

УДК 520.353

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНОГО ЗВЕЗДНОГО СПЕКТРОГРАФА БТА.
ОПЫТ РАБОТЫ С РЕЗАТЕЛЯМИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

И. Ф. Бикмаев. Э. Б. Гажур

Приведены результаты исследований и наблюдений на ОЗСП БТА с резателями изображений, разработанными в САО АН СССР. Показано, что применение резателей позволяет увеличить световую эффективность спектрографа в 3.5-4.5 раза по отношению к классической щели. Соответственно возрастают фотометрическая точность спектров и проникающая способность спектрографа.

The results of investigations and observations with the Main stellar spectrograph of the 6-m telescope with the image slicers, constructed in SAO USSR AS, are presented. It is shown that the use of the slicers allows to increase the light efficiency of the spectrograph by a factor of 3.5-4.5 as compared with the classical slit. Photometrical accuracy of spectra and limited magnitude of the spectrograph increases respectively.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем практической спектроскопии является согласование размеров изображения звезды и входной щели спектрографа: масштаб изображения на щели зависит от фокусного расстояния оптической схемы телескопа, а ширина щели, как правило, согласованная с пространственным разрешением светоприемника, определяется параметрами спектрографа. При увеличении размеров телескопа относительные потери света на щели возрастают, поэтому проникающая способность системы "телескоп-спектрограф" увеличивается пропорционально диаметру главного зеркала, а не его площади.

Указанная проблема является наиболее острой для классических спектрографов высокого разрешения, установленных в фокусе кудэ, а также для их аналогов, например, для Основного звездного спектрографа 6-м телескопа, размещенного в одном из фокусов Нэсмита (Копылов, Рылов, 1979). Размер входной щели у таких спектрографов не превышает одной угловой секунды, а при работе с длиннофокусными камерами потери света на входе могут составлять 95 % (Боуэн, 1938).

Попытки решить проблему привели к разработке и созданию резателей изображений - оптических устройств, которые устанавливаются на входе спектрографа вместо классической щели, и делят изображение звезды на ряд полос, ширина каждой из которых равна нормальной ширине щели. От каждой такой полосы на фокальной поверхности камеры формируется свой спектр. С точностью до потерь света в таком устройстве, выигрыш по свету относительно

классической щели пропорционален числу спектров, зарегистрированных одновременно.

Первый вариант резателя изображений был применен Боуэном еще в 30-е годы (Боуэн, 1938; Боуэн, 1967; Пирс, 1965). Впоследствии были разработаны резатели Ричардсона (Ричардсон, 1966; Ричардсон, 1968; Ричардсон, 1972) Вальравена (Вальравен, 1972), модифицированный вариант Боуэна-Вальравена (Симонс и др., 1982), а также резатели на основе волоконных световодов (Феленбок и др., 1988; д'Одориго и др., 1989). В данной работе приводятся результаты исследований и наблюдений на ОЗСП БТА с резателем изображений, разработанным в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР, который по своей конструкции принципиально отличается от предыдущих вариантов (Афанасьев и др., 1986).

СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕЗАТЕЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАЗРАБОТАННОГО В САО

Оптическая схема резателя изображена на рис. 1: а - меридиональный разрез (поперек щели); б - саггитальный разрез (вдоль щели), в - вид в плане по направлению падающего пучка. Резатель состоит из двух ножей 1 с зеркальным покрытием, расстояние между которыми S равно ширине нормальной щели; плоского зеркала 2, параллельного плоскости ножа, и дистанционных пластин 3. Плоскость ножа наклонена к оси падающего пучка (оптическая ось телескоп-коллиматор) на угол α в саггитальной и β меридиональной плоскостях. В зеркале 2 выполнено окно, вырезающее из "изображения" звезды центральную часть, определяемую параметрами резателя. Свет, прошедший через окно, попадает на нож таким образом, что часть его (правый край на рис.1в) проходит прямо через щель, не испытывая каких-либо отклонений, а оставшаяся часть отражается от ножа на плоское зеркало и обратно на нож. При этом рабочей является одна половина ножа, вторая половина фиксирует ширину щели. Наклон резателя в двух плоскостях обеспечивает последовательное прохождение в щель новых участков изображения - "срезов". Поскольку система из двух параллельных зеркал не меняет наклона вошедшего луча, то выходящие срезы параллельны первоначальному направлению и лежат в одной плоскости, так как прошли через одну щель.

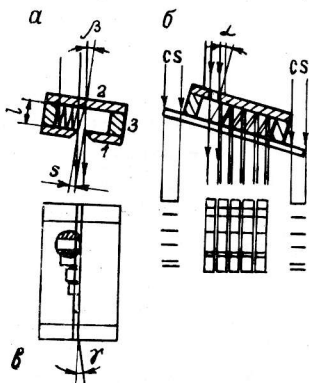


Рис. 1. Схема и принцип работы резателя изображений, разработанного в САО, (см. текст): 1, 2, 3 - оптические детали резателя, S - ширина щели, CS - каналы спектра сравнения.

Таким образом, после $2n$ отражений образуется $K = n + 1$ срезов, включая участок, прошедший без отражений. Углы α и β связаны с шириной щели S , числом

срезов K и расстоянием между ножами и плоским зеркалом z следующими зависимостями (для случая квадратного входного окна):

$$\alpha = \arcsin KS/2z, \quad (1)$$

$$\beta = \arctg S/2z. \quad (2)$$

Благодаря специально разработанной системе тонких подвижек, выбор оптимальных углов α и β и настройка резателя осуществляется непосредственно в схеме спектрографа. Кроме того, предусмотрена подвижка по углу γ , позволяющая расположить проекцию щели резателя вдоль штрихов дифракционной решетки, чтобы иметь единый нуль-пункт лучевых скоростей у всего набора спектров. Для определения лучевых скоростей звезд в конструкции резателя предусмотрены каналы спектра сравнения. Свет от лампы с полым катодом направляется с помощью линз на зеркальные призмы, которые отражают его на щель резателя, выше и ниже основного "звездного" канала (рис. 1б)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЗАТЕЛЕИ

Макет резателя был испытан на ОЗСП БТА В. Е. Панчуком и В. Л. Афанасьевым в 1979 г. В последующие годы была выполнена работа по модернизации ОЗСП, в том числе и его щелевой части (Гажур и др., 1986). В 1984–85 гг. Э. Б. Гажуром была разработана более совершенная конструкция резателя. Техническая работа на ОЗСП и первые наблюдения были выполнены В. Е. Панчуком, В. Г. Ключковой совместно с авторами данной статьи в 1985–86 гг.

Спектрограммы, полученные с помощью резателя изображений, представляют собой набор спектров, расположенных один под другим на фотопластинке. Фотометрическая обработка такого спектра требует независимого сканирования на микроденситометре отдельных спектров и затем соответствующего суммирования интенсивностей. Возможность такой спектрофотометрической обработки была показана В. Г. Ключковой на базе диалоговой системы "Спектр", разработанной в САО (Назаренко, 1990, см. настоящий том).

Недостатком первого варианта резателя было алюминиевое покрытие оптических элементов. Как и в случае резателей Ричардсона и Вальравена, каждый следующий срез образуется после двукратного отражения. Из-за сравнительно невысокого коэффициента отражения алюминия на каждом спектре терялось 30–40 % света. В результате, при фотографической регистрации лишь часть спектров оказывалась пригодной для спектрофотометрической обработки. Поэтому систематические наблюдения с первым вариантом резателя не состоялись.

Стало очевидным, что для уменьшения потерь на отражениях необходимо использовать высокоэффективные диэлектрические покрытия. Так как рабочий диапазон таких покрытий не охватывает одновременно весь регистрируемый диапазон спектра (3300–6800 Å), то потребовалось разработать и изготовить по два идентичных комплекта резателей ("синий" и "красный" для короткофокусной (N2) и длиннофокусной (N1) камер ОЗСП. В 1988 г. в опытно-производстве ГАО АН УССР (Киев) В. В. Андрущенко и В. Н. Ешаном на отражающие поверхности резателей были нанесены диэлектрические покрытия с коэффициентом отражения $K = 0.95-0.99$ в рабочем диапазоне длин волн. Дальнейшая работа по исследованию

резателей с диэлектрическими покрытиями велась авторами статьи.

В настоящее время на ОЗСП имеется 4 комплекта резателей. Параметры резателей приведены в табл.1. Каждый из резателей размещен в собственной механической оправе. Благодаря этому, а также работе по модернизации щелевой части ОЗСП, выполненной в предыдущие годы (Гажур, Найденов и др., 1986), можно в течение нескольких минут заменить один резатель на другой при смене варианта наблюдений (диапазон длин волн, камера).

Таблица 1. Параметры резателей изображений САО

	Камера N 1	Камера N 2
Высота входной диаграммы	2"	3"
Ширина щели	0.15"	0.5"
Угол α	12°30'	15°
Угол β	0°57'	2°09'
Число одновременно регистрируемых спектров	4 - 6	4 - 6
Размер эквивалентной входной щели	0.8" x 2"	2.5" x 3"
Высота отдельного спектра на фотопластинке (без расширения)	0.8 мм	0.2 мм
Спектральные диапазоны	3600-5000 Å 5000-8000 Å	3600-5000 Å 5000-8000 Å
Выигрыш по свету относительно классической щели	350-450 %	350-450 %

Рассмотрим основные результаты исследований и наблюдений с резателями изображений в САО и сделаем ряд сравнений с другими типами резателей.

1. Оптимальным является такой угол α (см рис.1), при котором образуется 4-5 спектров от звезды. Увеличение числа спектров до 6-7 приводит к частичному переналожению 5-го, 6-го, 7-го спектров, так как резатель работает в расходящемся пучке (F/31) и имеет вполне определенные геометрические размеры. Эффект переналожения спектров можно исключить, уменьшив высоту входной диаграммы, но это уменьшает количество света, попадающего в спектрограф.

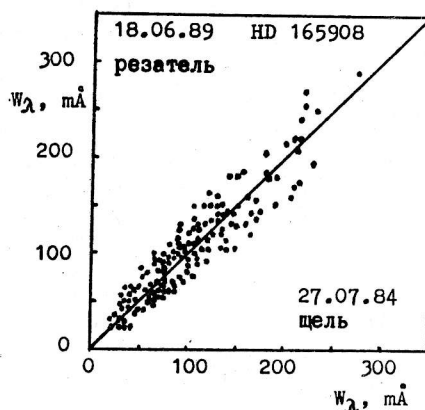
2. а) Применение резателей с высокоэффективными диэлектрическими покрытиями позволяет увеличить световую эффективность спектрографа в 3.5 - 4.5 раза по сравнению с классической щелью. Суммарные потери света при этом определяются коэффициентом отражения покрытия, расходимостью пучка и качеством изображения звезды на входном окне резателя. По световой эффективности резатель САО сравним с резателями Вальравена и Боуэна-Вальравена, где для формирования каждого последующего среза используется эффект полного внутреннего отражения на границе 2-х сред и потери света составляют лишь 2 % на каждом отражении (Вальравен, 1972; Симонс и др., 1982). Резатель Ричардсона дает выигрыш по

свету в 2–3 раза по отношению к щели при работе с 4-мя срезами (Ричардсон и др., 1984; Грей, 1986). Первые варианты резателей на основе волоконных световодов пока ненамного (35 %) превосходят по световой эффективности классическую щель (Феленбок и др., 1988).

б) При работе в фотографическом варианте регистрации спектров использование резателя в случае камеры N 2 ОЗСП позволяет увеличить проникающую способность на 1 – 1.5 звездные величины. Суть этого выигрыша состоит в следующем: как правило, для увеличения отношения сигнал/шум при наблюдениях с классической щелью спектр уширяют по высоте (до 0.6 мм), вводя за щелью качающуюся плоскопараллельную пластину (расширитель спектра). Этот прием обеспечивает необходимую фотометрическую точность. Применение резателя позволяет суммарно получить несколько большую высоту спектра без расширения (см. табл. 1). Таким образом, выигрыш по свету (в звездной величине) соответствует выигрышу при регистрации нерасширенного и расширенного спектра при работе с классической щелью, а соответствующая расширенному спектру фотометрическая точность при работе с резателем обеспечивается за счет суммирования интенсивностей отдельных спектров. В рамках наших исследований с резателем изображений получен спектр F сверхгиганта UU Herculus ($V=9.3^m$) с обратной дисперсией $14 \text{ \AA}/\text{мм}$ в диапазоне $\lambda\lambda 5100\text{--}6800 \text{ \AA}$ (эмульсия 103 аF) за 2 часа экспозиции. Предельная звездная величина в этом варианте, для которой может быть получен расширенный спектр с классической щелью, составляет $V=7.4^m$ за 1 час экспозиции (Бикмаев и др., 1986).

На рис. 2 показано сравнение эквивалентных ширин линий для звезды HD 165908 (99 Her), спектры которой получены с резателем изображений и классической щелью с дисперсией $9 \text{ \AA}/\text{мм}$ в синей области. В обоих случаях использовано по одной спектрограмме. Видно, что систематических различий в эквивалентных ширинах нет. Эпохи наблюдений при этом отличаются на 5 лет, т.е. рис. 2 подтверждает также стабильность фотометрической калибровки спектров ОЗСП. Вся спектрофотометрическая обработка вплоть до определения эквивалентных ширин линий выполнена в диалоговом режиме на базе системы "Спектр" (Назаренко, 1990 смотри настоящий том).

Рис. 2. Сравнение эквивалентных ширин линий звезды HD 165908, спектры которой получены с классической щелью и с резателем изображений на камере N 2 с дисперсией $9 \text{ \AA}/\text{мм}$ в синей области спектра. В обоих случаях использовано по одной спектрограмме.



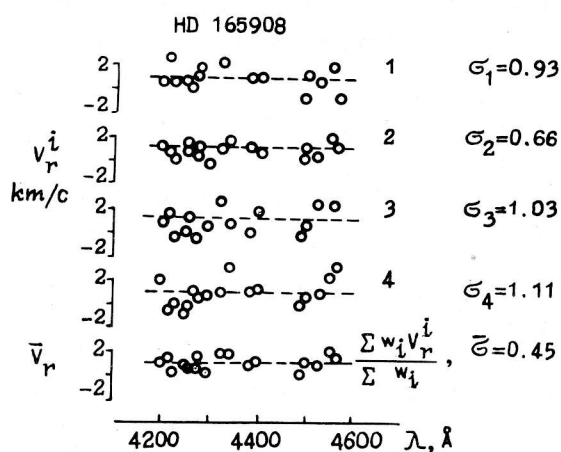


Рис. 3. Результаты измерения лучевых скоростей для звезды HD 165908 по спектру, полученному с резателем изображений (9 Å/мм). При усреднении использованы независимые измерения положений линий в 4-х спектрах. В нижней части рисунка показан результат усреднения с учетом веса каждого спектра. σ_i - среднеквадратичная ошибка определения лучевой скорости в км/с. $W_i = 1/\sigma_i^2$ - вес измерения в соответствующем спектре.

На рис.3 показан пример измерения лучевых скоростей для звезды HD 165908. Как и при спектрофотометрической обработке, определение лучевой скорости предполагает соответствующее суммирование позиционных измерений, выполненных по отдельным спектрам. Небольшие систематические различия в V_r между отдельными спектрами исключены введением поправок, полученных по измерениям лучевых скоростей звезд-стандартов. Видно, что после суммирования измерений по отдельным спектрам, точность определения лучевой скорости становится сравнимой с аналогичными определениями по уширенным спектрам, полученным с классической щелью. Позиционные измерения выполнены на лазерном компараторе, созданном сотрудниками САО Э. Б. Гагуром, И. Д. Найденовым, С. В. Драбеком на основе двухкоординатного измерительного прибора ДИП-1.

в) В случае длиннофокусной камеры N 1 применение резателя позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счет одновременной регистрации 4-5 спектров высотой 0.8 мм (без расширения). Особенно полезным это может оказаться при составлении атласов звезд, где для обеспечения высокой фотометрической точности необходимо получить большое количество спектрограмм. В качестве иллюстрации на рис. 4 показан участок спектра дневного неба (район линии Sr II 4215 Å), зарегистрированный фотографически с резателем изображения с обратной дисперсией 1.8 Å/мм. На рис. 4а приведен фотометрический разрез первого спектра, что соответствует обычному варианту с классической щелью. На рис. 4б показан результат усреднения по 5 спектрам, зарегистрированным одновременно с помощью резателя изображений. Стрелками отмечен ряд деталей, которые выделились над уровнем шумов после усреднения и отождествлены по Льежскому атласу Солнца (Дельбуиль и др., 1973). Деталь N 1 (Fe I 4212.08 Å) имеет эквивалентную ширину $W_\lambda = 8 \text{ mÅ}$.

Особенно перспективным мы считаем использование резателей на камере N 1 в сочетании с современными двумерными светоприемниками (ПЗС-матрицей, телевизионной системой счета фотонов). Если в случае классической щели один спектральный элемент занимает около 30-ти пространственных элементов светоприемника по высоте, то при использовании резателя эта величина возрастает до 150, что позволяет:

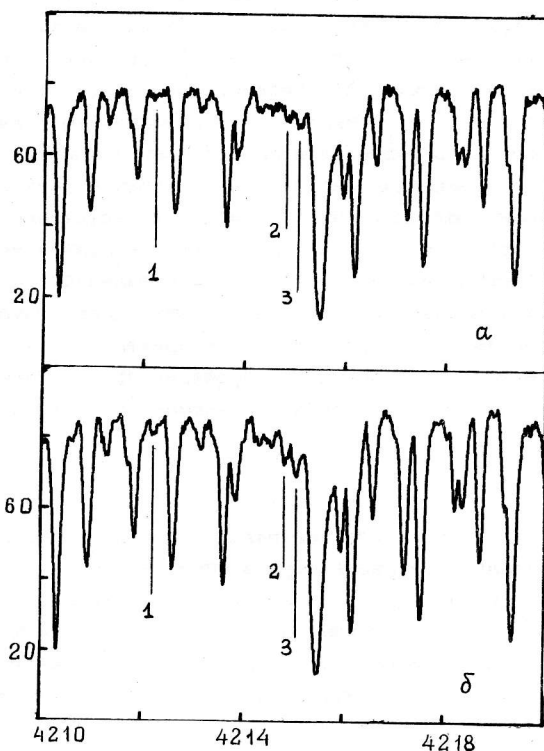
- соответственно увеличить отношение сигнал/шум или проникающую способность

при заданном отношении сигнал/шум;

– более эффективно использовать рабочую площадь светоприемника и не терять спектральную информацию из-за локальных дефектов приемника и попадания космических частиц.

Рис. 4. Спектр дневного неба, зарегистрированный фотографически с резателем изображений на камере N 1 ($D = 1.8 \text{ \AA}/\text{мм}$). Абсцисса – длина волны в Ангстремах, ордината – относительные интенсивности.

а) фотометрический разрез первого спектра – аналог спектра, получаемого с классической щелью; б) результат усреднения по 5 спектрам, зарегистрированным одновременно. Деталь N 1 ($\text{Fe I } 4212.03 \text{ \AA}$) имеет эквивалентную ширину $W = 8 \text{ м\AA}$.



При работе с фотоэлектрическими приемниками появляется возможность регистрировать спектр сравнения, используя основной "звездный" канал резателя изображений. Это позволит учитывать возможные систематические различия в лучевых скоростях между отдельными спектрами без специального привлечения спектров звезд-стандартов лучевых скоростей.

3. Характерной особенностью резателей Боуэна и Вальравена является то, что линия, на которой фокусируются пучки света после выхода из резателя, лежит под углом 45° по отношению к фокальной поверхности зеркала коллиматора. В результате, в фокусе оказывается лишь один из спектров (Вальравен, 1972; Симонс и др., 1982; Ричардсон и др. 1984), для остальных наблюдается потеря спектрального разрешения. Поэтому применение резателей Боуэна, Вальравена и их модификаций оказывается неоптимальным в тех задачах, где требуется предельно высокое спектральное разрешение – лучшее, чем 0.1 \AA (Ричардсон и др., 1984; Грей, 1986).

Резатель Ричардсона лишен этого недостатка, так как его выходная щель практически параллельна фокальной поверхности коллиматора (Ричардсон, 1972; Ричардсон и др., 1984). Резатель SAO занимает некоторое промежуточное положение: плоскость зеркал 1, 2 (рис. 1) лежит под углом $\alpha \approx 10^\circ - 15^\circ$ к

фокальной поверхности коллиматора, этот угол существенно меньше, чем в случае резателей Боуэна и Вальравена.

Чтобы оценить изменение спектрального разрешения от спектра к спектру в нашем случае, мы выполнили измерения центральных глубин у группы неблендированных линий в спектрах звезд классов F, G, K, исходя из постоянства эквивалентной ширины линии. Непосредственные измерения полуширин линий не позволяют выполнить корректные определения, так как эффект лежит внутри ошибок измерения полуширин. Наличие механизма фокусировки коллиматора позволяет выбрать такое оптимальное положение коллиматора, при котором изменение спектрального разрешения от спектра к спектру становится минимальным. В табл.2 приведены результаты измерений центральных глубин линий для 2-х положений коллиматора (назовем их оптимальным и неоптимальным) в случае резателей камер N 1 и N 2. Результаты измерений, усредненные по группе линий, приведены в процентах к центральной глубине линий в первом спектре (100 %). Небольшие изменения в центральных глубинах, которые мы связываем с изменениями в спектральном разрешении, характеризуют конкретные варианты резателей, используемых в настоящее время. Часть эффекта, возможно, связана с внеосевой схемой установки коллиматора в случае ОЗСП БТА (Копылов и Рылов, 1979).

Таблица 2. Изменения центральных глубин линий в процентах к центральной глубине в первом спектре (см. текст)

N спектра	камера N 1		камера N 2	
	F кол. неоптим.	F кол. оптим.	F кол. неоптим.	F кол. оптим.
1	100	100	100	100
2	119	109	126	111
3	114	111	139	124
4	141	114	143	116
5	148	115	120	101

Неоптимальным в случае резателя Ричардсона, по-видимому, является то обстоятельство, что для формирования спектра от каждого среза используется лишь часть поверхности (20-25 %) дифракционной решетки (Ричардсон, 1968; Ричардсон, 1972; Ричардсон и др., 1984), что может ухудшать спектральную чистоту по сравнению с классической щелью.

В случае резателей с волоконными световодами потери разрешения могут происходить из-за сложности идентичной юстировки выходных концов световодов, образующих "щель" спектрографа (д'Одориго и др., 1989).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-видимому, резатель изображений, разработанный в САО, наиболее оптимально сочетает в себе простоту конструкции и изготовления, высокую световую эффективность, минимум дополнительных аберраций. Отличительной особенностью, важной на практике, является возможность настраивать резатель непосредственно в схеме спектрографа.

Данная конструкция резателя может быть использована как на других спектрографах БТА, так и на спектрографах других телескопов.

Авторы благодарят В. Е. Панчука за помощь в работе и советы, В. Г. Ключкову и В. Л. Афанасьева – за полезные обсуждения и консультации, ответственного астронома БТА Л. И. Снежко – за выделение части технического времени 6-м телескопа для исследования резателей изображений. Считаем необходимым отметить, что успех работы в большой степени определился исключительно высоким уровнем изготовления оптических деталей резателя Е. И. Перепелицыным. Механическая часть была выполнена сотрудниками макетных мастерских САО. Всем им авторы выражают искреннюю благодарность. Авторы благодарят также В. Г. Елькина за помощь в наблюдениях в ряде технических ночей.

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьев В.Л., Гажур Э.Б., Панчук В.Е.: 1986, Бюлл. "Открытия, изобретения", авт. свид. No. 1236325, 21, С. 172.
- Боуэн (Bowen I.S.): 1938, *Astrophys. J.*, 88, No. 2, P. 113-124.
- Боуэн И.С.: 1967, *Спектрографы. Методы астрономии*, под ред. В. А. Хильтнера, М.: Мир, С.37.
- Бикмаев И.Ф., Ключкова В.Г., Панчук В.Е.: 1986, *Астрофиз.исслед.* (Изв. САО), 23, С.117-125.
- Вальравен (Walraven J.H., and Th.): 1972, *ESO/CERN conference on auxiliary instrumentation for large telescopes*, eds.: S.Laustsen and A.Reiz, Geneva, P.175-183.
- Гажур Э.Б., Найденов И.Д., Панчук В.Е., Перепелицын Е.И.: 1986, *Астрофиз. исслед.* (Изв.САО), 23, С. 105-110.
- Грей (Gray D.F.): 1986, *Instrumentation and research programmes for small telescopes*, eds.:J.V. Hearnshaw and P. L. Cottrel, D. Reidel, P. 401-412.
- Дельбуиль и др. (Delbouille L., Neven L., Roland G.): 1973, *Photometric Atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000 Å.* – Liege.
- Копылов И.М., Рылов В.С.: 1979, *Новая техника в астрономии*, вып.6, Л: Наука, С.24-35.
- Назаренко А.Ф.: 1990, *Астрофиз. исслед.* (Изв.САО), 32 (наст. том).
- д'Одориго и др. (D'Odorico S., Avila G., Molaro P.): 1989, *ESO Messenger* No. 58, P.58-60.
- Пирс (Pierce A.K.): 1965, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 77, No. 456, P.216-217.
- Ричардсон (Richardson E.H.): 1966, *Publ. Astron Soc. Pacif.*, 78, No. 464, P. 436-437.
- Ричардсон (Richardson E.H.): 1968, *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, 62, No. 6, P. 313-330.

Ричардсон (Richardson E. H.): 1972, ESO/CERN conference on Auxiliary instrumentation for large telescopes, eds.: S. Laustsen and A. Reiz, Geneva, P.275-284.

Ричардсон и др. (Richardson E. H., Fletcher J.M., Grundmann W. A.): 1984, Very large telescopes, their instrumentation and Programmes, IAU Colloquium No. 79, eds.: M.-H. Ulrich, K. Kjar, Garching by Munchen, P. 469-492.

Симонс и др. (Simmons J.E., Drake R.M., Hepburn L.V.): 1982, Proceedings of SPIE, v. 331, Instrumentation in Astronomy IV, P. 427-432.

Феленбок и Герин (Felenbok P., Guerin J.): 1988, The impact of very high S/N spectroscopy on stellar physics, Proceedings of IAU Symp., 132, eds.: G. Cayrel de Strobel and M. Spite, Dordrecht, Netherlands, P. 31-34.

Поступила в редакцию
7 декабря 1989 г.