

КОНЦЕПЦИЯ АСТРОСПЕКТРОСКОПИИ НА БТА

В. Г. Ключкова, В. Е. Панчук

Анализируется потенциальное качество спектральных приборов БТА, ориентированных на изучение спектров звезд. Кратко охарактеризована степень использования потенциального качества штатных спектральных приборов. Показано, что оснащение этих приборов современными светоприемниками привело к существенным потерям информационного потенциала БТА при реализации задач исследования звезд с высоким спектральным разрешением.

Рассмотрена задача: как, не выходя за рамки семейства приборов на основе дифракционных решеток, реализовать предельное потенциальное число одновременно регистрируемых спектральных элементов при условии минимизации потерь света, собранного 6-м зеркалом. Сообщается о создании автоколлимационного эшелле-спектрометра ЭСПАК, обеспечивающего одновременную регистрацию 30-ти спектральных порядков с $D = 5.5 - 2.5$ А/мм. Предложена схема светосильного (1:2) автоколлимационного эшелле-спектрометра с рекордным значением диаметра коллимированного пучка (300 мм). Эти две эшелле-системы могут быть положены в основу двухлучевого спектрального комплекса высокого разрешения ($\lambda/\Delta\lambda$ до 10^5), размещенного на БТА стационарно.

Предлагается схема двухлучевого комплекса умеренного спектрального разрешения. В состав комплекса входят эшелле-спектрометр Зебра и светосильная камера Шмидта (1:1), работающая в схеме Основного звездного спектрографа в сочетании с ПЗС-матрицей, встроенной внутри камеры.

Все параметры, характеризующие потенциальное качество предлагаемых систем высокого и умеренного спектрального разрешения, ориентированных на стационарное размещение на БТА, находятся на рекордном уровне.

Potential quality of spectral devices of the 6-m telescope intended for study of stellar spectra is analysed. A degree of application of potential quality of permanent spectral devices is briefly characterized. It is shown that the coupling of these devices with the modern sensors has led to essential losses of information potential of the 6-m telescope while solving the problems of investigation of stars with high spectral resolution.

The following problem is considered: how to realize the maximum potential number of simultaneously registered spectral elements at minimum losses of the light gathered with the 6-m telescope using only the reliable of devices with various diffraction gratings. It is reported on the construction of autocolli-

mated echelle-spectrometer ESPAC which secures the registration of 30 spectral orders with $D = 5.5-2.5\lambda/\text{mm}$. A scheme of the lightpower (1:2) autocollimated echelle-spectrometer with a record value of the collimated beam diameter (300 mm) is presented. The both echelle systems may be the base of the two-beam spectral complex of high resolution ($\lambda/\Delta\lambda$ up to 10^5), which can be installed at the 6-m telescope permanently.

A scheme of the two-beam complex of moderate spectral resolution is suggested. The complex includes the echelle-spectrometer Zebra and the lightpower Schmidt camera (1:1) which operates with the Main Stellar Spectrograph and CCD matrix installed inside the camera.

All the parameters, characterising the potential quality of the suggested systems of high and moderate spectral resolution oriented for stationary mounting at the 6-m telescope, are on the record level.

ВВЕДЕНИЕ

С конца 60-х годов развитие классических спектрографов с дифракционными решетками оказалось под сильным влиянием повышенного спроса на спектроскопию слабых объектов. До тех пор, пока этот спрос удовлетворялся в пределах задач классификации объектов или задач получения первой спектральной информации относительно объектов неизвестной природы, развивалась классическая схема дифракционного спектрографа со значительным углом между осью коллиматора и осью камеры. В последнее десятилетие улучшение информационных характеристик этой схемы шло по пути увеличения числа одновременно регистрируемых объектов, так как ресурсы оптимизации схемы однообъектного спектрографа были уже исчерпаны. Действительно, увеличение светосилы камеры Шмидта-Кассегрена приводит к увеличению угла между осями камеры и коллиматора, т.е. к увеличению потерь за счет уменьшения эффективной площади штриха решетки. Кроме того, увеличение светосилы в значительной мере компенсируется потерями на центральном экранировании диспергированного пучка вторичным кассегреневским зеркалом (или отверстием в ломающем плоском зеркале, если камера построена по схеме "ломаный Шмидт"). Дальнейшее развитие метода одновременной спектроскопии большого числа слабых объектов идет за счет развития схемы спектрографа "прямого зрения" с линзовым коллиматором и прозрачными решетками. Эти общие соображения мы приводим здесь с целью подчеркнуть, что в эволюции спектральных систем, ориентированных на спектроскопию с низким и высоким разрешением, обозначилось разветвление путей развития. Как будет показано ниже, методика получения спектров высокого разрешения также отошла от классической схемы спектрографа фокуса Кудэ. Такое разветвление идеологии развития спектральной аппаратуры больших телескопов не проявилось, естественно, в схемах штатных спектрографов БТА, которыми телескоп был оснащен в начале 70-х годов (Васильев и др., 1977; Гусев и др., 1976; Зандин и др., 1977 а, б).

Изложение построим по следующей схеме: сначала оценим информационные характеристики штатных спектрографов БТА и выявим степень применимости разных технических решений, затем проанализируем возможности эшелле-спектроскопии в задаче повышения потенциального качества спектрометров и попытаемся оценить соотношение различных видов спектральных наблюдений в ближайшем будущем.

Напомним (Миберн, 1979), что потенциальным качеством спектрального прибора данного класса называется произведение светосилы по потоку L , разрешающей способности R , фактора спектральной одновременности M_λ и квантовой эффективности Q . Так как речь пойдет о спектроскопии точечных объектов, не будем рассматривать фактор числа одновременно спектрофотометрируемых элементов протяженного источника - M_θ .

1.1. РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ НА ОСНОВНОМ ЗВЕЗДНОМ СПЕКТРОГРАФЕ БТА

ОЗСП БТА был единственным спектральным прибором, размещенным на телескопе стационарно (Васильев и др., 1977). Рассмотрение потенциального качества спектрального прибора начнем с камеры №2, так как эта камера Шмидта с $F=600$ мм оказалась наиболее удачной и с ее помощью на ОЗСП получено несколько тысяч спектрограмм. С целью привязки информационных способностей ОЗСП к эшелле-спектрометру Зебра (Гажур и др., 1990) в качестве исходного варианта примем вариант наблюдений на ОЗСП с камерой № 2 при работе в первом порядке дифракционной решетки с углом блеска 8° (вариант 7 в табл. 1 из работы Бикмаева и др., 1986). Обратная дисперсия при 600 штр/мм составляет при этом 28 А/мм, что близко к параметрам спектрометра Зебра. Нормируем потенциальное качество указанного варианта: $L \times R \times M = 1$. Так как все наблюдения в этом варианте мы выполняли с нормальной шириной щели 0.45 угл.сек, условимся, что в пределах фотографического метода реализованное качество ОЗСП близко к потенциальному для данного типа наблюдений. При таких предположениях в пространстве L, R, M_λ вариант обозначен точкой с координатами (1;1;1) (см. рис. 1).

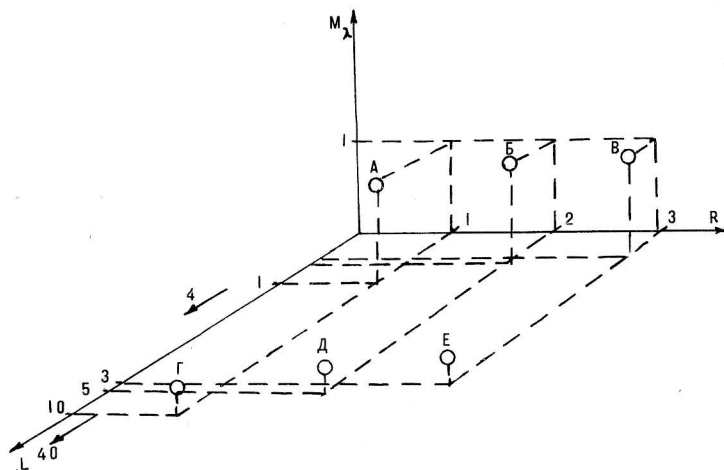


Рис. 1. Параметры потенциального качества камер ОЗСП, имеющих относительное отверстие (1:2). Обозначения: А, Б, В - камера Шмидта №2 с фотографической регистрацией, обратная линейная дисперсия 28, 14 и 9 А/мм соответственно, Г, Д, Е - камера с внешним фокусом, оснащенная счетчиком фотонов. Стрелкой указан выигрыш в светосиле по потоку, обеспечиваемый применением резателей изображения.

Так как все остальные варианты наблюдений с камерой № 2 реализуются с этой же шириной входной щели и величина расширения спектра всюду максимальна, а применение порядкоразделительных фильтров уменьшает светосилу по потоку незначительно, то различие других вариантов использования камеры при работе во втором и третьем порядках приближенно можно свести к различиям в светосиле и разрешающей способности, определяемым изменением обратной дисперсии. При этом координата R увеличивается настолько, насколько уменьшится светосила по потоку L , а произведение $L \times R$ сохранится (принцип Жакино). Различие вариантов по числу одновременно передаваемых элементов на поле камеры длиной 130 мм определяется различиями кривых спектральной чувствительности фотозумульсий, этим эффектом можно пренебречь, если учесть результаты работы Бикмаева и др. (1986) по оптимизации вариантов для регистрации спектров звезд конкретных спектральных классов. Показано (Бикмаев, Гажур, 1990), что разработанные в САО резатели изображения несущественно понижают разрешающую способность, поэтому применение резателей изображения при условии заданного отношения "сигнал/шум" на итоговом суммарном спектре можно отобразить на рис. 1 перемещением точек вдоль оси L на величину среднего выигрыша по потоку, приблизительно в 4 раза (Бикмаев, Гажур, 1990).

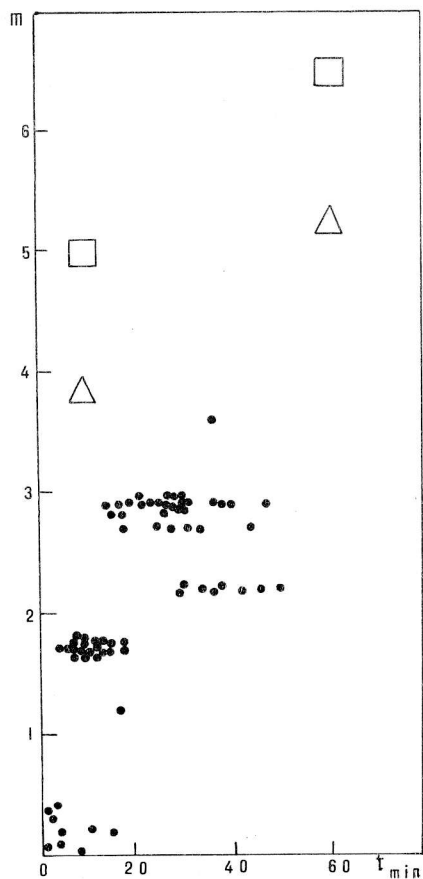


Рис. 2. Проницающая способность камеры № 1 ОЗСП до реконструкции. Обозначения: точки - характеристики отдельных экспозиций; квадраты и треугольники - теоретическая оценка проницающей способности в цвете V и V' , соответственно.

Длиннофокусная камера № 1 была ориентирована на исследования ярких звезд с предельно большим числом одновременно передаваемых элементов спектра. С этой целью кроме большого поля (до 1000 мм) была реализована схема работы со скрещенной дисперсией в низких порядках (Пейсахсон, 1970). Уже при первых испытаниях ОЗСП обнаружилось расхождение результатов наблюдений с теоретическими оценками (Рылов, 1970) проникающей способности. До реконструкции камеры № 1 (Гажур и др., 1986), выполненной с целью увеличения проникающей способности, было получено всего около 70 спектрограмм, соответствующие сведения по данным архива наблюдений на БТА приведены на рис.2. Из рис. 3 можно получить представление о средней проникающей способности Кудэ-спектрографов тех телескопов, на которых были выполнены массовые работы по спектроскопическому определению металличности звезд разных типов. Эта информация получена нами при анализе около 300 работ, цитированных в каталоге спектроскопических определений металличности (Керель и др., 1985). Из этих работ, выполненных с хорошим спектральным разрешением, мы собрали сведения об использованных вариантах наблюдений, что позволило впоследствии выполнить исследование методических ошибок спектrophотометрических наблюдений.

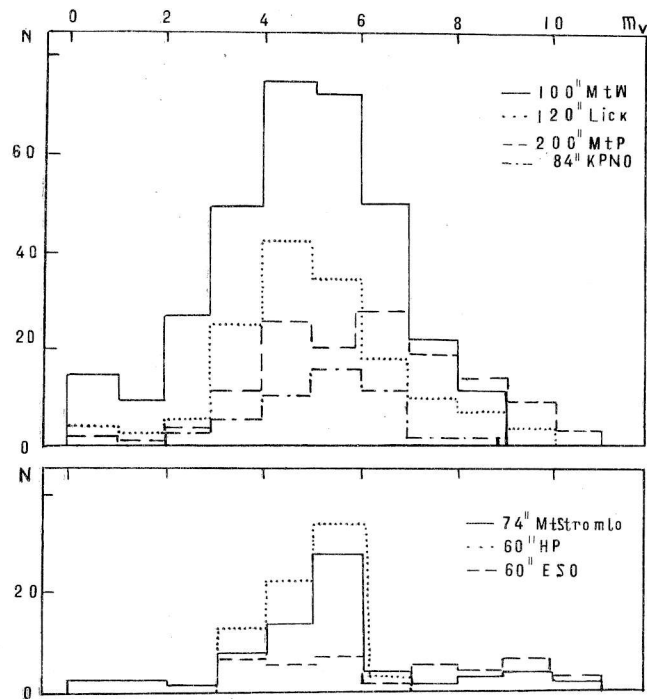


Рис. 3. Распределение числа спектров, полученных с целью исследования химического состава звездных атмосфер, от звездной величины. Спектрографы Кудэ, фотографическая регистрация. (Аналогичные гистограммы для ОЗСП см. на рис. 7 в работе Бикмаева и др., 1986).

Сравнение рис.2 и рис.3 показывает, что стремление реализовать рекордное для Кудэ-систем значение M_{λ} за счет схемы скрещенной дисперсии с использованием низких спектральных порядков резко понизило реальную светосилу системы по потоку. Действительно, реальная светосила может сильно отклоняться от геометрической, если применяется неклассическая схема работы длиннофокусной

камеры. В классической схеме для камер с $F = 3000$ мм часто реализуется вариант, в котором кассета не виньетует диспергированный пучок. В камере № 1 величина разведения спектральных порядков большая, это определяется тем, что вдоль порядка с низким номером длина волны сильно изменяется, и порядки расположены "веером". Отсюда большой размер фотопластины поперек основной дисперсии и большие потери света на центральном экранировании кассетой. К числу других недостатков отнесем потерю ультрафиолетового порядка из-за поглощения в менисковом корректоре камеры (на Западе камеры с $F = 3000$ мм используются без корректора!) и невозможность получить рабочие значения фотографической плотности сразу в трех спектральных порядках для большинства спектральных классов. Следовательно, формально высокое значение M_λ , превосходящее типичные значения Кудз-спектрографов за счет числа порядков, регистрируемых одновременно, не реализовывалось практически. Остальные недостатки камеры № 1 перечислены в работе Гажура и др. (1986), там же указаны преимущества измененной схемы камеры.

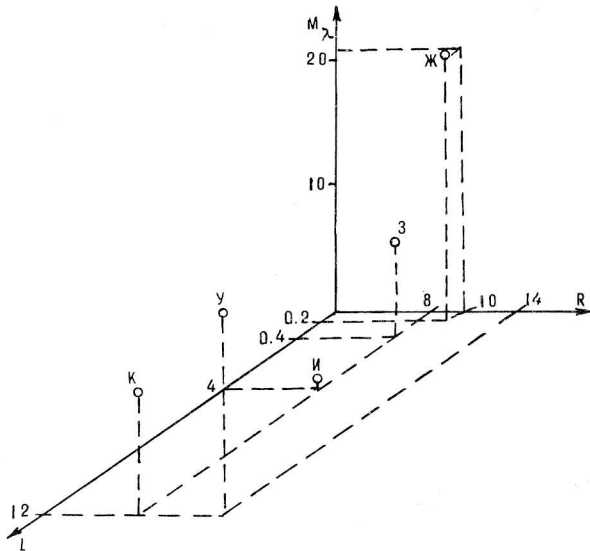


Рис. 4. Параметры потенциального качества спектрометров БТА. Обозначения: Ж - камера №1 до реконструкции, фотографическая регистрация (значение по координате M_λ не реализуется, см. текст), 3 - камера №1 после реконструкции, фотографическая регистрация, И - счетчик фотонов на камере №1, К - автоколлимационный эшелле-спектрометр ЭСПАК со счетчиком фотонов, У - светосильный эшелле-спектрометр высокого разрешения со счетчиком фотонов.

После реконструкции камеры №1 ее светосила по потоку возросла (Бикмаев и др., 1986), и потенциальная разрешающая способность, так и не реализованная из-за позиционных нестабильностей ОЗСП (Бикмаев и Панчук, 1986) и отсутствия программы борьбы с нестабильностями, понизилась (так как потенциальная разрешающая способность прежнего варианта определялась при условии "абсолютно жесткого" спектра). Понизилось также и потенциальное число передаваемых элементов, принципиально не реализуемое в схеме скрещенной дисперсии из-за

низкого динамического диапазона фотоэмульсии. Ситуация отражена на рис. 4, где показано положение потенциальных характеристик камеры № 1 до и после реконструкции.

Для ОЗСП БТА была разработана также камера Шмидта № 3 ($F = 300$ мм). В отличие от камеры № 2, работающей с единственной коррекционной пластинкой, камера № 3 снабжена четырьмя сменными пластинами, обеспечивающими коррекцию сферической аберрации в шести диапазонах спектра. При смене рабочего диапазона следует также изменить наклон фокальной плоскости и ее расстояние от зеркала камеры, расстояние между фокальной плоскостью и полеспрямляющей линзой также изменяется. Кроме этих эксплуатационных неудобств камера оказалась очень чувствительной к ошибке коллимации, возникающей при смене коррекционных пластин во время наблюдений. Величина аберрации вследствие ошибки коллимации пропорциональна элементу разрешения и квадрату светосилы, отсюда следует, что допустимые смещения корректоров камеры № 3 не должны превосходить 0.2 мм, тогда как единственный корректор камеры № 2 должен быть один раз установлен с точностью положения оси не хуже 0.8 мм. В итоге при работе с камерой № 3 оказалось невозможным выполнять смену рабочего диапазона в течение ночи без существенной потери наблюдательного времени. Тем не менее оценим потенциальное качество ОЗСП при работе с камерой № 3.

Таблица 1. Размеры рабочего поля ℓ (мм) при использовании камеры ОЗСП № 3 с разными коррекционными пластинами Шмидта. А-Г - обозначения пластин, ψ - угол блеска используемой решетки, D - обратная линейная дисперсия (А/мм), λ_c - центральная длина волны

	ψ	D	фильтр	эмульсия	ℓ	λ_c
А	12°	28	-	IIaO	12.5	3700
Б	17°	28	БС-10	IIaO	28.0	4300
В	17°	28	ЖС-16	103aD	37.5	5400
В	25°	28	ЖС-17	103aF	21.5	6200
Г	12°	56	КС-15	IN	29.0	7600
Б	8°	56	-	IIaO	25.0	4200
В	8°	56	ЖС-17	103aF	25.0	6200

Анализ точечных диаграмм и практическая работа показали, что даже при идеальном положении коррекционной пластины характеристики комы резко ограничивают размер требуемого (50 мм) поля хороших изображений. В табл. 1 приведены значения длины рабочего поля, соответствующие максимальной величине элемента разрешения, не превосходящей 0.03 мм при обратной дисперсии 28 А/мм. Для оценки M_λ размеры рабочего поля примем неизменными от диапазона к диапазону, ширина входной щели всюду равна 1.0 угл. сек, т.е. светосила по потоку для всех вариантов с $D = 28$ А/мм также принята одинаковой, а величина разрешающей способности оценена снизу из условия, что кружок рассеяния не превышает 0.03 мм. На рис. 5 приведены потенциальные характеристики камеры № 3.

На рис. 6 сведены характеристики как реализованных (камеры № 1 и № 2), так и потенциально возможных (камера № 3) вариантов наблюдений на ОЗСП. Приходим к выводу, что в пределах схемы ОЗСП невозможно реализовать увеличение числа одновременно регистрируемых элементов спектра без существенной потери в

величине светосилы по потоку. Общее увеличение светосилы по потоку может осуществляться путем широкого применения резателей изображения, а также за счет применения дифракционных решеток с увеличенными размерами заштрихованной части, когда будет использоваться весь диаметр коллимированного пучка (260 мм). В настоящее время работа идет с решетками 200×300 мм, и расширение набора вариантов наблюдений на ОЗСП (Бикмаев и др., 1986) неизбежно привело к потерям доли коллимированного пучка и за счет недостаточной длины заштрихованной области. Необходимо отметить, что переход на решетки больших размеров целесообразен лишь в том случае, если при технологии изготовления решеток будут сохранены высокие значения концентраций света в рабочих порядках (иначе большие затраты на увеличение рабочей поверхности решеток не приведут к запланированному выигрышу в светосиле по потоку).

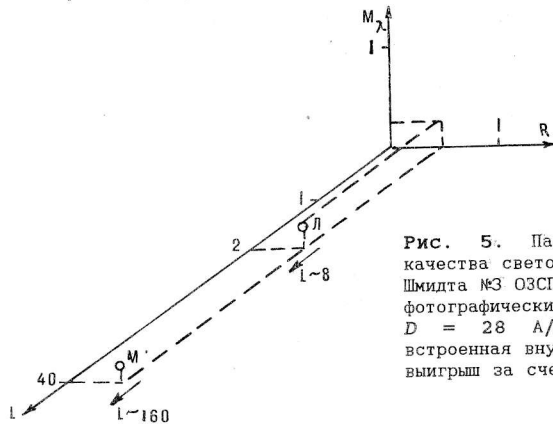


Рис. 5. Параметры потенциального качества светосильной (1:1) камеры Шмидта №3 ОЗСП. Обозначения: Л - фотографический вариант регистрации, $D = 28$ А/мм, М - ПЗС-матрица, встроенная внутри камеры. Стрелки - выигрыш за счет применения резателя.



Рис. 6. Реализованные - ● и возможные - ○ параметры потенциального качества ОЗСП. Обозначения: А, Б, В - камера №2, 3 - камера №1, фотографическая регистрация, И - счетчик фотонов на камере №1, Г, Д, Е - счетчик фотонов на камере с внешним фокусом (1:2), Л, М - камера №3, фотографический и ПЗС-варианты, соответственно.

Проблематичной является также задача оснащения ОЗСП светоприемниками с принципиально более высокими значениями квантовой эффективности Q . Основная трудность состоит в том, что применение крупногабаритных счетчиков фотонов

возможно только в сочетании со светосильной камерой с внешним фокусом, но здесь мы столкнемся с габаритными ограничениями, определяемыми тем, что камера разрабатывалась под применение более короткого светоприемника (ЗОП с фотографической регистрацией), либо в сочетании с длиннофокусной камерой при дополнительном изломе ее оптической оси. В обоих случаях не удается удержаться на значениях M_λ , реализованных для фотографического метода регистрации (так как размеры поля светоприемника существенно меньше потенциального рабочего поля камер с относительным отверстием 1:11 и 1:2). В качестве примера рассмотрим итог реализованного нами эксперимента по применению двумерного счетчика фотонов на камере № 1.

На рис. 7 показана оптическая схема эксперимента, на рис. 8 приведен образец спектра. Из рис. 8 видно, что точность регистрации спектров, обеспечиваемая хорошими фотометрическими характеристиками счетчика, может быть утеряна на этапе обработки за счет неуверенного проведения уровня непрерывного спектра по небольшому участку блендированного линиями спектра.

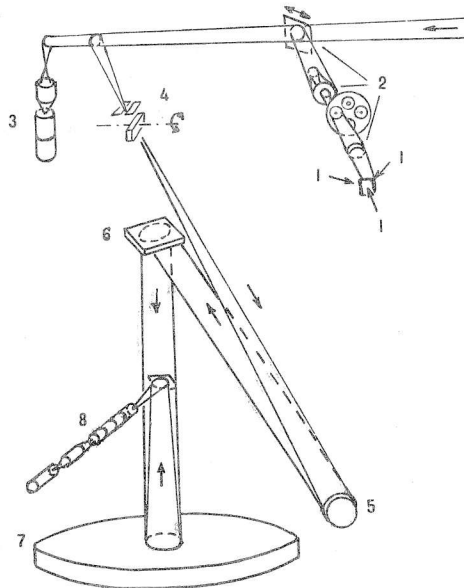


Рис. 7. Счетчик фотонов, установленный на камере № 1. Обозначения: 1 - источника непрерывного и линейчатого спектра сравнения, 2 - оптика искусственной звезды, 3 - телевизионный подсмотр, работающий через светоделитель, 4 - щелевая часть ОЗСП с расширителем спектра, выделяющим рабочий порядок, 5 - коллиматор ОЗСП, 6 - дифракционная решетка, 7 - оптика камеры № 1, показана рабочая зона зеркала камеры, 8 - светоприемник (ЗОП, оптический перебор, ТВ-трубка).

Метод синтетических спектров, где положение континуума вычисляется, также непригоден в качестве вспомогательного инструмента при обработке таких фрагментов, так как для своей реализации требует дополнительной информации о спектре, рассредоточенной по другим, одновременно не регистрируемым фрагментам спектра. Ситуация принципиально не изменится, если вместо счетчика фотонов на камере № 1 применить ПЗС-матрицу, просто в этом случае несколько улучшится параметр R (за счет "жесткого" светоприемника), что может быть скомпенсировано позиционными нестабильностями. Очевиден выигрыш в Q за счет улучшения шумовых характеристик при переходе на ПЗС-матрицу. Подчеркнем, что высокая точность астрофизического результата при этом может быть реализована только в узком классе неперегруженных линиями спектров (но даже в случае В-звезд будут проблемы, см. рис. 8). Таким образом приходим к выводу, что число одновременно регистрируемых деталей спектра должно быть существенно меньше потенциального числа, определяемого из длины регистрируемого фрагмента

и разрешающей способности. Для того, чтобы нанести данный наблюдательный вариант на рис. 4, сделаем два упрощения. Первое состоит в предположении эквивалентности характеристик L и Q , если речь идет о регистрации спектров линейным светоприемником до заданного отношения "сигнал/шум". В этом случае выигрыш в квантовой эффективности за счет перехода от фотопластинки к счетчику фотонов можно отобразить смещением области, занимаемой вариантами использования камеры, вдоль оси L . Второе упрощение состоит в оценке самой величины выигрыша, которую чисто условно примем равной 10, так как данная работа не является очередной попыткой теоретического вычисления проникающей способности спектральных приборов. Так же формально выигрыш в результате применения ПЗС-матрицы примем равным 20. Применение резателей изображения в комбинации со счетчиком фотонов или ПЗС-матрицей приведет к дополнительному увеличению качества по параметру L .

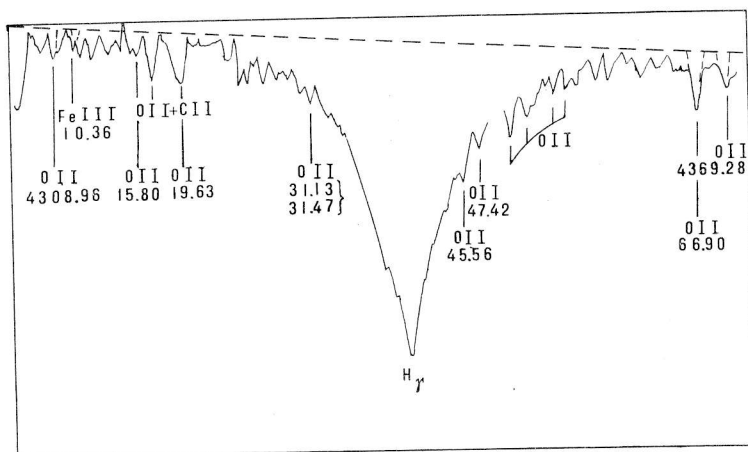


Рис. 8. Фрагмент спектра сверхгиганта класса В, зарегистрированный на камере № 1 со счетчиком фотонов. Пунктир - уровень непрерывного спектра.

Использование камеры с внешним фокусом может несколько улучшить характеристики ОЗСП по координате L за счет светосилы камеры (относительное отверстие 1:2 реализуется только после замены дифракционных решеток). Но по разрешающей способности мы во столько же раз проиграем согласно принципу Жакино. Применение резателей улучшит светосилу по потоку, оставляя R практически неизменным. Дополнительное (или независимое) улучшение светосилы по потоку можно обеспечить, изменяя масштаб оптического переброса изображения спектра с люминофора ЭОПа на телевизионную мишень. Размер рабочего поля камеры соответствует диаметру фотокатода ЭОПа счетчика и составляет 40 мм, при проекции изображения с люминофора на мишень с масштабом 1:1 мы теряем более 2/3 изображения. Если изображение спроецировать с уменьшением в 2-3 раза, то выполнение условия согласования проекции входной щели с размером двух каналов телевизионного счетчика позволит раскрыть щель в 2-3 раза. На такую же величину уменьшится R и увеличится длина одновременно регистрируемого диапазона длин волн. Следует сразу отметить, что такое решение сразу ограничит круг решаемых задач спектроскопии высокого разрешения, так как значения обратной линейной дисперсии, реализуемые на ОЗСП при работе со светосилой 1:2, не являются избыточ-

ными для таких задач. Ожидаемое положение параметров наблюдений на ОЗСП при помощи камеры с внешним фокусом дано на рис. 1, так как рассматриваемый вариант удобно сравнивать с камерой № 2, имеющей то же самое значение относительного отверстия.

Анализ рис. 1 и рис. 4 показывает, что адаптация ОЗСП под новые светоприемники не улучшит разрешающей способности R , резко снизит M_λ и приведет к существенному выигрышу в потенциальном качестве спектрометра за счет величины Q . При этом не гарантируется, что технологически достижимое более высокое отношение "сигнал/шум" приведет к такому же повышению точности измерения тех параметров линий, которые вычисляются с использованием информации о положении уровня непрерывного спектра.

Потеря элементов спектра, которые строит камера и не использует светоприемник, минимальна в случае оснащения камеры № 3 светоприемником, встроенным в центральное пятно диспергированного пучка, причем размер пятна определен диаметром кабины первичного фокуса. Диаметр криостата с ПЗС-матрицей не должен превышать 80 мм, что технологически допустимо. Такое решение в будущем должно стать типичным для систем с большим диаметром коллимированного пучка. Соответствующее положение рассматриваемого варианта дано на рис. 5 (еще раз подчеркнем, что при резком продвижении вдоль оси L за счет увеличения Q не происходит существенной потери потенциального качества прибора по параметру M_λ , так как за пределами светоприемника остается чуть больше половины поля с хорошими изображениями). Напомним, что величина позиционных нестабильностей ОЗСП пропорциональна фокусному расстоянию используемой камеры (Бикмаев и Панчук, 1986), т. е. в случае камеры № 3 эти нестабильности не повлияют на качество спектра. Фактор широкощельности равен 27, это предельное значение среди спектральных систем БТА, и применение резателя не является обязательным. В варианте работы с ПЗС-матрицей и с классической щелью 1 угл. секунда одновременно будет регистрироваться и спектр фона неба. Если решить проблему минимизации ошибки коллимации при смене коррекционных пластин, или остановиться на одном, наиболее оптимальном для сочетания с характеристиками ПЗС-матрицы диапазоне, рассматриваемый вариант может оказаться основным для развития наблюдательных возможностей в классе задач, решаемых сегодня на телевизионном сканере БТА. Мощность варианта можно дополнительно увеличить, если использовать резатель изображений (3-4 среза позволят работать без ощутимых потерь при диаметре изображений 3-4 угл. секунды и спектральном разрешении 1 Å). В этом случае фон неба можно вводить в один из оптических каналов, используемых в резателе изображений для одновременной регистрации реперного эмиссионного спектра (Афанасьев и др., 1986; Бикмаев и Гажур, 1990). Такая конфигурация позволит одновременно регистрировать три вида спектра (объект, фон неба, спектр сравнения) с итоговой широкощельностью для спектра объекта, достигающей 100!

1.2. РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ НА ПЛАНЕТНОМ СПЕКТРОГРАФЕ

Спектрограф СП-124 (Гусев и др., 1976) оснащен камерой $F = 640$ мм (1:8), что позволяло получать спектры высокого качества (разделение линий, расположенных на расстоянии 0.02 мм) по всему полю длиной 154 мм. Спектрограф

разрабатывался для исследования планетных атмосфер, поэтому его схема обеспечивала сохранение высокого качества спектра по всей высоте (45 угл. секунд) входной щели. Спектрограф был оснащен тремя дифракционными решетками, конструкция диспергирующего узла (Гусев, 1985) позволяла осуществить быструю смену вариантов работы, причем, как показали испытания спектрографа, механизм изменения рабочего угла позволял воспроизводить положение спектра с точностью до ширины изображения нормальной щели. Зеркальная оптика спектрографа позволяла работать в УФ-диапазоне, кроме того, наличие уникальной решетки (600 штр/мм при угле блеска 46°) позволяло работать и в фотографической ИК-области спектра. В частности, в сумеречное время, не используемое для выполнения основных программ, мы выполнили спектрофотометрические наблюдения ярких сверхгигантов в диапазоне 6400-8800 Å с $D = 4.5 - 3$ А/мм. В фотографическом варианте наблюдений СП-124 уступал камере № 2 ОЗСП по широкощельности и превосходил по позиционной стабильности и спектральной чистоте. По-видимому, основной причиной непопулярности столь высококачественного спектрографа явилось определенное воздействие принципа широкощельности на практику современных наблюдений (т.е. приоритет был отдан высокой эффективности по L с ущербом по R). Определенную роль сыграло также и отсутствие фотозкснометра на приборе, что делало затруднительным выполнение качественных наблюдений астрономами, не имеющими достаточного практического опыта работы на СП-124. Отметим, что к моменту начала эксплуатации СП-124 о позиционных нестабильностях ОЗСП (но не об их причине, см. Бикмаев и Панчук, 1986) уже было известно, и интенсивные наблюдения на планетном спектрографе могли бы восполнить недостаток в наблюдениях с хорошими значениями R .

Ключевым моментом в программе реализации потенциального качества СП-124 должно было являться сохранение и использование характеристик камеры спектрографа. Объективную потребность в наблюдениях в близком ИК-диапазоне с хорошим спектральным разрешением и с проникающей способностью, занимающей промежуточное положение между характеристиками камер № 1 и № 2 ОЗСП, дополняет также и возможность расширения интервала наблюдений на БТА за счет наблюдений на СП-124 в сумеречное время, т.е. реализации качества спектрометра в то время суток, когда прибор не имеет конкуренции со стороны систем, пусть даже и обладающих более высоким потенциальным качеством, но не в фотографической ИК-области. Что касается фотозлектрических наблюдений, то характеристики камеры наиболее удовлетворяли идее растрового спектрометра. Действительно, основным требованием к растровому спектрометру является условие точного совмещения изображения входного растра с выходным растром, т.е. аберрационные искажения изображения входного растра должны быть минимальными. Реализация растрового принципа позволяет увеличить светосилу по потоку более чем на два порядка (Тарасов, 1977), разрешающая способность при этом, по крайней мере, не уменьшается. К сожалению, для развития СП-124 был выбран вариант, соседний из семейства модуляционных спектрометров - измеритель лучевых скоростей Гриффина (1974). В этом приборе щель остается относительно узкой, а на фокальной поверхности камеры устанавливается маска, после которой промодулированный в результате колебаний изображения входной щели поток собирается на одноканальный светоприемник (ФЭУ). Принципиальным недостатком реализации этого метода на БТА с использованием СП-124 является сохранение высоких потерь света на вход-

ной щели и потери на этапе согласования большого размера промодулированного спектра с фотокатодом ФЭУ. Действительно, фотокатод освещается пучками различного наклона, что понижает эффективность работы тонкопленочного фотокатода в качестве резонатора световых волн. Несмотря на то, что схема Гриффина реализована в Кудз-спектрографе 5-м телескопа, такие измерители скоростей успешно применялись в основном на телескопах метрового класса, где потери на входной щели практически отсутствуют и для выполнения статистических программ измерения лучевых скоростей выделяется достаточное количество времени. Вторая из отмеченных выше трудностей преодолевается уменьшением линейных размеров поля промодулированного изображения за счет использования схемы эшелле-спектрометра (Коравел, 1977; Токовинин, 1987).

Впоследствии СП-124 был дооснащен камерой Шмидта-Кассегрена из комплекта спектрографа UAGS ("Карл Цейсс", каталог № 16-190/23-9), и был реализован основной вариант сканера БТА (Афанасьев и др., 1991), широкощельность 16. На посадочное место этой камеры устанавливался также менее светосильный объектив (эффективное относительное отверстие 1:6.2) с последующей регистрацией фрагмента спектра диссектором (Алексеев и др., 1983). Анализ данных архива наблюдений на БТА (см. также Алексеев и Скульский, 1989) показал, что в этом варианте исследовалась переменность участков спектров ярких ($V = 2.5^m - 5.5^m$) звезд с характерным временем накопления 20-30 минут.

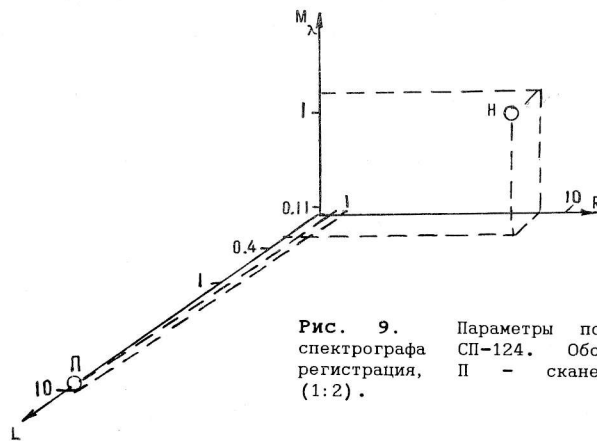


Рис. 9. Параметры потенциального качества планетного спектрографа СП-124. Обозначения: Н - фотографическая регистрация, Π - сканер БТА, камера Шмидт-Кассегрен (1:2).

На рис. 9, где приведены параметры различных вариантов наблюдений, определяющих потенциальное качество СП-124, характеристики последнего варианта нанести затруднительно, так как число одновременно регистрируемых элементов спектра равно единице, что с учетом нормировки M_λ (см. раздел 1.1) соответствует 1/4300. Отметим, что реальное число M_λ еще меньше, так как каждый спектральный элемент регистрируется в режиме счета импульсов.

В целом приходим к выводу, что СП-124 выведен из совокупности приборов, пригодных для спектрофотометрии с хорошими значениями R и M_λ .

1.3. РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ НА СВЕТОСИЛЬНОМ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФЕ

Светосильный спектрограф со скрещенной дисперсией СП-161 (Зандин и др., 1977а) был ориентирован на спектрофотометрию звезд и звездобразных объектов с применением ЭОПа и последующей фотографической регистрацией на фотозмульсию. Так как в таком варианте зарегистрировать спектр фона неба затруднительно, оптическая схема была рассчитана для случая плотной упаковки спектральных порядков. За 9 лет для наблюдений с СП-161 было выделено 22 календарные ночи, в архиве БТА было зарегистрировано всего несколько спектрограмм, что не позволяет точно оценить светосилу по потоку для штатного варианта наблюдений. В результате развития СП-124 в сканер БТА популярность прибора возросла, а процедура смены спектрографов СП-124 и СП-161 в фокусе Нэсмит-1 усложнилась. К числу несомненных достоинств СП-161 следует отнести высокое значение широкощельности (фокусные значения коллиматора и камеры отличаются в 20 раз) и относительно небольшое значение угла между осями коллиматора и камеры, что сразу обеспечивает прибору известное преимущество перед новой оптической схемой сканера БТА (Афанасьев и др., 1991). Дополнительным преимуществом является высокая прозрачность оптики в УФ-диапазоне. Так как СП-161 был ориентирован на фотографическую регистрацию спектров, требования к перепадам концентрации в пределах спектрального порядка были довольно жесткими, что привело к выбору неклассических параметров эшелле-решетки, работающей в относительно низких спектральных порядках. Кроме того, максимумы концентрации понижены из-за существенного отклонения от условия Литтрова. С этой точки зрения прибор подходит к использованию в нем системы счета фотонов, динамический диапазон которой невелик по сравнению с ПЗС-матрицей. Было решено переоборудовать СП-161 в прибор, постоянно размещенный на телескопе и оснащенный двумерной системой счета фотонов. Некоторые детали решения этой задачи даны в работе Гажура и др. (1990).

На рис. 10 показано место этой системы в пространстве параметров L , R , M_λ .

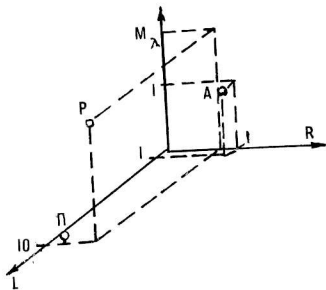


Рис. 10. Параметры потенциального качества сканера БТА (П), эшелле-спектрометра Зебра (Р) и камеры № 2 ОЗСП (28 А/мм) - (А).

Принимая во внимание, что счетчики, установленные в системе Зебра и сканере БТА, имеют близкие значения Q , можем сравнить потенциальное качество этих систем (см. рис. 10).

В заключение раздела сравним потенциальные качества спектрографа первичного фокуса СП-160 (Зандин и др., 1977б) и спектрографа со скрещенной дисперсией СП-161 (Зандин и др., 1977а) в предположении, что регистрация спектров выполняется одним и тем же светоприемником - фотографической регистрацией посредством ЭОПа. Размеры рабочего поля камеры СП-161 по результатам наших

испытаний прием 15 мм, а для СП-160 возьмем из работы Зандина и др. (19776), но при расчете M_λ учтем реальную длину регистрируемого спектра. Сравнение дано на рис. 11, который по параметру L не следует сравнивать с другими рисунками, так как параметр Q указанного варианта наблюдений мы не оценивали. Основное преобладание в потенциальном качестве у эшелле-спектрометра проявляется за счет числа одновременно регистрируемых спектральных порядков и за счет более высокого спектрального разрешения. Следует отметить также, что, согласно нашему анализу архива наблюдений БТА, СП-160 использовался преимущественно с камерой $F = 200$ мм (1:2), т.е. в варианте, уступающем эшелле-спектрографу и в светосиле по потоку.

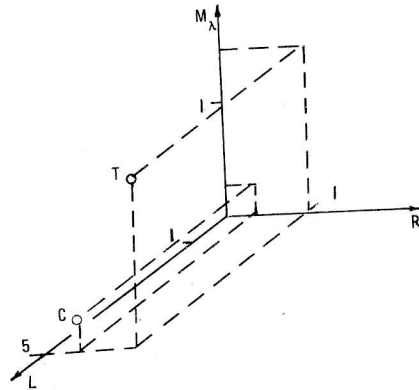


Рис. 11. Параметры потенциального качества светосильного спектрографа первичного фокуса СП-160 ($D = 84$ А/мм) - (С) и звездного спектрографа со скрещенной дисперсией СП-161 ($D = 28$ А/мм) - (Т). Тип светоприемника один и тот же (ЭОП с фотографической регистрацией, выигрыш в Q по сравнению с прямой фотографической регистрацией условно принят равным 5).

1.4. ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ КАЧЕСТВО ДРУГИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ

Следует упомянуть еще о двух важных работах по оснащению штатных спектрографов фотоэлектронными методами регистрации - создании спектрополяриметров, ориентированных главным образом на поиск и измерение магнитных полей звезд.

Поляриметр-магнитометр первичного фокуса (Штоль и др., 1985) основан на использовании серийного спектрографа UAGS ("Карл Цейс", каталог № 16-190/23-9), в котором в качестве камеры использовались зеркально-линзовый (1:10), а затем линзовый (1:5) объективы со световым диаметром 100 мм. Так как диаметр коллимированного пучка спектрографа UAGS составляет всего 75 мм, то реальная светосила камер еще более низкая, что в сочетании с относительным отверстием коллиматора (1:4) обеспечивает уникальные для астрономической практики значения широкощельности 0.3 и 0.6 соответственно. Соответствующий проигрыш в светосиле по потоку снижает влияние выигрыша в квантовой эффективности, обеспечиваемого применением ФЭУ.

Магнитометр с эталоном Фабри-Перо (Воган, 1967; Глаголевский и др., 1975) имеет принципиально более высокую широкощельность, так как принадлежит другому классу интерференционных спектральных приборов. Здесь также действует принцип Жакино, но величина произведения $L \times R$ существенно выше. Потенциальное качество такого спектрометра понижается за счет скважности регистрации спектрального диапазона, так как комбинация эталона Фабри-Перо с дифракционным спектрографом в идеальном случае пропускает лишь долю света, обратно пропорциональную фактору добротности эталона. В случае последовательного

согласованного сканирования спектра путем перемещения выходной щели, сопровождаемого перестройкой эталона, фактор спектральной одновременности минимальный. Это же справедливо и для магнитометра-поляриметра первичного фокуса, где на выходе также установлена щель. Подчеркнем, что магнитометр с эталоном Фабри-Перо по определению нечувствителен к позиционным нестабильностям ОЗСП, который является лишь средством выделения одного из порядков эталона. Возможность развития такой системы состоит в применении счетчика фотонов, установленного на камере № 1 (см. выше), в этом случае фактор спектральной одновременности возрастает во столько раз, сколько неперекрывающихся проекций широко раскрытой щели ОЗСП, изображаемой в разных спектральных порядках эталона, разместится на рабочей части фотокатода счетчика.

В заключение первой части работы рассмотрим тенденцию использования перечисленных выше технических решений.

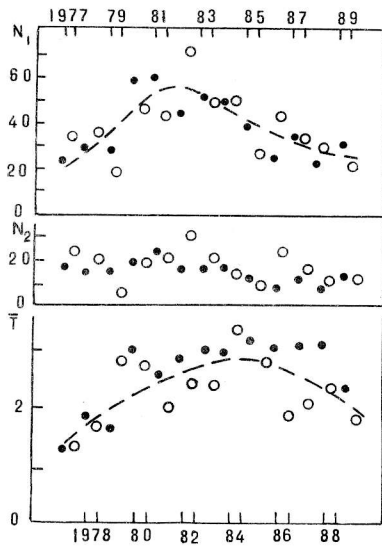


Рис. 12. Статистика нагрузки на ОЗСП БТА. N_1 - общее число ночей за полугодие, N_2 - число наблюдательных сетей за полугодие, T - средняя продолжительность наблюдательного сета (число ночей). Точки - первое полугодие, кружки - второе (второе полугодие 1979 - с 01.10.79).

Оснащение штатных спектрографов БТА современными светоприемниками приводит к снижению как потенциального, так и реализуемого качества спектрометров за счет потери числа одновременно регистрируемых элементов спектра и за счет потерь в разрешающей способности. С этой точки зрения наиболее устойчивыми оказались характеристики СП-161, так как спектрограф был изначально ориентирован на небольшое поле хороших изображений спектра. Но спектральное разрешение, реализуемое системой Зебра, не удовлетворяет условиям большинства задач детального анализа спектров. Единственным прибором, удовлетворяющим требованиям по R и M_λ , остается ОЗСП БТА, но степень использования его в лунные ночи снижается (см. рис. 12, построенный по данным распределения времени на БТА). Так как доля лунных ночей остается неизменной, приходим к выводу, что степень использования других спектральных систем с низкими значениями параметров R и M_λ непрерывно возрастает. Эта тенденция противоположна тому, что мы видим, анализируя

расписание наблюдений на других крупных телескопах, где наряду с развитием систем с низким и средним спектральным разрешением отмечен "Ренессанс спектроскопии высокого разрешения" (Вольф, 1983). Игнорирование этого обстоятельства усилит известные диспропорции развития отечественной астрофизики.

2.1. ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Всю совокупность технических решений по реализации хороших значений L , R , M_λ , Q в классе дифракционных приборов представим на примере четырех эшелле-систем: спектрографа Королевского Университета Белфаста (SQUB), спектрометра Королевской Гринвичской обсерватории (RGO), Гамильтоновского Кудэ-эшелле спектрометра Ликской обсерватории (HES) и Кудэ-эшелле спектрометра Европейской Южной обсерватории (CES ESO).

Спектрограф SQUB (МакКэйт и др., 1978) разработан в качестве экспедиционного варианта для использования в касегреновских фокусах 30-дюймового телескопа Южноафриканской обсерватории SAAO и 74-дюймового телескопа в Коттамии (Египет). Используется решетка с углом блеска 63.5° , размер заштрихованной части 110×220 мм, 316 штр/мм. Система напоминает схему Пфунда (решетка используется в пределах $\pm 2^\circ$ от условия автоколлимации. Призма двойного прохождения выполнена из флинта, что не позволяет работать короче $\lambda = 3500$ Å. Ломающее зеркало четырехкратного прохождения позволило сделать прибор компактным и жестким. Работа в низких порядках компенсируется автоколлимационным использованием параболического зеркала $F = 1624$ мм, что обеспечивает высокие значения обратной дисперсии ($D = 0.6$ Å/мм на $\lambda = 3500$ Å и $D = 1.1$ Å/мм на $\lambda = 6200$ Å). Применение автоколлимационной схемы находится в противоречии с условием минимальных потерь на центральном экранировании. Длина регистрируемых на фотопластинку спектральных интервалов составляет 45 Å в 16-м и 82 Å в 9-м порядках дисперсии. Без изменения оптической схемы спектрограф использовался также с применением ЭОПа с последующей регистрацией спектра на фотопластинку, затем была применена ПЗС-матрица (Бейтс и др., 1985). В последнем случае очевидна неэкономичность компоновки порядков: расстояние между порядками составляет 5 мм на $\lambda = 3500$ Å и 2 мм на $\lambda = 6500$ Å. Данную схему упоминаем с целью подчеркнуть, что эшелле-спектрографы, ориентированные первоначально на применение фотопластинки, при оснащении другими светоприемниками теряют часть потенциального качества.

Спектрометр RGO (Миберн и др., 1984) также построен по схеме автоколлимационного использования линзового объектива $F = 800$ мм с решеткой 63.5° , 128×254 мм, 31.6 штр/мм. Значения обратной дисперсии от 1.3 Å/мм на $\lambda = 4000$ Å до 2.5 Å/мм на $\lambda = 7500$ Å. В этой схеме уже нет центрального экранирования вспомогательной оптикой спектрометра и отсутствуют потери света на изломах пучков. Спектрометр установлен в фокусе Ричи-Кретьена (1:7.9) телескопа ААТ, что позволяет использовать его и в многоцелевом варианте в низкодисперсионной моде (решетка отключена и введена отражающая плоскость) и в варианте "длинная щель" с использованием одного эшелле-порядка, выделенного интерференционным фильтром. Рабочее поле камеры велико (25×30 мм), поэтому прибор используется с двумерной системой счета фотонов. Анализ публикуемых

расписаний работы ААТ показал, что в различных модификациях прибор использовался до 50 % календарного времени.

Напомним, что применение автоколлимационных систем оправдано в тех случаях, когда масштаб входного изображения относительно невелик, т.е. часть проблемы согласования изображения звезды с входной щелью спектрометра решена на этапе проектирования телескопа.

Спектрометр HES (Фогт, 1987) разработан для фокуса Кудэ 3-м телескопа Ликской обсерватории с целью распространить спектроскопию "стиля Кудэ" на объекты с $V=16$. Внеосевой коллиматор образует пучок диаметром 200 мм, угол между осями коллиматора и камеры составляет 22° . Элементом скрещенной дисперсии являются две увиолетовые призмы, рабочая область $\lambda > 3700 \text{ \AA}$. Камера с относительным отверстием 1:1.7, выполнена по схеме "ломаный Шмидт", используется решетка 63.5° , $204 \times 408 \text{ мм}$, 31.6 штр/мм. Спектральное разрешение составляет 0.22 \AA на $\lambda=6500 \text{ \AA}$. Прибор используется с ПЗС-матрицей размерами $12 \times 12 \text{ мм}$, 800×800 элементов. Сравнение с кассегреновским эшелле-спектрографом 4-м телескопа обсерватории Китт-Пик и с двухлучевым спектрографом 5-м телескопа показало полное преимущество системы HES (Фогт, 1988).

Спектрометр CES ESO (Энард, 1988) ориентирован на достижение предельной разрешающей способности при соблюдении высокой спектральной чистоты. Используется решетка 63.5° , $200 \times 400 \text{ мм}$, 79 штр/мм. Подчеркнем, что наиболее светосильным вариантом здесь является камера 1:5 с максутовским корректором. Основным, ориентированным на дальнейшее изучение узких участков спектра, является вариант с широкощельностью 1, что позволяет достичь спектрального разрешения $\lambda/\Delta\lambda = 15000$. Такое значение широкощельности позволило реализовать вариант использования решетки в двойном прохождении, так как дальнейшее увеличение спектрального разрешения путем сужения входной щели невозможно из-за ограничений со стороны качества оптики спектрометра. Если спектр регистрируется не ПЗС-приемником, а фотоумножителем, то сканирование спектра осуществляется прецизионным поворотом стола решетки. В приборе достигнуто предельно низкое значение уровня рассеянного света (0.001 % от центрального пика аппаратной функции). Низкое значение широкощельности позволило реализовать схему скрещенной дисперсии до входной щели спектрометра, это снижает уровень рассеянного света и стоимость прибора (сейчас наиболее дорогим элементом эшелле-систем являются крупногабаритные призмы скрещенной дисперсии). Отметим, что рекордные параметры CES ESO получены за счет снижения числа одновременно регистрируемых элементов спектра.

К преимуществам двух последних систем отнесем возможность их сопряжения с расположенными на юге от башен основных телескопов дополнительными телескопами, питающими фокус Кудэ (САТ). Благодаря такому решению время больших телескопов не расходуется на задачи калибровки спектрометров и наблюдения ярких частей обзорных программ, а дорогостоящие спектрометры работают каждую ясную ночь.

2.2. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТР БТА

Испытав в 1989 г. двумерный счетчик фотонов на камере № 1 ОЗСП, мы перешли к решению задачи увеличения фактора M_λ при сохранении достигнутых значений L и

Р. Это можно сделать путем разработки эшелле-спектрометра, реализующего близкие значения обратной линейной дисперсии на входе счетчика, увеличение фактора M_λ по сравнению с камерой № 1 ОЗСП в таком случае приближенно определяется числом порядков, упакованных в кадр счетчика. Мы использовали решетку 63.5° , 200×300 мм, 75 штр/мм, которая с избытком соответствует световому диаметру (100 мм) линзового триплета $F = 365$ мм (1:3.7). Порядкоразводящая призма с углом 35° обеспечивает хорошее заполнение кадра счетчика.

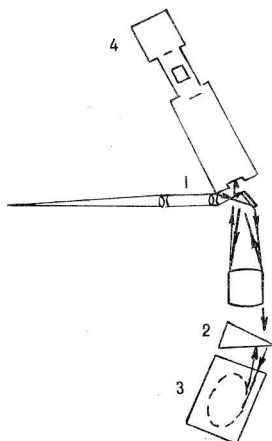


Рис. 13. Схема автоколлимационного эшелле-спектрометра ЭСПАК. Обозначения: 1 - оптика, согласующая светосилу БТА и камеры спектрометра, 2 - порядкоразводящая призма, 3 - решетка, 4 - счетчик фотонов.

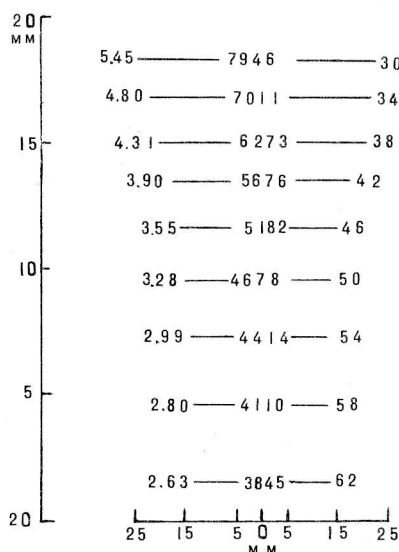


Рис. 14. Параметры спектра, регистрируемого системой ЭСПАК. Свободные спектральные интервалы обозначены линиями, в центре которых указана центральная длина волны, слева - D в А/мм, справа - номера избранных порядков. Масштабы осей, характеризующих формат кадра, неодинаковы.

На рис. 13 показаны основные конструктивные особенности спектрометра ЭСПАК (эшелле-спектрометр автоколлимационный). Предварительное согласование светосилы вторичного фокуса БТА (1:30.7) со светосилой объектива и неклассическая схема использования решетки являются основными отличительными элементами. Угол падения света на решетку α и угол дифракции β равны углу блеска и лежат в одной плоскости с нормалью к рабочей грани штриха, а угол между падающим пучком и плоскостью основной дисперсии не равен нулю (случай "С" по Шредеру и Хилларду, 1980). Хроматизм объектива скомпенсирован наклоном плоскости фотокатода в направлении скрещенной дисперсии (этот прием подходит для тех случаев, когда величины основной и скрещенной дисперсии сильно различаются). На рис. 14 приведены параметры кадра системы ЭСПАК, измеренные в процессе испытаний на БТА. С целью сравнения с близким по светосиле вариантом использования счетчика на камере № 1 ОЗСП потенциальное качество системы ЭСПАК нанесено на рис. 4.

2.3. ПРОЕКТ СВЕТОСИЛЬНОГО ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В первом приближении задача перехода на новые светоприемники с сохранением большого числа передаваемых элементов спектра, типичного для камеры № 2 ОЗСП БТА, решена при создании спектрометра ЭСПАК. К недостаткам ЭСПАК отнесем низкую светосилу камеры, низкое пропускание объектива в УФ-диапазоне, несоответствие длины спектральных порядков размерам рабочей зоны фотокатода счетчика и потери на неоптимальной оптике согласования светосилы телескопа и камеры. Если исходить из оценки перспектив развития теории звездных атмосфер, то реализованные на ЭСПАК значения обратной дисперсии также недостаточны. Действительно, ряд неоднозначностей, возникающих на этапе количественной интерпретации звездных спектров, связан с тем, что наиболее употребимой формой представления информации о звездной атмосфере является эквивалентная ширина. Пока идет интерпретация на уровне эквивалентных ширин, часть эффектов, открывающих пути уточнения физики атмосфер, остается неуловимой. Поэтому единственным способом увеличения потенциального качества эшелле-спектрометра с одновременным приближением к величине спектрального разрешения $\lambda/\Delta\lambda = 10^5$ является увеличение диаметра коллимированного пучка до рекордных значений (Панчук, 1987). В таком случае облегчается задача обеспечения высокого качества изображения спектра по полю значительных размеров, так как увеличение диаметра коллимированного пучка при сохранении светосилы обеспечивает пропорциональное увеличение размеров поля камеры. В разделе 1.1 указан еще один резерв увеличения светосилы камеры за счет изменения масштаба оптического переброса изображения с люминофора на телевизионную мишень, но если применение этого приема на камере с внешним фокусом приведет к значениям обратной линейной дисперсии около 20 А/мм, то на этой же камере, но в схеме эшелле-спектрометра, соответствующий прием дает значения D около 4 А/мм. Такой способ "регулировки светосилы" наиболее экономичен, следует сравнить его с общепринятым способом обеспечения спектрографа набором высококачественных камер различной светосилы (см., например, описание комплекта камер для СП-160, Зандин и др., 1977б). Как уже указывалось, увеличение светосилы приводит к увеличению угла между осями коллиматора и камеры, что в свою очередь снижает эффективность работы решетки. Предложенная в схеме ЭСПАК ориентация решетки при больших значениях угла γ приводит к значительному астигматизму. Так как обратная линейная дисперсия с увеличением γ возрастает пропорционально $1/\cos \gamma$, то спектральное разрешение практически не изменяется, но число одновременно регистрируемых в кадре спектральных элементов снижается в этой же пропорции. Необходимо снижать γ , но малые значения угла γ можно реализовать только в схеме автоколлимации с линзовой оптикой. Линзовая оптика обрезает УФ-диапазон, поэтому естественно приходим к необходимости использования камеры с внешним фокусом (корректирующая оптика кварцевая) в схеме автоколлимации. Автоколлимационный режим использования решетки экономичен по степени использования сечения коллимированного пучка, дополнительным преимуществом является более низкий уровень рассеяния света на решетке. Следующим условием оптимизации схемы спектрометра является переход на использование эшелле с 37.5 штр/мм, это позволит лучше согласовать величину свободного спектрального интервала (длину порядка) с размерами фотокатода.

Из вышеизложенного следует схема (рис. 15) светосильного эшелле-спектрометра высокого разрешения, основанная на использовании камеры с внешним фокусом, разработанной в начале 80-х годов для ОЗСП БТА.

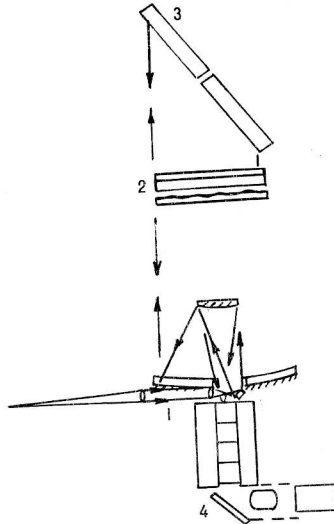


Рис. 15.. Предлагаемая схема светосильного эшелле-спектрометра высокого (до 10^5) спектрального разрешения. Обозначения: 1 - оптика, согласующая светосилу БТА и камеры спектрографа, 2 - порядкоразводящая призма, 3 - составная решетка, 4 - счетчик фотонов (из-за габаритных ограничений после ЭОПа выполнен излом оптической оси, не приводящий к потере в светосиле по потоку).

Световой диаметр камеры 300 мм, что в автоколлимационном режиме позволит приблизиться к значению светосилы 1:2. Оптика камеры в сочетании с типом фотокатода делает доступным для детальных исследований УФ-диапазон (реализованные на камере № 2 значения $D = 7$ и 14 А/мм недостаточны для большинства задач). С этой целью порядкоразводящая призма также должна быть кварцевой. Решетка составлена из двух одинаковых (63.5° , 37.5 штр/мм), суммарный размер заштрихованной части технологически доступен (300×670 мм). Мы рассмотрели два варианта согласования с оптикой БТА. Первый вариант изображен на рис.15, основной проблемой здесь является минимизация хроматизма линзовой группы с сохранением хорошего пропускания в УФ-диапазоне. По-видимому, наиболее перспективным решением является применение здесь миниатюрной камеры Боуэна-Попова. Резервным является способ компенсации хроматизма, примененный нами в системе ЭСПАК. В качестве второго варианта можно предложить волоконнооптическое сочетание изображения звезды, построенного в первичном фокусе БТА, с параметрами светоприемника, установленного в рассматриваемой системе (Панчук, 1987). Противоречивость такой схемы состоит в том, что на входе системы желательно иметь диаметр волокна, по крайней мере соответствующий 0.5 угл.секунд, т.е. около 0.16 мм, а на выходе - соответствующий ширине двух элементов разрешения светоприемника, т.е. около 0.05 мм. Проблему согласования можно облегчить путем сочетания выходного торца волокна с резателем изображений, рассчитанным на 2-3 среза. Конструкция резателя принципиально доступна для организации таких микросрезов (Афанасьев и др., 1986). Соотношение светосил главного зеркала БТА и камеры спектрографа с запасом учитывает деградацию апертуры при волоконнооптической передаче света, поэтому на входе волокна можно применить дополнительную согласующую оптику, уменьшающую масштаб изображения. В целом, использование волоконнооптического сочетания не является методом, существенно превосходящим способ, реализованный в системе ЭСПАК. К числу недостатков второго способа

отнесем также необходимость иметь на момент наблюдений кабину первичного фокуса, свободную от других видов навесной аппаратуры, и наличие дополнительных потерь света на экранировании вторичным зеркалом камеры (так как после передачи света по волокну тень кабины первичного фокуса "рассасывается").

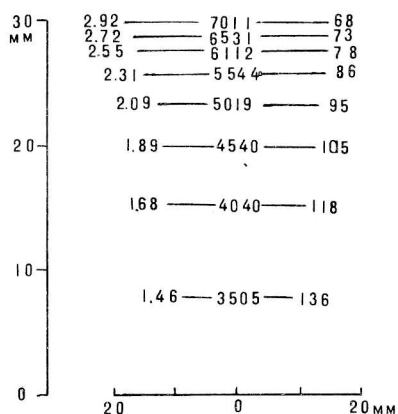


Рис. 16. Результат расчета параметров кадра, реализуемого на плоском поле диаметром 40 мм при помощи схемы, указанной на рис. 15. Длина свободных спектральных интервалов (в мм) соответствует длине линий, в центре которых указана центральная длина волны, слева - значение D (в Å/мм), справа - номер порядка. В отличие от системы ЭСПАК, в данном случае возможна регистрация всего спектра за одну экспозицию, т.е. изменять наклон эшелле-решетки не требуется.

Расчетные параметры кадра светосильного эшелле-спектрометра приведены на рис. 16, потенциальное качество прибора отмечено на рис. 4.

3.1. КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Опыт наблюдений на штатной аппаратуре БТА, опыт реконструкции штатной аппаратуры, включая применение счетчика фотонов на ОЗСП и системе Зебра, опыт макетирования и создания эшелле-спектрометров, анализ степени применимости на БТА различных технических решений и анализ тенденций развития спектральной аппаратуры на других больших телескопах позволяют нам предложить один из возможных путей развития спектральной аппаратуры БТА, ориентированной на реализацию высокого потенциального качества спектрометров при сохранении требуемой разрешающей способности.

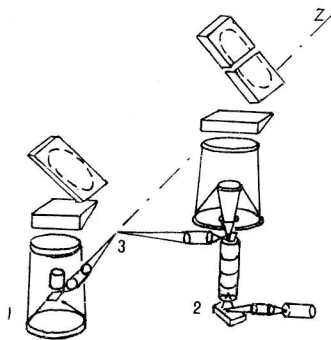


Рис. 17. Двухлучевая эшелле-система, ориентированная на выполнение наблюдений с высоким спектральным разрешением. 1 - "красная ветвь", камера Шмидта со встроенным светоприемником или схема, аналогичная схеме ЭСПАК, 2 - "синяя ветвь", подробнее см. на рис. 16, 3 - делитель спектрального диапазона.

В качестве системы высокого спектрального разрешения можно рассмотреть

связку из двух эшелле-спектрометров, снабженных двумя типами светоприемников. Такая система должна предусматривать двухлучевой вариант использования и состоит из автоколлимационного спектрометра, прообразом которого является ЭСПАК, оснащенный ПЗС-матрицей. Это "красная ветвь" комплекса, и оптика может быть как зеркально-линзовой (камера Шмидта со встроенным ПЗС-приемником), так и линзовой. "Синяя ветвь" состоит из спектрометра, предложенного в разделе 2.3, приемником является счетчик фотонов. Схема такого комплекса приведена на рис. 17.

В качестве системы, реализующей среднее спектральное разрешение, можно также рассмотреть двухлучевой спектральный комплекс, который также может быть размещен на платформе фокуса Нэсмита-2. "Синяя ветвь" этого комплекса включает систему Зебра. Доработка системы сводится к решению проблемы более широкого разведения порядков спектра с тем, чтобы между ними можно было бы "вставить" систему порядков, регистрирующую спектр фона неба. "Красная ветвь" этого комплекса может быть основана на использовании камеры № 3 с ПЗС-матрицей в обычной схеме ОЗСП, подробнее см. раздел 1.1. Схема комплекса среднего спектрального разрешения приведена на рис. 18.

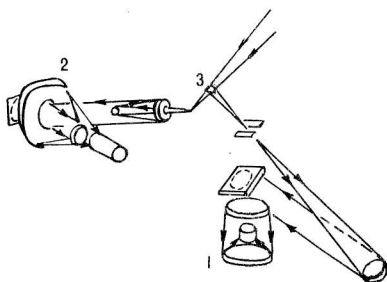


Рис. 18. Двухлучевая схема, ориентированная на выполнение наблюдений со средним (1-2 А) спектральным разрешением. 1 - "красная ветвь", камера Шмидта № 3 ОЗСП со встроенным светоприемником, 2 - "синяя ветвь", система Зебра, 3 - делитель спектрального диапазона.

К числу неперспективных решений отнесем любые попытки создания классического спектрометра (пусть даже по схеме эшелле) для работ в первичном фокусе. Во-первых, в первичном фокусе затруднительно развернуть двухлучевую схему, а любое другое решение типа "универсальный спектрометр" дороже и заведомо проигрывает по потенциальному качеству. Во-вторых, вероятность внеплановых наблюдений (дублирование основной программы и т.п.) для подвесных систем равна нулю, тогда как для систем, стационарно размещенных на БТА, гораздо легче реализовать как режим подстраховки других видов наблюдений, так и эпизодический мониторинг интересных объектов или экстренные наблюдения (вспышки звезд и т.п. редкие явления). И, наконец, спрос на классический спектрометр, размещенный в первичном фокусе, понизит долю использования более информативных многообъектных систем.

Ошибочным может оказаться также решение полного отказа от использования счетчиков фотонов в пользу более "удобных" наблюдений с ПЗС-матрицей. Развитие систем сбора открывает широкие возможности исследования быстротекающих процессов в спектрах методами эшелле-спектроскопии.

Что касается камер № 1 и № 2 ОЗСП, то их ресурсы с вводом в работу крупногабаритных решеток окажутся исчерпанными. Перспектива здесь полностью связана с надеждами на существенное улучшение Q-фотоэмульсий.

В табл. 2 и 3 даны объективные характеристики стратегии распределения календарного времени БТА для выполнения программ исследования звезд, полученные при анализе расписаний работы телескопа в 1977-1988 гг. Видно, что половину времени занимали короткие программы, суммарная продолжительность каждой из которых не превысила 50 ночей за 12 лет. Не имея возможности подробно останавливаться на результатах полного анализа опубликованных работ, выполненных на основе наблюдательного материала, полученного при выполнении упомянутых выше программ, отметим, что, как правило, выполнение коротких программ не завершалось публикацией результатов.

Таблица 2. Распределение числа N программ исследования звезд на БТА от суммарной (за период 1977-1978 гг.) продолжительности T одной программы (календарные ночи)

T	N	T	N
≤3	16	22-24	5
4-6	24	25-27	1
7-9	10	28-30	0
10-12	5	31-33	4
13-15	7	34-36	1
16-18	3	37-39	2
19-21	3		

Таблица 3. Суммарное календарное время Σ , выделенное на выполнение программ исследования звезд на БТА, попадающих в данный интервал суммарной (за период 1977-1988 г.г.) продолжительности T. N - число программ

T	Σ (ночи)	N	T	Σ (ночи)	N
<10	235.5	50	50-59	57	3
10-19	218	15	60-69	-	-
20-29	183	7	70-79	230.5	3
30-39	240	7		93.5	1
40-49	211.5	5		104.5	1
				247.5	1
				268	1

Пока нет оснований считать, что вид приведенных в табл. 2 и 3 распределений изменится в ближайшем будущем. Поэтому основным элементом концепции развития средств спектроскопического изучения звезд следует признать ориентацию на стационарные спектральные приборы, размещенные на платформах фокусов Нэсмита. Такое решение позволит и в дальнейшем следовать принципу объединения однотипных (близких по технологии) программ в блоки, впервые реализованному в конце 70-х годов на ОЗСП.

Мы не претендуем на то, что перечисленные соображения являются единственно возможными, но вышеприведенный анализ показывает, что концепция использования

и развития средств спектроскопического изучения звезд на БТА пока отсутствует и пора сделать первый шаг.

Авторы выражают благодарность В. Л. Афанасьеву и Н. А. Викульеву за полезную полемику, поддержку и помощь при практической реализации идеи автоколлимационного эшелле-спектрометра.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев Г.Н., Драбек С.В., Саморуков Г.С.: 1983, *Изв.Крым. астрофиз. обсерв.*, **67**, с.177.
- Алексеев Г.Н., Скульский М.Ю.: 1989, *Астрофиз.исслед. (Изв.САО)*, **28**, с.21.
- Афанасьев В. Л., Гажур Э. Б., Панчук В. Е.: 1986, *Авт. свид. № 1236325*, Бюлл. Открытия, изобретения, **21**, с. 172.
- Афанасьев В.Л., Липовецкий В.А., Михайлов В.П., Назаров Е.А., Шаповалова А.И.: 1991, *Астрофиз. исслед. (Изв.САО)*, **31** (в печати).
- Бейтс и др. (Bates V., McKeith C.D., Jordan P.R., van Breda I.C.): 1985, *Astron. Astrophys.*, **145**, p. 321.
- Бикмаев И.Ф., Панчук В.Е.: 1986, *Астрофиз.исслед. (Изв.САО)*, **23**, с.112.
- Бикмаев И.Ф., Клочкова В.Г., Панчук В.Е.: 1986, *Астрофиз.исслед. (Изв.САО)*, **23**, с.118.
- Бикмаев И.Ф., Гажур Э.Б.: 1990, *Астрофиз. исслед. (Изв.САО)*, **32**, с. 181.
- Васильев А. С., Евзеров А. М., Лобачев М. В., Пейсахсон И. В.: 1977, *Оптико-механич. промышл.*, **2**, с.31.
- Воган (Vaughan A.H.Jr.): 1967, *Ann. Rev. Astrophys.*, **5**, p. 139.
- Вольф (Wolff S.C.): 1983, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **571**, p. 529.
- Гажур Э.Б., Найденов И.Д., Панчук В.Е., Перепелицын Е. И.: 1986, *Астрофиз. ис-след. (Изв.САО)*, **23**, с. 105.
- Гажур Э.Б., Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1990, *Письма в астроном.ж.*, **16**, № 5, с. 473.
- Гусев О. Н., Зандин Н. Г., Лобачев М. В.: 1976, *Оптико-механич. промышл.*, **12**, с. 63.
- Гусев О. Н.: 1985, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, **48**, с. 5.
- Глаголевский Ю. В., Рылов В. С., Шеглов П. В., Чунтонов Г. А.: 1975, *Звездный магнитометр на основе интерферометра Фабри-Перо. В кн.: Новая техника в астрономии. Л.: Наука*, **5**, с. 7.
- Гриффин и Ган (Griffin R.F., Gunn J.E.): 1974, *Astrophys.J.*, **191**, p. 545.
- Енард (Enard D.): 1982, *Proc. of SPIE*, **331**, p. 232.
- Зандин Н. Г., Гусев О. Н., Пейсахсон И. В. : 1977а, *Оптико-механич. промышл.*, **6**, с. 20.
- Зандин Н. Г., Колесников А. Е., Пейсахсон И. В., Лобачев М. В.: 1977б, *Оптико-механич. промышл.*, **2**, с. 34.
- "Карл Цейсс" каталог (*Universal-Astro-Gitterspectrograph. VEB Carl Zeiss Jena Catalog, N 16-190/23-9*).
- Керель и др. (Cayrel de Strobel G., Bentolila C., Hauck B., Duquennoy A.):1985, *Astron. Astrophys. Suppl.Ser.*, **59**, p. 145.
- Коравел (The Coravel): 1977, *ESO Messenger*, **8**, p. 3.
- МакКэйт (McKeith C. D., Dufton P. L., Kane L.): 1978, *Observatory*, **98**, p. 262.

- Миберн Дж.: 1979, *Обнаружение и спектрометрия слабых источников света*. М.: Мир, 304 с.
- Миберн и др. (Meaburn J., Blundell B., Carling R., Gregory D. F., Keir D., Wynne S.G.): 1984, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **210**, p. 463.
- Панчук В.Е.: 1987, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, **56**, с. 25.
- Пейсахсон И.В.: 1970, *Оптика спектральных приборов*. Л.: Машиностроение, 272 с.
- Рылов В. С.: 1970, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, **2**, с. 121.
- Тарасов К. И.: 1977, Л.: *Спектральные приборы*. 368 с.
- Токовинин А.А.: 1987, *Астрон.ж.*, **64**, с. 196.
- Фогт (Vogt S. S.): 1987, *Publ. Astroh. Soc. Pacif.*, **99**, p.1214.
- Фогт (Vogt S. S.): 1988, *The Lick observatory Hamilton echelle spectrometer. IAU Symp.*, **132**, p. 1.
- Шредер и Хиллард (Schroeder D. J., Hillard R.L.): 1980, *Applied Optics*, **19**, p. 2833.
- Штоль В. Г., Бычков В. Д., Викульев Н. А., Георгиев О. Ю., Глаголевский Ю. В., Драбек С.В., Найденов И.Д., Романюк И.И.: 1985, *Астрофиз.исслед. (Изв.САО)*, **19**, с. 66.

Поступила в редакцию
12 апреля 1990 г.