

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

### III. ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ В ОБЛАСТИ O9—A0

Ю. А. Гвоздь,\* И. М. Копылов,\*\* В. В. Леушин,\*  
Г. П. Топильская\*

На основе сравнения наблюдаемых и теоретических величин критериев спектральной классификации звезд спектральных классов O8—A0 и классов светимости III—V построена шкала эффективных температур в этой области. Как вторичные результаты этой методики получены зависимости турбулентной скорости и содержания гелия, углерода, азота, кислорода, кремния, магния, железа в зависимости от спектрального класса. Обсуждаются аномалии элементов CNO цикла. Приводится сравнение полученных результатов с результатами других авторов. Данной методикой получены эффективные температуры для звезд 10 Lac,  $\tau$  Sco,  $\gamma$  Peg,  $\iota$  Her,  $\zeta$  Cnc.

The temperature scale for spectral range O9—A0 is constructed on the basis of comparison observational and theoretical criteria for stars III—V. Scales of turbulence and abundances of helium, carbon, nitrogen, oxygen, silicon, magnesium, iron are obtained depending on the spectral type, as the second result of this method. The anomaly of CNO abundance is discussed. The results obtained are compared with the results of other authors. The effective temperatures for stars 10 Lac,  $\tau$  Sco,  $\gamma$  Peg,  $\iota$  Her,  $\zeta$  Cnc are obtained with the help of this method.

#### 1. Введение

В предыдущих наших работах [1, 2] был предложен и обоснован метод построения температурной шкалы спектральных классов  $T_e$ —(Sp) на основе сравнения ряда наблюдаемых и теоретических критериев. Критерии представляют собой отношения комбинаций эквивалентных ширин линий, подобранных таким образом, чтобы их зависимость от эффективной температуры была максимальной, а от других факторов — химического состава,  $\lg g$ , влияния межзвездного поглощения, эффектов отклонения от ЛТР — минимальной. Величины критериев, определенные на основе наблюдаемых в звездах спектральных классов A0—O9 (классов светимости III—V) и теоретически рассчитанных в этом же интервале эквивалентных ширин линий, приведены в работе [2]. Там же проведен анализ характера зависимостей критериев от  $T_e$ , Sp и других, «мешающих», факторов.

В этой работе предложенным в [1, 2] методом построены соотношения Sp— $T_e$  и найдены ошибки определения эффективной температуры. Поскольку не удастся полностью исключить зависимость критериев от турбулентной скорости и химического состава, то одновременно с построением температурной шкалы спектральных классов мы определили среднюю зависимость  $v_t$ —Sp и среднее содержание ряда химических элементов для нашей выборки звезд (около 300 звезд классов светимости III—V). Оказалось, что в области спектральных классов B0—B3 среднее содержание азота и кислорода примерно на 0.5 dex больше солнечного, а содержание углерода — меньше солнечного. Содержание остальных элементов He, Mg, Si, Fe в целом нормальное.

Ошибки определения эффективной температуры нашим методом составляют 500—700 K в области A0—B6 и увеличиваются до 2000 K вблизи O9. В пределах

\* Ростовский-на-Дону государственный университет.

\*\* ГАО АН СССР, Пулковое, Ленинград.

этих ошибок наша температурная шкала совпадает со шкалами других авторов, построенными различными методами.

Для нескольких звезд —  $\tau$  Sco,  $\gamma$  Peg, 10 Lac,  $\kappa$  Sps,  $\iota$  Her — по их наблюдаемым  $W_\lambda$  с помощью нашей методики мы определили  $T_e$ . Приводится сравнение этих  $T_e$  с результатами детального анализа, выполненного методом моделей атмосфер.

Результаты показывают, что подобранные нами температурные критерии можно использовать для определения в первом приближении эффективной температуры отдельных, конкретных звезд. Предложенный метод является надежным инструментом для определения  $T_e$  и оценки химического состава статистически больших групп звезд.

## 2. Сравнение наблюдаемых и теоретических эквивалентных ширин

Использование критериев спектральной классификации [1] как температурного параметра, полученного из эквивалентных ширин, приводит к необходимости более детально и внимательно провести сравнение экспериментальных и теоретических  $W_\lambda$  линий. Для этой цели был использован наблюдательный

ТАБЛИЦА 1  
Использованный наблюдательный материал

Авторы	Ссылка	Спектральный интервал	Дисперсия, Å/мм
U. Sinnerstad	[3]		18—112
K. Kodaira, M. Takada	[4]	3780—4370	5.3
И. М. Копылов	[13]	3700—4900	75.
И. М. Копылов	[14]	3670—4924	75.
В. Г. Ключкова и др.	[15]		9.
P. S. Conti, W. R. Alshuler	[16]	4000—5000	16.
P. S. Conti	[17]	4000—5000	16.
D. Didelon	[18]	3600—7000	2—75
A. А. Боярчук	[19]	3820—6570	23.4
L. Kane et al.	[20]		

материал разных авторов, данные о котором приведены в табл. 1. В общей сложности использовалось около 300 звезд O9—A0. По этим данным построены средние зависимости эквивалентных ширин  $W_\lambda$  от спектрального класса для линий,

список которых приведен в работе [2]. К этому списку добавлены линии SiIV ( $\lambda$  4116 и 4088). Теоретические  $W_\lambda$  линий с принятыми атомными параметрами также приведены в работе [2]. Расчеты были выполнены в приближении ЛТР с использованием бланкетированных моделей атмосфер.

Средние зависимости  $W_\lambda$  от спектрального класса (Sp) сравнивались с расчетными для соответствующих линий. При этом  $\lg g$  выбирался для каждого из интервалов спектральных классов, исходя из зависимости

ТАБЛИЦА 2  
Принятые значения  $\lg g$  для различных классов светимости и спектральных интервалов

Спектральный интервал	Класс светимости		
	III	IV	V
O9—B2	3.75	3.85	3.96
B1.5—B3.5	3.74	3.87	4.05
B3.5—A0	3.77	3.95	4.10

$\lg g$  (Sp), приведенной в работе [5]. Принятые значения  $\lg g$  даны в табл. 2.

На рис. 1 приведены примеры сравнения экспериментальной зависимости  $W_\lambda$  от Sp с теоретическими расчетами при солнечном химическом содержании и двух значениях турбулентной скорости (2.5 и 10 км/с). Для перевода  $T_e$  в Sp использовалась шкала эффективных температур из табл. 2 работы [1].

Как видно, для линий, показанных на рис. 1, теоретические зависимости довольно хорошо описывают поведение наблюдаемых  $W_\lambda$  от  $S_p$ . Для большинства линий аналогичная ситуация повторяется, различия между теоретическими и средними наблюдаемыми  $W_\lambda$  не достигают 50 % и лежат в пределах разброса наблюдаемых величин  $W_\lambda$ , обусловленных в первую очередь индивидуальными различиями звезд и ошибками измерений  $W_\lambda$ . Однако для высоких температур ( $T_e > 28\ 000\ \text{K}$ ) имеются и большие расхождения, что можно объяснить влиянием отклонений от ЛТР, которые мы не учитывали при расчетах  $W_\lambda$  (это проявляется особенно сильно для линий He I, He II).

Кроме того, существует группа линий, для которых во всем исследуемом интервале спектральных классов или в одной из областей эквивалентная ширина

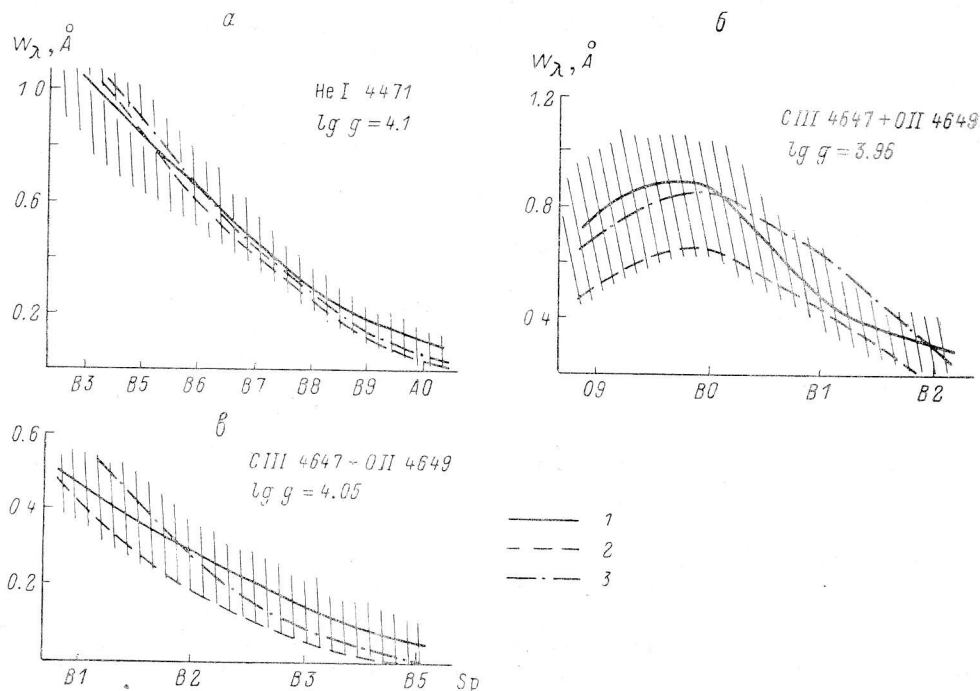


Рис. 1. Сравнение наблюдаемых и расчетных  $W_\lambda$  различных линий.

а — He I  $\lambda$  4471; б — Si III  $\lambda$  4647 + O II  $\lambda$  4649; 1 — средняя наблюдательная кривая; 2 — расчеты при солнечном химическом составе и  $v_t = 2.5\ \text{km/s}$ ; 3 — расчеты при солнечном химическом составе и  $v_t = 10\ \text{km/s}$ . Заштрихована область величин среднеквадратичных отклонений наблюдений от среднего.

очень сильно зависит от турбулентной скорости, так что  $W_\lambda$  по нашим расчетам, проведенным для  $v_t = 2.5$  и  $10\ \text{km/s}$ , значительно отличаются от наблюдаемых значений, которые должны соответствовать некоторым промежуточным значениям турбулентных скоростей. Наиболее сильно это выражено для линий Si II  $\lambda$  3948—20, Si II  $\lambda$  4428, Si II  $\lambda$  3856, Fe II  $\lambda$  4583 (B6—A0), Si II  $\lambda$  4267 (B1—B2); да и для большинства других линий, за исключением линий He I, He II, N III и O III, турбулентная скорость является важнейшим параметром, влияющим на  $W_\lambda$ . Поэтому ключевым моментом для дальнейшего анализа является определение адекватных наблюдениям значений  $v_t$ .

Необходимо отметить далее, что для некоторых линий различия между наблюдаемыми и теоретическими  $W_\lambda$  значительно превышают ошибку наблюдений независимо от принятого значения  $v_t$ . Это следующие линии: O III  $\lambda$  3961 (O9—B1.5), O II  $\lambda$  (4676+4626) (O9—B2), O II  $\lambda$  (4415—17) (B2—B3.5), O II  $\lambda$  (4317—20) (B2—B3.5). Во всех случаях здесь наблюдаемые значения  $W_\lambda$  больше теоретических. Для линий O III  $\lambda$  3961 и O II  $\lambda$  4676 и O II  $\lambda$  4626 причина этих систематических различий может быть связана с неучтенными эффектами отклонений от ЛТР, хотя окончательно утверждать это нельзя, так как не-ЛТР расчеты  $W_\lambda$  этих линий нам неизвестны. Для линий O II  $\lambda$  4415—17 и O II  $\lambda$  4317—20 причина может крыться скорее всего в ошибочном завышении наблю-

даемых  $W_\lambda$  этих линий при измерении их в спектрах звезд, где эти линии слабые и присутствуют на пределе обнаружения.

Для выяснения относительного влияния вышеперечисленных причин мы попытались подобрать наиболее оптимальное значение  $v_t$  в зависимости от Sp, чтобы уменьшить рассогласование наблюдаемых и расчетных  $W_\lambda$  при солнечном содержании элементов. Из анализа исключались линии HeI и HeII, так как их  $W_\lambda$  практически не зависят от величины  $v_t$ . Таким образом, получены зависимости  $v_t$  от Sp для классов светимости V—III, которые приведены на рис. 2. Здесь же нанесены определения  $v_t$  отдельных звезд, взятые из работ [8, 9]. Из рисунка видно, что «оптимальные»  $v_t$ , определенные нами, в целом хорошо согласуются с индивидуальными определениями  $v_t$  для звезд спектральных классов от B5 до A0, тогда как в области спектральных классов B0—B3 для большинства звезд в работах [8, 9] получены значительно меньшие турбулентные скорости, чем показывает наша средняя зависимость  $v_t$ —Sp.

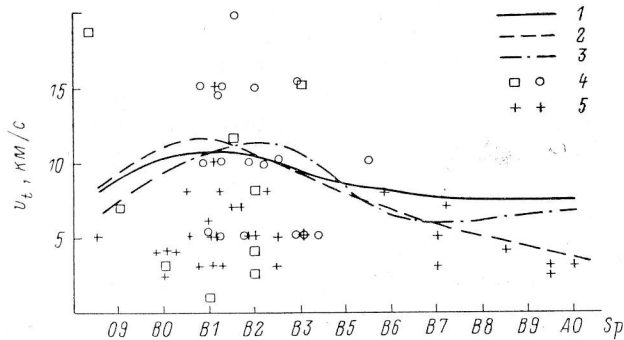


Рис. 2. Зависимость турбулентной скорости  $v_t$  от спектрального класса.

Класс светимости: 1 — V, 2 — IV, 3 — III; 4 — данные [8], 5 — [9].

Однако использование полученной средней  $v_t$  для каждого спектрального интервала и класса светимости не позволяет полностью согласовать наблюдаемые и расчетные зависимости  $W_\lambda$  от Sp для всех линий использованных элементов. Корректировка температурной шкалы, т. е. изменение масштаба шкалы  $T_e$  в шкале Sp относительно принятой изначально температурной шкалы [6], также не позволяет достичь нужного результата. Изменение  $\lg g$  в тех пределах, в которых мы работаем (классы светимости III—V), слабо влияет на величины  $W_\lambda$  большинства линий, и на данном этапе работы принятые значения  $\lg g$  достаточно хорошо отражают реальность.

Таким образом, остается единственный свободный параметр, который мы пока не использовали, — это химический состав. В данном случае химический состав является тем параметром, от которого очень сильно зависят величины  $W_\lambda$  линий. Поэтому, варьируя химический состав, можно достаточно точно согласовать наблюдения и теорию (исключая область очень высоких температур,  $T_e > 28\,000$  К).

На рис. 3 приведено распределение содержания элементов CNO-группы, полученное данной методикой, в зависимости от спектрального класса и класса светимости. Из рис. 3 видно, что для холодной области, вплоть до  $T_e = 17\,000$  К, содержание углерода в пределах ошибок можно считать нормальным [ $\lg N(C) = 8.5$ ], тогда как для области температур от 17 000 до 28 000 К ярко выражен дефицит углерода в среднем на 0.7—0.8 dex. В этой же области температур содержание азота и кислорода ведет себя аналогично, т. е. в районе  $T_e = 24\,000 \div 26\,000$  К оно снижается до нормального [ $\lg N(N) = 7.9$ ,  $\lg N(O) = 8.9$ ], а на краях интервала стремится к избытку на величину порядка 0.8—0.9 dex. Интересно, что избыток содержания азота и кислорода относительно содержания углерода в этом интервале остается величиной постоянной и равной примерно 0.9 dex. Так как при определении содержания элементов использовалось большое количество звезд (100 для углерода, порядка 60 и 50 для азота и кислорода соответственно), этот результат является статистически значимым.

Для сравнения на рис. 3, б и в крестиками приведены соответственно данные об обилии N и C из работ [9, 11—16]. Видно, что наши результаты в целом согласуются с результатами определения содержания азота другими авторами, что же касается углерода, то в области спектрального класса В2 мы получили больший дефицит его содержания, чем по большинству других индивидуальных определений. По-видимому, этот результат и характерные формы кривых зависимостей содержания C, N и O от Sp являются следствием использования «оптимальной» зависимости  $v_t$  от Sp. Если в области спектральных классов В0—В3 взять значение  $v_t = 5$  км/с, то это приведет к уменьшению дефицита углерода и увеличению избытка азота и кислорода в этой области, сгладит причудливый ход кривых на графиках, и в целом наш результат будет лучше согласоваться с определениями других авторов.

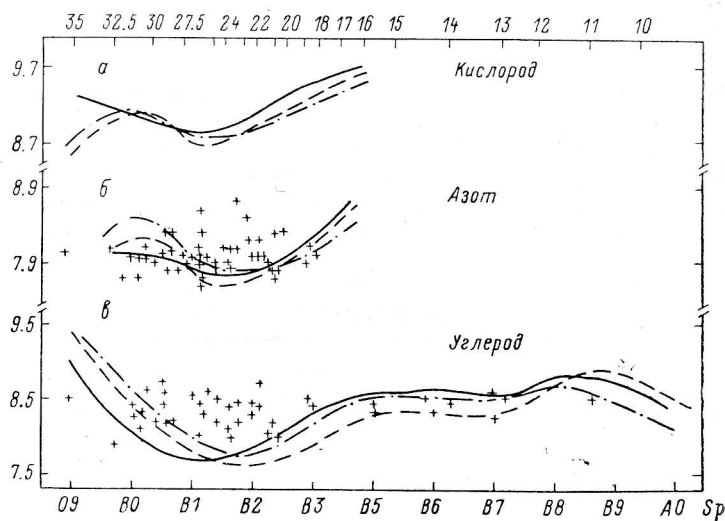


Рис. 3. Зависимость содержания элементов CNO-группы в зависимости от спектрального класса для звезд разных классов светимости.

1—3 — см. на рис. 2; крестики — данные [9, 11—16].

С целью выяснения вопроса, не может ли данный результат быть следствием большого процента тесных двойных звезд, по каталогу спектрально-двойных звезд [10] из полного списка звезд нами были выбраны двойные звезды с  $P < 15-20^d$ . Оказалось, что доля двойных составляет всего от 10 % для звезд В5—А0 до 20 % для звезд О9—В5, а поскольку, согласно [9, 11], эволюционное изменение содержания CNO-элементов в атмосферах двойных звезд в среднем составляет 0.2 dex для углерода и 0.7 dex для азота, то ясно, что наличие тесных двойных звезд в нашем списке не может привести к полученному распределению содержания элементов CNO-группы.

Мы проверили возможное влияние быстрого вращения звезд на определяемое нашей методикой содержание элементов. Среди звезд спектральных классов В1.5—В3.5 в нашей выборке оказалось 45 % звезд с  $v \sin i > 100$  км/с. Однако содержание CNO-элементов, определенное только для быстровращающихся звезд, оказалось почти таким же, как для всей выборки. Таким образом, если быстрое вращение звезд и приводит к поверхностным аномалиям химического состава, то в нашей выборке эти аномалии не выявляются.

Об остальных элементах, кроме C, N, O, можно сказать, что их содержание в пределах ошибок практически не отличается от солнечного. Это относится к таким элементам, как Mg и He. Однако для He в области  $T_e > 25\,000$  К становятся существенными эффекты, связанные с отклонением от ЛТР. Аналогичная ситуация проявляется и для линий Si III (сумма трех линий); и для согласования расчетов, проведенных в приближении ЛТР, и наблюдений приходится завышать содержание как гелия, так и кремния.

В холодной области (10 000—17 000 К) при определении содержания кремния используются две линии SiII  $\lambda$  4128 и SiII  $\lambda$  3856. По линии SiII  $\lambda$  4128 мы получаем нормальное содержание, а линия SiII  $\lambda$  3856 (она слабее первой примерно в два раза) приводит к дефициту содержания примерно на  $-0.3$  dex. Аналогично ведет себя и слабая линия FeII  $\lambda$  4584 — она показывает дефицит на  $0.5$  dex. С другой стороны, эти оба отклонения можно исключить, если уменьшить турбулентную скорость до  $2.5$  км/с (в среднем по всем линиям было получено  $6-7$  км/с). Поскольку этот результат является средним статистическим, полученным по большому количеству звезд, то он может быть проявлением возможно существующего радиального градиента скоростей турбулентных движений в звездных атмосферах. В этом случае слабые линии, формирующиеся на сравнительно больших оптических (и геометрических) глубинах в атмосферах, могут показывать меньшие турбулентные скорости, чем линии средней и сильной интенсивности.

### 3. Построение температурной шкалы спектральных классов

Для построения температурной шкалы мы вновь вернемся к критериям спектральной классификации. Искомая температурная шкала в каждой спектральной области должна являться результатом некоторого усреднения зависимостей  $S_p - T_e$ , полученных для отдельных критериев. При этом должно выполняться

ТАБЛИЦА 3  
Веса критериев

Номер критерия	Критерий	Вес	Вес [1]
48	SiII $\lambda$ 4128/HeI $\lambda$ (4713+4121)	2	2
53	MgII $\lambda$ 4481/HeI $\lambda$ (4713+4121)	3	1
56	SiII $\lambda$ 4128/CII $\lambda$ (4267+3920)	1	2
57	MgII $\lambda$ 4481/CII $\lambda$ (4267+3920)	2	1
60	MgII $\lambda$ 4481/HeI $\lambda$ 4471	4	1
D1	1/2 HeI $\lambda$ (4388+4471)/2/SiII $\lambda$ 4128	2	2
D2	1/2 HeI $\lambda$ (4388+4471)/MgII $\lambda$ 4481	4	1
D3	1/2 HeI $\lambda$ (4388+4471)/FeII $\lambda$ 4584	1	1
D4	2 $\times$ CII $\lambda$ 4267/FeII $\lambda$ 4584	1	1
D6	CII $\lambda$ 4267/SiII $\lambda$ 4128	1	1
33	CII $\lambda$ (4267+3920)/CIII+OII $\lambda$ (4647+4649)	1	2
33a	CII $\lambda$ 4267/CIII+OII $\lambda$ (4647+4649)	1	1
35	NII $\lambda$ (3995+4631)/CIII+OII $\lambda$ (4647+4649)	2	3
38	MgII $\lambda$ 4481/CIII+OII $\lambda$ (4647+4649)	2	1
41a	CII $\lambda$ (4267+3920)/OII $\lambda$ (4415+4317)	1	2
41b	CII $\lambda$ 4267/OII $\lambda$ (4415+4317)	1	1
41в	CII $\lambda$ (4267+3920)/OII $\lambda$ 4641	1	2
51b	MgII $\lambda$ 4481/OII $\lambda$ 4649	2	1
1	SiIV $\lambda$ (4089+4116)/SiIII $\lambda$ (4552+4567+4574)	1	4
2	SiIV $\lambda$ (4089+4116)/NII $\lambda$ (3995+4631)	1	2
3	NIII $\lambda$ 4097/SiIII $\lambda$ (4552+4567+4574)	2	4
4	2 $\times$ OIII $\lambda$ 3962/OII $\lambda$ (4662+4676)	1	1
5	1/2 HeII $\lambda$ (4199+4541)/SiIII $\lambda$ (4552+4567+4574)	2	3
6	SiIV $\lambda$ (4089+4116)/OII $\lambda$ 4641	1	2
7	HeII $\lambda$ (4199+4541)/2/HeI $\lambda$ 4388	2	2
8	HeII $\lambda$ (4199+4541)/2/HeI $\lambda$ 4471	2	2
32	CIII $\lambda$ 4647/SiIII $\lambda$ (4552+4567+4574)	3	1
21	OIII $\lambda$ 3962/SiIII $\lambda$ (4552+4567+4574)	1	2

условие непрерывности, т. е. отсутствие скачков температуры на границах спектральных областей. Поэтому центральным вопросом построения температурной шкалы является выбор весов усреднения.

В работе [1] всем критериям были приданы соответствующие веса, которые выбирались, исходя из анализа наблюдений  $W_\lambda$  (разброс наблюдательных величин, однородность и т. д.), и поэтому они являются чисто эмпирическими. Теперь

мы заново определим веса, исходя из сравнения теоретических расчетов с наблюдениями.

Задача состоит в том, чтобы подобрать такую систему весов, при которой эффективная температура, полученная по критериям спектральной классификации, не зависела бы от неопределенности в химическом составе.

С этой целью нами двумя способами была построена температурная шкала на основе сравнения теоретических и наблюдательных критериев. Во-первых, мы рассчитали критерии с солнечным химическим составом, во-вторых, использовался химический состав, полученный в п. 2. Затем для каждого критерия мы сравнили зависимости  $S_p - T_e$ , полученные двумя способами, и на основе этого подобрали веса критериев.

С этими весами для каждой спектральной области была построена средняя температурная шкала, для лучшей их сшивки на границе областей система весов была еще раз модифицирована. Таким образом, наша система весов является внутренней, основанной на принципе минимизации ошибок нашего метода построения температурной шкалы. Окончательные веса в сравнении с первоначальными приведены в табл. 3.

С использованием приведенных выше весов в каждой области спектрального интервала построена температурная шкала. Анализ показал, что в холодной и горячей областях полученная температурная шкала достаточно хорошо описывает исходную температурную шкалу, причем изменение химического состава, полученного в п. 2, практически не вносит изменения в определение  $T_e$ . Более того, в случае горячей области при определении  $T_e$  мы получаем большую ошибку при химическом составе, определенном в п. 2, чем при солнечном химическом составе. Это связано именно с учетом не-ЛТР эффектов при температурах больше 28 000—30 000 К. Таким образом, на данном этапе правомерно говорить именно о среднем солнечном химическом составе для звезд из горячей и холодной областей.

На средней области нужно остановиться особо.

В критерии спектральной классификации в этой области входят в основном  $W_\lambda$  линий CNO-цикла. И в этой же области при согласовании  $W_\lambda$  для этих элементов требуется ввести довольно большие аномалии химического состава. Это приводит к тому, что теоретические критерии при солнечном химическом составе очень сильно отличаются от наблюдаемых и вносят большие ошибки в определение  $T_e$ . Для таких критериев, как 33, 33А, 41А, 41Б, 41В, ошибки достигают 7500 К, причем при использовании солнечного химического состава это приводит к завышению  $T_e$  относительно шкалы [1]. Остальные критерии, 35, 38, 51Б, вносят меньшую ошибку в определение  $T_e$  (от -3000 до +3500 К).

В этой области температур нельзя сколько-нибудь корректно подобрать систему весов для критериев таким образом, чтобы убрать зависимость шкалы эффективных температур от химического состава. Поэтому здесь мы придали относительно больший вес критериям, которые слабее чувствуют аномалии химического состава.

Далее, при сравнении теоретических и наблюдательных критериев построены температурные шкалы как при солнечном содержании, так и при химическом содержании, полученном в п. 2 для этой области температур, — рис. 4. (Здесь приведены звезды V класса светимости). Из рисунка видно, что данные шкалы различаются не только по абсолютной величине (0—4000 К), но и по величинам своих среднеквадратичных ошибок. Причем значительно большие (в 2—5 раз) ошибки имеет шкала  $T_e$ , полученная для критериев с солнечным химическим составом. Этот факт говорит в первую очередь о том, что полученное содержание элементов CNO (п. 2) для данной области является правомерным, так как снижает расхождения (рассогласование) наблюдаемых и теоретических критериев, что в свою очередь ведет к снижению среднеквадратичной ошибки определения  $T_e$  (эти ошибки лежат в пределах 300—1400 К). Отметим другой факт, не менее важный: полученный химический состав приводит к хорошему сшиванию температурных шкал на границе двух спектральных интервалов без какого-либо специального подбора весов. Разница  $T_e$  на границе раздела двух областей ( $T_e \approx 17\ 000$  К,  $S_p \approx B\ 3.5$ ) не превышает 200—300 К, тогда как ошибки определения  $T_e$  порядка 600—800 К. В то же время при солнечном химиче-

ском составе на границе двух областей образуется разрыв в температуре до 4000 К.

В итоге можно сделать вывод, что принятые критерии спектральной классификации с выбранными для них весами могут быть использованы для корректного построения температурной шкалы с точностью не хуже 6—8 %, что в свою очередь дает возможность в дальнейшем для конкретных звезд определять достаточно точно и быстро главный физический параметр — эффективную температуру.

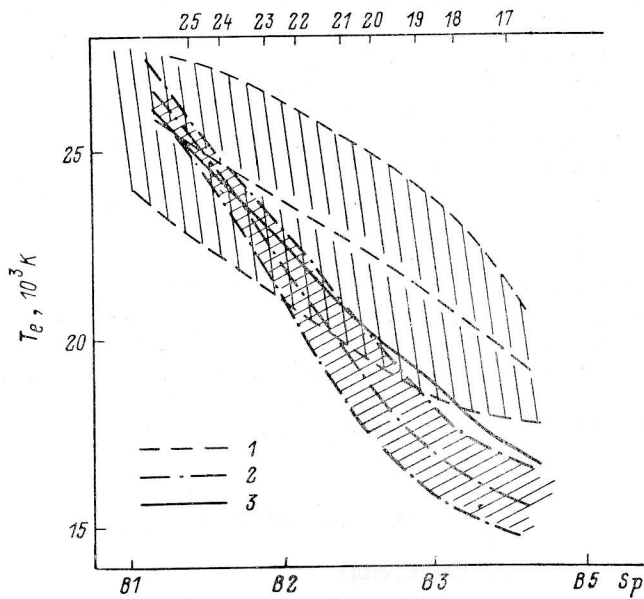


Рис. 4. Температурные шкалы спектрального интервала В1—В3.5 для звезд V класса светимости.

1 — при солнечном химическом содержании; 2 — при химическом составе из п. 2; 3 — температурная шкала из работы [1].

#### 4. Сравнение полученной температурной шкалы со шкалами других авторов

Как говорилось выше, подобрав зависимость турбулентной скорости и химического состава от спектрального класса и выбрав определенным способом веса критериев, мы смогли не только наилучшим образом согласовать наблюдательные критерии и расчеты (т. е. уменьшить различия в  $T_e$  по разным критериям), но и довольно точно сшить три области по  $T_e$ . При переходе от одной области к другой скачок по  $T_e$  не превышает 300—600 К, что меньше абсолютных ошибок

ТАБЛИЦА 4  
Температурная шкала

Спектральный класс Sp	Эффективная температура $T_e$ , К	Ошибка $\sigma$ , К	Спектральный класс Sp	Эффективная температура $T_e$ , К	Ошибка $\sigma$ , К
O9	35700	2200	B5.5	14800	700
O9.5	33900	1800	B6	14300	500
B0	32000	1500	B6.5	13800	500
B0.5	30100	1300	B7	13200	600
B1	27800	2000	B7.5	12600	600
B1.5	24900	3000	B8	12000	500
B2	22200	1000	B8.5	11400	400
B2.5	19100	1500	B9	11000	500
B3	17300	1300	B9.5	10600	500
B3.5	16200	1100	A0	10100	600
B5	15500	900			



определения  $T_e$ . Интересно отметить, что мы добились такого согласия между тремя областями только за счет изменений химического состава.

На рис. 5 приведена температурная шкала для спектрального интервала O9—A0. Эта шкала построена для звезд V класса светимости, но в пределах ошибок шкалы  $T_e$  для звезд классов светимости V, IV, III совпадают.

На рис. 5 мы также привели температурные шкалы из работ [5, 1, 23] и определения  $T_e$  для отдельных звезд из работ [21, 22]. Несмотря на то, что все

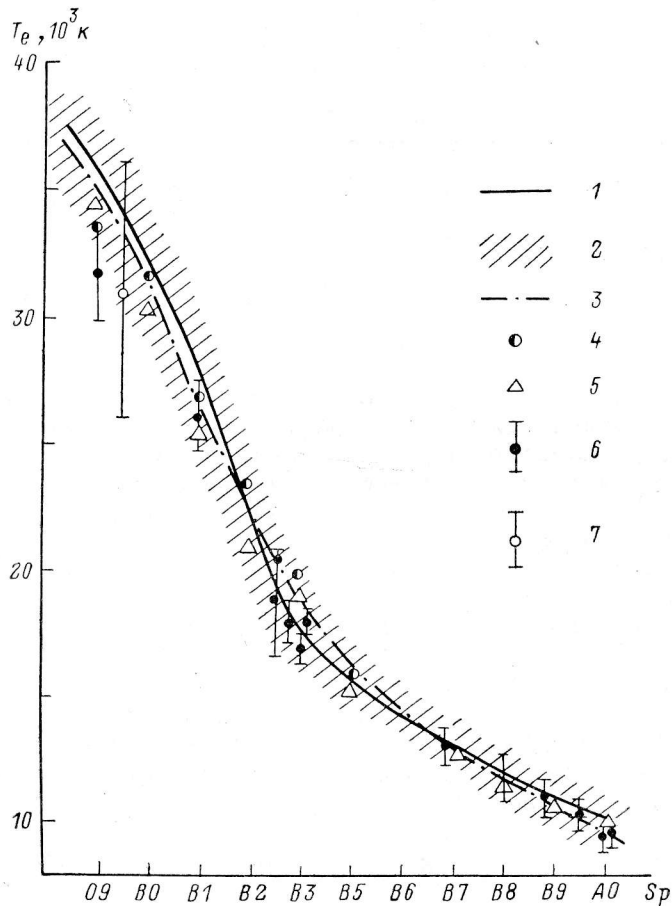


Рис. 5. Сравнение температурных шкал разных авторов.

1 — настоящая работа; 2 — среднеквадратичная ошибка  $T_e$ ; 3 — [1]; 4 — [5]; 5 — [23]; 6 — [21]; 7 — [22].

эти определения  $T_e$  выполнены различными методами, мы видим, что они согласуются друг с другом в пределах ошибок, которые характеризуют нашу методику. Таким образом, можно сказать, что точность определения эффективной температуры звезд на сегодня составляет 500—700 K для звезд спектральных классов A0—B5.5, 1000—1500 K для B5—B2 и 1500—3000 K для B1.5—O9. Наша окончательная температурная шкала и ее ошибки приведены в табл. 4.

### 5. Использование критериев спектральной классификации для анализа отдельных звезд

Мы применили наш метод для определения эффективной температуры нескольких звезд, для которых имеются результаты детального анализа, причем мы выбрали как звезды с нормальным химическим составом  $\tau$  Sco,  $\gamma$  Peg,  $\iota$  Her, так и одну резко пекулярную HgMg-звезду, ( $\times$  Spc), для которой к тому же найден дефицит гелия в 8 раз. Список звезд, их параметры и ссылки на оригинальные работы приведены в табл. 5. Для  $\gamma$  Peg мы использовали

результаты наблюдений с разной дисперсией, 75 Å/мм в работе [13] и 3 Å/мм в работе [24].

По приведенным в этих работах  $W_\lambda$  линий мы посчитали наблюдаемые значения критериев и по нашим зависимостям теоретических критериев от  $T_e$  определили  $T_e$  для каждого критерия, при этом использовался химический состав, полученный для нашей выборки звезд в п. 2. Среднюю эффективную температуру для каждой звезды мы посчитали с теми весами, которые были даны

ТАБЛИЦА 5  
Результаты определения  $T_e$  отдельных звезд

Название	Sp	$T_e$ , К	Ссылка	$T_e$ , К	Ошибка $\sigma$ , К	$v_t$ , км/с
10 Lac	O9V	35500		34300	3070	9
$\tau$ Sco	B0V	30600	[25]	31300	1320	10
$\gamma$ Peg	B2IV		[13]	18620	2690	10
$\gamma$ Peg	B2IV	24000	[24]	18250	2200	10
$\iota$ Her	B3V	18500	[25]	15970	570	9
$\kappa$ Snc		12800	[26]	11680	200	6

критериям в п. 3 и приведены в табл. 3. Заметим, что найденные значения  $T_e$  соответствуют не только полученному ранее в п. 2 среднему химическому составу, но и средним значениям турбулентной скорости для нашей выборки звезд. Эти значения также приведены в табл. 5, в последнем столбце.

При сравнении найденных нами значений  $T_e$  с полученными с помощью метода моделей атмосфер, который, несомненно, является более точным, мы видим, что различие не очень велико. Причем даже для резко пекулярной звезды  $\kappa$  Snc мы получили близкое к точному значение  $T_e$ , хотя в этой области спектральных классов мы использовали солнечный химический состав. Заметим также, что наша методика позволяет использовать и низкодисперсионный наблюдательный материал, что мы видим на примере  $\gamma$  Peg, для которой наблюдения с  $D=3$  и 75 Å/мм дали близкие значения  $T_e$ .

Таким образом, подобранные нами критерии спектральной классификации могут быть использованы и для определения в первом приближении эффективных температур отдельных звезд.

## 6. Заключение

На основе анализа обширного наблюдательного материала и сравнения с однородной сеткой теоретических расчетов мы построили зависимость между эффективной температурой и спектральным классом для звезд A0—O9 классов светимости III—V. В качестве критериев для этого использовались специальным образом подобранные отношения комбинаций эквивалентных ширин линий. Одновременно были определены средняя зависимость  $v_t$ —Sp и средний химический состав таким образом, чтобы ошибка в  $T_e$  по разным критериям была минимальной.

Характерной особенностью нашей выборки звезд, которая, вообще говоря, была случайной, оказались аномалии содержания CNO-элементов в области спектральных классов B3—B0: избытки азота и кислорода и дефицит углерода, достигающие одного порядка. Заметим сразу, что этот факт не связан ни с двойственностью звезд, ни с наличием быстровращающихся звезд, ибо количество тех и других звезд в нашей выборке мало для получения такого большого эффекта. Явных аномалий в содержаниях других элементов не обнаружено. В частности, на всем интервале от A0 до O9 содержание гелия в среднем нормальное, хотя среди наших звезд были и He-g и He-w звезды. По-видимому, главным аргументом за принятие аномального содержания CNO-элементов в области B3—B0, и особенно аномалии для C, является то, что солнечный химический состав дает разрыв в  $T_e \approx 3000$  К вблизи B3 при использовании критериев

разных групп. Это тем более странно, что линии СИ входят и в критерии «холодной» группы и дают в среднем нормальное содержание углерода для звезд холоднее 18 000 К. Таким образом, мы оказались перед дилеммой: либо допустить скачок в температуре в  $\sim 3000$  К вблизи ВЗ, либо принять аномальный химический состав в ВЗ—В0. Подобрать для проверки другие критерии в области ВЗ—В0 пока не представляется возможным, так как большинство линий в этой области достигает максимума и зависимость  $W_\lambda$  от  $T_e$  исчезает.

Можно предложить такую интерпретацию полученного результата. Начиная от спектрального класса ВЗ линии углерода, азота и кислорода, увеличиваясь, достигают максимального значения (между В1—В2). Для линий NII, OII эти значения 0.10—0.15 Å и для СИ примерно 0.3 Å. Это приводит к уменьшению  $\tau_{ef}$  образования этих линий. Если предположить, что в звездах рассматриваемого типа в верхних слоях атмосферы существует эффект, приводящий к «завыванию» сильных линий тем больше, чем больше интенсивность линии (например, хромосферное излучение), то мы получим фиктивное уменьшение  $W_\lambda$  и, следовательно, содержания соответствующих элементов. В то же самое время снижение значения турбулентной скорости может компенсировать уменьшение  $W_\lambda$  и устранить полученные различия в содержании CNO-элементов. Справедливость этого предположения подтверждается тем, что и влияние хромосферы, и влияние турбулентной скорости сильнее на более интенсивных линиях. Для самых сильных линий (HeI) эффекты хромосферы и  $v_t$  незаметны вследствие того, что эти линии имеют широкие крылья, формирующиеся в глубоких слоях атмосферы и дающие подавляющий вклад в суммарную  $W_\lambda$ .

В среднем наша температурная шкала хорошо согласуется со шкалами других авторов, но именно на область ВЗ—В0 приходится наибольшее различие. Их можно устранить, взяв в этой области солнечный химический состав и убрав скачок в  $T_e$  вблизи ВЗ простым усреднением всех критериев, но тогда ошибки здесь становятся большими [для ВЗ  $T_e = (19\,000 \pm 3000)$  К,  $\sigma = 16\%$ ].

Дальнейшим интересным применением разработанного здесь метода может быть использование его для анализа больших статистически однородных групп звезд, например только для He-r-, или He-w-звезд, или только для тесных двойных звезд.

Предложенные здесь критерии спектральной классификации и их теоретические зависимости от  $T_e$  можно использовать также для быстрого приблизительного определения  $T_e$  отдельных звезд, чтобы полученные значения  $T_e$  в свою очередь использовать в качестве начальных для применения метода моделей атмосфер. Причем это применимо для звезд с любым, неизвестным заранее химическим составом. Независимо от химического состава первоначальное значение  $T_e$  будет не очень сильно отличаться от истинного именно потому, что критерии подбирались таким образом, чтобы исключить зависимость определения  $T_e$  от химического состава.

### 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. Исследование критериев спектральной классификации и температурной шкалы спектральных классов. 2: Анализ спектральных критериев / И. М. Копылов, В. В. Леушин, Г. П. Топильская и др. // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1989. 28. С. 72—87.
3. Sinnerstad U. Spectrophotometric measurements of absorption-line intensities in early-type stars // *Stockholms Obs. Annaler*. 1961. В. 21, nr. 06.
4. Kodaira K., Takada M. Differential curve-of-growth analyses of HgMn stars. II: Analyses of 53 Aur, HR 6997, and 112 Her, and final summary // *Annals of the Tokyo Astron. Obs. (Univ. of Tokyo)*. 1976. 17. P. 79—92.
5. Straizys V., Kuriliene G. Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks // *Astrophys. Sp. Sci.* 1982. 80. P. 353—368.
6. Копылов И. М. Диаграмма ( $U-B$ ), ( $B-V$ ) для звезд V класса светимости с солнечным химическим составом // *Астрон. журн.* 1985. 62. С. 1132—1138.
7. Dufton P. L., Hibbert A. Non-LTE calculation of N II line strengths in B-type stars // *Astron. and Astrophys.* 1981. 95. P. 24—31.
8. Копылов И. М. Турбулентные движения в звездных атмосферах // *Вопросы космогонии*. М.: Наука, 1984. X. С. 74—105.

9. Леушин В. В. Содержание азота в атмосферах одиночных и двойных звезд // Астрон. журн. 1988. 65, вып. 4. С. 827—836.
10. Batten A. H., Fletcher J. M., Mann P. J. Seventh catalogue of the orbital elements of spectroscopic binary systems // Publ. Dominion Astron. Obs. 1978. Vol. 15. P. 121.
11. Леушин В. В. Содержание углерода в атмосферах одиночных и двойных звезд // Астрон. журн. 1988. 65, вып. 3. С. 571—582.
12. Любимков Л. С. О наблюдательном дефиците углерода в атмосферах В-звезд (в печати).
13. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация 238 звезд O5—B7 и построение диаграммы «спектр—абсолютная величина» // Изв. КраО. 1958. 20. С. 156—207.
14. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация звезд спектральных классов В8—F2 // Изв. КраО. 1960. 23. С. 148—173.
15. Вр- и Ар-звезды в движущемся скоплении Скорпиона—Центавра / В. Г. Ключкова, И. М. Копылов и др. // Письма в Астрон. журн. 1981. 7, № 6. С. 366—371.
16. Conti P. S., Alshuler W. R. Spectroscopic studies of O-type stars. I: Classification and absolute magnitudes // Astrophys. J. 1971. 170, nr 2. P. 325—344.
17. Conti P. S. Spectroscopic studies of O-type stars. II: Comparison with Non-LTE models // Astrophys. J. 1973. 179, nr 1. P. 161—179.
18. Didelon D. Largeurs equivalentes de raies spectrales dans les etoiles B // Astron. and Astrophys. 1982. 50, nr 2. P. 199—207.
19. Боярчук А. А. Сравнение химического состава В и Ве звезд // Изв. КраО. 1957. 17. С. 89—116.
20. Kane L., McKee C. D., Dufton P. L. Carbon, nitrogen and oxygen abundances in loose association and field B-type stars // Astron. and Astrophys. 1980. 84, nr 1/2. P. 115—122.
21. Malagnini M. L. et al. The empirical *BC* versus *T* scale for non-supergiant O9—G5 stars // Astron. and Astrophys. 1986. 162, nr 1/2. P. 140—150.
22. Leggett S. K. et al. The effective temperatures, diameters and luminosities of 22 bright stars by application of the infrared flux method // Astron. and Astrophys. 1986. 159, nr 1/2. P. 217—222.
23. Jager C. de et al. // Astron. and Astrophys. 1987. 177. P. 217—227.
24. 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—159.
25. Любимков Л. С. Эволюционное увеличение содержания азота в атмосферах ранних В-звезд // Астрофизика. 1984. 20, вып. 3. С. 475—493.
26. Zöschling J., Muthsam H. An analysis of the manganese star HD 78316 ( $\alpha$  Cnc) // Astron. and Astrophys. 1987. 176. P. 75—82.

Поступила в редакцию  
6 июля 1989 г.