

УДК: 524. 3-355

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР В, А И F ЗВЕЗД КЛАССОВ СВЕТИМОСТИ III — V ПО НАКЛОНУ СПЕКТРА В БАЛЬМЕРОВСКОМ КОНТИНУУМЕ

Н.А. СОКОЛОВ

Поступила 26 марта 1994

Принята к печати 15 апреля 1994

Предложен новый метод определения эффективных температур, основанный на линейной зависимости между наклоном спектра в бальмеровском континууме и эффективными температурами для В, А и F звезд классов светимости III — V. Сравнение эффективных температур, полученных этим методом, с эффективными температурами, полученными другими авторами, не показало систематических различий в температурах звезд.

1. *Введение.* Большинство наших знаний о звездных атмосферах мы получаем из основных физических характеристик для индивидуальных звезд, таких как эффективная температура (T_{eff}) и ускорение силы тяжести (g). Точные знания T_{eff} необходимы для определения положения звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, для определения содержания металлов в звездных атмосферах, при изучении звездных масс и т.д. В литературе имеется большое количество работ по их определению. Бем—Витензе [1] классифицировала различные методы определения T_{eff} , выделив из них три основных:

1) Прямой метод, основанный на определении полного потока и углового диаметра звезды из наблюдений. В работе Коуда и др. [2] он впервые был применен для определения T_{eff} на основе прямых измерений угловых диаметров.

2) Полупрямой метод, в котором полные потоки находятся из наблюдений, а угловые диаметры звезд определяются на основе сравнения наблюдаемого потока с моделями атмосфер в ИК-области спектра. Метод был предложен Блеквел-

лом и Шеллисом [3] и использовался многими авторами для определения угловых диаметров и эффективных температур.

3) Непрямые методы, в которых эффективные температуры определяются: а) из сравнения наблюдаемого распределения энергии с распределением энергии моделей атмосфер в видимой и/или УФ-области спектра для звезд спектральных классов O, B, A и F; б) из рассмотрения ионизационного равновесия для O-звезд; в) из изучения бальмеровских линий G-звезд; г) по синтетическим цветам для B, A, F и G звезд; д) по наблюдаемым цветам в различных фотометрических системах.

Континуум в видимой области спектра, очевидно, зависит от T_{eff} звезды. Впервые на это было обращено внимание в работе [4], в которой определялись зависимости между наблюдаемыми характеристиками непрерывного спектра в инструментальной системе и спектральным классом звезд, что легло в основу французской спектральной классификации. Шалонж [5] предложил использовать для классификации звезд три параметра непрерывного спектра: φ_b (спектрофотометрический градиент в видимой области спектра, примыкающий к бальмеровскому скачку), D (бальмеровский скачок) и λ (длина волны, соответствующая падению интенсивности непрерывного спектра у границы серии Бальмера на величину $D/2$). Зависимость между параметром L , который является комбинацией этих трех параметров, и T_{eff} была получена Шалонжем и Диван [6]. В работах [7], [8] определялись спектрографические градиенты и градационные температуры звезд в пашеновском и бальмеровском континуумах, а в работе [9] была получена зависимость между спектрофотометрическими градиентами и спектральным классом звезд. Отметим, что в этих работах под градационной температурой понимается температура планковского излучения, наилучшим образом представляющего наблюдаемое распределение энергии в спектральном интервале, где находится спектрофотометрический градиент. Из изложенного выше следует, что спектрофотометрический градиент (в дальнейшем — наклон) с коротковолновой стороны от бальмеровского скачка использовался лишь для определения цветовых температур звезд и никогда не использовался для определения эффективных температур звезд. С другой стороны, теория показывает, что с коротковолновой стороны от бальмеровского скачка континуум у B, A и F звезд мало отличается от распределения абсолютно черного тела, то есть определяется только температурой звезды. Поэтому кажется целесообразным использовать указанный участок спектра для определения эффективных температур звезд.

Цель настоящей работы — представление нового метода определения T_{eff} , который основан на калибровочной зависимости между наклоном континуума с

коротковолновой стороны от бальмеровского скачка и эффективной температурой для В, А и F звезд классов светимости III, IV и V.

2. *Определение наклона непрерывного спектра звезд.* В качестве наблюдательных данных мы использовали два каталога абсолютных распределений энергии в спектрах звезд; [10] — для звезд Южного полушария и [11] — для звезд Северного полушария. Мы исключили из рассмотрения звезды I и II классов светимости, звезды, имеющие какие-либо особенности в спектре, а также переменные и двойные звезды. Для каждой звезды полученного списка мы вычислили значение избытка цвета $E(B-V)$ на основе таблиц нормальных цветов $(B-V)_0$, приведенных в книге Страйжиса [12]. Затем из рассмотрения были исключены звезды, которые имеют значительное покраснение ($E(B-V) > 0.05$). В дальнейшем мы не учитывали влияния межзвездного поглощения на наклон континуума, считая, что этот эффект незначителен для слабопокрасневших звезд. Для оставшихся 202 звезд была проведена редукция данных в единую систему спектрофотометрического стандарта α Луг [13]. Редуцированные данные, нормированные к длине волны 5550 \AA , использовались для определения наклона континуума в области длин волн $3200 - 3600 \text{ \AA}$ методом наименьших квадратов по формуле:

$$m(\lambda) - m(\lambda_{5550}) = a + b \lambda^{-1}. \quad (1)$$

Здесь b — наклон континуума в выбранном участке длин волн. На точность определения наклона влияют два основных фактора: ошибки определения абсолютных распределений энергии в спектрах звезд и эффект блокировки линиями поглощения. Эффект блокировки линиями поглощения различен для звезд разных спектральных классов и достигает максимальных величин для F-звезд поздних спектральных классов. При определении параметров прямой (1) программа учитывает этот эффект путем исключения из рассмотрения линий поглощения и выбора в качестве наблюдаемого континуума верхнего уровня спектра. Точность учета эффекта блокировки линиями поглощения иллюстрирует рис. 1, на котором видно, что наблюдаемый континуум сильно искажен линиями поглощения, однако его наклон определяется достаточно надежно.

3. *Калибровка наклона континуума по θ_{eff} .* Для определения зависимости между наклоном спектра в бальмеровском континууме и $\theta_{\text{eff}} = \frac{5040}{T_{\text{eff}}}$ было

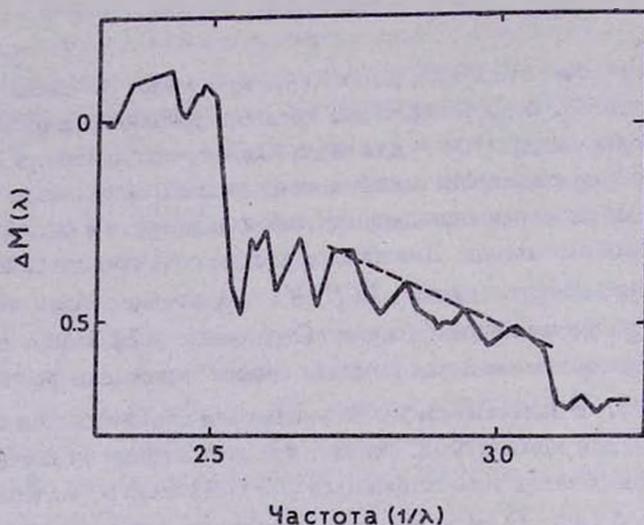


Рис.1. Определение наклона наблюдаемого континуума для звезды HR 5404 спектрального класса F7 V.

отобрано 28 звезд спектральных классов В—F и классов светимости III—V, для которых имеются надежные эмпирические определения T_{eff} в работах [2, 14]. В [2] для определения T_{eff} использовались наблюдаемые угловые диаметры звезд и абсолютные распределения энергии в УФ, видимой и ИК областях спектра, в [14], при определении точных эмпирических значений T_{eff} использовались угловые диаметры, которые вычислялись по методике, использующей модели Куруча [15]. Список отобранных звезд приводится в табл.1, которая включает номера звезд по BS и HD каталогам, спектральный класс по каталогу Хоффлейт и Яшека [16], вычисленные избытки цвета $E(B-V)$, T_{eff} и определенные по ним значения θ_{eff} , а также наклон континуума с коротковолновой стороны от бальмеровского скачка, вычисленный по формуле (1). В последнем столбце таблицы приведены ошибки определения наклона континуума, полученные при вычислении параметров прямой по способу наименьших квадратов. Четыре звезды табл.1 (HR 2943, 3982, 556, 8728) имеют по два определения T_{eff} . По ним можно оценить сходимость результатов двух авторов. Мы включили в обработку оба определения T_{eff} для каждой из четырех звезд. На точность определения зависимости между θ_{eff} и наклоном спектра в бальмеровском

Таблица 1

ЗВЕЗДЫ С ХОРОШО ИЗВЕСТНЫМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ

HR	H _D	Sp.	Type	E(B-V)	T_{eff} , K	θ_{eff}	b	δ (b)
269	5448	A5	V	- 0.02	8069	0.625	0.301 [±]	0.053
591	12311	F0	V	- 0.02	7122	0.708	0.639	0.062
1122	22928	B5	III	0.03	13844	0.364	- 0.454	0.036
1756	34816	B0.5	IV	0.02	27577	0.183	- 1.017	0.032
1790	35468	B2	III	0.02	21580	0.234	- 0.939	0.024 *
2421	47105	A0	IV	- 0.02	9260	0.544	0.126	0.037 *
2943	61421	F5	IV—V	0.02	6510	0.774	0.767	0.090 *
					6532	0.772		
3685	80007	A2	IV	- 0.02	9240	0.545	0.083	0.030 *
3775	82328	F6	IV	- 0.01	6364	0.792	0.727	0.099
3982	87901	B7	V	- 0.02	12210	0.413	- 0.420	0.024 *
					12318	0.409		
4295	95418	A1	V	- 0.04	9166	0.550	0.023	0.033
4357	97603	A4	V	0.00	8081	0.624	0.255	0.043
4534	102647	A3	V	0.00	8850	0.570	0.142	0.045 *
4540	102870	F9	V	0.00	6037	0.835	0.841	0.110
4853	111123	B0.5	III	0.05	27600	0.183	- 0.963	0.027 *
5056	116658	B1	III—IV	0.04	23930	0.211	- 0.950	0.024 *
5132	118716	B1	III	0.05	25740	0.196	- 1.000	0.023 *
5191	120315	B3	V	0.02	16716	0.302	- 0.746	0.024
5264	122408	A3	V	0.01	8418	0.599	0.209	0.024
5404	126660	F7	V	0.01	6237	0.808	0.634	0.082
6556	159561	A5	III	0.00	8020	0.628	0.288	0.035 *
					7920	0.636		
6879	169022	B9.5	III	0.02	9460	0.533	0.080	0.023 *
7001	172167	A0	V	- 0.02	9660	0.522	- 0.091	0.022 *
7528	186882	B9.5	IV	0.02	9883	0.510	- 0.076	0.025
7557	187642	A7	V	0.02	8010	0.629	0.304	0.038 *
7790	193924	B2	IV	0.04	17880	0.282	- 0.752	0.033 *
7906	196867	B9	IV	0.01	10963	0.460	- 0.254	0.022
8728	216956	A3	V	0.00	8800	0.573	0.045	0.037 *
					8548	0.590		

Примечание. Знаком (*) отмечены звезды, у которых T_{eff} взяты из [2]

континууме влияет неопределенность наблюдаемого континуума для F-звезд. Для оценки влияния этого эффекта мы построили зависимость θ_{eff} от наклона наблюдаемого континуума для В и А звезд и для В, А и F звезд таблицы. Коэффициенты этих двух зависимостей с точностью до ошибок совпали, что дает нам возможность определять температуры звезд по одной зависимости в широком интервале температур от 6000 до 25000 К. На рис.2 показана зависимость θ_{eff} от наклона континуума для В, А и F звезд, которая выражается простой линейной формулой:

$$\theta_{eff} = 0.535 + 0.336b \quad (2)$$

$$\pm 0.015 \quad \pm 0.007$$

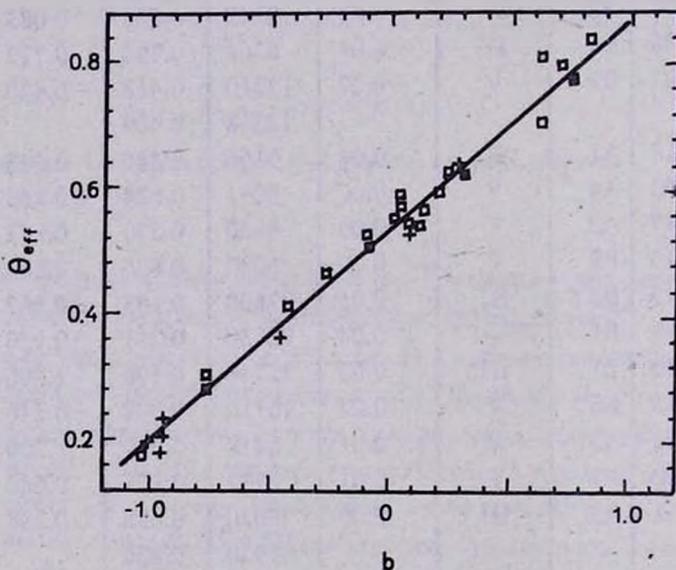


Рис.2. Калибровочная зависимость между θ_{eff} и наклоном наблюдаемого континуума в области $3200 - 3600 \text{ \AA}$ для В, А и F звезд класса светимости III — крестики и классов светимости IV, V — кружки.

Отметим, что звезды III класса светимости не показали систематических отклонений от этой прямой, что наглядно иллюстрирует рис.2.

При калибровке различных цветовых индексов аналогичная линейная зависимость может быть получена лишь для фотометрических данных в ультрафиолете, недоступном при наблюдении с Земли. Так, в работе [17] получена

линейная зависимость для В5 — F7 звезд главной последовательности при использовании потока на длине волны $\lambda 1965 \text{ \AA}$, а в работе [18] — для О, В, А и F звезд с использованием потока на длине волны $\lambda 1910 \text{ \AA}$. Более подробно калибровки θ_{eff} в различных фотометрических системах были рассмотрены Хауком [19].

Зависимость же, полученная нами по наклону спектра в бальмеровском континууме, позволяет определить T_{eff} по данным спектрофотометрических наблюдений с Земли в ближней УФ-области спектра.

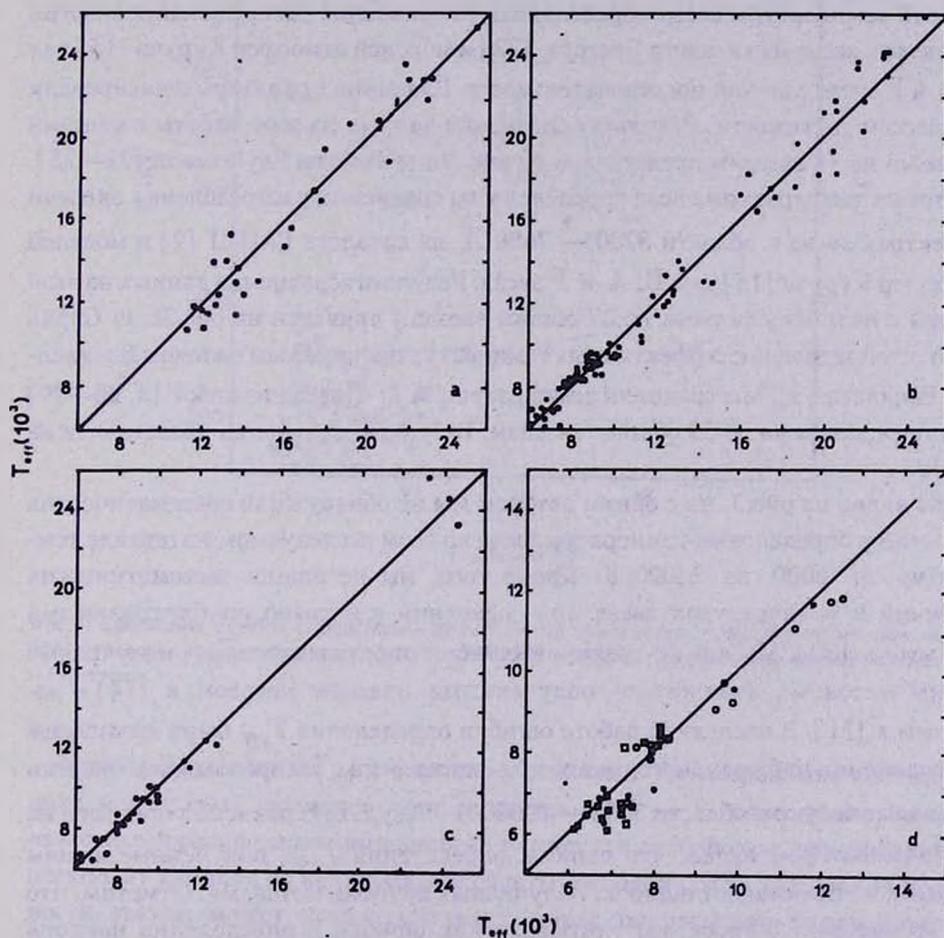


Рис.3. Сравнение наших определений T_{eff} (горизонтальная ось) с T_{eff} , полученными в работах: а — [20]; б — [21]; в — [23–25]; д — [3], [26] и [27] — светлые кружки, [28] — темные кружки, [29] — светлые квадратики, [31] — темные квадратики.

4. Сравнение с данными других определений эффективной температуры. В последние несколько лет T_{eff} звезд определяли многие авторы. Для сравнения наших определений температур с определениями, полученными другими авторами, мы отобрали следующие работы: а) Работа Андерхилл и др. [20], в которой температуры определялись из 13-цветной фотометрии Джонсона и Митчелла, данных каталога S2/68 при сравнении с моделями атмосфер Куруча для звезд спектрального класса В. Значения lgg были фиксированы для различных классов светимости ($lgg=4$ для IV, IV—V и V классов светимости, $lgg=3.5$ для II и III). Результат сравнения данных из этой работы с нашими данными по 30 общим звездам представлен на рис. 3а; б) Работа Моросси и Маланьини [21], в которой температуры звезд определялись из сравнения распределения энергии в спектрах звезд из каталога Брегера [22] и моделей атмосфер Куруча [15] для В, А и F звезд главной последовательности. Значения lgg авторы фиксировали по классам светимости. Результат сравнения данных из этой работы с нашими данными по 78 звездам представлен на рис. 3б; в) Работы Глушневой [23—25], в которых температуры звезд определены из сравнения распределения энергии в спектрах звезд в области 3200 — 7600 Å из каталога ГАИШ [9] и моделей атмосфер Куруча [15] для В, А и F звезд. Результат сравнения данных из этой работы с нашими данными по 27 общим звездам приведен на рис. 3с; г) Серия работ по определению эффективных температур полупрямым методом Блеквелла и Шеллиса [3]. Мы сравнили температуры А и F звезд из работ [3, 26—29] с нашими данными по 39 общим звездам. Результат сравнения представлен на рис. 3д.

Как видно из рис. 3, ни с одним автором мы не обнаружили систематических различий в определении температур звезд во всем исследуемом интервале температур от 6000 до 25000 К. Кроме того, мы не нашли систематических различий в температурах звезд при сравнении с недавно опубликованными данными в [30]. Мы также сравнили ошибки определения T_{eff} , полученные нашим методом, с ошибками, полученными прямым методом в [14] и непрямым в [31]. В последней работе ошибки определения T_{eff} были вычислены при сравнении наблюдаемого распределения энергии с распределением энергии моделей атмосфер в области 3200 — 10000 Å. Результат сравнения приведен на рис. 4, на котором видно, что ошибки определения T_{eff} , полученные нашим методом, не превышают ошибок, полученных другими методами. Отметим, что при вычислении ошибок мы учитывали как ошибки в определении наклона наблюдаемого континуума, так и ошибки констант калибровочной прямой.

5. *Заключение.* В настоящей работе предложен метод определения эффективных температур звезд по наклону спектра в бальмеровском континууме. Основное его достоинство — использование, в качестве индикатора температуры, наблюдаемого параметра непрерывного спектра, который показывает линейную зависимость от θ_{eff} в широком интервале температур.

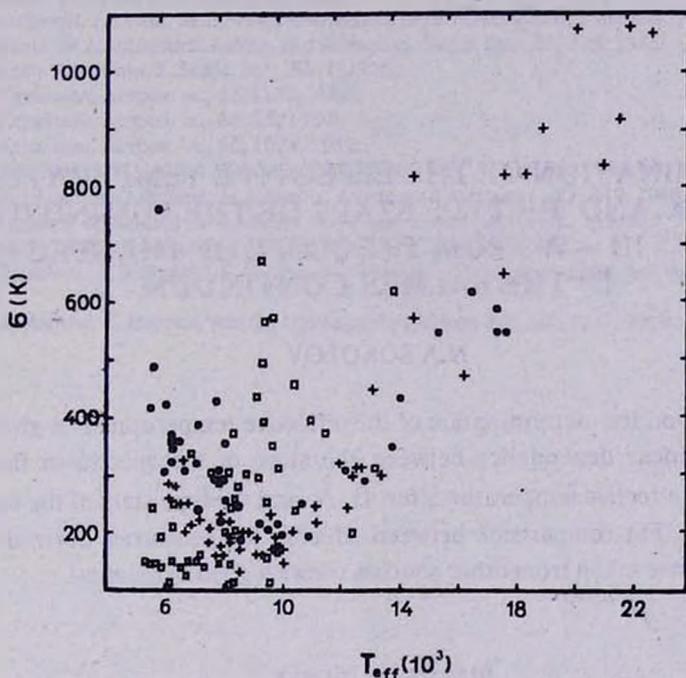


Рис.4. Сравнение ошибок определения эффективных температур, полученных прямым методом [14] — темные квадратики; непрямом методом [31] — светлые кружки и по нашим определениям — крестики.

Метод определения T_{eff} по наклону спектра в бальмеровском континууме пока может быть применен лишь к звездам III — V классов светимости с известными распределениями энергии в спектре и слабопокрасневшим звездам, поскольку влияние на непрерывный спектр ускорения силы тяжести на поверхности звезды может исказить, а межзвездное покраснение определенно искажает наблюдаемый наклон континуума в ближней УФ-области спектра. В дальнейшем мы собираемся детально изучить влияние этих эффектов и опубликовать результаты.

ликовать полный каталог эффективных температур, полученных по наклону спектра в бальмеровском континууме.

Автор выражает благодарность И.М.Копылову за обсуждение результатов работы, В.А.Гаген-Торну за ценные советы и замечания при прочтении рукописи, а также Американскому астрономическому обществу за финансовую поддержку этой работы.

Главная астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE TEMPERATURES OF B, A AND F-TYPE STARS OF THE LUMINOSITY CLASSES III — V FROM THE SLOPE OF THE SPECTRA IN THE BALMER CONTINUUM

N.A.SOKOLOV

A new method for determination of the effective temperatures is given, which is basing on linear dependence between the slope of the spectra in the Balmer continuum and effective temperatures for B, A and F-type stars of the luminosity classes III — V. The comparison between effective temperatures, derived with this method, and those taken from other sources shows a good agreement.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.Bohm-Vitense, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **19**, 295, 1981.
2. A.D.Code, J.Devis, R.C.Bless, R.Handbury Brown, *Astrophys. J.*, **203**, 417, 1976.
3. D.E.Blackwell, M.J.Shallis, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **180**, 177, 1977.
4. D.Burbier, D.Chalonge, *Ann. Astrophys.*, **4**, 30, 1941.
5. Д.Шалонж, *Астрон. ж.*, **33**, 490, 1956.
6. D.Chalonge, L.Divan, *Astron. and Astrophys.*, **55**, 121, 1977.
7. Е.М.Терещенко, А.В.Харитонов, Исследование распределений энергии в спектрах 109 звезд в абсолютных единицах, Наука, Алма-Ата, 1972.
8. Е.И.Гаген-Торн, Е.В.Рубан, Бальмеровские скачки, спектрофотометрические градиенты и температуры звезд по результатам спектрофотометрических наблюдений, Деп. ВИНТИ. № 6001-83, 1983, 24 стр.
9. И.Б.Волошина, И.Н.Глушнев, В.Т.Дорошенко и др. Спектрофотометрия ярких звезд. Наука, М., 1982.
10. Н.Л.Алексеев, Г.А.Алексеева, А.А.Архаров и др., Тр. Главной астрон. обсерв. АН СССР, **83**, 3, 1978.
11. Г.А.Алексеева, А.А.Архаров, Ю.А.Беллев и др., Каталог абсолютных распределений энергии в спектрах звезд в диапазоне 3100 — 10800 А, Деп. ВИНТИ. №7021 — В88, 1988, 134стр.

12. В. Страйжис, Многоцветная фотометрия звезд, Моклас, Вильнюс, 1977.
13. А.В.Харитонов, И.Н.Глушневa, Астрон. ж., 55, 496, 1978.
14. M.L.Malagnini, C.Morossi, L.Rossi, R.L.Kurucz, Astron. and Astrophys., 162, 140, 1986.
15. R.L.Kurucz, Astrophys. J. Suppl. Ser., 40, 1, 1979.
16. D.Hoffleit, C.Jaschek, The Catalogue of Bright Stars, Connecticut New Haven, 1982.
17. M.L.Malagnini, C.Morossi, R.Faragiana, The MK Process and Stellar Classification, Ed. R.F.Garrison Toronto, David Dunlap Observ., 1984.
18. E.Theodossiou, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 214, 327, 1985.
19. В.Хаук, Calibration of Fundamental Stellar Quantities, IAU Symp. № 111, Eds D.S.Hayes et al., Dordrecht, D. Reidel Publ. Company, 1985.
20. A.V.Underhill, L.Divan, M.L.Prevot-Burnichon, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 189, 601, 1979.
21. C.Morossi, M.L.Malagnini, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 60, 365, 1985.
22. М.Врегер, Astrophys. J. Suppl. Ser., 32, 7, 1976.
23. И.Н.Глушневa, Астрон. ж., 62, 1132, 1985.
24. И.Н.Глушневa, Астрон. ж., 66, 95, 1989.
25. И.Н.Глушневa, Астрон. ж., 66, 1024, 1989.
26. D.E.Blackwell, M.J.Shallis, M.J.Selby, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 188, 847, 1979.
27. D.E.Blackwell, A.D.Petford, M.J.Shallis, Astron. and Astrophys., 82, 249, 1980.
28. S.K.Legget, C.M.Mountain, M.J.Selby et al., Astron. and Astrophys., 159, 217, 1986.
29. М.Сахнер, G.Hammarback, Astron. and Astrophys., 151, 372, 1985.
30. D.E.Blackwell, A.D.Petford, S.Arribas, D.J.Huddock, M.J.Selby, Astron. and Astrophys., 232, 396, 1990.
31. M.L.Malagnini, C.Morossi, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 85, 1015, 1990.