

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ СПЕКТРАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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

Рассматриваются наиболее распространенные методы определения эффективных температур звезд и источники ошибок определения T_e , анализируются причины этих ошибок. Приводятся некоторые существующие шкалы эффективных температур для звезд спектральных классов O8—A0 классов светимости III—V. Предлагается простой метод определения T_e , свободный от многих ошибок и основанный на использовании критериев количественной спектральной классификации, в качестве которых берутся отношения комбинаций эквивалентных ширин избранных линий поглощения. Приведены критерии для определения T_e в интервалах спектральных классов O8—B1, B1—B3, B3—A0.

The most dispersed methods of stellar effective temperature determinations are considered. The sources and causes of errors in T_e determination are analysed. Some existing scales of effective temperatures for stars of O8—A0 spectral types and III—V luminosity classes are presented. A simple procedure for T_e determination is suggested. It is free of a lot of errors and is based on the use of quantitative spectral classification criteria for which the equivalent width ratios for the selected absorption lines are taken. The criteria for T_e determination within the intervals of O8—B1, B1—B3, B3—A0 spectral types are given.

1. Методы определения

Эффективная температура (T_e), определяющая энергетический выход звезды, является фундаментальной характеристикой, обуславливающей как строение атмосферы и всей звезды в целом, так и ее эволюцию. В связи с этим знание эффективной температуры является одной из основ всех наших заключений о физических свойствах, строении, химическом составе и эволюционном статусе звезды. Адекватность наших выводов и о строении самых верхних слоев атмосферы и о процессах, происходящих в центре звезды, в значительной мере, а иногда и полностью, зависит от точности определения T_e , поэтому неудивительно, что вопрос об эффективной температуре отдельных звезд и целых групп (классов) подробно изучается в астрофизике начиная со времени введения этого понятия.

Методы измерения эффективной температуры можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Прямое измерение проводится по результатам абсолютной фотометрии звезд, при этом T_e определяется с использованием соотношения

$$T_e = \left[\left(\frac{R}{r} \right)^{-2} \cdot \frac{1}{2} \int_0^{\infty} F_{\nu} d\nu \right]^{1/4} = \left(\frac{H}{2\theta^2} F \right)^{1/4},$$

где $\theta = 2R/r$ — угловой диаметр звезды, рад; F_{ν} и F — наблюдаемый у Земли монохроматический и интегральный поток излучения, эрг/(см²·с) [1]. Трудности измерения как потоков излучения, так и угловых диаметров звезд являются причиной немногочисленности подобных измерений; основными за-

* Ростовский-на-Дону государственный университет.

** Симферопольский государственный университет.

трудностями, кроме чисто экспериментальных, являются зависимость углового диаметра звезды от длины волны излучения, недоступность для наблюдений с Земли некоторых диапазонов полного спектра, в которых часто излучается подавляющая доля энергии звезды, и межзвездное поглощение. Тем не менее все косвенные методы определения T_e основаны на результатах именно таких абсолютных измерений и на сравнении наблюдаемых характеристик спектра с калибровочными зависимостями, построенными либо по модельным теоретическим расчетам, либо по наблюдениям. Для построения последних могут быть использованы распределения энергии в некоторых участках спектра, фотометрические индексы и цвета для разных фотометрических систем, скачки у пределов серий поглощения, распределения атомов по состояниям возбуждения и ионизационные равновесия, определенные по отношениям содержаний элементов в соответствующих состояниях ионизации и возбуждения. Все эти методы должны давать в принципе одно и то же значение эффективной температуры при условии однозначности и точности калибровок, однако реально получаемые величины T_e часто далеки от согласия.

Рассмотрим основные причины возникновения ошибок при определении эффективной температуры некоторыми наиболее распространенными методами. Даже наиболее рафинированные методики типа изложенной в [2], включающие итерационную процедуру определения θ и T_e с использованием распределения энергии в широких спектральных областях, кроме приближений, обусловленных возможной неадекватностью используемых моделей, отягощают полученное значение T_e ошибками, связанными с неопределенностью самого понятия радиуса звезды (значение радиуса звезды определяется размером излучающей области фотосферы, а она для разных длин волн различна).

Существенные расхождения возникают при использовании распределений энергии в спектрах, рассчитанных для нормального солнечного химического состава атмосфер, для определения T_e и анализа физических условий и состава атмосфер химически пекулярных звезд. При этом, как показано в работе [3], значительное изменение содержания хотя бы одного достаточно обильного элемента (например, Si для Bp-, Ap-звезд) может оказывать разное воздействие на распределение энергии в спектре и интенсивность спектральных линий в зависимости от эффективной температуры звезды. Эти изменения приводят, скажем для Bp-, Ap-звезд, к различиям в 1000—15 000 К при определении температуры по наклону пашеновского континуума, по показателям цвета (например, по $U-B$ и $B-V$) или по величине скачков у пределов серий водородных линий (например, по бальмеровскому скачку). Проблема учета бланкетирования в линиях также непосредственно связана с точностью определения T_e , так как включение в расчеты распределения энергии в спектре модели поглощения в линиях, особенно в ультрафиолетовой области спектра, существенно меняет теоретическое распределение энергии по длинам волн, поэтому учет линий может приводить к ошибкам в искомым T_e . В работе [4] показано, например, что при использовании моделей атмосфер без учета бланкетирования в линиях для анализа Am-звезд ошибки в определении T_e достигают 1000 К.

Межзвездная экстинкция, как селективная, так и нейтральная, ослабляя поток энергии от звезды, также может привести к неверным определениям T_e . Селективная экстинкция искажает истинное распределение энергии в спектре (межзвездное покраснение) и, таким образом, вносит ошибку в эффективную температуру, определяемую по распределению энергии. Современные методы учета влияния селективной межзвездной экстинкции достаточно хорошо работают в среднем и в некоторых наиболее исследованных направлениях в Галактике, однако не могут полностью учесть имеющиеся отклонения от закона межзвездного поглощения (покраснения), особенно для далеких, сильно покрасневших звезд. Учет селективной экстинкции значительно затруднен при изучении звезд с аномальным распределением энергии. Исключение влияния нейтральной экстинкции еще более сложно, поскольку ее обнаружение и определение затруднено из-за отсутствия ее связи с колор-экссессом, и, хотя такая экстинкция, вероятно, не очень велика в Галактике в среднем, не исключена возможность существования достаточно большой нейтральной экстинкции для отдельных звезд, особенно входящих в молодые плот-

ные газОВО-звездно-пылевые комплексы. Нейтральная экстинкция, уменьшая интегральный поток от звезды, может привести к неуверенности в калибровке абсолютного потока, как интегрального, так и монохроматического, и тем самым исказить результаты, получаемые, например, итеративным методом [2]. Межзвездное вещество в виде околозвездных пылевых оболочек также искажает распределение энергии в спектре звезды. Примером тому может служить обнаруженный еще в 1973 г. [5] избыток потока в инфракрасной области спектра у α Лут, который удалось объяснить лишь после обнаружения ИСЗ IRAS пылевой оболочки вокруг этой звезды [6]. Подобная пылевая оболочка малой плотности не дает существенной экстинкции, но может быть ответственна за избыток излучения в далекой инфракрасной области спектра [7]. Поскольку наличие околозвездных пылевых оболочек не зависит от расстояния, на котором находится звезда, их влияние на поток энергии от звезды, в отличие от межзвездного поглощения, важно и для близких звезд.

В конечном итоге определение эффективной температуры звезды должно проводиться итерационным методом, когда по первоначально определенному (заданному) значению T_e строится модель атмосферы и сравнивается с наблюдениями, и на основе такого сравнения проводится уточнение эффективной температуры, ускорения силы тяжести на поверхности звезды ($\lg g$), химического состава и структуры атмосферы. Итерации можно считать законченными при достижении совпадения рассчитанных и наблюдаемых непрерывных спектров, скачков у пределов серий, эквивалентных ширин и профилей представительного набора спектральных линий. Поскольку вся процедура является очень трудоемкой, начальное значение T_e должно быть выбрано достаточно близким к реальному, а таким оно будет, если в качестве температурного параметра привлечь исходную величину, слабо реагирующую на изменения в распределении энергии в результате воздействия описанных выше причин.

Нам представляется очевидным, что такой величиной может служить количественный спектральный класс звезды (Sp), определенный по специально подобранным отношениям эквивалентных ширин спектральных линий, в разной степени чувствительных к изменениям температуры. Поскольку спектральный класс звезды является параметром, не зависящим от межзвездного поглощения, то нахождение зависимости Sp— T_e позволяет непосредственно определять T_e , не зная расстояния от звезды и, следовательно, ее углового диаметра. До сих пор классификация звезд по спектральным классам и сравнение вычисленных по моделям атмосфер спектральных характеристик с наблюдаемыми деталями спектра у реальных звезд проводились, как правило, отдельно. Спектральная классификация выполнялась по интенсивностям (W_λ) линий или их отношениям, а сравнение моделей с наблюдениями проходило на основе сопоставления распределения энергии в непрерывном спектре, бальмеровского скачка и т. д. Поскольку для установления соотношения между шкалой эффективных температур и последовательностью спектральных классов применялись самые различные методики, часто с использованием промежуточных связей (анализ кривых роста и связь T_{ion} или T_{ex} с T_e , многоцветная фотометрия и сопоставление вычисленных по моделям и наблюдаемых показателей цвета, анализ и сравнение эволюционных треков и т. д.), то появляются существенные различия в находимых температурных шкалах, в «наблюдаемых» (M_p , S_p) и теоретических (M_{bol} , T_e) координатах. Было отмечено, например, что T_e , определенные непосредственно из наблюдений непрерывных спектров звезд, ниже, чем T_e , определенные по линиям поглощения [8, 9]. Однако показано [9], что использование моделей атмосфер с более полным учетом бланкетирования в линиях и доведение фактора бланкетирования до 2 для сверхгигантов позволяют согласовать эффективные температуры, найденные двумя способами.

В работе [10] разработана методика количественной спектральной классификации звезд O и B, где в качестве критериев Sp используются отношения комбинаций W_λ избранных линий. В нашей работе на основе расчетов, выполненных с помощью программ SAM 4 [11] и KONTUR [12], проведено сравнение модельных расчетов и данных наблюдений по критериям количественной спектральной классификации для спектрального интервала O8—A0 и классов

светимости III—V. Сравнение со шкалой эффективных температур [13] показало, что используемые модели, имеющие различного рода приближения (плоскопараллельное приближение, стационарность, ЛТР-приближение), в целом довольно корректно описывают поведение T_e и $\lg g$ со спектральным классом. Кроме того, в результате совместного анализа используемых спектральных критериев в работе [14] предложен способ выявления некоторых особенностей химического состава (аномалий элементов CNO-цикла), неравномерностей распределения элементов по поверхности звезды (используя различный характер переменности критериев с фазой орбитального и прецессионного периодов для сверхгиганта в системе Лебедь X-1), а также некоторых особенностей строения атмосфер горячих сверхгигантов.

2. Существующие шкалы эффективных температур

Многообразие методов определения эффективной температуры и наличие источников ошибок, описанных выше, приводит к тому, что разные авторы для одной и той же звезды дают значения температур, различия в которых существенно больше внутренней ошибки, сообщаемой исследователями. Таким образом, неоднозначность в подходе к определению T_e может служить источником ошибок и недоразумений при интерпретации наблюдательного материала. Приведенные в качестве примера в табл. 1 данные по опубликованным

ТАБЛИЦА 1
Параметры звезд α Lyr, γ Peg и τ Sco по разным источникам

T_e	$\lg g$	Метод	Источник
α Lyr, A0V			
9650	4.05	2	Шильд и др., Ap. J., 166, 95, 1971
9660		1	Ханбари Браун и др., MNRAS, 167, 121, 1974
9660±140		1	Код и др., Ap. J., 203, 417, 1976
9500	3.90	1	Ланге и др., Dudley Obs. Rep. N14, 263, 1979
9400±200	3.95±0.05	1	Куруц, Ap. J. Suppl., 40, 1, 1979
9468		1	Блеквелл и др., Astron. Ap., 82, 249, 1980
9650	4.05	2	Дрейлинг и др., Ap. J., 241, 734, 1980
9610		3	Болин и др., Astron. Ap., 85, 1, 1980
9546±149	3.96	1	Глушневa, А. Ж., 60, 560, 1983
9500±200	3.90±0.30	3	Лайн и др., Ap. J., 281, 723, 1984
9570±200	3.95±0.05	3	Терез, Кинем. физ. неб. тел., 1, № 5, 3, 1985
9581		1	Глушневa, А. Ж., 62, 1132, 1985
γ Peg, B2IV			
24000	3.8	2	Аллер и др., Ap. J. Suppl., 4, 109, 1959
21900	4.1	3	Лекрон, Astron. Ap., II, 387, 1971
20800±850	3.9±0.2	2	Норрис, Ap. J. Suppl., 23, 193, 1971
21700	4.0	2	Шильд и др., Ap. J., 166, 95, 1971
25670	4.0	2	Андерхилл, Vistas in Astr., 13, 169, 1972
21500	3.7	1	Петерс, Ap. J. Suppl., 30, 551, 1976
25500	3.9	2	Кемп, Ap. J. Suppl., 36, 143, 1978
21940	4.0	1	Андерхилл и др., MNRAS, 189, 601, 1979
21900		3	Филип и др., Astron. Ap. Suppl., 40, 199, 1980
23500	3.80	3	Любимков, Астрофизика, 20, 475, 1984
τ Sco, B0V			
28150±750	4.9±0.4	2	Фойгт, Z. f. Ap., 31, 48, 1952
32800	4.45	2	Травинг, Z. f. Ap., 36, 1, 1955
35000	4.3	2	Аллер и др., Ap. J. Suppl., 3, 1, 1957
32800±300	4.2±0.1	2	Шольц, Z. f. Ap., 24, 243, 1967
32000	4.1	2	Хардори и др., Ap. J. Suppl., 19, 193, 1970
28600±800	4.2±0.2	2	Норрис, Ap. J. Suppl., 23, 193, 1971
31020	4.0	2	Андерхилл, Vistas in Astr., 13, 169, 1972
31500	4.15	1	Ауэр и др., Ap. J. Suppl., 24, 193, 1972
33200	4.50	2	Кемп, Ap. J. Suppl., 36, 143, 1978
30050	4.2	1	Андерхилл и др., MNRAS, 189, 601, 1979
31500		3	Филип и др., Astron. Ap. Suppl., 40, 199, 1980
30600	3.80	3	Любимков, Астрофизика, 20, 475, 1984

значениям T_e и $\lg g$ для трех стандартных, подробно изученных звезд в исследуемой области спектральных классов A0—B0 характеризуют как многочисленность, так и точность определений T_e и $\lg g$.

Метод нахождения T_e определяется по сути дела набором параметров, характеризующих звезду и зависящих от T_e и $\lg g$, что позволяет записать систему уравнений типа

$$\begin{aligned} W_{\text{H}\beta}(T_e, \lg g) &= W_{\text{H}\beta}^*; \\ W_{\text{H}\gamma}(T_e, \lg g) &= W_{\text{H}\gamma}^*; \\ B - V(T_e, \lg g) &= (B - V)^*; \\ c_1(T_e, \lg g) &= c_1^*; \\ D_{3646}(T_e, \lg g) &= D_{3646}^*; \\ \text{FeI/FeII}(T_e, \lg g) &= \text{FeI/FeII}^*; \\ H_{4625}/H_{3625}(T_e, \lg g) &= H_{4625}/H_{3625}^* \text{ и т. д.}, \end{aligned}$$

где в левой части дается функциональная зависимость, вид которой определяет сетка моделей атмосфер по T_e и $\lg g$ с каким-либо предположением о химическом составе, а в правой части стоит эмпирически определенное значение критерия или параметра для исследуемой звезды. Количество методов определяется числом сочетаний из полного набора подобных уравнений, хотя все методы определения T_e из табл. 1 можно приблизительно разбить на три группы (третий столбец). В первой (1) для нахождения T_e используется распределение энергии в достаточно широкой области спектра, позволяющее найти полный поток энергии. Во второй группе (2) используется сравнение наблюдаемых эквивалентных ширин и профилей спектральных линий с теоретически рассчитанными. В третьей (3) используется главным образом многоцветная фотометрия. Поскольку принципиально невозможно адекватно отразить любую выборку звезд конечной сеткой моделей, то каждая пара уравнений может быть линейно независимой и каждый индивидуальный набор уравнений по существу является отдельным методом, который может дать свою пару значений T_e и $\lg g$, что мы и видим в представленной таблице. Вероятно, простое усреднение полученных значений температур (то же относится и к $\lg g$) не приведет к повышению реальной точности искомого значения T_e в силу разнородности используемых значений параметров, различной точности методов и систематических ошибок. Даже в рамках одного метода, т. е. использования одного набора уравнений, можно получить разные значения параметров T_e и $\lg g$ вследствие учета или неучета разных физических процессов при теоретических расчетах и систематических ошибок при определении наблюдаемых характеристик (параметров) спектров. Например, согласование потока в ИК-диапазоне с теоретическим может идти как по пути изменения непрозрачности в атмосфере (т. е. изменения теоретической модели атмосферы), так и по пути включения излучения от околозвездной пылевой оболочки (т. е. исправления наблюдаемого потока).

ТАБЛИЦА 2
Эффективные температуры звезд O—B

Sp	$(B-V)_0$	T_e , K	Sp	$(B-V)_0$	T_e , K
	m			m	
O3	-0.330	(50700)	B2.5	-0.220	20420
O4	-0.328	(48750)	B3	-0.200	18700
O5	-0.325	46240	B4	-0.185	17060
O6	-0.322	42850	B5	-0.172	15810
O7	-0.320	39900	B5.5	-0.160	15000
O8	-0.316	37580	B6	-0.150	14260
O9	-0.311	35400	B7	-0.130	13150
O9.5	-0.305	33420	B7.5	-0.115	12900
B0	-0.295	31700	B8	-0.106	11640
B0.5	-0.288	29720	B8.5	-0.085	11200
B1	-0.274	26850	B9	-0.064	10500
B1.5	-0.260	24210	B9.5	-0.040	10000
B2	-0.242	22590	A0	-0.015	9640

Таким образом, необходимо заключить, что многообразие существующих температурных шкал обусловлено как реальными различиями в структуре атмосфер звезд (разные величины $\lg g$, различия в химическом составе, турбулентности и т. д.), так и различиями в методике и точности определения спектрального класса, и если расхождения, обусловленные первой причиной, необходимо анализировать и учитывать, то во втором случае их можно и нужно устранять, используя максимально однородные данные спектральных наблюдений и однородную по методике сводку спектральной классификации.

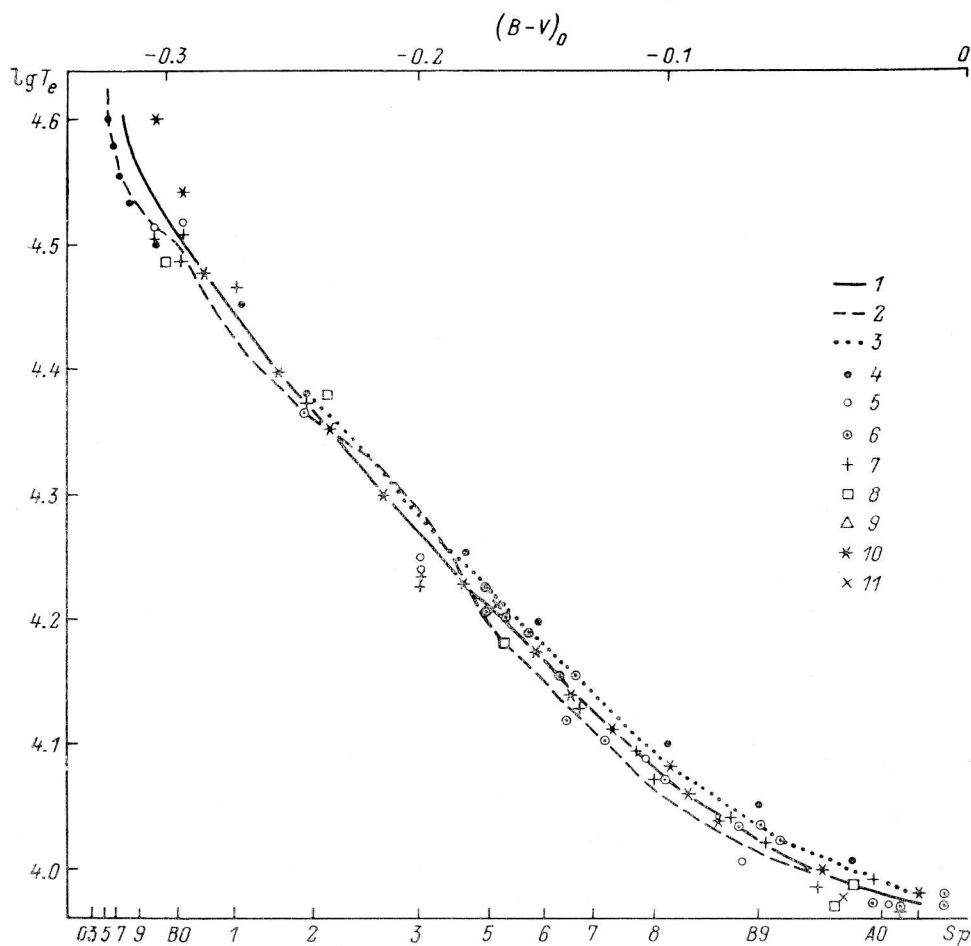


Рис. 1. Зависимости T_e —Sp по результатам работ разных авторов.

1 — [23]; 2 — [13]; 3 — [25]. Результаты определения T_e для отдельных звезд взяты из следующих работ: 4 — [19], 5 — [15], 6 — [17], 7 — [16], 8 — [20, 21], 9 — [13], 10 — [22], 11 — [18].

Существующие шкалы эффективных температур звезд O и B достаточно подробно обоснованы и описаны в соответствующих работах, тем не менее здесь разумно провести сопоставление некоторых из них. На рис. 1 приведены зависимости эффективной температуры от $B-V$ и спектрального класса для звезд главной последовательности (классы светимости V—III), построенные как по отдельным звездам, так и усредненные по группам звезд. Кривая 1 построена по данным табл. 2, полученной по результатам Кода и др. [15], Бекманса [16], Адельмана [17], Кошыллова [18, 19], Блеквелла и др. [20, 21] и Басера и Куруца [22], причем данные по T_e из работ [15—17] были исправлены с использованием истинных цветов $(B-V)_0$ по методике, описанной в [23]. Связь между $(B-V)_0$ и спектральным классом взята из работы [24]. Линиями 2 и 3 на рис. 1 даны шкалы эффективных температур Страйжиса и Курилене [13] и Глушневой [25] соответственно. В определениях T_e для отдельных звезд с одинаковыми значениями $B-V$ наблюдается разброс до 2000—3000 K, обу-

словленный неточностью наблюдений, калибровки и индивидуальными особенностями звезд. Расхождения в шкалах, естественно, меньше, но достигают 1000 К. Шкала Страйжиса и Курилене осциллирует около сплошной кривой, огибая индивидуальные определения то сверху, то снизу с амплитудой отклонений до 500—700 К; отличие шкалы Глушневой, практически совпадающей со шкалой Андерхилл [26], меньше 500 К, однако видно, что температуры в этой шкале завышены и по сравнению с другими шкалами, и по сравнению с индивидуальными определениями в среднем. Причины расхождений в температурах обсуждались ранее, здесь же для

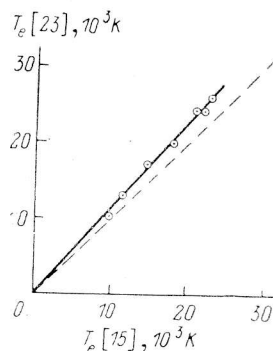


Рис. 2. Сравнение T_e , определенных для общих звезд в работах [15] и [23], при разном учете межзвездного покраснения.

примера приведен рис. 2, иллюстрирующий различия в температуре, возникающие при разном учете межзвездной экстинкции [15, 23, 24].

В исследуемом интервале T_e шкала $Sp-T_e$ является общей для звезд III—V классов светимости (для «полосы» главной последовательности), связано

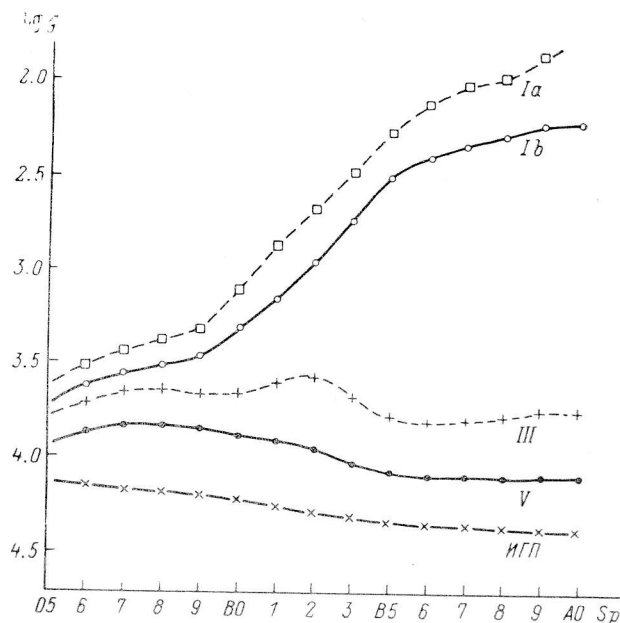


Рис. 3. Зависимость $\lg g$ от Sp для звезд разных классов светимости по результатам работ [13, 19].

это прежде всего с тем, что $\lg g$ для звезд в этой области меняется и различается незначительно. На рис. 3 представлена зависимость $\lg g$ от Sp для звезд разных классов светимости [13, 19]. Видно, что для звезд главной последовательности в области от $B0$ ($O5$) до $A0$ значение $\lg g$ изменяется в пределах от 4.3 до 3.7, и, таким образом, звездам классов светимости III—V в первом приближении можно приписать $\lg g=4.0$.

3. Критический анализ критериев спектральной классификации

В данной работе в качестве эмпирических (наблюдаемых) критериев спектральной классификации были использованы критерии, разработанные в [10], которыми являются отношения эквивалентных ширин спектральных линий.

В работе [10] отмечены основные преимущества применения отношений W_λ для количественной спектральной классификации:

1) отношения W_λ при соответствующем подборе линий меняются со спектральным классом значительно сильнее, чем интенсивность каждой из них в отдельности;

2) влияние систематических ошибок определения W_λ при получении отношений может быть исключено или сведено до минимума;

3) влияние эффектов светимости на определение спектральных классов сводится к минимуму.

Кроме того, отношения W_λ для линий в одной сравнительно узкой спектральной области позволяют исключить влияние изменений уровня непрерывного спектра, возникающих из-за эффекта бланкетирования, и изменений коэффициента непрозрачности в континууме, вызванных особенностями химического состава и другими причинами.

Зависимость отношения W_λ линий одного и того же элемента (в двух соседних стадиях ионизации) от содержания последнего, если она существует, должна быть существенно меньше, чем для отдельной линии; это позволяет уменьшить ошибки спектральной классификации при относительно небольших (в 2—4 раза) вариациях содержания данного элемента. С другой стороны, использование критериев, содержащих линии разных химических элементов, позволяет делать заключения о наличии каких-либо аномалий в химическом составе.

Структурные особенности атмосферы, отражаясь на виде распределения энергии в спектре звезды, влекут за собой изменения W_λ спектральных линий. Кроме того, на W_λ линий, особенно в горячих звездах, влияют и отклонения от ЛТР, и эффекты, связанные с этими отклонениями, например, эффект сверхионизации [27]. В то же время соответствующий подбор отношений W_λ спектральных линий может существенно снизить влияние этих эффектов на получаемые значения S_p и T_e .

Для наиболее уверенного получения S_p желательно, чтобы величины W_λ , входящие в критерий, были примерно одной интенсивности (т. е. величина критерия должна быть порядка 1), так как в противном случае величины случайных ошибок будут неодинаковыми для линий, входящих в отношение, что приведет к большой неуверенности в величине критерия. Особенно это справедливо, когда одна из линий, входящих в критерий, находится на грани обнаружения (величины W_λ на уровне шума фотоэмульсии).

Интенсивности большинства линий в той или иной мере зависят от ускорения силы тяжести на поверхности звезды. Наиболее ярко этот эффект (называемый эффектом светимости) проявляется в W_λ линий водорода, однако и для других элементов, если в критерий входят линии ионов разных стадий ионизации, этот эффект искажает зависимость критерия от S_p . В то же время для некоторых критериев зависимость их от g очень слабо выражена; например, для звезд В классов светимости III—V отношения $W_\lambda(\text{He II})/W_\lambda(\text{He I})$, $W_\lambda(\text{O III})/W_\lambda(\text{O II})$, $W_\lambda(\text{Si III})/W_\lambda(\text{Si II})$ и некоторые другие почти не зависят от g .

Проведенное выше рассмотрение показывает, что значение критерия может зависеть от многих причин, которыми часто пренебрегают на этапе определения S_p и T_e для исследуемой звезды. Совершенно ясно, что эти причины и их следствия далеко не равнозначны, но некоторые из них можно практически исключить при использовании отношений интенсивностей линий. Тем не менее полностью учесть влияние всех особенностей звезды на отношения W_λ ее спектральных линий принципиально невозможно, и в значение полученного спектрального класса, как и в значение T_e будет входить ошибка, обусловленная физическими особенностями данной звезды.

4. Выбор критериев для разных интервалов спектральных классов

Поскольку наличие и интенсивность тех либо иных линий является признаком, по которому определяется спектральный класс (температура) звезды, линии, включаемые в критерии спектральной классификации для горячих

звезд, определяются почти однозначно: это наиболее интенсивные линии нейтрального гелия и следующих ионов: HeII, OII, NII, NIII, CII, CIII, MgII и SiII—SiIV. Для звезд B5—A0 включаются еще линии ионизованных металлов FeII, TiII, CaII и др. Основываясь на спектральных исследованиях [10, 28], область спектральных классов O8—A0 можно разделить на три участка O8—B1, B1—B3 и B3—A0, в каждом из которых можно особенно эффективно использовать определенную группу критериев. Эти критерии для каждого из участков приведены в табл. 3 с соответствующими весами. Эти веса определяются интенсивностями линий, входящих в критерий, и степенью их изменения с температурой. Номера критериев в табл. 3 даются в основном по работам [10, 28, 29].

ТАБЛИЦА 3
Список критериев спектральной классификации

№	Критерий	Вес	№	Критерий	Вес
O8—B1					
1	$\frac{\text{SiIV (4089 + 4116)}}{\text{SiIII (4552 + 4576 + 4574)}}$	4	6	$\frac{\text{SiIV (4089 + 4116)}}{\text{OII 4641}}$	2
2	$\frac{\text{SiIV (4089 + 4116)}}{\text{NII (3995 + 4631)}}$	2	7	$\frac{\text{HeII (4199 + 4541)}}{2 \text{ HeI 4388}}$	2
3	$\frac{\text{NIII 4097}}{\text{SiIII (4552 + 4567 + 4574)}}$	4	8	$\frac{\text{HeII (4199 + 4541)}}{2 \text{ HeI 4471}}$	3
4	$\frac{2 \text{ OII 3962}}{\text{OII (4662 + 4676)}}$	1	32	$\frac{\text{CIII 4647}}{\text{SiIII (4552 + 4567 + 4574)}}$	1
5	$\frac{1/2 \text{ HeII (4199 + 4541)}}{\text{SiIII (4552 + 4567 + 4574)}}$	3	21	$\frac{\text{OIII 3962}}{\text{SiIII (4552 + 4567 + 4574)}}$	2
B1—B3					
33	$\frac{\text{CII (4267 + 3920)}}{\text{CIII + OII (4647 + 4649)}}$	2	41a	$\frac{\text{CII (4267 + 3920)}}{\text{OII (4415 + 4317)}}$	2
33a	$\frac{\text{CII 4267}}{\text{CIII + OII (4647 + 4649)}}$	1	41б	$\frac{\text{CII 4267}}{\text{OII (4415 + 4317)}}$	1
35	$\frac{\text{NII (3995 + 4631)}}{\text{CIII + OII (4647 + 4649)}}$	3	41в	$\frac{\text{CII (4267 + 3920)}}{\text{OII 4641}}$	2
38	$\frac{\text{MgII 4481}}{\text{CIII + OII (4647 + 4649)}}$	1	51б	$\frac{\text{MgII 4481}}{\text{OII 4649}}$	1
B3—A0					
48	$\frac{\text{SiII (4128 + 4130)}}{\text{HeI (4713 + 4121)}}$	2	Д1	$\frac{1/2 \text{ HeI (4388 + 4471)}}{2 \text{ SiII (4128 + 4130)}}$	2
53	$\frac{\text{MgII 4481}}{\text{HeI (4713 + 4121)}}$	1	Д2	$\frac{1/2 \text{ HeI (4388 + 4471)}}{\text{MgII 4481}}$	1
56	$\frac{\text{SiII (4128 + 4130)}}{\text{CII (4267 + 3920)}}$	2	Д3	$\frac{1/2 \text{ HeI (4388 + 4471)}}{\text{FeII 4584}}$	1
57	$\frac{\text{MgII 4481}}{\text{CII (4267 + 3920)}}$	1	Д4	$\frac{2 \text{ CII 4267}}{\text{FeII 4584}}$	1
60	$\frac{\text{MgII 4481}}{\text{HeI 4471}}$	1	Д6	$\frac{\text{CII 4267}}{\text{SiII (4128 + 4130)}}$	1

Спектральная область O8—B1. Поскольку в области этих спектральных классов ускорение силы тяжести на поверхности не различается так резко для звезд разных классов светимости, как в области более поздних Sp, отделить на эмпирических зависимостях критерий—спектральный класс карликов (V) от гигантов (III) практически довольно трудно, если не невозможно. Однако необходимо помнить, что разброс на этих зависимостях обусловлен не только ошибками измерений, но и неучтенными реальными различиями в характеристиках

ТАБЛИЦА 4

Эмпирические значения критериев спектральной классификации

Sp	1			2			3		
	III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V
O8.5	0.87	0.83	0.74	—	—	—	—	—	—
O9	0.85	0.77	0.69	—	—	—	—	—	1.11
O9.5	0.82	0.67	0.63	2.57	2.70	2.27	0.82	0.91	—
B0	0.69	0.56	0.57	2.22	2.38	2.13	0.51	0.61	0.54
B0.5	0.50	0.45	0.50	1.56	2.38	1.75	—	—	0.31
B1	0.40	0.36	0.43	1.03	1.43	1.37	0.39	0.30	0.23
B1.5	0.36	0.32	0.39	0.79	1.16	1.15	—	—	0.21
B2	0.32	0.31	0.36	0.62	0.97	0.97	0.37	0.24	0.19
B2.5	—	0.29	0.34	0.55	0.88	0.88	—	—	—

Sp	4		5			6		7	8
	III	V	III	IV	V	III	V	V	V
O8	—	—	—	—	0.93	2.56	1.16	1.43	0.54
O8.5	—	—	—	—	—	2.33	1.11	—	—
O9	0.47	0.54	0.67	0.73	0.80	2.08	1.05	0.85	0.41
O9.5	0.32	0.35	0.38	0.44	0.52	1.75	0.97	0.50	0.25
B0	0.20	0.24	0.22	0.26	0.33	1.28	0.89	0.30	0.16
B0.5	0.16	0.21	—	—	0.17	0.77	0.77	0.14	0.08
B1	—	—	—	0.08	0.13	0.52	0.56	0.12	—
B1.5	—	—	—	0.06	0.10	—	0.52	—	—

Sp	21			32			Sp	21			32		
	III	IV	V	III	IV	V		III	IV	V	III	IV	V
O9	0.40	0.44	0.47	2.00	1.45	1.48	B1	0.14	0.16	0.20	0.75	0.63	0.68
O9.5	0.27	0.32	0.35	1.85	1.02	1.41	B1.5	0.12	0.15	0.18	—	—	0.54
B0	0.21	0.22	0.27	1.40	1.04	1.27	B2	—	—	—	0.58	0.48	0.48
B0.5	—	—	0.22	—	—	1.05	—	—	—	—	—	—	—

Sp	33		33a			35		
	III	V	III	IV	V	III	IV	V
O9.5	—	—	—	—	—	0.20	0.30	0.30
B0	0.34	0.42	0.14	0.14	0.18	0.26	0.31	0.36
B0.5	0.41	0.60	0.20	0.24	0.25	0.33	0.39	0.44
B1	0.62	0.88	0.39	0.35	0.43	0.53	0.50	0.60
B1.5	0.95	1.20	0.60	0.53	0.64	0.78	0.64	0.80
B2	1.35	1.50	0.83	0.77	0.92	1.07	0.80	0.95
B2.5	1.72	2.16	1.10	1.04	1.18	1.40	0.96	1.15
B3	2.22	2.84	1.35	1.33	1.54	1.68	1.22	1.35
B4	—	—	1.65	1.73	2.05	1.97	1.50	1.70

ТАБЛИЦА 4 (продолжение)

Sp	38			41a		41б		
	III	IV	V	III	V	III	IV	V
B0	0.14	0.22	0.22	0.49	0.47	0.20	0.20	0.20
B0.5	0.16	0.26	0.26	0.51	0.65	0.25	0.22	0.27
B1	0.24	0.40	0.48	0.54	0.78	0.34	0.30	0.38
B1.5	0.42	0.60	0.73	0.73	0.86	0.46	0.40	0.46
B2	0.88	0.98	1.35	1.01	0.86	0.62	0.49	0.53
B2.5	1.12	1.34	1.29	1.13	1.03	0.72	0.56	0.56
B3	1.65	2.00	1.84	1.28	1.07	0.78	0.58	0.58
B4	2.50	2.90	2.50			0.82	0.66	0.66
B5						0.84	0.75	0.75

Sp	41в			51б		Sp	41в			51б	
	III	IV	V	III	V		III	IV	V	III	V
B0	0.20	0.16	0.32		0.24	B2.5	0.64	0.70	0.64	0.66	0.70
B0.5	0.21	0.18	0.34	0.21	0.30	B3	0.88	0.92	0.83	0.80	0.84
B1	0.23	0.23	0.37	0.28	0.36	B4	1.07	1.14	0.98	0.92	1.00
B1.5	0.38	0.38	0.44	0.39	0.44	B5	1.23	1.25	1.18	1.03	1.12
B2	0.48	0.50	0.53	0.52	0.57						

Sp	48			53			Sp	48			53		
	III	IV	V	III	IV	V		III	IV	V	III	IV	V
B2	0.23	0.30	0.32	0.29	0.33	0.38	B5.5	0.60	0.80	0.75	1.05	0.88	0.83
B2.5	0.33	0.37	0.38	0.39	0.42	0.45	B6	0.75	0.90	0.85	1.25	0.92	1.00
B3	0.42	0.43	0.46	0.49	0.57	0.54	B6.5	0.90	1.00	1.02	1.45	0.94	1.17
B4	0.47	0.55	0.55	0.69	0.71	0.62	B7	1.07	1.07	1.23	1.65	0.95	1.40
B5	0.50	0.67	0.65	0.85	0.82	0.74							

Sp	56			57			60		
	III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V
B1.5	0.24			0.48	0.44		0.18	0.18	0.16
B2	0.35	0.50	0.56	0.55	0.52	0.65	0.20	0.20	0.20
B2.5	0.53	0.57	0.60	0.65	0.62	0.70	0.24	0.27	0.23
B3	0.63	0.61	0.68	0.81	0.71	0.79	0.30	0.33	0.27
B4	0.65	0.73	0.78	0.93	0.95	0.90	0.36	0.39	0.33
B5	0.64	0.85	0.92	1.00	1.05	1.01	0.40	0.44	0.41
B5.5	0.72	1.00	1.04	1.11	1.09	1.15	0.47	0.50	0.49
B6	0.95	1.15	1.15	1.27	1.14	1.32	0.56	0.63	0.60
B6.5	1.17	1.35	1.29	1.43	1.17	1.57	0.70	0.80	0.75
B7	1.47	1.62	1.62	1.47	1.20	1.72	0.86	1.00	0.95
B7.5						2.00			

Sp	Д1	Д2	Д3	Д4	Д6	Sp	Д1	Д2	Д3	Д4	Д6
	V	V	V	V	V		V	V	V	V	V
B2	5.50	4.00				B7	0.72	1.36	0.54	0.71	0.29
B2.5	3.50	3.00	1.75		1.56	B7.5	0.64	1.15	0.45	—	0.23
B3	2.75	3.54	1.43		1.11	B8	0.56	0.97	0.34	0.41	0.19
B4	1.73	2.86	1.16		0.70	B8.5	0.46	0.80	0.26	—	0.14
B5	1.16	2.26	0.96	1.69	0.50	B9	0.38	0.62	0.26	0.24	0.10
B5.5	1.04	2.01	0.87	—	0.44	B9.5	0.30	0.48			—
B6	0.90	1.80	0.78	1.14	0.39	A0	0.25	0.36		0.12	
B6.5	0.80	1.55	0.66	—	0.33						

ках атмосфер этих звезд, например в микротурбулентных скоростях, химическом составе и др. Предложенная группа критериев позволяет классифицировать звезды до O7; для более ранних звезд критерии № 2, 4, 6 становятся малоэффективными из-за уменьшения W_λ линий, входящих в знаменатель. В сторону более поздних спектральных классов можно дойти до B2, в более поздних звездах эта группа критериев неприменима из-за исчезновения линий HeII, CIII, NIII, OIII, SiIV. При определении спектральных классов звезд O8—B1, заподозренных в пекулярности химического состава, например звезд с CNO-аномалиями, He-r-, He-w-звезд, критерии № 1, 4, 7, 8 могут определенно использоваться для нахождения температуры, а критерии № 2, 3, 5, 6, 21, 32 — также и в качестве индикаторов некоторых особенно явных пекулярностей химического состава.

Спектральная область В1—В3. Критерии, выбранные для этой области, почти все могут быть использованы для определения Sp, начиная от B0 и до B5, но наиболее уверенные результаты по ним могут быть получены именно в области В1—В3. Часть из этих критериев, а именно № 33, 33а, 35, явно зависит от класса светимости, для остальных эта зависимость маскируется разбросом, и, хотя для звезд каждого класса светимости можно провести свою кривую, последние достаточно близки друг к другу и к тому же часто располагаются в беспорядке. В этой области при необходимости разделения эффектов температуры и химического состава можно и следует использовать критерии 33, 33а — для определения Sp, а критерии 35, 38, 41а—в, 51б — также и для обнаружения особенностей химического состава.

Спектральная область В3—А0. Список критериев для этой области несколько больше, чем для предыдущей, что обусловлено шириной температурного (спектрального) интервала, в ранней части которого, от В3 до В7, более эффективны критерии 48, 53, 56, 60, а в поздней, В7—А0, — критерии Д1—Д6. Критерии Д1—Д6 составлены нами по опубликованным в работе [29] зависимостям W_λ линий от Sp для звезд разных классов светимости, построенным на основе обширной сводки спектральных наблюдений (см. ссылки в работе [29]). К сожалению, в этой области не удастся сформировать критерии, полностью удовлетворяющие изложенным в начале данного параграфа требованиям, из линий одного и того же элемента, в связи с чем здесь разделение эффектов температуры и химического состава более сложно. Эмпирические зависимости критериев—спектральный класс для области В3—А0 четко разделяются для звезд I—II и III—V классов светимости, а различия внутри каждой из этих двух групп полностью маскируются разбросом.

В табл. 4 приведены полученные нами эмпирические значения критериев количественной спектральной классификации для классов светимости III—V, которые будут использованы в дальнейшем для построения шкалы эффективная температура—спектральный класс и которые можно применять для определения спектральных классов отдельных звезд.

5. Заключение

Таким образом, проведенное выше рассмотрение существующих методов определения эффективных температур, количественных спектральных классов и построения температурных шкал показывает, что принципиально наиболее простым и в то же время достаточно точным способом определения эффективной температуры звезд ранних спектральных классов является нахождение ее по количественному спектральному классу, полученному с помощью критериев спектральной классификации, предложенных более 25 лет назад [10, 28]. Однако такое определение должно быть основано на температурной шкале, адекватной данным спектральным критериям. В связи с этим представляется полезным построить такую шкалу на основе теоретического расчета величин критериев в зависимости от T_e , используя современные модели атмосфер и точные расчеты эквивалентных ширин спектральных линий. Подобный расчет при варьировании параметров T_e , $\lg g$, ν_t , содержания химических элементов и сравнении с наблюдаемыми величинами позволит не только достаточно точно определить эффективную температуру и указать реальную точность такого

определения, обусловленную ошибками измерений W_λ , расчетов и особенностями физических условий в атмосфере звезды, но и выявить некоторые аномалии, если они существуют, химического состава атмосфер «нормальных» звезд.

Литература

1. Грэй Д. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. М.: Мир, 1980.
2. Blackwell D. E., Shallis M. J. Stellar angular diameters from infrared photometry. Application to Arcturus and other stars; with effective temperatures // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1977. 180. P. 177—191.
3. Леушин В. В., Соколов В. В., Топильская Г. П. Влияние содержания легко ионизируемого элемента на атмосферы звезд // *Астрофизика*. 1982. 18. С. 423—439.
4. Lane M. C., Lester J. B. Effective temperatures and surface gravities of metallic-line A stars // *Astrophys. J.* 1984. 281. P. 723—738.
5. Morrison D., Simon T. Broad-band 20-micron photometry of 76 stars // *Astrophys. J.* 1973. 186. P. 193—206.
6. Robinson L. J. The frigid world of IRAS // *Sky and Telesc.* 1984. 67. P. 4—8.
7. Терез Э. И. Сравнение теоретических моделей атмосферы Веги с результатами наблюдений // *Кинематика и физика небес. тел.* 1985. 67. С. 4—8.
8. Böhm-Vitense E. The effective temperature scale // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1981. 19. P. 295—317.
9. Remie H., Lamers H. J. G. L. M. Effective temperatures and radii of luminous O and B stars: A test for the accuracy of the model atmospheres // *Astron. Astrophys.* 1982. 105. P. 85—97.
10. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация 238 звезд O5—B7 и построение диаграммы спектр—абсолютная величина // *Изв. КраО*. 1958. 20. С. 156—207.
11. Леушин В. В., Топильская Г. П. О точности определения химического состава звезд методом моделей атмосфер // *Астрофизика*. 1986. 25. С. 103—118.
12. Wright S., Arguros J. ATLAS 5 at the University of London (SAM 1) 1. Programming and implementation // *Comm. Univ. London Obs.* 1975. 76. P. 1—61.
13. Straizis V., Kurilienė G. Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks // *Astrophys. Sp. Sci.* 1981. 80. P. 353—368.
14. Копылов И. М., Соколов В. В. О прецессии оптической звезды в системе Cyg X-1 // *Письма в АЖ*. 1984. 10. С. 756—764.
15. Empirical effective temperatures and bolometric corrections for early type stars / Code A. D., Davis J., Bless R. C., Hanbury Brown R. // *Astrophys. J.* 1976. 203. P. 417—437.
16. Beekmanns F. Comparison of the S2/68 and OAO-2 stellar ultraviolet flux measurements // *Astron. Astrophys.* 1977. 60. P. 1—7.
17. Adelman S. J. Spectrophotometry of B, A and F stars // *Astrophys. J.* 1978. 222. P. 547—555.
18. Копылов И. М. О шкале эффективных температур звезд // *Изв. КраО*. 1963. 30. С. 69—89.
19. Копылов И. М. Физические характеристики горячих звезд // *Изв. КраО*. 1967. 36. С. 134—154.
20. Blackwell D. E., Shallis M. J., Selby M. J. The infrared flux method for determining stellar diameters and effective temperatures // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1979. 188. P. 847—862.
21. Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J. Use of the infrared flux method for determining stellar effective temperatures and angular diameters; the stellar temperature scale // *Astron. Astrophys.* 1980. 82. P. 249—252.
22. Buser R., Kurucz R. L. A systematic investigation of multicolor photometric systems. III: Theoretical *UBV* colors and temperature scale for early-type stars // *Astron. Astrophys.* 1978. 70. P. 555—568.
23. Спектроскопическое исследование оптической компоненты Лебеда X-1 / О. Э. Ааб, И. М. Копылов, Л. В. Бычкова и др. // *Письма в АЖ*. 1981. 7. С. 417—421.
24. Копылов И. М. Диаграмма $(U-B)_0$, $(B-V)_0$ для звезд класса светимости V с солнечным химическим составом // *Астрон. журн.* 1985. 62. С. 348—355.
25. Глушнев И. Н. Спектрофотометрия стандартных звезд. Физические параметры атмосфер и шкала эффективных температур // *Астрон. журн.* 1985. 62. С. 1132—1138.
26. Effective temperatures, angular diameters, distances and linear radii for 160 O and B stars / Underhill A. B., Divan L., Prevot-Burnichon M. L., Doazan V. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1979. 189. P. 601—606.
27. Боярчук А. А., Любимков Л. С., Сахибуллин Н. А. Эффекты отклонений от ЛТР в атмосферах F-сверхгигантов. 1: Повышение ионизации атомов FeI // *Астрофизика*. 1985. 22. С. 339—356.
28. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация звезд спектральных классов B8—F2 // *Изв. КраО*. 1960. 23. С. 148—173.
29. Didelon P. Largeurs equivalentes de raies spectrales dans les étoiles B // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1982. 50. P. 199—207.

Поступила в редакцию
3 ноября 1987 г.