

УДК 520.353;520.84

## СПЕКТРОГРАФЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМ ВХОДОМ

© 2011 В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, М. В. Якопов

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 ноября 2010 г.; принята в печать 25 января 2011 г.

Анализируются характеристики спектрографов высокого разрешения, имеющих оптоволоконное сочетание с телескопом. Приведены результаты испытаний оптоволоконного спектрографа, разработанного авторами для телескопов диаметром 1–2 метра.

Ключевые слова: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в мире построено несколько десятков спектрографов высокого разрешения, имеющих оптоволоконное сочетание с телескопом. Прежде чем рассмотреть характеристики таких спектрографов, отметим работы, заложившие основы данного направления.

Когда классический спектрограф фокуса кудэ для 2.6-м телескопа ЗТШ Крымской Астрофизической Обсерватории еще не был построен, на этом телескопе уже работал первый в мире звездный спектрограф с эшелле [1]. Дифракционная решетка (50 штр/мм, размер заштрихованной области  $80 \times 110$  мм, угол блеска  $\theta_B = 39.2^\circ$ ), изготовленная в ГОИ им. С. Вавилова, использовалась круглосуточно: днем — в эшелле-спектрографе солнечного телескопа, а ночью — в фокусе кудэ ЗТШ.

Астрономы быстро оценили основное преимущество работы в высоких порядках дифракции: возможность получать высокое спектральное разрешение при скромных диаметрах коллимированного пучка  $d$  и, следовательно, при небольших габаритах прибора. Было построено несколько подвесных эшелльных спектрографов фокуса Кассегрена, основным конструктивным решением являлась схема с близкими параметрами зеркального коллиматора и зеркальной камеры, что позволяло компенсировать астигматизм в большом поле [2]. Элементом скрещенной дисперсии, пространственно разводящим высокие порядки дифракции эшелле-решетки, являлась дифракционная решетка, работающая, как правило, в первом порядке дифракции, или призма, иногда необходимый спектральный порядок выделялся узкопо-

лосным фильтром. Почти полный перечень подвесных спектрографов, построенных для телескопов умеренных диаметров к первой половине 80-х, можно найти в работе [3]. Не вдаваясь в конструктивные особенности разных схем, отметим, что основным фактором, обеспечивающим успешное применение модифицированной схемы Черни-Тернера (Czerny-Turner) на спектрографе телескопа с  $D \sim 0.6$  м, является небольшой масштаб изображения в фокусе Кассегрена, поэтому применение камеры большой светосилы для согласования ширины входной щели и элемента разрешения светоприемника не требуется. Например, при масштабе изображения около  $23''$  в мм в кассегреневском фокусе телескопа с  $D = 0.6$  м щель спектрографа шириной 0.05 мм ( $1.1''$ ) является согласованной с элементом разрешения светоприемника (0.05 мм) уже при равенстве фокусных расстояний камеры и коллиматора. Так как относительные отверстия коллиматора и камеры равны (или близки по величине), то уже при  $d = 50$  мм кассегреневский эшелле-спектрограф обеспечивает спектральное разрешение, достигающее величины  $R = 40\,000$ – $70\,000$ . С таким спектральным разрешением, на фотопластинке, а затем с ЭОП, на телескопе указанного диаметра удавалось регистрировать только спектры звезд, видимых невооруженным глазом. Астигматизм внеосевого параболического коллиматора приводит к уширению спектра поперек дисперсии эшелле, поэтому спектры получались равномерно уширенными. Общим недостатком первого поколения спектрографов скрещенной дисперсии являлась сложная процедура извлечения информации из двумерного изображения эшелле-спектра (при фотометрической обработке негатива

необходимо было учитывать кривизну спектральных порядков, наклон изображения щели, аберрации электронной оптики ЭОП и прочее). Ситуация изменилась с появлением многоэлементных цифровых приемников, размеры которых удавалось согласовать с форматом изображения эшелле-спектра.

Если речь идет об измерении интегральной интенсивности линии — эквивалентной ширины, то небольшие вариации формы линии, связанные с нестабильным положением изображения звезды на входной щели спектрографа — несущественны. Поэтому в ряде задач подвесные спектрографы высокого разрешения используются и сегодня. Но если необходимо измерять точные положения спектральных линий, или изучать их форму (например, асимметрию, вызванную движениями вещества в атмосфере звезды), то необходимо применять методы, обеспечивающие высокую стабильность положения изображения звезды на входе спектрографа. Известно, что применение оптического волокна в качестве входа в спектрограф — более чем на порядок увеличивает стабильность засветки спектрографа. Оптоволоконное сочетание телескопа и стационарно размещенного спектрографа позволяет решить и вторую проблему — сохранения высокой стабильности оптико-механической конструкции спектрографа, как во время экспозиции, так и в течение нескольких лет эксплуатации прибора. В итоге обеспечивается высокая пространственно-временная стабильность аппаратной функции спектрографа.

Эксперименты по оптоволоконному сочетанию телескопа и спектрографа можно разделить на две группы: а) передача излучения единичного объекта от телескопа в спектрограф [4], б) сбор света от нескольких объектов, наблюдаемых в поле зрения одного телескопа [5]. Из второй группы в данной работе рассмотрим только те эксперименты, где реализовано высокое спектральное разрешение.

Первой успешной попыткой оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа высокого разрешения можно считать работу [6]. 1.6-метровый телескоп университета штата Пенсильвания был соединен оптическим волокном с эшелле-спектрографом FOE, установленным в лаборатории. Эшелле  $R2$  ( $\text{tg } \theta_B = 2$ , размер заштрихованной области  $200 \times 100$  мм, 79 штр/мм) использовалась в двух вариантах: а) с камерой  $f/2$  ( $F = 200$  мм) и с литтровской призмой скрещенной дисперсии, спектральное разрешение в этом варианте составляло  $R = 10\,000$ , б) с камерой  $f/5$  ( $F = 762$  мм) с решеткой скрещенной

дисперсии (226 штр/мм), при этом спектральное разрешение достигало величины  $R = 80\,000$ . Диаметр ядра оптического волокна составлял 200 мкм, что позволяло использовать изображение звезды диаметром до  $3.6''$ . Позиционная нестабильность спектрографа в течение ночи соответствовала изменениям лучевой скорости на  $\Delta V_r = 1$  км/с.

В 80-е годы также были построены оптоволоконные спектрографы высокого разрешения, работающие в одном порядке дифракции. Здесь и далее под оптоволоконным спектрографом будем понимать спектрограф, свет в который передается из фокуса (первичного, кассегреневского, нэсмитовского и т.д.) телескопа по оптическому волокну (оптическим волокнам). Первый спектрограф [7] для 2.14-м телескопа обсерватории Cananea (Mexico) был разработан в университете штата Джорджия. Сменные решетки с размером заштрихованной части  $128 \times 154$  мм и плотностью штрихов 1200, 400, 150 и 50 штр/мм были установлены в схеме Эберта-Фасти, коллиматором и объективом являлись участки поверхности 300 мм параболаида ( $f/3.3$ ,  $F = 980$  мм). Изображение звезды проецировалось на торец оптоволоконного жгута, состоящего из 34 волокон. Диаметр жгута составлял 300 мкм (что соответствует  $2.5''$ ), на выходе торцы волокон были выстроены в щель шириной  $0.4''$ . Каждое волокно имело полный диаметр 55 мкм, диаметр ядра — 45 мкм (далее 55/45 мкм), суммарные потери света на скважности упаковки волокон в жгут и на пропускании 10-метрового волокна составляли примерно 60%.

Для программы спектроскопического мониторинга, выполняемой на телескопах, разнесенных по долготе (например, 1.93-м телескоп обсерватории Верхнего Прованса (ОНР) и 2-м телескоп университета штата Гавайи) был разработан относительно простой спектрограф ISIS [8], конструкция которого допускала тиражирование. Спектрограф соединялся с телескопом кварцевым оптическим волокном с диаметром ядра 200 или 133 мкм. Деградация апертуры на волокне учитывалась путем увеличения относительного отверстия коллиматора. На выходе оптического волокна применялся оптоволоконный резатель изображения, изготовленный из стекла, что снижает потери на упаковке (по сравнению с кварцевыми волокнами, имеющими относительно толстую защитную оболочку). Две сменные решетки (600 и 300 штр/мм), работающие в схеме Черни-Тернера, обеспечивали спектральное разрешение  $R = 35\,000$  и  $R = 10\,000$ . Коллиматор параболический ( $d = 160$  мм,  $F = 600$  мм), камера сферическая ( $d = 200$  мм,  $F = 1000$  мм).

Для спектрографа фокуса кудэ 2.1-м телескопа KPNO был сначала изготовлен 10-метровый перемешиватель апертуры (обеспечивший, при половинной потере света, точность измерения лучевой скорости 100 м/с, с разрешением  $R = 12\,000$ ), а затем этот телескоп дополнительно оснастили оптоволоконным спектрографом [6].

Уже в первых работах по оптоволоконному сочетанию спектрографа высокого разрешения с телескопом были выявлены основные достоинства и недостатки метода. Флуктуации качества изображения, прозрачности и неточность гидирования в значительной мере проявляются в изменениях освещенности на всей площади зрачка спектрографа. Этот эффект снижает действие зональных ошибок оптики спектрографа и обеспечивает более корректный учет поэлементных неоднородностей чувствительности приемника излучения. Таким образом, при одинаковых (по сравнению с подвесным спектрографом) экспозициях обеспечивается более высокая точность измерения лучевых скоростей и повышенное отношение “сигнал/шум”. Габариты стационарно установленного спектрографа могут быть увеличены, что, в частности, позволяет реализовать схему белого зрачка (БЗ). Кроме того, конструкция стационарного спектрографа оказывается всегда дешевле конструкции подвесного спектрографа с аналогичными параметрами. Оптоволоконный спектрограф может быть перенесен

на другой телескоп, эксплуатационные расходы по поддержке спектрографа минимальны.

Но есть и недостатки метода. Во-первых, оптическое волокно имеет пониженное пропускание в ультрафиолете. Приблизительно можно считать, что для синих лучей потери на каждых 10 метрах оптического волокна эквивалентны потерям на одной алюминированной оптической поверхности. В красных лучах потери меньше, а в области  $\lambda < 3900 \text{ \AA}$  потери быстро возрастают. Во-вторых, передача излучения по волокну сопровождается деградацией апертуры (телесный угол выходящего пучка всегда больше угла входящего пучка, а интенсивность излучения внутри выходящего пучка понижается при удалении от его оси). В итоге широкощельность оптоволоконного спектрографа ухудшается как из-за соотношения угловых апертур, так и из-за уменьшения эквивалентного диаметра коллимированного пучка (т.е. диаметра равномерно освещенной площадки). В-третьих, применение камеры с центральным экранированием приводит к дополнительным потерям света (т.к. тень вторичного зеркала телескопа, наблюдаемая в конусе пучка, проецируемого на входной торец, отсутствует в конусе пучка, выходящего из волокна).

## 2. ПАРАМЕТРЫ ОПТОВОЛОКОННЫХ СПЕКТРОГРАФОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

**Таблица.** Основные параметры оптоволоконных эшелле-спектрографов высокого разрешения

$D$	$a$	$s$	$l$	$\text{tg } \theta_B$	$n$	$d$	$L$	$CD$	$F_{cam}$	$R$	$e$	$E$	$S/N$	$m$	$t$	[c]	*
0.75	100	1		2	31.6	80	220	$G$	300	70 000		1.1	235	0.0	8.8	[9]	a
		5								15 000							
0.9	125		27	2	31.6	48		$G$		90 000						[10]	b
0.91	100	4.2		2	79	90	254	$G$	300	21 000	60		100	6	10	[11]	c
	200	8.4											30	11	60		
0.9	100		15	2	31.6	80		$G$	300	20 000						[12]	d
													100	6	60		
				2	31.6	80		$G$	300	20 000			100	7.5	30		
	100															[13]	e
				2	79	54	206	$G$	750	35 000						[14]	f
1.0	100	4.5	22	2	31.6	210	408	$P$	973	41 000		18	100	7	10	[15]	g
	50	2.25								82 000			100	9.1	60		

Таблица. (Продолжение)

$D$	$a$	$s$	$l$	$\text{tg } \theta_B$	$n$	$d$	$L$	$CD$	$F_{cam}$	$R$	$e$	$E$	$S/N$	$m$	$t$	[c]	*
1.06	200	4		2	79	56	206	$G$	750	26 000			100	5.5	60	[16]	h
1.2	100	3.4	12	2	31.6	130	540	$P$	350	25 000			50	12	90	[17]	i
	50	1.7								50 000							
1.2	60	2.3		2.6	52.6	150	408	$P$	525	85 000	65	15				[18]	j
	60	2.3								50 000			100	9	10		
1.2	100	2	20	4	31.6	102		$GP$	300	50 000		1.5				[19]	k
1.5	100		13													[20]	l
1.5	200	2.75		2	59	90	200	$G$	690	32 000		1.5	500	0	1	[21]	m
1.5	200	3.6	16	2	31.6	150	375	$G$	750	15 000	80	2.8	100	10	90	[22]	n
	100	1.8								60 000			100	10	324		
1.52	100	2.7		2	79	136	306	$P$	410	48 000		16	100	12	120	[23]	o
1.52	50	2.7		2	31.6	200	408	$P$	1200	150 000						[24]	p
1.6	200	3.6		2	79	100	200	$P$	200	10 000						[6]	
	75	1.2						$G$	762	40 000							
1.88	100		25								80					[25]	q
1.9	50	2	16	2	31.6	100	206	$P$	400	39 000	92		200	7	10	[26]	r
1.93	100	2	25	4	31.6	102		$GP$	300	42 000	80	1.3	100	9.7	60	[27]	s
1.93	100	3	17	2	52.6	200	410	$P$	720	39 000	84	10.4	100	11	60	[28]	t
										75 000	34	4.3	100	10	60		
2.0	50	2.1	20	2	31.6	100	206	$P$	400	34 000	70		450	7	60	[29]	u
2.0	100	4	25							25 800		4	100	7	60	[30]	v
2.0				2	79	190	400	$P$	388	81 000			200	10	60	[31]	w
2.2	100	1.1	18	2	31.6	150	320	$P$	455	40 600	90	10	100	11	60	[32]	x
3.5	100	0.6											100	12	60		
2.56	100	1.3	40	2	31.6	150	306	$P$	520	67 000			162	10	60	[33]	y
	200	2.5								25 000		7	204	10	60		
3.6	85		38	2		200		$P$		36 800			100	10.5	210	[34]	z
3.6	133	2.6	40	2		200		$P$		83 000	90					[35]	A
	200			2		200		$P$		35 000							
3.6				2		200		$P$		194 000		7				[36]	B
3.6	70	1.0	38	4	31.6	208	840	$GP$	728	120 000		4.5	100	12	30	[37]	C

Таблица. (Продолжение)

$D$	$a$	$s$	$l$	$\text{tg } \theta_B$	$n$	$d$	$L$	$CD$	$F_{cam}$	$R$	$e$	$E$	$S/N$	$m$	$t$	[c]	*
													110	6	1		
													45	8	1		
3.6	100	1.8	27		316	320	640	$GP$	1250	120 000	72					[38]	D
3.6	100	1.6		2	79	190	400	$P$	388	81 000	42	12	300	10	60	[39]	E
													100	14	60		
3.93	300	2.0		2	316	200			400	15 000		1.5	100	13	15	[40]	F
	200	1.3								40 000							
4.0	320	3.3		4		105	408			40 000						[41]	G
5.0	150	1.4	40	2	79	203	306	$P$	610	20 000	91	5	75	15	60	[42]	H
										40 000		1.5	120	13	30		
6.0	300	3.5	1.5	2	70			$G$		10 000			300	5	5	[43]	I
6.5	320	1.8	26	2	110	259	835	$F$	770	32 000		10				[44]	J
8		1.2		2	316	180	408	$F$	360	15 000		9	100	17.5	60	[45]	K
8		1.0	55	4		200	840	$G$	500	47 000						[46]	L
8		0.9		2	87	200	408	$P$		150 000			10	14.8	60	[47]	M
9.2	400	2		3.75	31.6	179	836	$G$	500	120 000		1.2	100	8.9	30	[48]	N
	600	3											100	9.3	30		
9.2		2.2		4	31.6	200				16 000						[49]	O
										37 000							
										67 000							

## Примечания к таблице:

- a** — Гейдельберг, линзовая камера;
- b** — спектрограф Серковского (Serkowski) с интерферометром Фабри-Перо (ИФП), Лунно-Планетная Лаборатория (LPL);
- c** — FRESKO, обсерватория Catania, адаптация кассегреневского спектрографа фирмы REOSC, линзовая камера,  $\Delta V_r < 0.3$  км/с;
- d** — HEROS, синяя и красная ветви, светоделитель в коллимированном пучке, линзовые камеры;
- e** — HEROS на 2-метровом телескопе обсерватории Ондражейов;
- f** — адаптация подвешенного кассегреневского спектрографа MJUO;
- g** — вакуумный HERCULES, камера ломаный Шмидт с центральным экранированием,  $\Delta V_r \sim 15$  м/с;
- h** — обсерватория Ritter, Toledo, адаптация подвешенного кассегреневского спектрографа;
- i** — SES на робот-телескопе STELLA-I, обсерватория Teide. БЗ, камера с центральным экранированием. Масштабированная копия SES установлена на 0.8 м робот-телескопе STELLA-II;
- j** — HERMES, БЗ, линзовая камера, теоретическая оценка  $S/N$ ;
- k** — CORALIE, БЗ, улучшенная копия ELODIE; пиксель  $15 \times 15$  мкм;
- l** — Гарвард, адаптация подвешенного кассегреневского спектрографа;
- m** — AFOE, БЗ, линзовая камера. С оптоволоконном 200 мкм  $R = 32 000$ ,  $FWHM = 5.3$  пикселя. Со щелью 115 мкм после 200 мкм фибера —  $R = 51 000$ ,  $FWHM = 3.05$  пикселя. Потери на щели порядка 50%;
- n** — СТЮ ВМЕ, камера с центральным экранированием, регулируемая щель после оптоволоконка;

- o** — FEROS, БЗ, линзовая камера, перенесен с 1.5 м телескопа на 2.2 м MPI;
- p** — EMILIE, вакуумный спектрограф с ИФП, абсолютная акселерометрия;
- q** — DDO, оптоволоконное сочетание с термостатируемым помещением “псевдокудэ”;
- r** — GIRAFFE, копия MuSiCOS;
- s** — ELODIE, БЗ, вторичный коллимированный пучок понижен до 75 мм, линзовая камера;
- t** — SOPHIE, ломаный Шмидт в автоколлимации, призма двойного хода, при щели 40.5 мкм на выходе оптоволоконна реализуется мода высокого разрешения “HR”  $R = 75\,000$ . Оптоволоконно без щели реализует моду высокой световой эффективности “HE”  $R = 39\,000$ ;
- u** — MuSiCOS, сменные призмы скрещенной дисперсии, линзовая камера;
- v** — TRAFICOS, автоколлимационный спектрополяриметр;
- w** — NARVAL, копия спектрополяриметра ESPaDOnS;
- x** — FOCES, БЗ, линзовая камера, используется преимущественно на 2.2 м телескопе;
- y** — FIES, БЗ, линзовая камера;
- z** — CES ESO;
- A** — переброс из первичного фокуса (PF) 3.6 м в CES ESO;
- B** — переброс из касегреновского фокуса 3.6 м в VLC CES, резатель на большое число срезов;
- C** — вакуумный HARPS, БЗ, линзовая камера, имеется спектрополяриметрическая мода;
- D** — GECKO CFHT, зеркально-линзовая камера;
- E** — ESPaDOnS, БЗ, линзовая камера. В режиме спектрополяриметра после оптоволоконна 3 среза,  $R = 68\,000$ , в обычном режиме — 6 срезов,  $R = 81\,000$ ;
- F** — HYDRA CTIO с эшелле, камера с центральным экранированием; с камерой  $F = 400$  мм и с узкими щелями  $R \sim 50\,000$ ;
- G** — HiRes LAMOST. БЗ. Копия FOCES;
- H** — EAE, автоколлимационный, линзовая камера, оптоволоконно 150 мкм — в моде низкого разрешения, щель шириной 34 мкм на выходе 150 мкм фибера — в моде высокого разрешения;
- I** — спектрограф в первичном фокусе, короткое волокно, узкая щель после оптоволоконна, линзовая камера;
- J** — Nectoechelle, одновременная регистрация 240 объектов в избранном порядке эшелле, камера с центральным экранированием;
- K** — FLAMES + GIRAFFE, одновременная регистрация 132 объекта в одном порядке эшелле, линзовая камера;
- L** — FLAMES + UVES (красная ветвь), БЗ, одновременная регистрация эшелле-спектров для 8 объектов, линзовая камера;
- M** — bHROS Gemini South, линзовая камера, эпизодически использовался с 2005 по 2007 г.;
- N** — HRS HET, синяя и красная ветви, линзовые камеры;  $R \sim 15\,000, 30\,000, 60\,000, \text{ и } 120\,000$  для различных значений ширины щели;

**O** — вакуумный SELESTIA SALT, БЗ, вторичный коллимированный пучок понижен до 111 мм, синяя и красная ветви, VPH-решетки скрещенной дисперсии, линзовые камеры,  $R = 37\,000$  и  $R = 67\,000$  с резателем.

Перечисление основных разработок оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа высокого разрешения удобно проводить в порядке возрастания диаметра телескопа. Это подчеркнет некоторые методические особенности, возникающие при переходе к телескопам большого диаметра. В таблице приводим основные характеристики оптоволоконных эшелле-спектрографов. Приняты следующие обозначения:  $D$  — диаметр телескопа (м),  $a$  — диаметр ядра оптоволоконна (мкм),  $s$  — диаметр звездного изображения, перехватываемого оптоволоконном (угл. сек),  $l$  — длина оптического волокна (м),  $\text{tg } \theta_B$  и  $n$  — угол блеска и плотность штрихов (штр/мм) эшелле,  $d$  — диаметр коллимированного пучка (мм),  $L$  — длина заштрихованной области эшелле (мм),  $CD$  — тип порядкоразводящего элемента ( $P$  — призма,  $G$  — решетка,  $F$  — фильтрация избранного спектрального порядка),  $F_{cam}$  — фокусное расстояние камеры (мм),  $R = \lambda/\Delta\lambda$  — спектральное разрешение,  $e$  — пропускание оптоволоконна (%),  $E$  — эффективность системы “телескоп–волоконно–спектрограф” (%),  $S/N$  — отношение сигнал/шум,  $m$  — звездная величина в полосе  $V$ ,  $t$  — время накопления сигнала (мин), [c] — основная использованная публикация, \* — примечания.

Анализ таблицы, цитируемой литературы и доступных нам расписаний наблюдений на некоторых телескопах позволяет сделать следующие выводы:

1. Из 38 спектрографов только 5 использовалось на двух и более телескопах, диаметром до 2 м. Следовательно, возможность переноса оптоволоконного спектрографа с телескопа на телескоп не является основным достоинством метода.
2. Существует несколько специализированных телескопов среднего диаметра, работающих только с оптоволоконными спектрографами высокого разрешения. Наблюдения выполняются в режиме удаленного доступа. Есть примеры монопольного использования телескопов большого диаметра в сочетании с оптоволоконным спектрографом (3.6-м ESO + HARPS и 2-м TBL + NARVAL).

3. Переход на большие многопрограммные телескопы сопровождается снижением доли использования спектрографа высокого разрешения. Но при увеличении  $D$  в поле телескопа оказывается больше объектов, доступных для наблюдений с высоким спектральным разрешением. Поэтому эффективность оптоволоконного метода высокого разрешения можно увеличить за счет применения многообъектных методов (HYDRA, HiRes + LAMOST, Hectoechelle, FLAMES + GIRAFFE, FLAMES + UVES).
4. Линзовые камеры преобладают, иногда катадиоптрическая камера с центральным экранированием, впоследствии заменяется на линзовую (FRESCO). Использование камеры с центральным экранированием оправдано лишь в схемах многообъектных спектрографов с рекордными значениями коллимированного пучка (Hectoechelle), где потери центральной части пучка, выходящего из каждого оптоволоконного, компенсируются информационным выигрышем за счет большого числа одновременно регистрируемых объектов.
5. Около половины спектрографов построено по схеме белого зрачка, что в ряде случаев позволило применить эшелле с большим углом блеска, получая дополнительный выигрыш в широкощельности. Схема белого зрачка позволяет понизить диаметр вторичного коллимированного пучка (ELODIE, SELESTIA SALT) и применить решетку скрещенной дисперсии VPH (с объемным голографическим фазированием) — SELESTIA SALT.
6. Если исключить подвесные кассегреновские спектрографы, адаптированные под оптоволоконное сочетание, то среднее значение  $d$  для телескопов с  $D < 3$  м составляет 132 мм. Для телескопов с  $D > 3$  м среднее значение  $d$  составляет 207 мм. Дополнительный выигрыш в спектральном разрешении (или в светосиле по потоку) на больших телескопах осуществляется за счет увеличения угла блеска эшелле (переход от  $R2$  к  $R3$  и  $R4$ ).
7. Средняя длина оптического волокна составляет 26 м, увеличиваясь от 19 м до 38 м при переходе к  $D > 3$  м.
8. Средний диаметр оптического волокна для  $D < 3$  м составляет 106 мкм, для  $D > 3$  м — 234 мкм.
9. Ряд спектрографов (CORALIE, ELODIE, SOPHIE, HARPS) построен для задачи прецизионного измерения доплеровских смещений. Оптоволоконное сочетание таких приборов включает перемешиватель апертуры (скрамблер), соответствующие дополнительные потери составляют до 30% света, поступающего на вход волокна.
10. Эффективность системы “телескоп—волоконно—спектрограф—приемник” составляет несколько процентов, достигая рекордных значений ( $> 10\%$ ) у HERMES, FEROS, SOPHIE, FOCES, ESPaDOnS, и Hectoechelle. Две из этих систем (SOPHIE и Hectoechelle) используют камеры с центральным экранированием.

### 3. СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И ШИРОКОЩЕЛЬНОСТЬ

Пользуясь величинами  $D$ ,  $\text{tg } \theta_B$ ,  $d$  и  $R$  из таблицы 1, по формуле  $S = 2d \text{tg } \theta_B / DR$  (см., например, [3]) можно оценить угловую ширину щели  $S$  в приближении автоколлимации. Ее можно сравнить с угловым диаметром звездного изображения, перехватываемого оптическим волокном —  $s$ . На Рис. 1 проведено сравнение  $s$  и  $S$ . Если точки лежат в окрестностях диагонали, это означает, что спектральное разрешение  $R$ , указанное в таблице, определяется диаметром оптоволоконного. Некоторый разброс точек определяется индивидуальными особенностями оптических схем (неучтенные отклонения от автоколлимации могут приводить к занижению  $S$ ), но для большинства схем белого зрачка приближение автоколлимации является довольно точным. На Рис. 1 значительное количество точек находится в области  $S < s$ , это означает, что спектральное разрешение  $R$  повышается либо за счет установки на выходе из волокна дополнительной щели, либо за счет резателя изображения. Для  $D > 3$  м такие конструктивные решения преобладают, тогда как для  $D < 2.5$  м щель на выходе из волокна используется реже (менее чем у четверти спектрографов) и только в одном случае (FEROS) используется резатель изображений (на два среза). Использование узкой щели может существенно снизить проникающую способность метода (см., например, [43]).

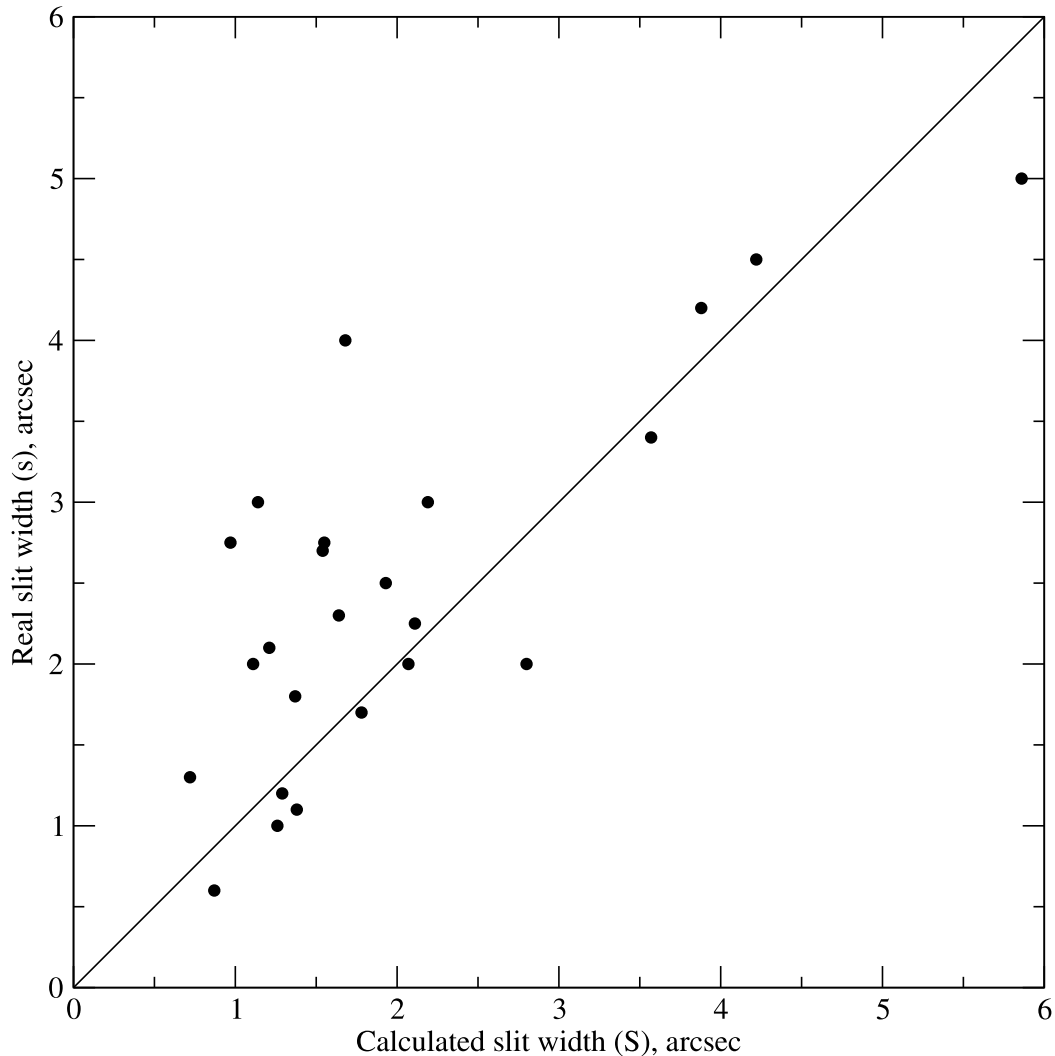


Рис. 1. Связь угловой ширины щели  $S$  (абсцисса), оцененной в приближении автоколлимации, с диаметром ядра оптоволоконного волокна  $s$  (выраженным в угловой мере).

#### 4. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕКТРОГРАФОВ

Приводимые в литературе результаты испытания различных спектрографов отличаются по всем параметрам: диаметр используемого телескопа, спектральное разрешение, время экспозиции, звездная величина, качество изображения, отношение сигнал/шум. Для сравнения эффективности спектрографов следует уменьшить число свободных параметров. Условимся, что наблюдения выполняются на телескопе  $D = 1$  м, время экспозиции  $t = 1$  час, отношение  $S/N = 10$  на элемент разрешения. Тогда критерием, позволяющим сравнить эффективность различных спектральных систем, является функция достижимой при данных параметрах звездной величины от спектрального

разрешения (рис. 2). Для упрощения оценки эффективности спектрографов не будем учитывать качество изображения, т.е. будем считать, что весь свет, собранный телескопом попадает в оптическое волокно. Конечно, такое упрощение может привести к сильной недооценке эффективности спектрографа, однако, для телескопов умеренного диаметра угловой размер входного торца оптического волокна всегда превышает, иногда в несколько раз, среднее качество изображения, характерное для места установки данного телескопа. При пересчете освещенности на единый диаметр телескопа мы ограничились спектрографами, установленными на телескопах с  $D < 4$  м.

Для связи отношения сигнал/шум на элемент спектрального разрешения, звездной величины и



эффективности спектрографа мы использовали формулу из [50]:

$$\frac{S/N}{= \frac{3600 \tau N_o t \times 10^{-0.4(m_\lambda - m_o)}}{\sqrt{3600 \tau N_o t \times 10^{-0.4(m_\lambda - m_o)} + W b^{-1} N_r^2 + W t T}}},$$

где  $\tau$  — эффективность спектрографа,  $N_o$  — сигнал, накопленный в единицу времени в единичном элементе приемника ( $e^- \text{ sec}^{-1} \text{ pix}^{-1}$ ) от звезды с величиной  $m_o$ ,  $W$  — высота спектрального порядка в пикселях,  $N_r$  — шум считывания в  $e^- \text{ pix}^{-1}$ ,  $T$  — темновой ток в  $e^- \text{ pix}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ,  $t$  — время экспозиции в часах,  $b$  — фактор биннинга в направлении, перпендикулярном дисперсии.

Результаты оценок приведены на рис. 2. Разброс точек частично можно объяснить использованием в конструкциях некоторых спектрографов дополнительных устройств для увеличения спектрального разрешения, таких как резатель изображения или щель на выходе оптического волокна. Резатель изображения увеличивает спектральное разрешение в число раз, равное количеству срезов, перемещая точку на рис. 2 слева направо вдоль оси  $R$ . Дополнительно на рис. 2 представлены теоретические зависимости предельной звездной величины от спектрального разрешения, рассчитанные при том же значении диаметра телескопа  $D = 1$  м (с учетом центрального экранирования главного зеркала, равного 11%), времени экспозиции  $t = 1$  час и отношении сигнал/шум  $S/N = 10$ , при различной эффективности  $\tau$  системы телескоп–спектрограф–приемник (100%, 10%, 1% и 0.1%). Для теоретической оценки использовалась величина атмосферной экстинкции на зенитном расстоянии  $Z = 45^\circ$  для обсерватории, расположенной на высоте 2000 м над уровнем моря. При  $S/N = 10$  шумом считывания и темновым током современных ПЗС-приемников можно пренебречь. Величину  $N_o$  для теоретических оценок мы рассчитывали не на элемент приемника, а на элемент спектрального разрешения  $\delta\lambda = \lambda/R$ , поскольку зачастую информация о ширине аппаратной функции спектрографа отсутствует.

Из Рис. 2 следует, что определяющим фактором является уровень потерь на многочисленных поверхностях системы ”телескоп — согласующая оптика — оптическое волокно — согласующая оптика — щель (или резатель) — эшелле-спектрограф высокого разрешения“. Использование высокоэффективных отражающих и просветляющих покрытий эквивалентно увеличению диаметра телескопа в 2–3 раза.

## 5. РАЗВИТИЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

По типу технического решения можно выделить, по крайней мере, четыре категории оптоволоконных спектрографов. К первой отнесем уже существовавшие подвесные касегреновские спектрографы с небольшим диаметром коллимированного пучка, переоборудованные впоследствии для оптоволоконного сочетания с телескопом [11, 14, 16, 20, 25]. Применение оптоволоконна приводило к дополнительным потерям света (по сравнению с подвесным вариантом), но обеспечивало долговременную стабильность аппаратной функции.

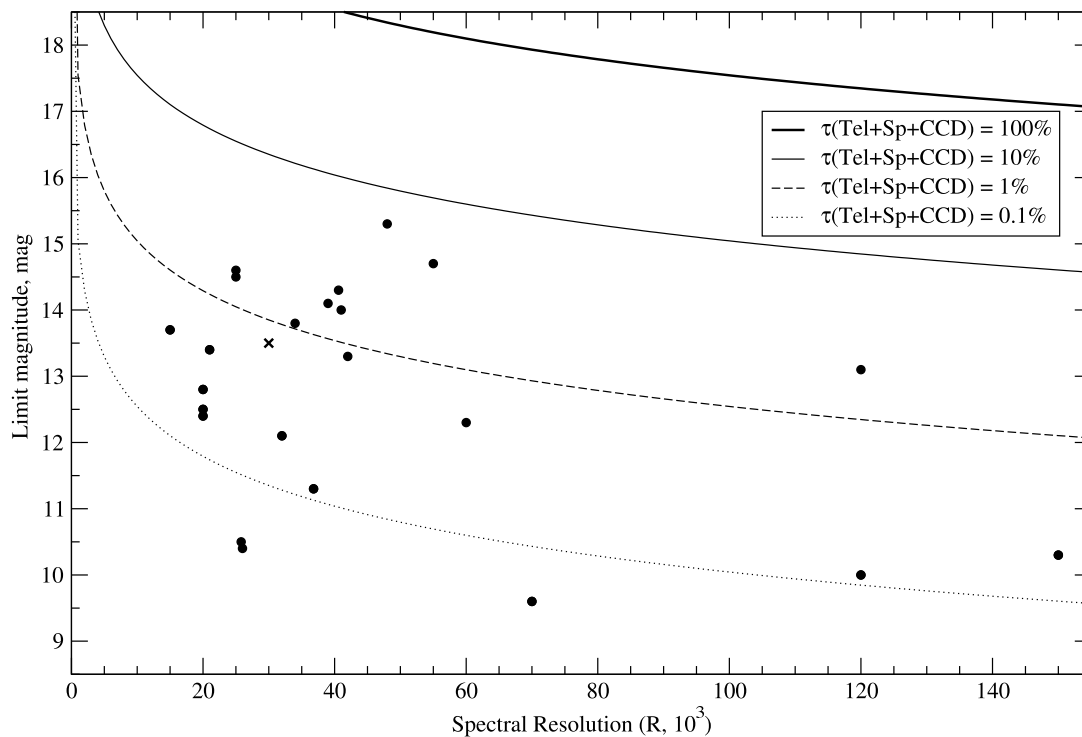
Ко второй категории отнесем оптоволоконные сочетания со спектрографами фокуса кудэ [34, 35, 38], где впервые было применено сочетание оптического волокна с резателем изображения. При этом потери на длинном волокне оказались практически сравнимыми с потерями на оптическом тракте фокуса кудэ. Такие системы не получили широкого распространения, но послужили для отработки технологии оптоволоконного сочетания, без создания специализированного спектрографа.

Следует отметить, что в первых экспериментах по оптоволоконному сочетанию спектрографа с телескопом использовалось связанное волокно, как правило ориентированное на работу с монохроматическим излучением. Но уже в 80-е годы были разработаны средства целенаправленного создания оптических волокон астрономического назначения и методы лабораторного испытания оптических волокон (см., например, [51–53]).

К третьей категории отнесем спектрографы, изначально сконструированные под оптоволоконное сочетание с телескопами диаметром 0.5–2.5 м. По типу оптической схемы спектрографа эту категорию можно разделить на классические схемы [6, 9, 12, 15, 22, 26, 29], автоколлимационные [24, 28, 30] и схемы белого зрачка [17–19, 23, 27, 31–33].

В четвертой категории спектрографов, ориентированных на использование телескопов большого диаметра ( $D = 3.6–9$  м), преобладает схема белого зрачка [37, 39, 41, 46–49], и только один прибор построен по автоколлимационной схеме [42]. В многообъектных методах используются зеркально-линзовая камера с центральным экранированием [44] и автоколлимационная линзовая схема [45].

Руководящими идеями, продвигающими разработку оптоволоконных спектрографов высокого разрешения для телескопов среднего диаметра,



**Рис. 2.** Зависимость предельно достижимой на телескопе с  $D = 1$  м за 1 час с отношением  $S/N = 10$  звездной величины  $m$  от спектрального разрешения  $R$  (в тысячах) для оптоволоконных спектрографов, указанных в таблице. Крестиком показан оптоволоконный эшелле-спектрограф, разработанный нами для телескопа метрового класса. Линиями показаны теоретические зависимости, рассчитанные для разных коэффициентов пропускания  $\tau$  системы телескоп–спектрограф–светоприемник.

являлись задачи астеросейсмологии и задачи поиска внесолнечных планет (экзопланет). В первом случае необходимо было использовать несколько одинаковых спектрографов, распределенных по долготе. Соответствующие координированные наблюдения необходимы для изучения спектра нерадиальных пульсаций — одного из немногих методов диагностики внутреннего строения звезд. Был разработан относительно недорогой спектрограф MuSiCOS [29], предназначенный для работы с телескопами диаметром около 2 м (Гавайи, Китай, Европа). Копия этого спектрографа была установлена на 1.9-м телескопе SAAO [26].

Если в астеросейсмологических исследованиях необходимо организовать краткосрочные (в течение 2–3 суток) синхронные наблюдения на двух-трех телескопах, то в задаче поиска экзопланет решающим является использование одного и того же спектрографа в течение ряда лет, причем на одном и том же телескопе. Важным условием является “неприкосновенность” спектрографа — с целью сохранения стабильной аппаратной функции спектрографа нельзя изменять углы диспергирующих элементов и требуется сохранять неизмен-

ными все юстировки. Такие условия были лучше всего выполнены на 1.9-м телескопе ОНР со спектрографом ELODIE [27], конструкция последнего позволяет непрерывно производить калибровку линейчатым спектром через второе оптическое волокно. В 1998 г. вступила в строй улучшенная (с матрицей бóльшего формата) копия ELODIE — спектрограф CORALIE [19], для которого был специально построен 1.2-м телескоп. Эта работа ознаменовала этап создания специализированных телескопов–роботов, работающих с оптоволоконными эшелле-спектрографами высокого разрешения (см., например, [17, 18]). Специализированные инструменты оказались наиболее эффективными как по проникающей способности, так и по сохранению требуемой позиционной точности в течение длительного времени.

Более крупные телескопы (например, 3.6-м ESO и CFHT, оснащенные оптоволоконными спектрографами HARPS [37] и Gecko [38, 54] соответственно) используются как в задаче поиска внесолнечных планет вблизи звезд, недоступных телескопам среднего диаметра, так и в астеросейсмологических исследованиях самых ярких

звезд неба, где требуется обеспечить высокое временное разрешение. Эффективность указанных спектрографов в значительной мере определяется системами точного удержания звезды на входе оптоволоконна (CFA и SAFE [38] соответственно).

Обратимся к некоторым интересным техническим решениям. Для точных измерений доплеровских смещений на 1.5-м телескопе обсерватории им. Ф. Уиппла был создан спектрограф AFOE [21], название которого подчеркивает развитие конструкции первого оптоволоконного эшелле-спектрографа FOE [6], — “Advanced FOE”. Оптоволоконно диаметром 200 мкм захватывает изображение диаметром 2.75”. Компоненты спектрографа: внеосевой параболаид ( $F = 1200$  мм) в качестве коллиматора, эшелле R2 (100 × 200 мм, 59 штр/мм), решетка скрещенной дисперсии 150 штр/мм, камерой служит гиперболическое зеркало с двухлинзовым корректором в сходящемся пучке [55] (эффективное фокусное расстояние  $F = 690$  мм). Известно еще одно применение камеры, построенной по схеме Росина, — в спектрографе Gesco CFHT [54]. Основным новшеством в концепции AFOE является применение оптоволоконного коммутатора, позволяющего изменять функциональные назначения некоторых из 7 оптических волокон. Такой прием позволяет устранить ошибки, связанные с рассогласованием каналов (см., например, [56]).

Большинство телескопов, упомянутых выше, создавалось для обеспечения широкого набора наблюдательных программ. Применение оптоволоконного сочетания снижает требования к обеспечению высокого качества изображения на большом поле зрения телескопа. Например: а) величина центрального экранирования вторичным зеркалом (или кабиной первичного фокуса на большом телескопе) оказывается избыточной при спектроскопии одной звезды; б) относительное отверстие питающего зеркала может быть изменено путем применения микрооптики на входе волокна. Поэтому следующий шаг в развитии оптоволоконного сочетания телескопа и спектрографа должен был проявиться в разработке оптимальной конструкции телескопа. В университете штата Джорджия был создан “мультителескопный телескоп” (МТТ), состоящий из девяти собранных на одной монтировке телескопов, оптические оси которых выставлены параллельно друг другу [57]. В фокусе каждого из 9 зеркал ( $D = 33$  см,  $f/4.4$ ) расположен оптоволоконный вход, девять волокон на выходе собраны в “щель”, являющуюся входом в спектрограф [7]. Используются волокна диаметром 100 мкм, согласование апертур на входе (в диапазоне от  $f/12$  до

$f/6$ ) обеспечивается линзочками Барлоу, что соответствует использованию изображений диаметром от 5.25 до 10.5”. По светособирающей способности МТТ эквивалентен классическому телескопу диаметром 1.3 м, но стоимость оптики МТТ в 30 раз ниже. МТТ является первым телескопом, построенным специально для оптоволоконного спектрографа высокого разрешения.

И все-таки основной линией развития схем оптоволоконных спектрографов высокого разрешения является увеличение  $d$  и увеличение угла блеска эшелле  $\theta_B$ , т.е. переход от R2 к R3–R4. Использование таких значений ограничивает варианты ориентации решетки (при наклоне оси коллимированного пучка к главной плоскости эшелле развивается астигматизм). Поэтому применение эшелле R3–R4 сочетается со схемой белого зрачка, впервые предложенной еще в начале 70-х [58]. В этой схеме используется дополнительный коллиматор, который компенсирует внеосевые aberrации основного коллиматора и строит изображение белого зрачка на элементе скрещенной дисперсии. Одновременное увеличение  $d$  и  $\theta_B$  позволило продвинуть технику эшелле-спектроскопии на телескопы большего диаметра.

## 6. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ ОПТОВОЛОКОННЫЙ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА УМЕРЕННОГО ДИАМЕТРА

Первой работой, выполненной в CAO по оптоволоконному сочетанию телескопа и эшелле-спектрографа, является адаптация эшелле-спектрографа автоколлимационного (ЭСПАК) [59] к телескопу Цейсс-1000 ( $D = 1.01$  м,  $F = 13.3$  м), выполненная в 1996 году одним из авторов (В.Е.П.). Спектрограф ЭСПАК использовался на БТА как с двумерным счетчиком фотонов, так и с первыми матрицами ПЗС, что отразилось на его оптико-механической конструкции. После демонтажа прибора с БТА механика спектрографа, система калибровки и управления были реконструированы. Вертикальная компоновка оптических элементов (см. [Рис. 1, 59]) была заменена на горизонтальную, эшелле с плотностью штрихов 75 штр/мм заменена на эшелле 37.5 штр/мм, оптика, согласующая коллиматор спектрографа с относительным отверстием фокуса Нэсмита БТА, заменена на оптику, согласующую оптическое волокно с коллиматором спектрографа. Схема подмотра изображения звезды, проецируемого на торец оптоволоконна, аналогична примененной в работе [42]. Использовались 9-метровые

отрезки оптоволокна с диаметром ядра  $a = 50$  мкм и 100 мкм. Блок-схема оптоволоконного варианта спектрографа ЭСПАК приведена на Рис. 3.

Функции коллиматора и камеры выполняет линзовый объектив  $F = 365$  мм. Пучок, выходящий из оптоволокна, разворачивается на  $80^\circ$  призмочкой, установленной вблизи плоскости светоприемника, и заполняет коллиматор. Коллимированный пучок диаметром  $d = 100$  мм попадает на узел скрещенной дисперсии, которым является призма из крона с преломляющим углом  $A = 34^\circ$  и толщиной основания 95 мм. Длина грани призмы 156 мм, ширина 130 мм. Призма установлена на угол минимального отклонения. Пучки, расходящиеся после призмы, перехватываются эшелле, установленной в автоколлимации. Размеры заштрихованной части эшелле  $260 \times 106$  мм, плотность штрихов — 37.5 штр/мм, угол блеска —  $\theta_B = 64.3^\circ$ ,  $\text{tg } \theta_B = 2.078$ , концентрация энергии в максимуме составляет 73% в долях отраженного света. Эшелле работает в автоколлимации (угол падения  $\alpha$  равен углу дифракции  $\beta$ ), с небольшим разворотом по углу  $\gamma$  (между падающим пучком и главной плоскостью эшелле),  $\gamma \neq 0$ , случай “С” по Шредеру и Хилларду [60]. Пучки, расходящиеся после эшелле, возвращаются через призму, объектив строит изображение на плоскости матрицы, формат которой составляет  $580 \times 520$  элементов (пикселей). Размер одного элемента  $24 \times 18$  мкм, размер светоприемника составляет 12 мм вдоль спектрального порядка и 9 мм поперек основной дисперсии. Широкощельность для автоколлимационной схемы равна 1, и диаметру волокна 100 мкм на входе коллиматора соответствует монохроматическое изображение с таким же диаметром на выходе камеры (4.2 пикселя на матрице ПЗС). Спектральное разрешение автоколлимационного оптоволоконного спектрографа оценим по формуле  $R = 2d \text{tg } \theta_B / Dsr$  [3], где коэффициент деградации апертуры  $r > 1$ . Деградация апертуры проявляется слабее при больших относительных отверстиях (см., например, [61]), поэтому относительное отверстие кассегреновского фокуса (1:13.3) преобразуем на входе оптоволокна в 1:4. В этом случае на выходе оптоволокна получим пучок, согласованный с коллиматором. Масштаб на входе в оптоволокно составляет  $47.2''/\text{мм}$ , т.е. теперь для волокна диаметром 100 мкм  $s = 4.7''$ . Принимая  $r \sim 1.1$ , получим оценку спектрального разрешения  $R \sim 16\,000$ . Конструкция спектрографа позволяет переставить оптоволоконный вход таким образом, чтобы эшелле работала и в случае “А”, когда  $\alpha > \beta$ , и  $\gamma = 0$ , см. [60, Рис. 2]. В этом случае вдоль направления дисперсии ширина проекции выходного

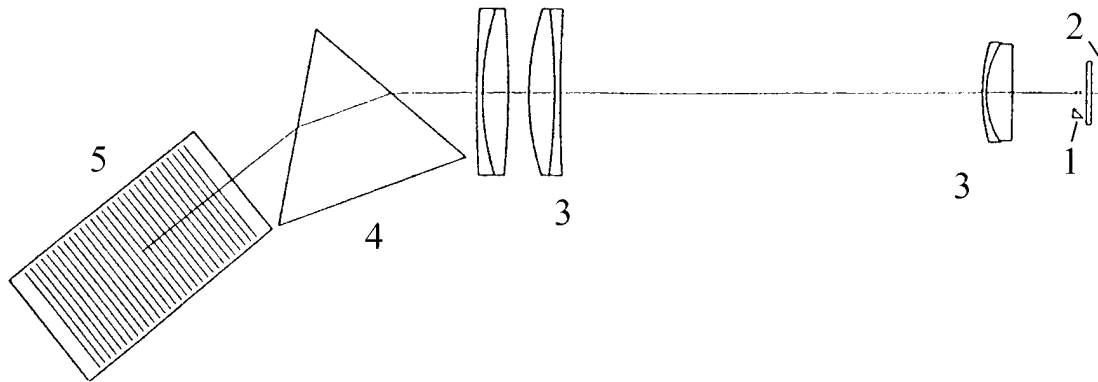
торца может быть уменьшена до 3.3 пикселя, таким образом от источника линейчатого спектра получаем совокупность монохроматических эллипсов с разностью полуосей около одного пикселя. Произведение величины спектрального разрешения  $R$  на угловую ширину “щели” при этом возрастет. Однако спектральное разрешение не только возрастает, но и уменьшается (на 5–6%), за счет того, что используется призма двойного хода. Действительно, размещение узла скрещенной дисперсии до эшелле приводит к наклону спектральной линии к оси порядка, причем угол наклона изменяется с длиной волны. В случае оптоволоконного входа наблюдаем совокупность эллипсов, деформированных за счет использования призмы двойного хода. В диапазоне 4000–6900 Å регистрировались спектральные порядки от  $m = 119$  до  $m = 70$  без перекрытия длин волн соседних порядков. Отметим, что в экспериментах использовался светоприемник, имеющий низкий квантовый выход в синей области спектра.

Основным достоинством автоколлимационной схемы является компактное размещение основных оптических узлов, что существенно снижает потери на виньетирование краев спектральных порядков (или позволяет применить камеру меньшего диаметра при заданной величине виньетирования). Эксперименты с автоколлимационным оптоволоконным эшелле-спектрографом показали, что основными проблемами для нас явилось обеспечение процесса автоматического гидирования изображения объекта на входе оптоволокна, а также неудовлетворительная инженерная поддержка светоприемника.

## 7. ОПТОВОЛОКОННЫЙ ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА УМЕРЕННОГО ДИАМЕТРА

В 2008 году нами был разработан оптоволоконный спектрограф для телескопа диаметром 1.2 м. К спектрографу предъявлялись следующие требования:

- спектрограф должен обеспечивать спектральное разрешение не менее  $R = 30\,000$ ;
- рабочий диапазон длин волн должен быть не менее 3900–10500 Å;
- спектрограф должен быть ориентирован на работу с охлаждаемой матрицей ПЗС форматом  $2048 \times 2048$  элементов и размером элемента  $13.5 \times 13.5$  мкм.



**Рис. 3.** Схема оптоволоконного автоколлимационного эшелле-спектрографа ЭСПАК. Обозначения: 1 — призмочка оптоволоконного входа, 2 — матрица ПЗС, 3 — оптика объектива, 4 — призма скрещенной дисперсии, 5 — эшелле.

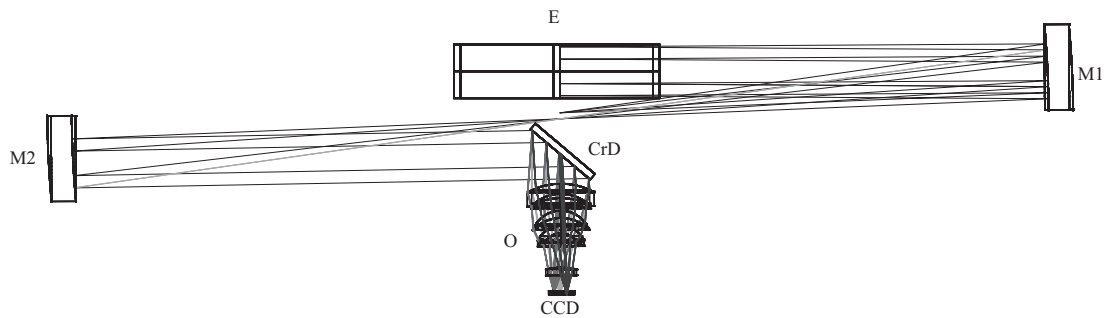
Руководствуясь приведенной выше статистикой параметров оптоволоконных спектрографов для телескопов умеренных размеров, а также доступными технологическими возможностями, мы остановились на следующей схеме спектрографа (Рис. 4).

Спектрограф построен по схеме белого зрачка, что позволяет достичь высокое спектральное разрешение при сравнительно небольшом диаметре коллимированного пучка (данная схема, как было сказано выше, позволяет применять эшелле-решетки с большим углом блеска, которые обладают значительным астигматизмом при работе вне главной плоскости), а также обеспечивает оптимальное распределение интенсивности вдоль спектрального порядка. Коллиматор представляет собой два одинаковых внеосевых параболоида с общим фокусом (апертура каждого параболоида  $175 \times 350$  мм, фокусное расстояние 1000 мм), диаметр коллимированного пучка составляет  $d = 100$  мм. В качестве основного диспергирующего элемента используется эшелле-решетка  $R4$  ( $\theta_B = 76^\circ$ ) с плотностью штрихов 37.5 штр/мм. В качестве элемента скрещенной дисперсии используется дифракционная решетка размером  $120 \times 170$  мм и плотностью штрихов 300 штр/мм, работающая в первом порядке. Поскольку, во-первых, в оптическом волокне происходит перемешивание апертуры телескопа, и в выходящем из волокна пучке исчезает тень от вторичного зеркала, а во-вторых, угловое распределение интенсивности излучения на выходе из оптического волокна в первом приближении описывается экспоненциальным законом, было принято решение применить линзовую камеру, свободную от центрального экранирования. В качестве камеры спектрографа, строящей изображение спек-

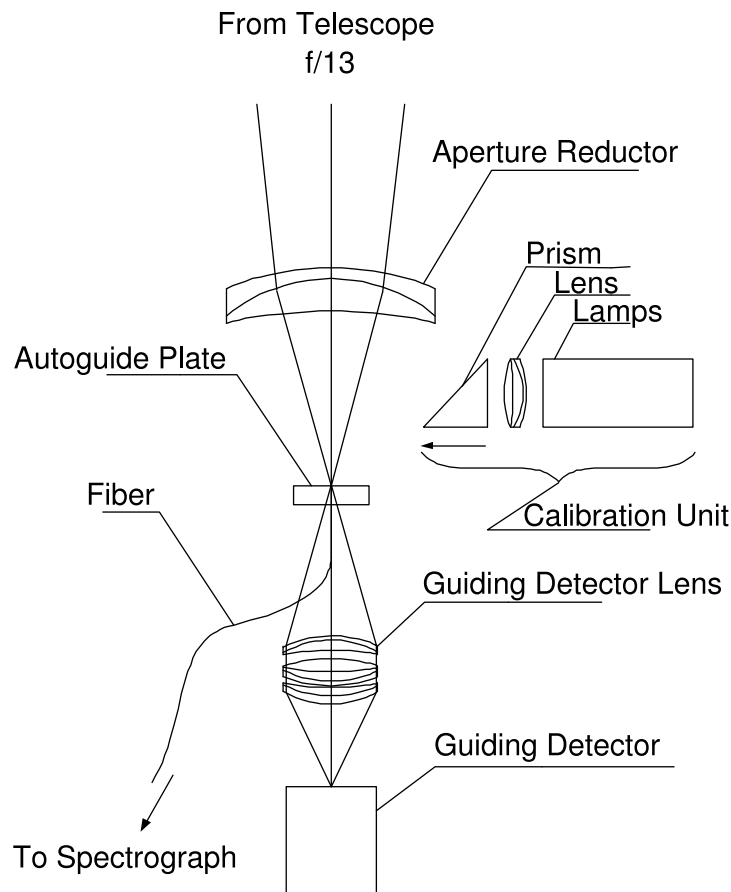
тра на матрице ПЗС, мы решили использовать промышленный объектив Сапоп с фокусным расстоянием  $F_{cam} = 200$  мм и относительным отверстием 1:1.8, обладающий, несмотря на большое количество оптических элементов, хорошим пропусканием во всем оптическом диапазоне, включая ближний УФ и ближний ИК. На матрице ПЗС в диапазоне 4000–7800 Å одновременно регистрируется 60 спектральных порядков. Смена рабочего диапазона осуществляется поворотом элемента скрещенной дисперсии. Поскольку линзовая камера обладает вторичным спектром, смена рабочего диапазона сопровождается изменением наклона плоскости матрицы ПЗС относительно оптической оси камеры спектрографа. Оптическая схема основной (стационарной) части спектрографа представлена на Рис. 4.

Подвесная часть спектрографа устанавливается в фокусе Нэсмита и содержит (Рис. 5):

- редуктор светосилы телескопа, согласующий апертуру телескопа с числовой апертурой оптического волокна, что позволяет снизить световые потери в оптическом волокне за счет деградации апертуры светового пучка;
- позиционер, удерживающий оптическое волокно;
- узел калибровки с источниками линейчатого и непрерывного спектра;
- систему стабилизации изображения звезды на входе в оптическое волокно;
- затвор спектрографа;



**Рис. 4.** Схема стационарной части оптоволоконного эшелле-спектрографа. Обозначения: E — эшелле, M1 — зеркало первого коллиматора, M2 — зеркало второго коллиматора, G — решетка скрещенной дисперсии, O — объектив камеры, CCD — плоскость светоприемника.



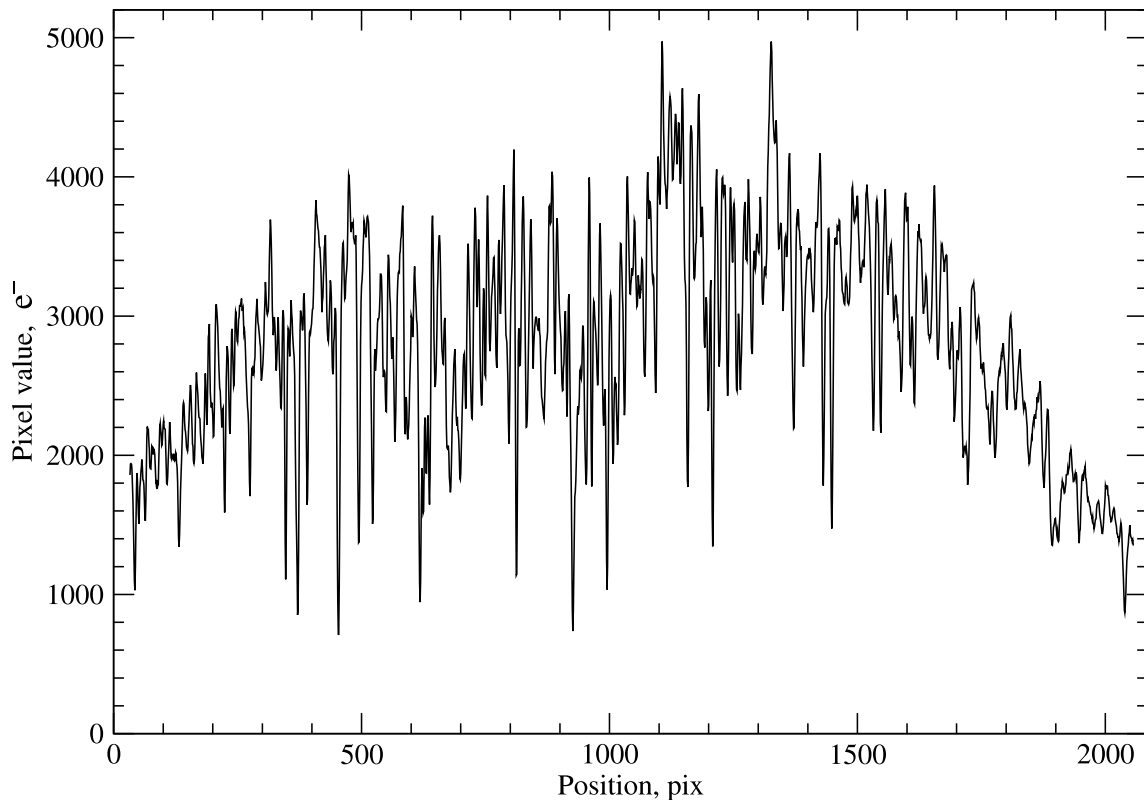
**Рис. 5.** Схема подвесной части оптоволоконного спектрографа.

- систему подмотра поля.

Точность позиционирования и однозначного удержания изображения звезды определяет не только световую эффективность, но и форму аппаратной функции спектрографа. Неполное перемешивание угловой апертуры в оптоволокне

оставляет ошибки измерения лучевой скорости

на уровне нескольких м/с, см. [62]. К проблеме удержания изображения звезды на входе оптоволоконного спектрографа мы обратились после приобретения опыта создания и эксплуатации локальных корректоров положения звезды для



**Рис. 6.** Фотометрический разрез одного из порядков ( $m = 70$ , центральная длина волны  $7392 \text{ \AA}$ ), эшелле-спектра диска Сатурна. Основные детали являются полосами метана,  $\text{CH}_4$ ,  $4\nu_1 + \nu_2$  и  $3\nu_1 + 2\nu_3$ . Шумовая дорожка на данном спектре практически отсутствует.

фокуса Нэсмита [63] и первичного фокуса [64] 6-метрового телескопа БТА. В данном случае стабилизация изображения на входе в оптическое волокно осуществляется перемещением самого оптического волокна вслед за смещением звезды в фокусе телескопа. Позиционер, удерживающий волокно, представляет собой плоскопараллельную пластину, в центр которой вклеено оптическое волокно, входной торец волокна отполирован вместе с передней плоскостью пластины. Телескоп строит изображение на передней плоскости пластины, изображение исследуемой звезды проваливается в оптическое волокно, а остальная часть попадает на камеру подзора поля, объектив которой также сфокусирован на переднюю поверхность плоскопараллельной пластины. Изображение, получаемое от камеры подзора поля, анализируется в интерактивном режиме достаточно быстро для того, чтобы зарегистрировать смещение изображения исследуемой звезды и скомпенсировать его перемещением плоскопараллельной пластины с оптическим волокном. Эта система стабилизации позволяет компенсировать смещения

изображения звезды, вызванные как неточностью гидирования, так и колебаниями механической конструкции телескопа, с частотой несколько раз в секунду (до 5 Гц).

Для передачи света из фокуса телескопа в стационарную часть спектрографа мы использовали оптическое волокно с диаметром ядра  $a = 150 \text{ мкм}$  и числовой апертурой  $NA = 0.12$ , общая длина волокна составляет 22 м. Данное волокно было изготовлено специально по нашему заказу в Научном центре волоконной оптики РАН. В оптическое волокно с учетом редуктора светосилы попадает участок изображения неба диаметром  $5''$ . На выходе из оптического волокна в стационарной части спектрографа наклеена микролинза, согласующая числовую апертуру волокна с апертурой входного зрачка коллиматора.

Управление спектрографом осуществляется в режиме удаленного доступа (в т.ч. и через Интернет). При этом, помимо ввода-вывода источников линейчатого и непрерывного света, имеется возможность изменять рабочие углы решетки скрещенной дисперсии, положение фокуса каме-

ры и угол наклона плоскости светоприемника к оптической оси камеры. Предусмотрены режимы автоматического гидирования как по изображению исследуемого объекта, так и по боковой звезде (офсетное гидирование) в пределах  $\pm 1'$ .

Весной 2010 года на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН мы провели первые наблюдения с этим оптоволоконным спектрографом. В диапазоне 4000–7800 Å были получены спектры объектов различной яркости. Качество спектров соответствовало расчетным характеристикам. Для иллюстрации высокого спектрального разрешения на Рис. 6 мы приводим фотометрический разрез одного из спектральных порядков, на котором отчетливо видна вращательная структура колебательных полос молекулы метана.

Результаты испытаний спектрографа показали, что на 1-м телескопе за 60 минут экспозиции при изображениях  $1.5''$  от звезды 13.5 величины в полосе  $V$  на длине волны 5500 Å на уровне непрерывного спектра получено значение  $S/N = 10$  в расчете на элемент разрешения, который составляет 5 пикселей. Результат приведения этих данных к общим условиям представлен на Рис. 2 (отмечено крестиком). Видно, что среди подобных оптоволоконных систем проникающая способность нашего спектрографа находится на достаточно высоком уровне.

## 8. ВЫВОДЫ

Телескопы с диаметром  $D = 0.6\text{--}2$  м являются массовыми инструментами наземной оптической астрономии. Совершенствование техники регистрации сигнала и достижения оптических технологий позволяют сегодня использовать эти инструменты для широкого круга задач, в том числе и для наблюдений звезд с высоким спектральным разрешением. При этом основным средством становятся спектрографы скрещенной дисперсии, где пространственное разведение высоких спектральных порядков обеспечивается вторым диспергирующим элементом. Оптоволоконное сочетание телескопа и спектрографа позволяет применять крупногабаритные оптико-механические конструкции и схему белого зрачка, что позволяет использовать эшелле с большими углами блеска. Кроме того, в конструкции, размещенной стационарно, можно увеличить диаметр коллимированного пучка вплоть до 150–200 мм, что обеспечивает большую широкость.

Внедрение крупноформатных матриц ПЗС позволяет выделить для каждого спектрального порядка большую площадь приемника, т.е. применить

резатель изображения, что продвигает метод оптоволоконной эшелле-спектроскопии на телескопы большого диаметра.

Применение оптического волокна существенно снижает позиционные ошибки, связанные с расогласованием каналов спектра звезды и спектра калибровки. Кроме того, за счет более точного учета попиксельной неоднородности чувствительности приемника, на этапе обработки гарантированно получаем дополнительный выигрыш в  $S/N$ .

Оптоволоконный спектрограф, подобный разработанному нами, мог бы существенно улучшить ситуацию со спектроскопией высокого разрешения на 1-метровом телескопе САО и разгрузить 6-метровый телескоп от некоторых задач спектроскопии ярких ( $V < 10^m - 11^m$ ) звезд.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Программой Отделения физических наук РАН, грантами РФФИ (проекты 07-02-00247-а и 09-07-00492-а), грантом Минобрнауки (Поддержка инновационных образовательных программ высших учебных заведений в рамках национального проекта “Образование”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. М. Копылов и Н. В. Стешенко, *Известия КРАО* **33**, 308 (1965).
2. D. J. Schroeder, *Appl. Opt.* **6**, 1976 (1967).
3. J. B. Hearnshaw, in *Instrumentation and research programmes for small telescopes* (D. Reidel Publishing Co, Dordrecht, 1986).
4. E. N. Hubbard, J. R. P. Angel, and M. S. Gresham, *Astrophys. J.* **229**, 1074 (1979).
5. J. M. Hill, J. R. P. Angel, J. S. Scott et al., *Proc. SPIE* **331**, 279 (1982).
6. L. W. Ramsey and D. P. Huenemoerder, *Proc. SPIE* **627**, 282 (1986).
7. I. Furenliid and O. Cardona, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **100**, 1001 (1988).
8. P. Felenbok and J. Guerin, in *The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics: Proceedings of the 132nd Symposium of the International Astronomical Union held in Paris, France, June 29-July 3, 1987*, Ed. by G. C. de Strobel and M. Spite (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988), p. 31.
9. H. Mandel, in *The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics: Proceedings of the 132nd Symposium of the International Astronomical Union held in Paris, France, June 29-July 3, 1987*, Ed. by G. C. de Strobel and M. Spite (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988), p. 9.
10. R. McMillan, M. L. Perry, P. H. Smith, and W. J. Merline, in *ASP Conf. Ser.* **3**, 237 (1988).



11. A. Frasca, <http://w3c.ct.astro.it/sln/strumenti.html>.
12. A. Kaufer, <http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/instrumentation/Heros/>.
13. M. Slechta and P. Skoda, Publ. Astron. Inst. ASCR **90**, 1 (2002).
14. G. M. Kershaw and J. B. Hearnshaw, Southern Stars **33**, 89 (1989).
15. J. B. Hearnshaw, S. I. Barnes, G. M. Kershaw, et al., Experimental Astron. **13**, 59 (2002).
16. N. Morrison, <http://astro1.panet.utoledo.edu/~wwriter/telescope.html>.
17. K. G. Strassmeier, M. Woche, M. I. Andersen, et al., in *Proc. of 3rd Potsdam Thinkshop* (2004).
18. G. Raskin and H. V. Winkel, Proc. SPIE **7014**, 178 (2008).
19. D. Queloz, M. Mayor, L. Weber, et al., Astronom. and Astrophys. **354**, 99 (2000).
20. D. W. Latham, J. Andersen, J. C. Geary, and R. P. Stefanik, ASP Conf. Ser. **3**, 269 (1988).
21. T. M. Brown, R. W. Noyes, P. Nisenson, et al., Publ. Astronom. Soc. Pacific **106**, 1285 (1994).
22. T. Ingerson, <http://www.ctio.noao.edu/spectrographs/bme/bme.html>.
23. A. Kaufer and L. Pasquini, Proc. SPIE **3355**, 844 (1998).
24. F. Bouchy and J. L. B. P. Conne, ASP Conf. Ser. **185**, 22 (1999).
25. K. W. Kamper, ASP Conf. Ser. **3**, 277 (1988).
26. <http://www.sao.ac.za/facilities/instrumentation/giraffe/introduction/>.
27. A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **119**, 373 (1996).
28. S. Perruchot, D. Kohler, F. Bouchy, et al., Proc. SPIE **7014**, 17 (2008).
29. J. Baudrand and T. Bohm, Astronom. and Astrophys. **259**, 711 (1992).
30. G. Hildebrandt, G. Scholz, M. Woche, et al., [http://www.aip.de/groups/sternphysik/stp/traficos\\_neu.html](http://www.aip.de/groups/sternphysik/stp/traficos_neu.html).
31. J.-F. Donati, <http://www.ast.obs-mip.fr/projets/narval/v1/>.
32. M. J. Pfeiffer, C. Frank, D. Baumueller, K. Fuhrmann, and T. Gehren, Astron. and Astrophys. Suppl. **130**, 381 (1998).
33. J. Telling, <http://www.not.iac.es/instruments/fies/>.
34. D. Enard and G. Lund., The Messenger **31**, 1 (1983).
35. G. Lund and R. Ferlet, The Messenger **36**, 2 (1984).
36. M. Kurster, The Messenger **94**, 12 (1998).
37. F. Pepe, M. Mayor, B. Delabre, et al., Proc. SPIE **4008**, 582 (2000).
38. J. Baudrand and R. Vitry, Proc. SPIE **4008**, 182 (2000).
39. J.-F. Donati, ASP Conf. Ser. **307**, 41 (2003).
40. K. Olsen, <http://www.ctio.noao.edu/spectrographs/hydra/hydra.html>.
41. Y. Zhu, X. Wu, L. Wang, and Q. Luo, Proc. SPIE **5492**, 401 (2004).
42. K. G. Libbrecht and M. L. Peri, Publ. Astronom. Soc. Pacific **107**, 62 (1995).
43. G. A. Chuntanov, Astrophysical Bulletin **65**, 95 (2010).
44. A. Szentgyorgyi, P. Cheimets, R. Eng, et al., Proc. SPIE **3355**, 242 (1998).
45. L. Pasquini, G. Avila, E. Allaert, et al., Proc. SPIE **4008**, 129 (2000).
46. L. Pasquini, G. Avila, A. Blecha, et al., The Messenger **110**, 1 (2002).
47. S. J. Margheim, in *Precision Spectroscopy in Astrophysics*, Ed. by N. C. Santos, L. Pasquini, A. C. M. Correia, and M. Romaniello (Springer, Garching, Germany, 2008).
48. R. G. Tull, Proc. SPIE **3355**, 387 (1998).
49. S. I. Barnes, P. L. Cottrell, M. D. Albrow, and et al., Proc. SPIE **7014**, 18 (2008).
50. В. Г. Клочкова, С. В. Ермаков, В. Е. Панчук и др. Препринт CAO **137**, 1 (1999).
51. G. W. Nelson, ASP Conf. Ser. **3**, 2 (1988).
52. L. W. Ramsey, ASP Conf. Ser. **3**, 26 (1988).
53. W. D. Heacox, ASP Conf. Ser. **3**, 204 (1988).
54. W. A. Grundmann, F. A. Moore, and E. H. Richardson, Proc. SPIE **1235**, 577 (1990).
55. T. M. Brown, Appl. Opt. **31**, 2314 (1992).
56. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, М. В. Юшкин и Д. С. Насонов, Астрофизический бюллетень **63**, 410 (2008).
57. W. G. Bagnuolo, I. K. Furenlid, D. R. Gies, et al., Publ. Astronom. Soc. Pacific **102**, 604 (1990).
58. A. Baranne and M. Duchesne, in *Proc. ESO-CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes*, Ed. by S. Lautsen and A. Reiz. (ESO/CERN, Geneva, Switzerland, 1972), p. 241.
59. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, и В. П. Рядченко, Письма в АЖ **17**, 645 (1991).
60. D. L. Schroeder and R. L. Hillard, Appl. Opt. **19**, 2833 (1980).
61. S. C. Barden, L. W. Ramsey, and R. J. Truax, Publ. Astronom. Soc. Pacific **93**, 154 (1981).
62. F. Bouchy and P. Connes, Astron. and Astrophys. Suppl. **136**, 193 (1999).
63. А. А. Иванов, В. Е. Панчук, и В. С. Шергин, Препринт CAO **155**, 1 (2001).
64. В. Е. Панчук и М. В. Якопов, Сборник "Физико-математические науки в СГУ", стр. 39 (2005).

СПЕКТРОГРАФЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМ ВХОДОМ  
**HIGH-RESOLUTION SPECTROGRAPHS WITH OPTICAL FIBER INPUT**

399

**V.E. Panchuk, M.V. Yushkin, M.V. Yakovov**

We analyze the properties of high-resolution spectrographs fed from the telescope through optical fiber links. We report the results of tests performed with the fiber-fed spectrograph that we developed for 1–2 m telescopes.

Key words: *instrumentation: spectrographs*