

УДК 524.31

БАЛЬМЕРОВСКИЕ СКАЧКИ ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. СРАВНЕНИЕ С ТЕОРИЕЙ

Н.А.СОКОЛОВ, Е.В.РУБАН

Поступила 20 сентября 1995

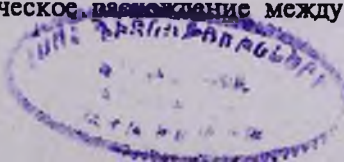
Принята к печати 31 октября 1995

В статье рассмотрена взаимосвязь между величиной бальмеровского скачка и эффективной температурой звезд главной последовательности. Показано, что наблюдаемые бальмеровские скачки имеют систематическое расхождение с теоретическими скачками, полученными по моделям Куруча. Обсуждаются возможные причины этого несоответствия.

1. *Введение.* Известно, что величина скачка континуума у границы серии Бальмера является одной из самых чувствительных к эффективной температуре параметров непрерывного спектра звезд классов В-Ф. Эта температурная обусловленность бальмеровского скачка была положена Барбье, Шалонжем и Диван в основу температурной BCD-классификации звезд [1,2].

Позднее, при переходе к более совершенным приемникам излучения, методикам наблюдения и их редукции, и, следовательно, с повышением точности, было показано (см., например, [3]), что спектры звезд главной последовательности, отнесенные к одному спектральному подклассу (т.е. имеющие приблизительно одинаковые температуры), могут заметно отличаться по бальмеровским скачкам. Эти различия превосходят ошибки вычислений и разброс скачков из-за дисперсии температур звезд одного спектрального подкласса, и определяются реальными различиями звезд. Это могут быть различия физических условий в атмосферах: ускорений силы тяжести на поверхности, химического состава, а также внешние различия звезд, не связанные непосредственно с атмосферой: вращение звезд и, возможно, наличие окружающих нормальные В-звезды протяженных оболочек - мантий [4], которые не проявляют себя в линейчатом спектре.

Сравнение наблюдаемых бальмеровских скачков с теоретическими значениями показывает систематическое расхождение между ними для



В-звезд главной последовательности [5]. При этом окончательного объяснения этим расхождениям в настоящее время нет.

Учитывая роль бальмеровских скачков в классификации звезд, с одной стороны, и выводы работ [2, 5], с другой, мы поставили задачу - еще раз исследовать температурную зависимость бальмеровских скачков нормальных звезд главной последовательности, основываясь на данных однородных высокоточных спектрофотометрических каталогов [6,7], и сравнить полученную зависимость с теорией.

2. *Новый метод вычисления бальмеровских скачков.* В предыдущей работе [8] были приведены результаты вычислений бальмеровских скачков для 235 нормальных звезд классов В, А и F главной последовательности. Результаты основаны на данных [6,7] и вычислены по новой методике. В чем ее отличие от общепринятой?

Как известно, бальмеровский скачок определяется по формуле

$$D = \lg \frac{F^{3700+}}{F^{3700-}}, \quad (1)$$

где F^{3700-} и F^{3700+} - потоки на длине волны $\lambda=3700\text{\AA}$ в бальмеровском и пашеновском континуумах, соответственно. Если поток F^{3700-} определяется довольно уверенно путем линейной аппроксимации бальмеровского континуума как в традиционном, так и в новом методе вычисления скачка, то при вычислении F^{3700+} имеется некоторая неопределенность. Действительно, у предела серии Бальмера с длинноволновой стороны наблюдается сильная депрессия в спектре из-за сгущения линий, ширина которой достигает 300-400 $\text{\AA}$ в зависимости от спектрального разрешения наблюдательных данных. Для получения потока F^{3700+} приходится использовать далекую экстраполяцию неискаженных линиями пашеновского континуума.

До настоящего времени традиционно применялась линейная экстраполяция спектральной зависимости $\lg F$ от обратной длины волны $1/\lambda$ в этой области спектра. В работе же [8] была предложена нелинейная аппроксимация непрерывного спектра во всем наблюдаемом диапазоне пашеновского континуума, 4000-7400 $\text{\AA}$, представленном в исходных данных [6, 7], с последующей экстраполяцией на $\lambda=3700\text{\AA}$. Аппроксимирующая кривая была задана в следующем виде:

$$\Delta m_{\lambda} = \alpha + \beta \lambda^{-\gamma}, \quad (2)$$

где $\Delta m_{\lambda} = m_{\lambda} - m_{5550}$, параметры α , β и γ определялись из наилучшего совпадения кривой с наблюдаемым континуумом по способу наименьших квадратов. Очевидно, что такая аппроксимация лучше, чем линейная, соответствует ходу непрерывного спектра в пашеновском континууме, особенно для звезд класса F (см. рис. 1 из [8]). В случае линейной аппроксимации у звезд класса F для ее корректности приходится суживать длинноволновый диапазон пашеновского континуума от границы серии Бальмера до 4600 Å (см. [9,10]).

Естественно, что скачки, вычисленные по новому и старому методам, должны отличаться. Иллюстрацией этому является рис. 1, на котором представлено сравнение результатов работ [8] и [9]. Вычисления скачков в этих работах проводились на основе одного и того же наблюдательного материала, но в работе [9] они выполнялись методом линейной экстраполяции как бальмеровского, так и пашеновского континуумов. Как

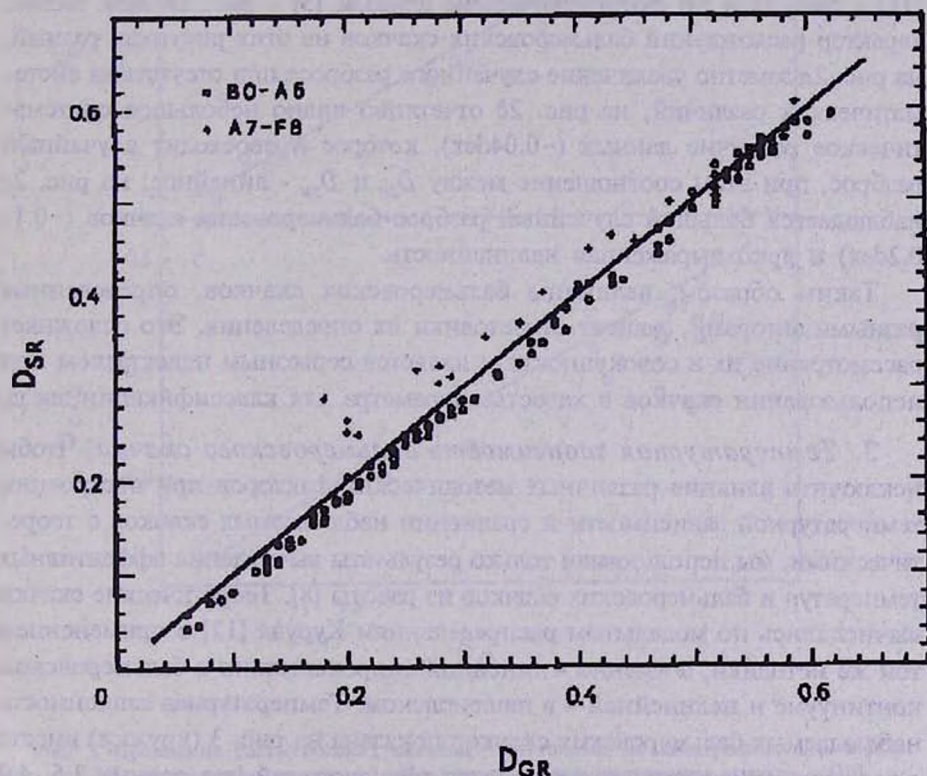


Рис. 1. Сравнение бальмеровских скачков, полученных линейной - D_{GR} и нелинейной - D_{SR} экстраполяцией пашеновского континуума.

видно из рисунка, расхождения являются систематическими и имеют противоположные знаки для ранних (B0-A6) и более поздних (A7-F8) звезд. Но если для ранних звезд они не превосходят 0.02-0.03dex, что лишь незначительно больше случайных ошибок вычисления D (0.016dex [3]), то для более поздних звезд - они превосходят их.

Очевидно, что расхождение бальмеровских скачков будет больше, если вычисления проводились не только по разным методикам, но и с использованием различных наблюдательных данных, при получении которых применялись разные способы регистрации светового потока (фотографический, фотометрический, спектрофотометрический), а также разные методы учета инструментальных и атмосферных эффектов (или их неучет). Мы сравнили величины бальмеровских скачков, полученные нашим методом, со скачками, полученными по спектрофотометрическим данным [10] - рис. 2а, по спектрофотометрическим и фотометрическим данным [11] - рис. 2б и по фотографическим данным [5] - рис. 2с. Как видно, характер расхождений бальмеровских скачков на этих рисунках разный: на рис. 2а заметно увеличение случайного разброса при отсутствии систематических различий; на рис. 2б отчетливо видно небольшое систематическое различие данных ($\sim 0.04\text{dex}$), которое превосходит случайный разброс, при этом соотношение между $D_{\text{сл}}$ и $D_{\text{зв}}$ - линейное; на рис. 2с наблюдается большой случайный разброс бальмеровских скачков ($\sim 0.1-0.2\text{dex}$) и ярко выраженная нелинейность.

Таким образом, величины бальмеровских скачков, определенные разными авторами, зависят от методики их определения. Это осложняет рассмотрение их в совокупности и является серьезным недостатком при использовании скачков в качестве параметра для классификации звезд.

3. Температурная зависимость бальмеровского скачка. Чтобы исключить влияние различных методических факторов при построении температурной зависимости и сравнении наблюдаемых скачков с теоретическими, мы использовали только результаты вычисления эффективных температур и бальмеровских скачков из работы [8]. Теоретические скачки вычислялись по модельным распределениям Куруча [12] с применением той же методики, а именно - линейной аппроксимации в бальмеровском континууме и нелинейной - в пашеновском. Температурная зависимость наблюдаемых бальмеровских скачков показана на рис. 3 (кружки) вместе с теоретическими зависимостями для трех значений $\lg g$, равных 3.5, 4.0 и 4.5.

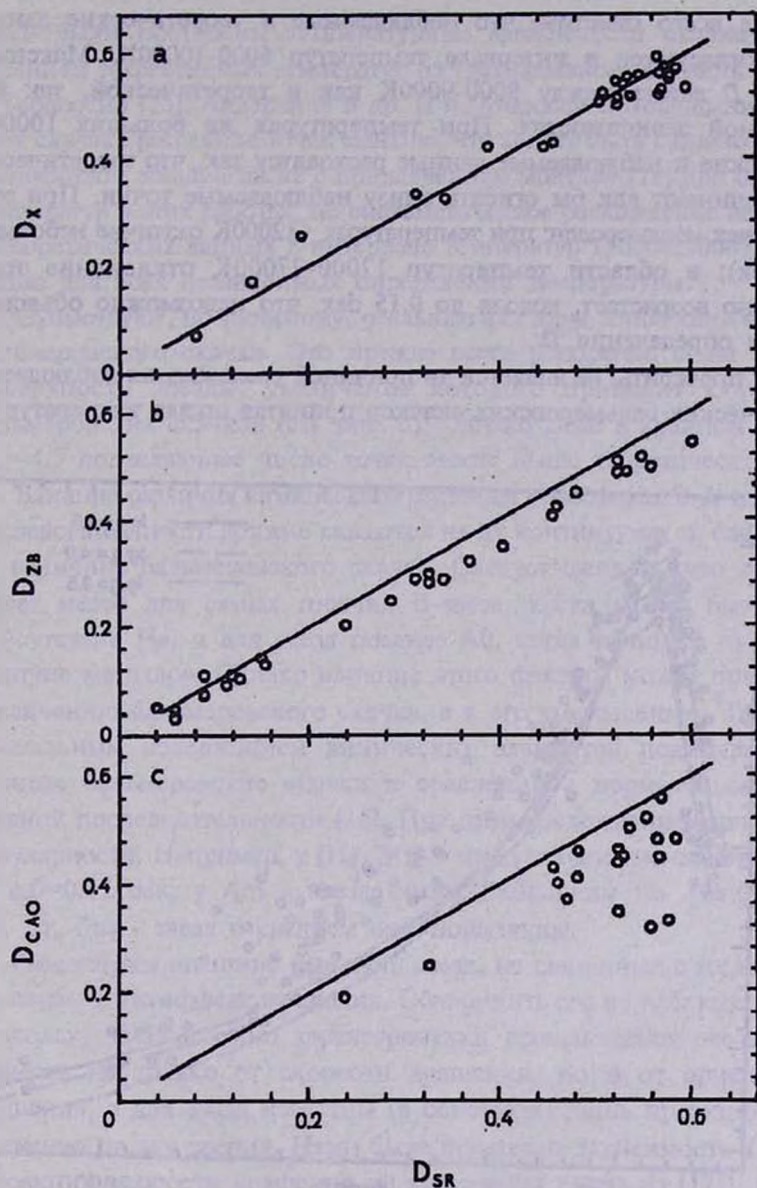


Рис. 2. Сравнение бальмеровских скачков, полученных по спектрофотометрическим данным в [8], со скачками, полученными по спектрофотометрическим данным в [10] - *a*, по спектрофотометрическим и фотометрическим данным в [11] - *b* и по фотографическим данным в [5] - *c*.

Прежде всего отметим, что наблюдаемые и теоретические данные хорошо согласуются в интервале температур 6000-10000К. Максимум значений D лежит между 8000-9000К как в теоретической, так и в наблюдаемой зависимостях. При температурах же больших 10000К, теоретические и наблюдаемые данные расходятся так, что теоретические кривые начинают как бы огибать снизу наблюдаемые точки. При этом разброс точек неоднороден: при температурах <12000К различие небольшое (~ 0.02 dex); в области температур 12000-27000К отклонение точек значительно возрастает, доходя до 0.15 dex, что невозможно объяснить ошибками определения D .

Чтобы проверить, не является ли причиной расхождения наблюдаемых и теоретических бальмеровских скачков принятая шкала температур [8],

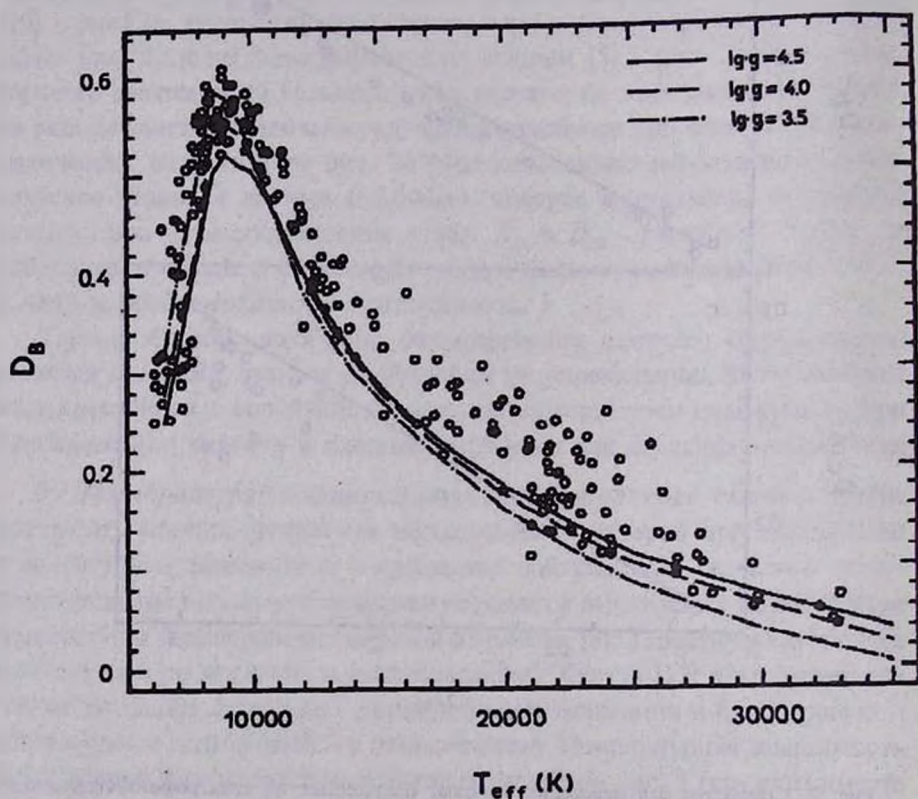


Рис. 3. Температурная зависимость наблюдаемых (кружки) и теоретических бальмеровских скачков по моделим Куруча [12].

нами были построены температурные зависимости скачка с использованием эффективных температур из трех независимых работ: Кондизаса и Теодоссио [13], Андерхилл и др. [14], Моросси и Маладжини [15]. Во всех случаях рассеяние точек меньше, что может быть связано с меньшим количеством звезд, а также с привлечением моделей [12] при определении температур в этих работах, но систематическое расхождение наблюдаемых и теоретических данных в интервале температур 15000-25000K отчетливо видно для всех независимых определений температуры.

Существуют, по-видимому, реальные факторы, влияющие на величину бальмеровского скачка. Это прежде всего ускорение силы тяжести на поверхности звезды, увеличение которого приводит к увеличению бальмеровских скачков (см. рис. 3). Однако даже в крайнем случае при $\lg g=4.5$ подавляющее число точек лежит выше теоретической кривой.

Влияние различия химического состава в атмосферах В-А звезд главной последовательности должно сказаться на их континуумах и, следовательно, на величине бальмеровского скачка. Следует ожидать, что этот эффект имеет место для самых горячих В-звезд, когда может быть ощутимо присутствие He, и для звезд позднее A0, когда начинает чувствоваться наличие металлов. Однако влияние этого фактора может привести не к увеличению бальмеровского скачка, а к его уменьшению. Так, звезды с аномальным содержанием химических элементов показывают уменьшенные бальмеровские скачки в сравнении с нормальными звездами главной последовательности [16]. При этом расхождение зависит от типа пекулярности. Например, у (Hg, Mn) - звезд скачки уменьшены в среднем на $\Delta D=0.05$ dex, у Am - звезд также уменьшены на $\Delta D=0.05$ dex, а у (Sr, Cr, Eu) - звезд в среднем они нормальны.

Рассмотрим внешние различия звезд, не связанные с их атмосферой. Во-первых, это эффект вращения. Обнаружить его из наблюдений трудно, поскольку наблюдаемые характеристики вращающейся звезды должны зависеть не только от скорости вращения, но и от ориентации оси вращения, а для звезд известны (в основном) лишь проекции скорости вращения на луч зрения. Нами была построена зависимость D от $V \sin(i)$ (проекции скорости вращения на луч зрения взяты из [17]), которая не показала заметного влияния эффекта вращения на D . Аналогичный результат был получен также в работе [18].

Во-вторых, возможное наличие мантий вокруг нормальных звезд. Как было показано в [3], излучение мантии, имеющее отрицательную величину бальмеровского скачка, накладываясь на излучение звезды, приводит к

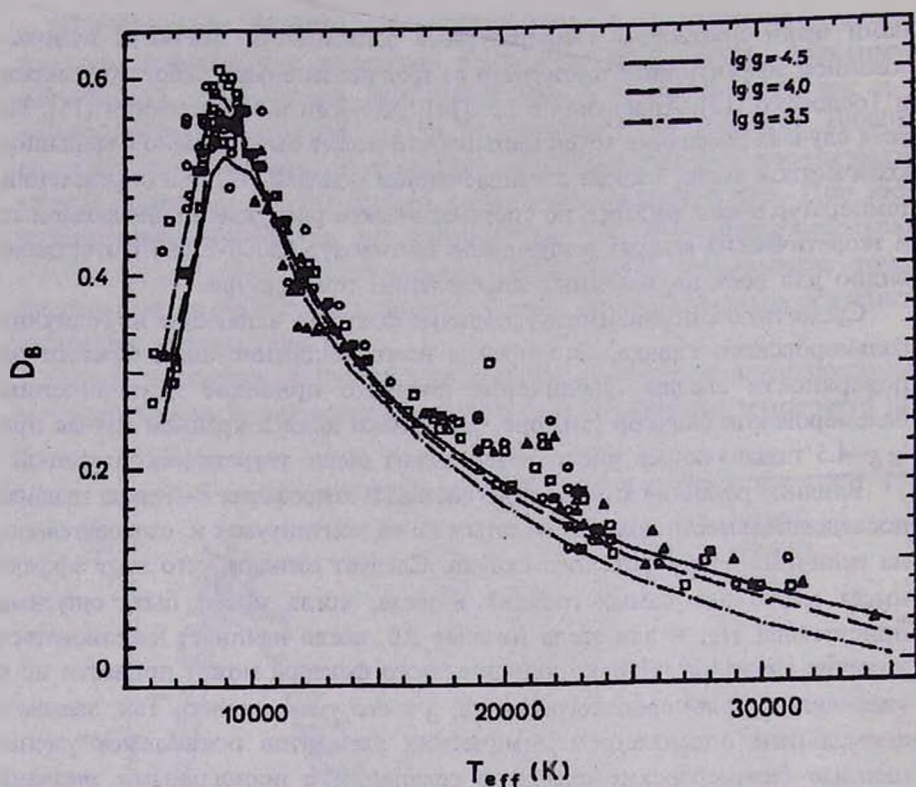


Рис. 4. Температурная зависимость наблюдаемых бальмеровских скачков для трех температурных шкал: Контисаса и Теодосию [13] - кружки, Андерхилл и др. [14] - треугольники и Моросси и Маладжини [15] - квадратики.

уменьшению D . Учитывая вышеизложенное, естественней было бы видеть, что теоретические кривые на рис. 3 огибают сверху наблюдаемые точки. Остается предположить, что модели [12] недостаточно совершенны в области высоких температур и вблизи бальмеровского скачка, либо существуют неизвестные пока механизмы, увеличивающие бальмеровский скачок. К выводу о несовершенстве моделей [12] пришли также авторы работы [5]. Они получили аналогичный результат при сравнении наблюдаемых и теоретических бальмеровских скачков (см. рис. 12 из [5]), который объясняют завышением расчетного потока на λ 3700 Å с коротковолновой стороны от скачка в теоретических спектрах [12] из-за неучета большого числа слабых перекрывающихся линий спектра

водорода, образующих бленду. Это должно приводить к систематическому занижению теоретических бальмеровских скачков D при фиксированных T_{eff} и $\lg g$. В свою очередь, мы хотели бы обратить внимание на влияние эффектов отклонения от локального термодинамического равновесия на интенсивность водородных линий и вид бальмеровского скачка. Последний может оказаться чувствительным как к изменению относительных интенсивностей высших членов серии Бальмера, блендирующих поток вблизи предела серии, так и к населенности второго уровня, темп ионизации с которого определяет коэффициент связанно-свободного поглощения и, следовательно, величину бальмеровского скачка.

4. *Заключение.* Из проведенного на основе высокоточного наблюдательного материала анализа величин бальмеровских скачков звезд главной последовательности можно сделать следующие выводы.

1. Величины бальмеровских скачков, определенные разными авторами, зависят как от способа их вычислений, так и от методов наблюдений и учета инструментальных и атмосферных факторов при редукции наблюдательных данных. Это ограничивает возможность использования бальмеровских скачков в качестве наблюдаемого параметра эффективной температуры звезд.

2. Зависимость D от T_{eff} показывает большое рассеяние точек, которое невозможно объяснить ошибками наблюдательных данных и вызвано, по-видимому, реальными различиями бальмеровских скачков у звезд с одинаковой температурой.

3. Наблюдаемые бальмеровские скачки существенно превосходят теоретические [12] в интервале температур 12000-27000К. Причиной этих расхождений, как нам представляется, является несовершенство теоретических распределений энергии [12]. Возможно, эти разногласия уменьшаются или совсем исчезнут при использовании новых, более совершенных теоретических данных [19].

Главная астрономическая обсерватория,
Пулково, Россия

THE BALMER DISCONTINUITIES OF THE MAIN SEQUENCE STARS. COMPARISON WITH THEORY

N.A.SOKOLOV, E.V.RUBAN

The correspondence between the Balmer discontinuities and the effective temperatures of main sequence stars is considered. Here we find, that the observational Balmer discontinuities and the theoretical ones from Kurucz's models show systematical disagreements. The nature of this is discussed.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.Шалонж, *Астрон. ж.*, 33, 490, 1956.
2. D.Chalonge, L.Divan, *Astron. Astrophys.*, 55, 117, 1977.
3. Е.В.Рубан, *Астрофизика*, 21, 111, 1984.
4. B stars with and without Emission Lines, ed. A.B. Underhill, V. Doazan, NASA, Sp-456, 1982.
5. С.А.Гуляев и др. *Изв. Спец. астрофиз. обсерв.*, 22, 3, 1986.
6. Н.А.Алексеев и др., *Тр. ГАО АН СССР*, 83, 3, 1978.
7. Г.А.Алексеева и др., *Каталог абсолютных распределений энергии в спектрах 183 звезд в диапазоне 3200-10800А*, Деп. ВИНТИ, N 2113 - В92, 96, 1992.
8. N.A.Sokolov, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 110, 553, 1995.
9. Е.И.Гаген-Торн, Е.В.Рубан, Бальмеровские скачки, спектрофотометрические градиенты и температуры звезд по результатам спектрофотометрических наблюдений. Деп. ВИНТИ, N6001-B83, 24, 1983.
10. В.М.Терещенко, А.В.Харитонов, *Тр. Астрофиз. ин-та АН Каз. ССР*, 21, 1972.
11. J.Zorec, D.Briot, *Astron. Astrophys.*, 245, 150, 1991.
12. R.L.Kurucz, *Astrophys. J Suppl. Ser.*, 40, 1, 1978.
13. E.Kontizas, E.Theodossiou, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 192, 745, 1980.
14. A.B.Underhill et al., *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 189, 601, 1979.
15. C.Morossi, M.L.Malagnini, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 60, 365, 1985.
16. Ю.В.ГлазOLEВСКИЙ, Г.П.Топильская, *Изв. Спец. астрофиз. обсерв.*, 22, 13, 1987.

17. *А.А.Архаров и др.*, Каталог спектральных, фотометрических, пространственных и физических характеристик 610 ярких звезд. Деп. ВИНТИ, N3527-B91, 167, 1991.
18. *И.Н.Глушкова*, Астрон. ж., 59, 523, 1982.
19. *R.L.Kilicz*, Proc. IAU Coll. N 138 "Peculiar versus Normal Phenomena in A-type and Related Stars", ed. *M.Dworetzky, F.Castelli, R.Faraggiana*, ASP Conference Ser., 44, 87, 1993.