

УДК 520.353

## Разработка оптоволоконных спектрографов скрещенной дисперсии для телескопов среднего диаметра

*В.Е. Панчук<sup>1,2</sup>, М.В. Юшкин<sup>1</sup>, Е.В. Уханов<sup>2,3</sup>, М.В. Якопов<sup>1</sup>, Г.В. Якопов<sup>1</sup>, Э.В. Емельянов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
*panchuk@yandex.ru*

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Национальный исследовательский университет ИТМО

<sup>3</sup>ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Поступила в редакцию 20 декабря 2012 г.

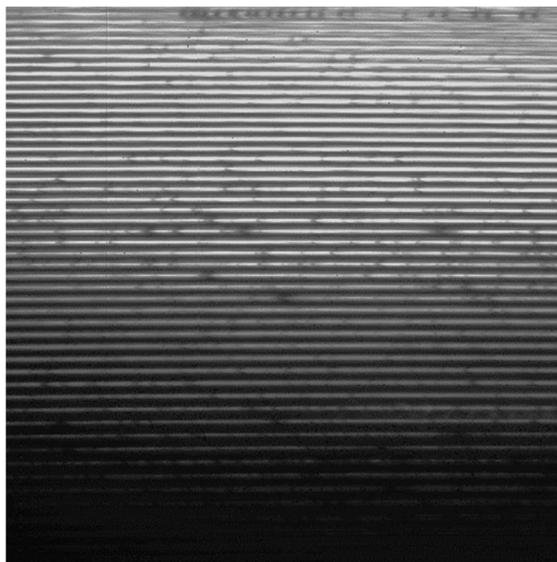
**Аннотация.** Сообщается о разработке четырех оптоволоконных спектрографов скрещенной дисперсии, предназначенных для телескопов диаметром 0.6–1.2 м.

### 1 Введение

Задача создания спектрографа скрещенной дисперсии, имеющего оптоволоконное сочетание с телескопом, уже не является новой (первые попытки предприняты в 1979 г.) (Рамсей, Хенемодер, 1986). К настоящему времени создано около двух десятков спектрографов скрещенной дисперсии, имеющих оптоволоконное сочетание с телескопом диаметром 0.5–1.5 м (см. табл. 5 в работе (Панчук и Клочкова, 2013)). В каждом конкретном случае особенности конструкции определялись, прежде всего, возможностями разработчика и основной научной задачей, сформулированной на момент разработки. Несколько эшелле-спектрографов, используемых ранее как подвесные в фокусе Кассегрена, были адаптированы для оптоволоконного сочетания, но такой наименее затратный путь можно рассматривать только в качестве первого шага. Затем были созданы конструкции, полностью реализующие преимущества стационарного размещения спектрографа. В конце 90-х были построены первые специализированные телескопы, ориентированные только на работу с оптоволоконными спектрографами высокого разрешения. Характеристики, габариты и внешний облик таких телескопов существенно отличаются от универсальных инструментов. Итак, менее чем за четверть века идея оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа утвердилась в практическом арсенале спектроскопистов, доминируя сегодня в методах звездной спектроскопии высокого разрешения. В САО подобные работы были начаты с опозданием приблизительно на 10 лет. Главной целью, естественно, является создание оптоволоконного эшелле-спектрографа БТА, но предварительно мы решили приобрести необходимый опыт на телескопах среднего диаметра. Средний диаметр был привлекателен еще и потому, что проблема широкощельности здесь ослаблена, и не пришлось тратить большие средства на создание светосильных камер.

## 2 Автоколлимационный спектрограф ЭСПАК

Первой работой, выполненной в САО по оптоволоконному сочетанию телескопа и эшелле-спектрографа, является адаптация эшелле-спектрографа автоколлимационного (ЭСПАК) для наблюдений в фокусе Ричи-Кретьена телескопа САО ( $D = 1.01$  м,  $F = 13.3$  м). Первоначально ЭСПАК (Клочкова и др., 1991) был разработан для наблюдений на БТА как с двумерным счетчиком фотонов, так и с первыми матрицами ПЗС, а затем был заменен более светосильным спектрографом. Оптоволоконный вариант ЭСПАК предполагалось использовать с матрицей ПЗС небольшого формата ( $580 \times 520$  элементов), и для согласования длины спектрального порядка с форматом ПЗС эшелле-решетка  $75$  штр/мм была заменена на эшелле  $37.5$  штр/мм. Реконструкция ЭСПАК и первые эксперименты с оптическим волокном выполнены одним из авторов (В. Панчуком) в 1996 году. Схема стационарной части ЭСПАК приведена на рис. 4 обзора по оптоволоконным эшелле-спектрографам (Панчук и др., 2011), здесь ограничимся перечислением основных параметров оптики. В автоколлимационной схеме функции коллиматора и камеры выполняет один объектив,  $F = 365$  мм. Коллимированный пучок диаметром  $100$  мм падает на призму скрещенной дисперсии (крон, угол  $A = 34^\circ$ , толщина основания –  $95$  мм, длина рабочей грани –  $156$  мм, ширина –  $130$  мм), работающую в минимальном отклонении. Расходящиеся после призмы пучки перехватываются основным диспергирующим элементом – эшелле (угол блеска  $\theta_b = 64.3^\circ$ , плотность штрихов  $37.5$  штр/мм, размер заштрихованной части  $260 \times 106$  мм<sup>2</sup>). Эшелле ориентирована практически в автоколлимации, с небольшим значением  $\gamma$  – угла между падающим пучком и главной плоскостью решетки. Пучки, расходящиеся после эшелле, перехватываются призмой, где происходит повторное разведение спектральных порядков. Объектив строит изображение спектра на матрице форматом  $580 \times 520$  элементов (рис. 1). В диапазоне  $4000\text{--}6900$  Å регистрировались спектральные порядки от  $m = 119$  до  $m = 70$  без перекрытия длин волн соседних порядков. На входе в оптическое волокно относительное отверстие телескопа  $1:13$  преобразовывалось в  $1:4$ , при этом масштаб на входе в оптоволокно составляет  $47.2$  угл. сек/мм.



**Рис. 1.** Изображение спектра G-карлика, полученное на оптоволоконном автоколлимационном эшелле-спектрографе ЭСПАК. Вверху – теллурическая полоса  $6800$  Å, несколько нижних, недоэкспонированных порядков изображения эшелле-спектра обрезано

Разработка оптоволоконных спектрографов...

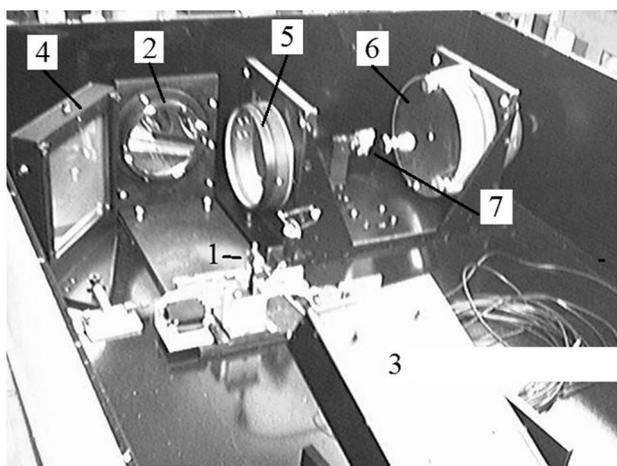
Спектрограф испытывался с оптическими волокнами, имеющими диаметр ядра 50 и 100 мкм, в первом случае спектральное разрешение ограничивалось aberrациями линзовой камеры, во втором было получено спектральное разрешение  $R = 16000$  (диаметр монохроматического изображения выходного торца оптоволокна составил 4 пикселя). Изображение звезды диаметром 4.7 угл. сек. использовалось при этом полностью.

### 3 Двухмодовый спектрограф 60-сантиметрового телескопа

Второй нашей работой по оптоволоконному сочетанию телескопа и эшелле-спектрографа является разработка и изготовление (в 2006 г.) двухмодового спектрографа для 60-сантиметрового телескопа Звенигородской обсерватории Института астрономии РАН. В фокусе Кассегрена устанавливался спектрограф низкого разрешения (рис. 2,  $R = 500$ , диапазон длин волн 4500–9000 Å).



**Рис. 2.** Двухмодовый спектрограф Звенигородской обсерватории во время испытаний на 1-метровом телескопе САО РАН. Обозначения: 1 – спектрограф низкого разрешения, 2 – стационарная часть эшелле-спектрографа среднего разрешения, временно размещенная в подкупольном пространстве

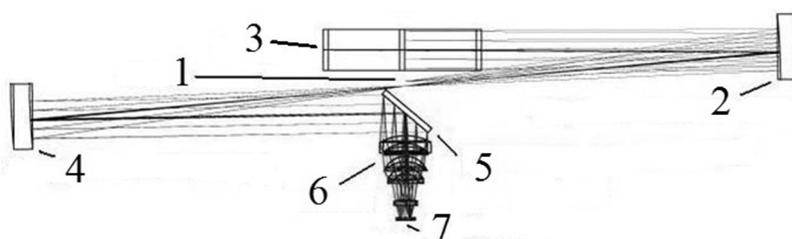


**Рис. 3.** Размещение основных элементов в стационарной части эшелле-спектрографа среднего разрешения 60-сантиметрового телескопа Звенигородской обсерватории. Обозначения: 1 – оптоволоконный вход в спектрограф, 2 – зеркало коллиматора, 3 – эшелле, 4 – решетка скрещенной дисперсии, 5 – линзовый корректор камеры, 6 – сферическое зеркало камеры, 7 – плоское зеркало камеры

В предщелевой части спектрографа низкого разрешения был предусмотрен оптоволоконный вход в эшелле-спектрограф среднего разрешения, установленный стационарно (рис. 3). Параметры оптики стационарной части спектрографа следующие: зеркальный коллиматор (1:4), диаметр коллимированного пучка  $d = 100$  мм, эшелле R2 ( $\text{tg}\theta_b = 2$ ), плотность штрихов 37.5 штр/мм, размер заштрихованной части  $260 \times 106$  мм<sup>2</sup>, решетка скрещенной дисперсии 300 штр/мм, работающая в первом порядке дифракции, светосильная камера Шмидта (1:1.4),  $F = 175$  мм, с ломающим зеркалом в сходящихся пучках. Спектральное разрешение, определяемое диаметром оптоволоконна и оптикой спектрографа, составило  $R = 13000$ . С целью корректировки системы подсматра входа в оптическое волокно была предусмотрена обратная засветка волокна, из объема спектрографа. Для данного спектрографа была разработана новая система управления оптическими элементами и узлами, которую мы использовали и в последующих разработках.

#### 4 Эшелле-спектрограф 120-сантиметрового телескопа

Для 120-см телескопа Коуровской астрономической обсерватории (КАО) Уральского федерального университета в 2009 г. был разработан и изготовлен эшелле-спектрограф, работающий по схеме белого зрачка (рис. 4). Одним из преимуществ этой схемы является возможность использования эшелле с увеличенным углом блеска, ( $R4$ , т.е.  $\text{tg}\theta_b = 4$ ), что обеспечивает двукратный выигрыш в спектральном разрешении, «при прочих равных» ( $d$  – диаметре коллимированного пучка,  $D$  – диаметре объектива телескопа,  $s$  – угловой проекции ядра оптоволоконна на небесную сферу). Спектральное разрешение ( $R = 30000$ ) в данном случае определяется не качеством оптики спектрографа, а диаметром ядра оптического волокна (150 мкм, этот диаметр был предварительно оценен по астроклиматическим характеристикам КАО). В качестве элемента скрещенной дисперсии использована дифракционная решетка, работающая в первом порядке (плотность нарезки 300 штр/мм, размер заштрихованной части  $120 \times 170$  мм<sup>2</sup>). В подвесной части спектрографа мы применили новую систему сопровождения: за изображением объекта «бегает» торец оптического волокна, вклеенного в прозрачную плоско-параллельную пластину, см. рис. 5 в (Панчук и др., 2011). Система управления прибором выполнена на разработанных нами унифицированных (т.е. взаимозаменяемых) модулях.

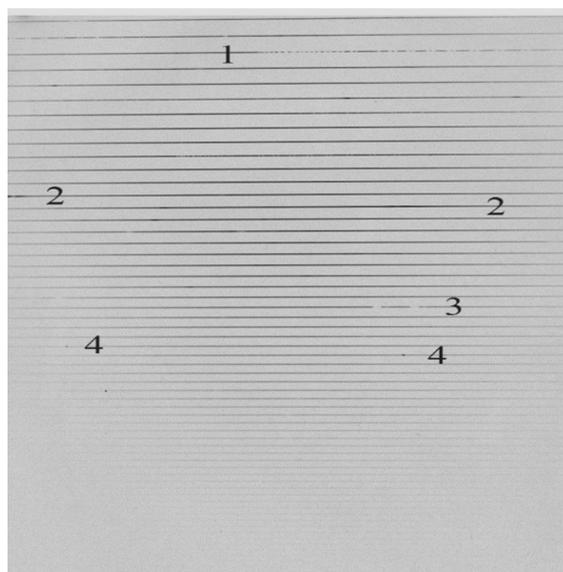


**Рис. 4.** Схема стационарной части эшелле-спектрографа высокого разрешения 120-сантиметрового телескопа Коуровской обсерватории. Обозначения: 1 – оптоволоконный вход в спектрограф, 2 – первый коллиматор, 3 – эшелле, 4 – второй коллиматор, 5 – решетка скрещенной дисперсии, 6 – камера, 7 – плоскость светоприемника

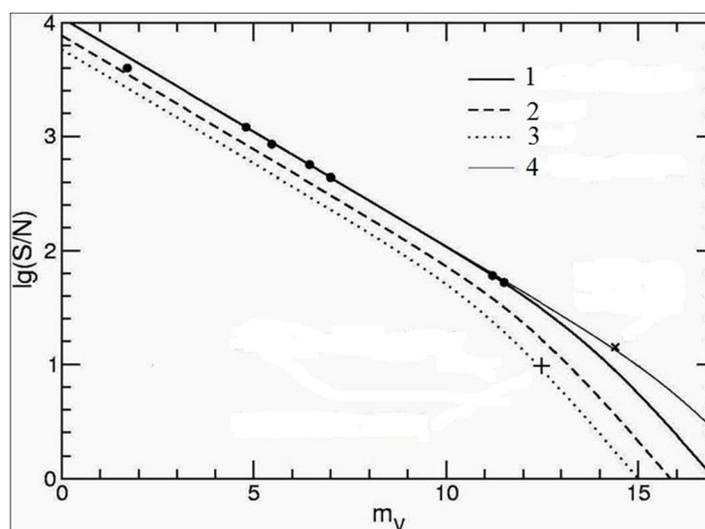
Проницающую способность спектрографа КАО мы оценили по результатам испытаний на 100-сантиметровом телескопе САО (пример изображения эшелле-спектра слабого объекта приведен на рис. 5). На рис. 6 проницающая способность оптоволоконного эшелле-спектрографа КАО сравнивается с проницающей способностью спектрографа НЭС (Панчук и др., 2009) 6-

Разработка оптоволоконных спектрографов...

метрового телескопа БТА. Результаты сравнения проникающей способности других оптоволоконных систем приведены на рис. 2 обзора (Панчук и др., 2011).



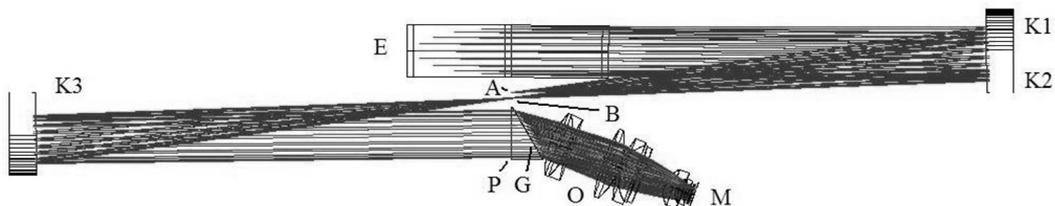
**Рис. 5.** Изображение спектра в диапазоне  $\lambda\lambda$  3953 ÷ 7868 Å (порядки  $m = 125 \div 66$ ), объекта V1302 Aql ( $B = 14$ ,  $V = 11.7$ ), полученное на 100-сантиметровом телескопе САО РАН при испытаниях эшелле-спектрографа Коуровской обсерватории. Некоторые детали спектра: 1 – голова теллурической полосы 6800 Å, 2 – линия Na, 3 – резонансный дублет NaI, 4 – ионосферная линия [OI] 5577 Å



**Рис. 6.** Проникающая способность эшелле-спектрографов высокого разрешения, установленных на 6-метровом и 100-сантиметровом телескопах. Время накопления сигнала – 1 час, отношение сигнал/шум рассчитано на элемент разрешения. Обозначения: точки и крестики – результаты наблюдений. Линии – теория: 1 – НЭС БТА, качество изображений  $b = 1$  угл. сек., 2 – то же, но  $b = 2$  угл. сек., 3 – то же, но  $b = 3$  угл. сек., (кривые 1, 2, 3 вычислены для шума считывания  $N_r = 7.7$  e<sup>-</sup>/pix), 4 – то же, для  $b = 1$  угл. сек., а  $N_r = 2.5$  e<sup>-</sup>/pix. Косой крестик – эффект применения рассекателя изображений на НЭС, при  $N_r = 7.7$  e<sup>-</sup>/pix. Прямой крестик – проникающая способность оптоволоконного эшелле-спектрографа КАО на 100-сантиметровом телескопе САО

## 5 Эшелле-спектрограф 100-сантиметрового телескопа

К настоящему времени завершается разработка эшелле-спектрографа, предназначенного для 100-сантиметрового телескопа САО РАН (рис. 7). Как и в спектрографе КАО, здесь применена схема белого зрачка. Изменен узел скрещенной дисперсии: вместо дифракционной решетки используется призма, в комбинации с прозрачной репликой, нанесенной на одну из граней призмы. Для изготовления этого узла была разработана новая технология. На приемнике форматом 2048 x 2048 элементов размещается 67 спектральных порядков, с номерами  $36 \div 102$ , одновременно регистрируемый диапазон составляет  $3800 \div 10000 \text{ \AA}$ , перекрытие соседних порядков обеспечивается для  $\lambda < 8000 \text{ \AA}$ . За счет равномерной упаковки порядков на площади приемника удалось отказаться от перестраиваемого узла скрещенной дисперсии. Таким образом, теперь нет необходимости управлять углом падения пучка на эшелле и углом падения пучков на элемент скрещенной дисперсии. Кроме того, габариты стационарной части уменьшились (сравнить рис. 4 и рис. 7), что позволяет собрать стационарную часть на оптическом столе размерами  $240 \times 100 \text{ см}^2$ . Оптический стол размещается в термостатируемом объеме. Изменение диаметра оптического волокна (со 150 мкм у спектрографа КАО на 100 мкм у спектрографа САО) позволяет увеличить спектральное разрешение в полтора раза. Система автоматического гидирования оснащена более чувствительным и более «быстрым» приемником. Для снижения инерционности изменена конструкция автогида (за изображением звезды «бежит» не пластина, в которую вклеено оптоволокно, а только оптоволокно). Схему стационарной части спектрографа 100-сантиметрового телескопа можно рассматривать в качестве масштабированного прототипа красной ветви оптоволоконного спектрографа БТА (Панчук и др., 2007).



**Рис. 7.** Схема стационарной части эшелле-спектрографа высокого разрешения, разработанного для 100-сантиметрового телескопа САО РАН. Обозначения, по ходу лучей: А – оптоволоконный вход в спектрограф, К1 – первый коллиматор, Е – эшелле, К2 – объектив промежуточного спектра, К3 – второй коллиматор, Р – призма скрещенной дисперсии, G – решетка скрещенной дисперсии, О – камера, М – плоскость светоприемника

## 6 Выводы

В таблице 1 приводим основные характеристики оптоволоконных эшелле-спектрографов среднего и высокого разрешения, разработанных в САО РАН для телескопов среднего диаметра. Каждая последующая конструкция включала новые технические решения. Поэтапная отработка технологий позволила приобрести соответствующий опыт и выполнить работы с минимальными затратами. Среднее (по четырем спектрографам) соотношение стоимости оптических, механических и электронных компонент составило 50 %, 34 % и 16 % соответственно от общей стоимости спектрографа (определяемой в данном случае без стоимости основного, научного приемника). Половину трудозатрат составила разработка электронных схем и программного обеспечения. Определенные трудности возникали из-за несоответствия характерного времени разработки и создания спектрографа (около трех лет) и характерного времени работ по соответствующему контракту (год-полтора).

**Таблица 1.** Основные параметры оптоволоконных эшелле-спектрографов, разработанных в CAO РАН для телескопов среднего диаметра. Обозначения:  $D$  – диаметр телескопа (м),  $a$  – диаметр ядра оптоволоконного волокна (мкм),  $s$  – диаметр звездного изображения, перехватываемого оптоволоконным (угл. сек),  $l$  – длина оптического волокна (м),  $\text{tg}\theta_b$  и  $n$  (штр/мм) – параметры эшелле,  $d$  – диаметр коллимированного пучка (мм),  $L$  – длина заштрихованной области эшелле (мм), CD – тип элемента скрещенной дисперсии ( $p$  – призма,  $g$  – решетка),  $F_{\text{cam}}$  – фокусное расстояние камеры (мм),  $R = \lambda/\Delta\lambda$  – спектральное разрешение

$D$	$a$	$s$	$l$	$F_{\text{coll}}$	$\text{tg}\theta_b$	$n$	$d$	$L$	CD	$F_{\text{cam}}$	$R$
1.0	100	4.7	9	365	2	37.5	100	260	p+p	365	16000
0.6	50	2.6	10	400	2	37.5	100	260	g300	175	13000
1.2	150	4.8	20	1000	4	37.5	100	400	g300	200	30000
1.0	100	3.3	20	1000	4	37.5	100	400	g+p	200	45000

## Благодарности

Работы по оптоволоконному спектрографу 120-см телескопа КАО поддерживаются грантом Минобрнауки (Поддержка инновационных образовательных программ высших учебных заведений в рамках национального проекта «Образование»).

Работы по оптоволоконному спектрографу 100-см телескопа CAO поддерживаются: Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 09-07-00492, 11-02-00319, 12-07-00739), Программой фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН ОФН-17 «Активные процессы в галактических и внегалактических объектах».

## Литература

- Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Рядченко В.П. // Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17. С. 645.  
 Панчук В.Е., Клочкова В.Г. // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2013.  
 Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В. // Спектроскопия звезд на БТА: проблемы развития. В кн. «Методы спектроскопии в современной астрофизике» / Под ред. Л. Машонкиной и М. Сачкова: Янус-К. 2007. С. 166.  
 Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. С. 42.  
 Панчук В.Е., Юшкин М.В., Якопов М.В. // Астрофиз. Бюлл. 2011. Т. 66. No. 3. С. 382.  
 Рамсей, Хенемодер (Ramsey L.W., Huenemoerder D.P.) // Proc. SPIE. 1986. V. 627. P. 282.