

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.01.044>

**Х. М. Микайлов<sup>1</sup>, Ф. А. Мусаев<sup>2</sup>, И. А. Алекберов<sup>1</sup>,  
Б. Н. Рустамов<sup>1</sup>, О. В. Халилов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси  
Национальной академии наук Азербайджана,  
пос. Ю. Мамедалиева, Шамахинский район, Азербайджан  
e-mail: mikailov.kh@gmail.com

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,  
пос. Нижний Архыз, Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская республика, Россия  
e-mail: faigm@rambler.ru

## **Оптоволоконный эшелле-спектрограф Шамахинской астрофизической обсерватории (ShaFES)**

*Приведено описание оптоволоконного эшелле-спектрографа высокого разрешения, разработанного для фокуса Кассегрена 2-м телескопа Шамахинской астрофизической обсерватории (ShaFES). Представлена принципиальная оптическая схема и схема подвесной части спектрографа. Спектрограф работает в двух режимах со спектральными разрешениями 27500 и 55000 в области длин волн 370...850 нм. Анализируются результаты тестирования параметров спектрографа. Представлены результаты и методика выполненных тестовых наблюдений, проведен сравнительный анализ как самого прибора, так и данных наблюдений ShaFES с аналогичными инструментами. Спектрограф позволяет получить спектры звезд до 8<sup>м</sup> и 10<sup>м</sup> с отношением сигнал/шум  $S/N = 150...200$  при  $\lambda = 580$  нм, экспозиции 1 ч и разрешениях  $R = 55000$  и  $R = 27500$  соответственно.*

**Ключевые слова:** спектроскопия высокого разрешения, приборы и инструменты, эшелле-спектрограф.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение спектров космических объектов позволяет получить наиболее полную информацию как о физических процессах, происходящих в источнике излучения, так и о свойствах среды, через которую это излучение распространяется.

© Х. М. МИКАЙЛОВ, Ф. А. МУСАЕВ, И. А. АЛЕКБЕРОВ,  
Б. Н. РУСТАМОВ, О. В. ХАЛИЛОВ, 2020

За время эксплуатации 2-м телескоп Шамахинской астрофизической обсерватории (ШАО) был оснащен спектрографами разного разрешения, в которых для регистрации спектров использовались фотопластинки. Однако приостановка производства фотопластинок и прогресс в создании высокочувствительных многоканальных светоприемников на основе ПЗС-матриц стимулировали разработку спектрографов на новом принципе регистрации света.

В 1993 г. для фокуса куде 2-м телескопа ШАО был изготовлен эшеле-спектрометр умеренного спектрального разрешения ( $R = 30000$ ) с использованием оптических узлов и деталей классического штатного спектрографа [3, 7].

Учитывая тематику исследований ШАО, которая ориентирована в основном на объекты звездной величины  $8^m \dots 11^m$ , а также для расширения круга астрономических задач астроспектроскопии и получения качественного спектрального материала для более слабых объектов, в 2003 г. был изготовлен подвесной эшеле-спектрограф для фокуса Кассегрена 2-м телескопа ШАО на базе спектрографа UAGS [2]. Несмотря на ряд известных недостатков, подвесные спектрографы используются и сегодня, поскольку для ряда задач, например для измерения эквивалентных ширин линий спектра, вариации формы линий, вызванные нестабильностью положения изображения звезды на входной щели прибора, не приводят к существенным погрешностям.

Для решения современных астрофизических проблем очень важно оснащение телескопов спектрографами с высокой разрешающей способностью. Одним из прогрессивных методов повышения характеристик спектрографа является разработка и внедрение в астрономическую практику специализированных спектрографов с оптоволоконным входом. Описание первого такого инструмента приведено в работе [10]. В настоящее время сделано несколько десятков спектрографов высокого разрешения, в которых свет подается через оптоволоконный канал [1, 4, 8, 13, 14]. Такой способ передачи световой энергии имеет целый ряд очевидных преимуществ, а именно: возможность размещения спектрографа вне подвижных частей конструкции телескопа, что обеспечивает более высокую механическую и температурную стабильность прибора и соответственно более высокую, чем у традиционных щелевых спектрографов, точность позиционных спектральных измерений. Это принципиально важно при измерениях лучевых скоростей звезд. Благодаря высокой механической стабильности на оптоволоконных спектрографах достигнута погрешность измерений лучевых скоростей звезд вплоть до 1 м/с и лучше [13]. Создание первых таких инструментов позволило начать ряд новых уникальных исследований, выполнение которых с использованием традиционных схем спектрографов было затруднительным или даже невозможным.

В рамках программы модернизации наблюдательной техники в ШАО с 2015 г. начали изготавливать оптоволоконный эшеле-спектрограф для фокуса Кассегрена 2-м телескопа ШАО (ShaFES — Shama-khy Fibre Echelle Spectrograph). Для этого прибора приобретена ПЗС-

камера с матрицей 4К 4К элементов, охлаждаемая жидким азотом. Спектрограф состоит из двух основных блоков: массивной стационарной части (рис. 1) с ПЗС-камерой и относительно легкой подвешенной части (рис. 2), закрепленной в фокусе Кассегрена. Между собой блоки соединяются оптическим волокном диаметром 200 мкм и длиной 20 м.

## СТАЦИОНАРНАЯ ЧАСТЬ СПЕКТРОГРАФА

Стационарная часть прибора построена по широко распространенной автоколлимационной схеме, которая обеспечивает спектральное разрешение  $R = 55000$  в диапазоне длин волн 370...850 нм. Конструктивно эта часть спектрографа ShaFES, оптическая схема которой приведена на рис. 1, расположена в отдельной термостатированной комнате подкупольного помещения и закрыта дополнительным хорошо теплоизолированным кожухом, что обеспечивает стабильную температуру спектрографа и легкий доступ к оптико-механическим элементам для выполнения сервисных работ.

В стационарной части расположены основные элементы эшелеспектрографа: механический узел, удерживающий оптическое волокно с согласующей оптикой на выходном торце (микролинзой), коллиматор, эшелес-решетка, элемент скрещенной дисперсии (призма), линзовый объектив и приемник излучения (ПЗС-камера).

Все оптические элементы этой части смонтированы на металлическом столе и снабжены юстировочными приспособлениями, используемыми только при первоначальной настройке спектрографа. Для увеличения механической жесткости конструкции стол закреплен на раме из стального швеллера с регулируемыми опорами.

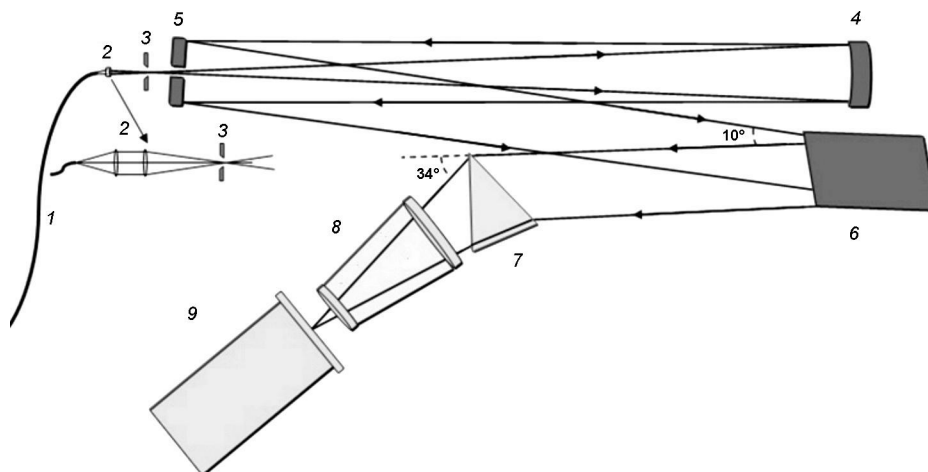


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эшелеспектрографа: 1 — оптическое волокно диаметром 200 мкм, длиной 20 м, 2 — группа линз, 3 — входная щель, 4 — коллиматор, 5 — плоское зеркало с отверстием диаметром 10 мм, 6 — эшелес-решетка, 7 — призма кросс-дисперсии, 8 — объектив «Сапон», 9 — ПЗС-камера

Изображение изучаемого объекта передается на щель 3 с помощью оптического волокна 1 с диаметром ядра 200 мкм и числовой апертурой  $N = 0.22$ . Для оптического согласования с коллиматором 4 на выходе оптоволоконна установлены линзы 2 со светосилой 1:10. Параметры коллиматора: фокусное расстояние — 1000 мм, диаметр коллимированного пучка — 100 мм. С помощью плоского зеркала 5 диаметром 110 мм коллимированный пучок попадает на поверхность эшеле-решетки 6, которая выполняет роль основного диспергирующего элемента и производит дисперсию света в вертикальном направлении. Эшеле-решетка имеет следующие характеристики: размеры 200 300 мм, 37.5 штрихов/мм, угол блеска 64°. Для работы в автоколлимационном режиме эшеле-решетка установлена под углом 26° к горизонтальной плоскости. Ее рабочая поверхность направлена книзу во избежание попадания пыли на эту поверхность.

Призма кросс-дисперсии с углом преломления 45° изготовлена из тяжелого флинта. Этот элемент выполняет дисперсию света в горизонтальном направлении, чтобы разделить эшеле-порядки. Показатель преломления этой призмы для красной области спектра (тяжелый флинт) равен 1.6444, а для фиолетовой — 1.6852, что обеспечивает угол отклонения около 34°. В качестве фокусирующей камеры 8 используется линзовый объектив «Canon» с эффективным фокусом 400 мм и светосилой  $F/2.8$ .

## ПОДВЕСНАЯ ЧАСТЬ СПЕКТРОГРАФА

Функционально навесная часть содержит: оптику, согласующую масштаб изображения звезды с размерами оптического волокна, узел калибровки с источниками линейчатого и непрерывного спектра, средства контроля положения объекта на входе в волокно (подсмотр). На рис. 2 приведена схема подвесной (предоптоволоконной) части спектрографа, размещенной в фокусе Кассегрена. В подвесной части прибора размещено подвижное зеркало 5 для калибровочных ламп линейчатого и непрерывного спектров, система позиционирования оптоволоконна и гидирующая телевизионная камера 10. Телескоп строит изображение на фокальной плоскости  $F1$ , где находится входная апертура 1. Относительное отверстие фокуса Кассегрена 2-м телескопа равно  $F/14.5$ . Пучок от 2-м зеркала с помощью одного из двух редукторов фокуса 12 с относительным отверстием  $F/9$  или  $F/6$  коллимируется за фокальной плоскостью группой линз 2 и группой линз 3 на фокальной плоскости  $F2$ , где находится входная часть волокна. Входная апертура 1 диаметром 200 мкм расположена на отражающей пластине, ее линейный размер соответствует 2.2 или 3.5 для редукторов фокуса  $F/9$  или  $F/6$  соответственно. Учитывая, что размер изображения звезды в основном составляет не менее 3", мы выбрали в качестве базового варианта редуктор фокуса с относительным отвер-

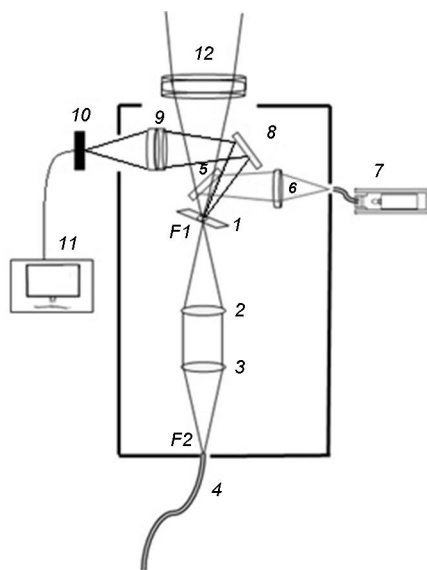


Рис. 2. Схема подвесной части спектрографа: 1 — входная апертура; 2 — коллимирующие линзы, 3 — фокусирующие линзы, 4 — оптоволоконно, 5 — подвижное диагональное зеркало, 6 — группа линз, 7 — калибровочные лампы, 8 — диагональное зеркало, 9 — группа линз, 10 — телевизионная камера, 11 — монитор, 12 — редуктор фокуса

ствием  $F/6$ . Далее изображение исследуемой звезды через апертуру 1 попадает в оптическое волокно, а отражение поля от краев апертуры с помощью плоского зеркала 8 и фокусирующей линзы 9 попадает на камеру подсмотра поля 10, объектив которой также сфокусирован на переднюю поверхность апертурной пластины. Изображение, получаемое от камеры подсмотра поля для выполнения операций гидирования, передается на монитор 11, который находится в наблюдательной комнате.

Искусственные источники света 7, которые применяются для калибровки по длинам волн (лампа с полым катодом, заполненная смесью газов) и для создания плоского поля (галогенная лампа), размещаются в фокусе Кассегрена. Пучок света, выходящий из источника, посредством короткого оптического волокна и с помощью линз 6 и зеркала 5 фокусируется и направляется на входную апертуру. Блок подвесной части спектрографа имеет размеры 50 50 100 мм и массу около 1 кг.

### ПЗС-КАМЕРА

В качестве светоприемника используется ПЗС-камера STA4150A производства фирмы «Semiconductor Technology Associates», с матрицей 4К 4К элементов, охлаждаемой жидким азотом, с размером элемента 15 мкм. Камера охлаждает ПЗС-чип до температуры (программируемой по выбору) в диапазоне от  $-110^{\circ}\text{C}$  до  $-145^{\circ}\text{C}$ , и удерживает ее с точностью  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Рекомендуемая температура ПЗС-чипа в условиях реальных наблюдений  $-120^{\circ}\text{C}$ . Система охлаждения имеет емкость 3 литра и время работоспособности между заправками азота не менее 24 ч. Эта ПЗС-камера STA4150A имеет антибликовое покрытие и обеспечивает максимальную квантовую эффективность в диапазоне длин волн 300...800 нм.

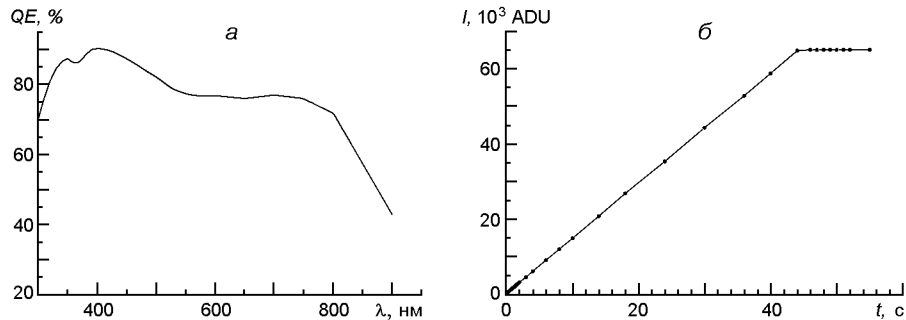


Рис. 3. Кривая квантовой эффективности ПЗС-матрицы при  $t = -120$  с (а); линейность отклика ПЗС (б)

На рис. 3а показана зависимость квантовой эффективности от длины волны ПЗС-матрицы STA4150A. Из данных, предоставленных производителем светоприемника, следует, что квантовая эффективность прибора в диапазоне длин волн 300...800 нм превышает 70 %. Следует отметить, что данный светоприемник обладает высокой эффективностью в ближнем УФ-диапазоне, для длины волны 400 нм его квантовая эффективность достигает 90 %. Также отметим и высокую линейность выходного сигнала этого светоприемника вплоть до уровня 65000 отсчетов (рис. 3б).

Основные параметры ПЗС-матрицы STA4150A: число пикселей 4096 4096; размер пикселя 15 15 мкм; размер фоточувствительной области 61.44 61.44 мм; рабочий спектральный диапазон 300...900 нм. Время считывания полного кадра для трех режимов: FST (быстрое) — 6.5 с, MED (среднее) — 19 с, SLW (медленное) — 40.7 с. В режиме SLW  $\text{gain} = 1.27 \text{ e}^-/\text{ADU}$ , Read Out Noise (RON) = 3.74. В режиме MED  $\text{gain} = 2.24 \text{ e}^-/\text{ADU}$ , RON = 4.8. В режиме FST  $\text{gain} = 2.0 \text{ e}^-/\text{ADU}$ , RON = 7.3. Измеренный темновой ток составляет  $4 \text{ e}^-/\text{пкл} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Управление и передача данных на компьютер осуществляется оптоволоконным кабелем длиной 15 м.

### ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭШЕЛЕ-СПЕКТРА

Как известно, уравнение дифракции имеет вид

$$\sin \theta - \sin \theta_0 = Nm \lambda_c. \quad (1)$$

Здесь  $\theta$  — угол падения на решетку параллельного светового пучка, т. е. угол, который образуют лучи с нормалью решетки,  $\theta_0$  — угол дифракции,  $N = 1/d$  — плотность штрихов решетки,  $d$  — постоянная решетки,  $m$  — порядок спектра,  $\lambda_c$  — центральная длина волны спектра на данном порядке. Если решетка работает в режиме автоколлимации ( $\theta = \theta_0$ ), уравнение дифракции имеет вид

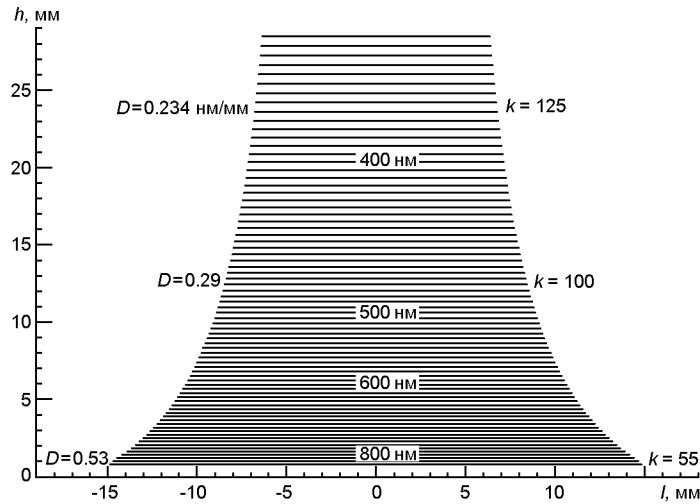


Рис. 4. Выходной формат ShaFES ( $h$  — размер эшелю-спектра по направлению кросс-дисперсии,  $l$  — длина эшелю-порядков). Эшелю: 37.5 штр/мм,  $\alpha = 64^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$ . Призма — тяжелый флинт с углом преломления  $45^\circ$ . Эффективный фокус камеры — 400 мм

$$2 \sin \alpha \cos \beta = Nm_c, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол блеска. Для того чтобы направить дисперсированный от эшелю-решетки пучок к элементу кросс-дисперсии, главное сечение эшелю-решетки располагается под малым углом ( $\beta = 10^\circ$ ) к оси коллиматора. В этом случае [5]

$$2 \sin \alpha \cos \beta = Nm_c. \quad (3)$$

При этом изображения щели (спектральных линий) получаются не перпендикулярными к направлению дисперсии, что приводит к потерям разрешающей силы спектрографа.

Для устранения наклона спектральных линий щель была повернута вокруг оси коллиматора на угол  $\gamma = 2 \arctan \tan \alpha \tan \beta$ . При  $\alpha = 64^\circ$  и  $\beta = 10^\circ$  получим  $\gamma = 36^\circ$ .

С учетом уравнения (3) были вычислены основные оптические параметры эшелю-спектра в фокальной плоскости камеры эшелю-спектрографа (см. рис. 4 и таблицу).

#### РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭШЕЛЮ-СПЕКТРОГРАФА

Реальная разрешающая способность эшелю-спектрографа, как и классических спектрографов, определяется формулой  $R = \lambda_m / \Delta \lambda_m$ , где  $\Delta \lambda_m$  — наименьший интервал длины волны, соответствующий разрешению светоприемника, вычисляется следующим образом:

$$\Delta \lambda_m = b D \frac{\cos \beta}{Nm f_{cam}}.$$

Параметры эшеле-спектра спектрографа ShaFES:  $m$  — порядок спектра,  $\lambda_c$  — центральная длина волны спектра на данном порядке,  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$  — конечные длины волн данного порядка, свободные от соседних порядков,  $\lambda$  — длина свободной области,  $D$  — обратная линейная дисперсия

$m$	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_c$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\lambda$ , нм	$D$ , нм/мм
55	850.584	858.316	866.191	15.607	0.531
56	835.529	842.989	850.584	15.055	0.522
57	820.998	828.200	835.529	14.531	0.513
58	806.964	813.921	820.998	14.034	0.504
59	793.402	800.125	806.964	13.562	0.495
60	780.288	786.790	793.402	13.114	0.487
61	767.600	773.892	780.288	12.688	0.479
62	755.318	761.410	767.600	12.282	0.471
63	743.424	749.324	755.318	11.895	0.464
64	731.898	737.616	743.424	11.526	0.457
65	720.724	726.268	731.898	11.174	0.450
66	709.886	715.264	720.724	10.838	0.443
67	699.369	704.588	709.886	10.517	0.436
68	689.159	694.226	699.369	10.210	0.430
69	679.243	684.165	689.159	9.916	0.424
70	669.608	674.391	679.243	9.635	0.417
71	660.243	664.893	669.608	9.365	0.412
72	651.136	655.658	660.243	9.107	0.406
73	642.277	646.677	651.136	8.859	0.400
74	633.656	637.938	642.277	8.621	0.395
75	625.264	629.432	633.656	8.393	0.390
76	617.090	621.150	625.264	8.173	0.385
77	609.128	613.083	617.090	7.962	0.380
78	601.368	605.223	609.128	7.760	0.375
79	593.804	597.562	601.368	7.564	0.370
80	586.427	590.092	593.804	7.376	0.365
81	579.232	582.807	586.427	7.195	0.361
82	572.211	575.700	579.232	7.021	0.356
83	565.358	568.764	572.211	6.853	0.352
84	558.667	561.993	565.358	6.691	0.348
85	552.133	555.381	558.667	6.534	0.344
86	545.750	548.923	552.133	6.383	0.340
87	539.513	542.614	545.750	6.237	0.336
88	533.417	536.448	539.513	6.096	0.332
89	527.457	530.420	533.417	5.960	0.328
90	521.629	524.527	527.457	5.828	0.325
91	515.928	518.763	521.629	5.701	0.321
92	510.350	513.124	515.928	5.578	0.318
93	504.892	507.606	510.350	5.458	0.314
94	499.549	502.206	504.892	5.343	0.311
95	494.318	496.920	499.549	5.231	0.308
96	489.196	491.744	494.318	5.122	0.304
97	484.178	486.674	489.196	5.017	0.301
98	479.263	481.708	484.178	4.916	0.298
99	474.446	476.842	479.263	4.817	0.295
100	469.725	472.074	474.446	4.721	0.292
101	465.097	467.400	469.725	4.628	0.289
102	460.560	462.818	465.097	4.538	0.287
103	456.110	458.324	460.560	4.450	0.284
104	451.745	453.917	456.110	4.365	0.281



Окончание таблицы

$m$	$\lambda_{\min}$ , нм	$\lambda_c$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	$D$ , нм/мм
105	447.463	449.594	451.745	4.282	0.278
106	443.262	445.353	447.463	4.202	0.276
107	439.139	441.191	443.262	4.123	0.273
108	435.091	437.106	439.139	4.047	0.271
109	431.118	433.095	435.091	3.973	0.268
110	427.216	429.158	431.118	3.902	0.266
111	423.385	425.292	427.216	3.832	0.263
112	419.621	421.495	423.385	3.763	0.261
113	415.924	417.765	419.621	3.697	0.259
114	412.292	414.100	415.924	3.633	0.256
115	408.722	410.499	412.292	3.570	0.254
116	405.214	406.960	408.722	3.508	0.252
117	401.765	403.482	405.214	3.449	0.250
118	398.375	400.063	401.765	3.390	0.248
119	395.041	396.701	398.375	3.334	0.246
120	391.763	393.395	395.041	3.278	0.244
121	388.538	390.144	391.763	3.224	0.242
122	385.366	386.946	388.538	3.172	0.240
123	382.246	383.800	385.366	3.120	0.238
124	379.176	380.705	382.246	3.070	0.236
125	376.155	377.659	379.176	3.021	0.234
126	373.181	374.662	376.155	2.974	0.232

Здесь  $\lambda_m$  — спектральное разрешение,  $D$  — обратная линейная дисперсия,  $b$  — ширина изображения щели в фокальной плоскости камеры. В современных светоприемниках типа ПЗС-матриц, как и на фотопластинках, изображение ширины щели соответствует размерам двух чувствительных элементов ( $b = 2$  пкл). Ширина щели определяется разрешением светоприемника и выражается в виде  $b = f_{col} \lambda_m / f_{cam}$ , где  $f_{col}$ ,  $f_{cam}$  — фокусное расстояние коллиматора и камеры соответственно.

Таким образом, реальная разрешающая способность, определяемая разрешением светоприемника, равна

$$R = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda} = \frac{2f_{cam} \tan \theta}{b}.$$

Отметим, что разрешающая способность эшелле-спектрографа зависит от угла блеска эшелле-решетки, от параметров оптической системы и размеров чувствительных элементов светоприемника. В данном случае  $f_{cam} = 400$  мм,  $\theta = 64^\circ$ ,  $b = 30$  мкм, и следовательно,  $R = 55000$ . Расстояния между порядками позволяют выполнять наблюдения на спектрографе в двух режимах, в зависимости от параметров бининга: для размера 1 пкл = 15 или 30 мкм разрешение составляет  $R = 55000$  или 27500 соответственно. На рис. 5 показаны участки спектра, демонстрирующие разрешающую способность эшелле-спектрографа. Выбор

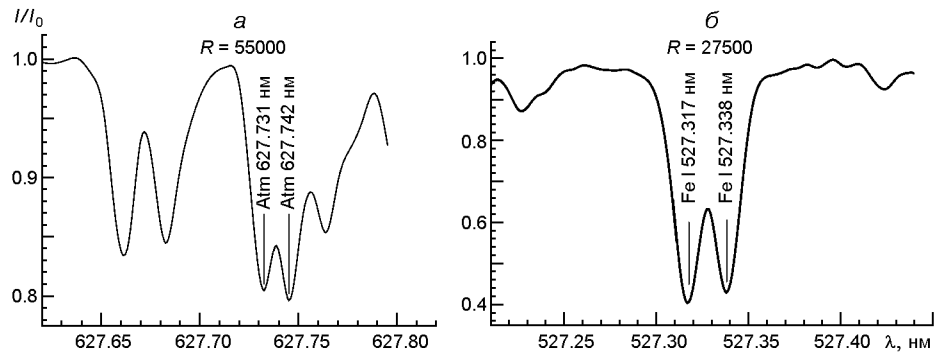


Рис. 5. Участок спектра звезды Cyg (а) и Sky (б), демонстрирующий разрешающую способность спектрографа

спектрального разрешения происходит программным образом, путем перехода при считывания кадра с binning 1 на binning 2, а уменьшение спектрального разрешения — вынужденная мера для достижения большего отношения сигнал/шум в случае наблюдений слабых звезд. В процессе наблюдений программа OWL, предоставленная изготовителем светоприемника, позволяет за короткое время переходить из одного режима в другой. При экспозиции 1 ч и разрешениях  $R = 55000$  и  $27500$  можно получить спектры звезд  $8^m$  и  $10^m$  соответственно, с отношением сигнал/шум  $150...200$  вблизи  $\lambda = 580$  нм.

## ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ

Управление ПЗС-матрицей — установка времени экспозиции, контроль температуры чипа, обращение эшеле-спектра, выбор формата чипа, соответствующего формату спектра, производится с помощью лицензионной программы «Owl 3.01» [<http://www.astro-cam.com/>]. Программа позволяет выбрать формат чипа, соответствующий формату эшеле-спектра. Для разрешающей способности  $R = 55000$  выбирался формат чипа 2400 пкл в направлении дисперсии и 1650 пкл — в направлении кросс-дисперсии, а для разрешающей способности  $R = 27500$  — 1250 пкл и 860 пкл соответственно. Расположение эшеле-порядков в кадрах — горизонтальное (направление дисперсии горизонтальное, а направление кросс-дисперсии — вертикальное). Длина волны увеличивается сверху вниз и слева направо, что исключает лишние процедуры при редукции спектра. Все кадры должны быть получены при одинаковом значении коэффициента преобразования (gain) ПЗС-камеры. Интенсивности плоского поля и торий-аргоновой лампы должны быть достаточно большими, но не выходить за пределы линейности ПЗС (около 65 000 для gain = 0.54 и 40 000 для gain = 2.17).

### ТРЕБОВАНИЯ К ОБРАБАТЫВАЕМЫМ КАДРАМ

Обработка спектров производится с помощью новой версии программы DECH [<http://www.gazinur.com/DECH-software.html>]. Для выполнения обработки, помимо спектров исследуемого объекта, необходимо получить полный набор калибровочных кадров: dark (или bias), flat-field, ThAr или Sky (см. рис. 6). ПЗС-матрицу охлаждают до очень низких температур порядка  $-120^\circ\text{C}$ , чтобы уменьшить влияние теплового шума. При такой степени охлаждения ПЗС-матрицы тепловые электроны практически отсутствуют, вследствие чего темновой кадр не отличается от кадра байса даже при экспозициях в десятки минут. Поэтому в этом случае нет смысла тратить немалую часть наблюдательного времени на получение темновых кадров.

**Flat-field — плоское поле** (изображение спектра лампы плоского поля, рис. 6б). Плоское поле нужно не только для коррекции чувствительности пикселя к пикселю, но и для удаления фрингов. Для выполнения всех этих функций одновременно необходимо иметь достаточный сигнал во всем спектральном диапазоне. Это требование трудно выполнить, особенно для синих участков спектра, где сигнал плоского

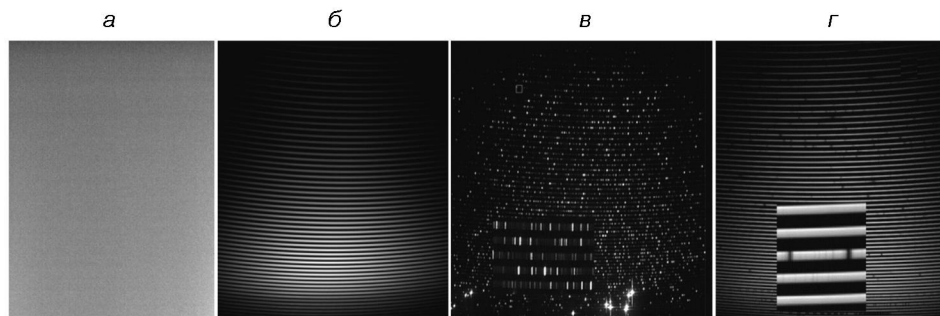


Рис. 6. Фрагменты изображений разного типа: dark (а), flat (б), ThAr (в), Cyg (г)

поля очень низок. Так как одной лампы недостаточно для перекрытия всего диапазона длин волн, мы использовали две лампы: галогенные в красной и светодиодные (Led) в синей области спектра. Спектры ламп можно получить как одновременно, так и по отдельности. Максимум распределения энергии галогенных ламп находится в области  $\lambda = 540...720\text{ нм}$ , а светодиодных ламп — около  $\lambda = 450...480\text{ нм}$  (см. рис. 7).

**Спектр сравнения** (рис. 6в) служит для точной привязки спектра объекта к длинам волн. Отметим, что все наблюдательные материалы получают в системе координат матрицы ПЗС. Нам необходимо перейти в пространство длин волн или, по крайней мере, каждому элементу приемника присвоить соответствующую длину волны. В спектре сравнения должно быть много узких линий, равномерно распределенных по всему спектру, имеющих известную постоянную длину

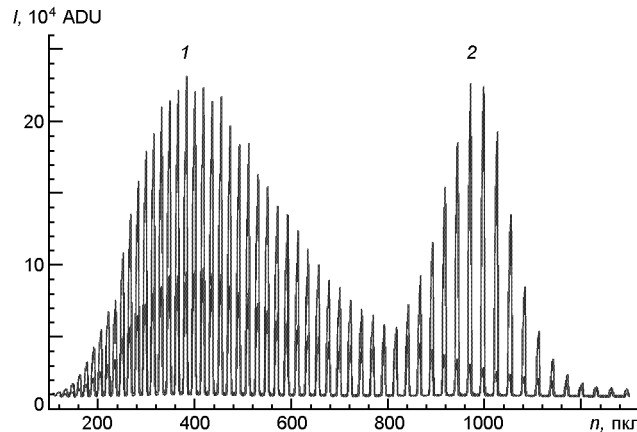


Рис. 7. Распределение света галогенной (1) и светодиодной (2) ламп по направлению кросс-дисперсии

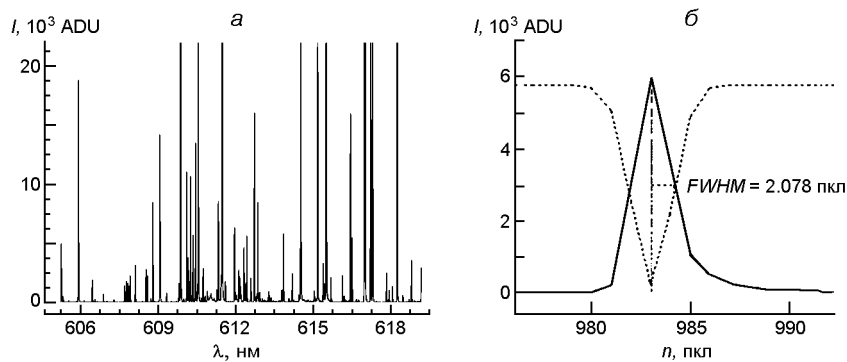


Рис. 8. Участок спектра 77-го порядка лампы ThAr (а) и инструментальный профиль (б)

волны. Для привязки по длинам волн обычно используют спектры торий-аргоновых (ThAr) ламп, а также спектр утреннего или вечернего сумеречного неба, — по сути спектр солнечного света (Sky), рассеянного атмосферой. Он имеет вид обычного спектра звезды класса *G* с узкими линиями поглощения Солнца и земной атмосферы.

При разрешении  $R = 55000$  ширина эмиссионных спектральных линий ThAr-лампы ограничена спектральным разрешением прибора ShaFES, и весь спектральный диапазон от ближнего УФ- до ближнего ИК-диапазона практически равномерно заполнен эмиссионными линиями. К примеру, на рис. 8а приведены изображения 77-го порядка эшелле-спектра торий-аргоновой лампы. При таком обилии линий из-за малой их ширины, определяющейся в основном инструментальным профилем, количество бленд невелико, что позволяет отобрать необходимое количество одиночных линий для точной калибровки по длинам волн. Как видно из рис. 8б, ширина профиля (*FWHM*) соответствует примерно 2 пкл.

## РАССЕЯННЫЙ СВЕТ

Определение уровня рассеянного света и его вычитание является частью процедуры экстракции спектра. Во всех спектрографах на фокальную поверхность спектральной камеры всегда попадает, помимо разложенного в спектр излучения, еще и некоторое количество паразитного (рассеянного) излучения других длин волн. Объяснить это можно многократным отражением света от оптических деталей, бликами на их оправах и внутренних стенках прибора, рассеянием света на поверхностях оптических деталей. Рассеянный свет снижает точность спектрофотометрических измерений, особенно когда яркость источников невелика. Вычитание рассеянного света выполняется самой программой DECH при экстракции спектра в процессе обработки данных. Для полного вычитания рассеянного света достаточно, чтобы в процессе построения маски был правильно определен уровень фона (рис. 9).

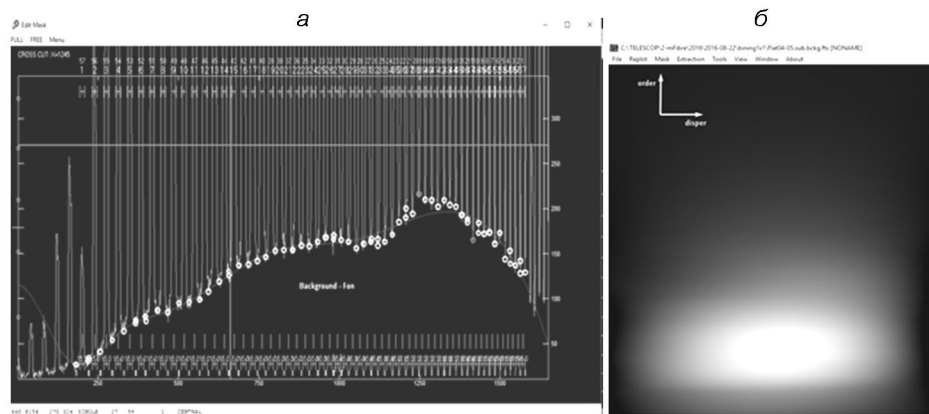


Рис. 9. Уровень рассеянного света в  $X = 1245$  (а), кружки — уровень фона между спектральными порядками, б — рассеянный свет, вычитенный из спектра

## ИСПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В порядках спектра, соответствующих красной области  $> 700$  нм, могут наблюдаться так называемые фринги (бахрома), представляющие собой череду резких неглубоких вариаций интенсивности по всему порядку, вызванных явлением интерференции света в тонких слоях прозрачных управляющих электродов ПЗС-матрицы или в самом кристалле кремния, если он тонкий. На рис. 10 приведен пример спектрального порядка, искаженного явлением интерференции. Эффективным путем освобождения от этих искажений является способ деления спектра на калибровочный спектр  $I_0$  плоского поля одинаковых спектральных порядков. На рис. 10б показан 63-й спектральный порядок, очищенный от фрингов. В нашем спектрографе, оснащённом тонкой

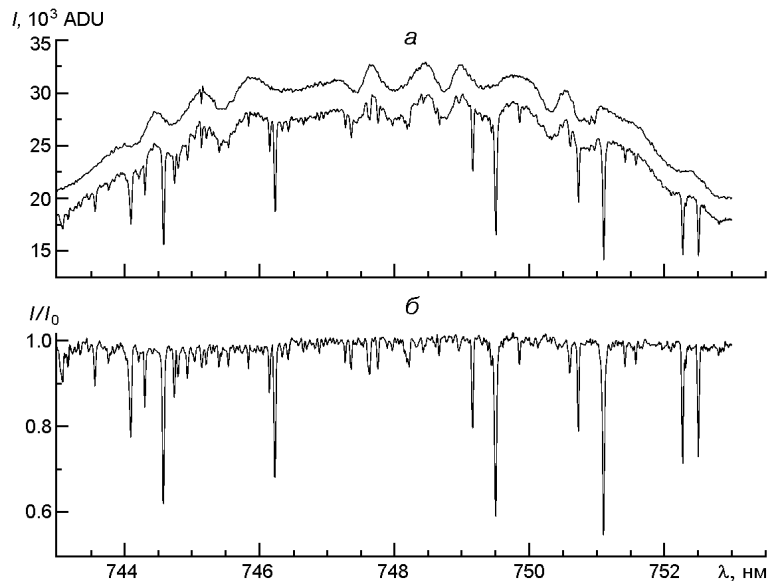


Рис. 10. *a* — 63-й порядок эшеле-спектра Sky, искаженный фрингами (кривая  $I$ ), плоское поле (кривая  $I_0$ ); *б* — спектр звезды после деления на плоское поле  $I_0$

матрицей ПЗС, амплитуда фрингов не превышает 1 % в области длин волн короче 670 нм.

Еще одной характерной особенностью ПЗС, в отличие от приемников предыдущих поколений, есть высокая чувствительность к так называемым «космическим» частицам. Высокоэнергичные ионы, образовавшиеся в результате столкновения космических частиц с молекулами земной атмосферы или распада радиоактивных элементов, сталкиваясь с ПЗС-матрицей, выбивают большое количество электронов. Матрица, как правило, регистрирует несколько сотен таких событий на всю поверхность приемника за час. Удаление космических частиц, как предусмотрено в программе DECH, осуществляется двумя способами: медианным усреднением изображений или сложением векторов.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНТИНУУМА

Проведение континуума — это ответственная операция, от которой зависит дальнейший результат спектрального исследования. Корректность проведения уровня непрерывного спектра, особенно в эшеле-спектрограммах, в большой степени зависит от опытности исследователя. Даже в эпоху фотографических эмульсий и обычных, не эшелюных низкодисперсионных спектров, нормализация на континуум широких, в первую очередь водородных линий в спектрах звезд спектральных классов  $A — F$  была проблемной. Тем более данная задача является проблемной для эшелюных спектров. Ширина спектральных порядков эшеле-решеток, работающих в высоких порядках,

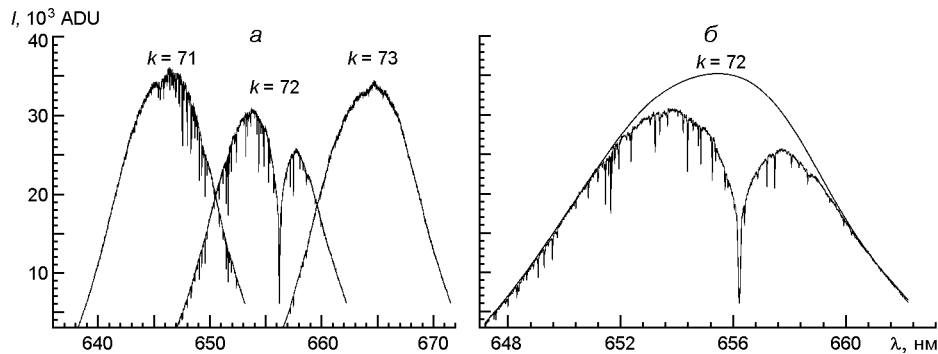


Рис. 11. а — 71...73-й порядки эшеле-спектра Лун, содержащие линию Н, б — спектр 72-го порядка и восстановленный континуум

мала. Поэтому в спектрах горячих звезд с широкими линиями, в особенности в эшеле-порядках, где расположены балмеровские линии водорода, проведение уровня непрерывного спектра достаточно сложно и требует особого подхода к этой процедуре.

В областях широких сильных линий или сильного их блендирования (слияния линий) континуум может проходить даже выше уровня полученного спектра. Линия континуума, как правило, является гладкой и выпуклой. Если есть сомнения в правильности проведения континуума в данном порядке, можно сравнить распределение энергии в соседних порядках спектра. Интенсивности соседних порядков в эшеле-спектрах близки. Как видно из рис. 11а ( $k = 72$ ), уровень спектрального порядка в области линии Н ниже, чем в соседних порядках. Широкие крылья линии Н не позволяют видеть уровень непрерывного спектра, и если в данном порядке провести ложный континуум, получим ошибочные значения эквивалентных ширин.

Длина спектральной области 72-го порядка (область Н), свободного от соседних порядков, составляет 9.6 нм. В соответствии с выбранным форматом чипа длина спектрального порядка фактически составляет 15.6 нм (рис. 11). Это дает возможность точно совместить кривые континуумы соседних порядков. Как видно из рис. 11а, максимальное значение спектральных порядков, в которых находятся балмеровские линии, равняется среднему максимальному значению соседних порядков. Это значение и записывается в опции «Mode — User Defined». Далее выбираются кривые континуума соседних порядков, а кривая сдвигается вверх до максимального значения. Эта кривая может служить подсказкой, где проходит континуум. В результате получим восстановленный континуум (рис. 11б).

## ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Тестирование спектрографа проведено в спектрах с разрешением  $R = 55000$  для нескольких звезд различными методами. Оптоволокон-

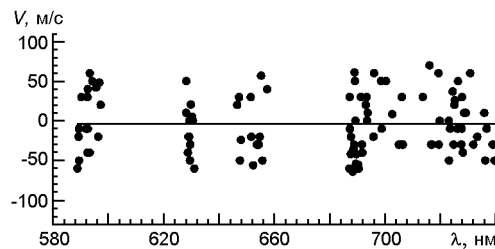


Рис. 12. Измеренные значения лучевых скоростей для избранных теллурических линий в спектре CMi

ные эшеле-спектрографы позволяют измерить лучевые скорости небесных тел с достаточно большой точностью. Мы провели исследование данного спектрографа на предмет точности измерения лучевых скоростей для спектральных линий с разными полуширинами ( $FWHM = 0.014...0.060$  нм). С этой целью измерения были произведены как по теллурическим линиям, так и по спектрам звезд, принадлежащим к разным спектральным классам.

**Оценки лучевых скоростей по теллурическим линиям.** Теллурические линии — узкие линии поглощения, появляющиеся в спектрах космических источников при прохождении их излучения через земную атмосферу. Ширина этих линий близка к ширине инструментального контура. Для тестов были измерены лучевые скорости 108 теллурических линий ( $FWHM = 0.014...0.022$  нм) в области длин волн  $\lambda = 580...740$  нм на девяти эшеле-порядках в спектре звезды CMi (Процион), которые были получены при наблюдениях 26 ноября 2016 г. Результаты измерений представлены на рис. 12. Разброс вычисленных значений лучевых скоростей составил  $\pm 60$  м/с относительно среднего значения при величине стандартного отклонения  $\sigma = 36.28$  м/с. Как видно из рис. 12, в области длин волн  $\lambda = 580...740$  нм среднее значение лучевых скоростей, определенное по измерениям теллурических линий, неизменно, что позитивно характеризует уровень систематических ошибок спектрографа.

**Оценки лучевых скоростей по атмосферным линиям звезд.**

CMi. На рис. 13а приведены измеренные значения лучевых скоростей для 309 фотосферных линий ( $FWHM = 0.020...0.025$  нм) на 54 эшеле-порядках в области длин волн  $\lambda = 400...740$  нм ( $S/N = 300...400$ ) в спектре звезды CMi, полученные 29 ноября 2016 г. Как видно, в данном диапазоне длин волн значения измеренных лучевых скоростей находятся около среднего  $V = -5429$  м/с при величине стандартного отклонения  $\sigma = 98.2$  м/с. Сравнение наших оценок с данными [11] представлено на рис. 13б.

43 Peg. Были также измерены лучевые скорости для 145 спектральных линий ( $FWHM = 0.020...0.040$  нм) на 47 эшеле-порядках в области длин волн  $\lambda = 390...640$  нм ( $S/N = 100...200$ ) в спектре стандартной звезды 43 Peg, полученные 22 августа 2016 г. (рис. 14а). Среднее



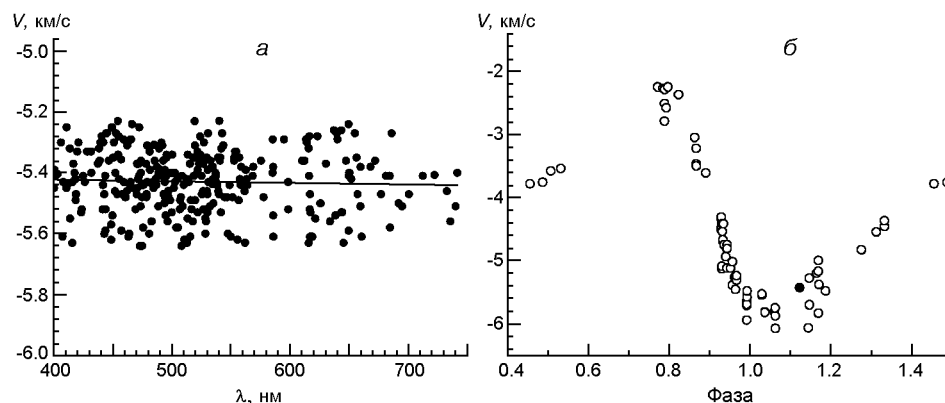


Рис. 13. Измеренные на разных инструментах значения лучевых скоростей CMi (а) и их изменения с фазой (б): кружки — данные [11], точки — измерения ShaFES

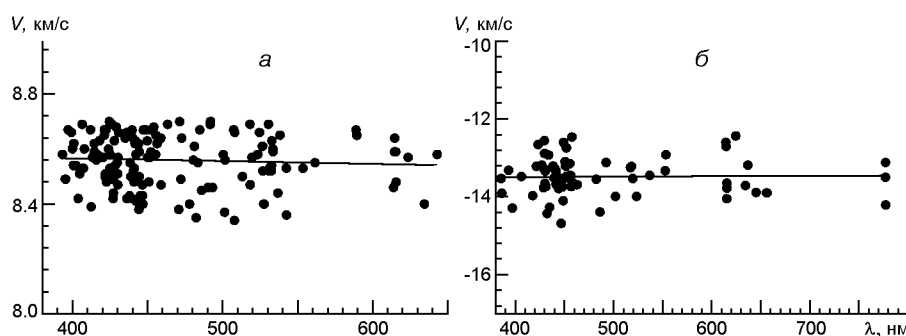


Рис. 14. Измеренные лучевые скорости стандартных звезд 43 Peg (а) и Lyr (б)

значение лучевых скоростей по нашим измерениям составляет:  $V = 8.56$  км/с (согласно базе данных SIMBAD  $V = 8.5$  км/с) при стандартном отклонении  $\sigma = 93$  м/с.

Лyr. В спектре звезды Lyr ( $S/N = 150...200$ ), полученном 15 мая 2016 г., были измерены лучевые скорости по 66 спектральным линиям ( $FWHM = 0.05...0.06$  нм) в области длин волн  $\lambda = 380...780$  нм (рис. 14б). Среднее значение лучевых скоростей составило  $V = -13.47$  км/с при стандартном отклонении  $\sigma = 0.49$  км/с.

#### ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН

Одной из важных характеристик спектральных приборов высокого разрешения является уровень систематических и случайных ошибок измерений эквивалентных ширин линий. Измерения эквивалентных ширин линий произведены по спектрам с разрешением  $R = 55000$ . Обработка спектров проведена с помощью усовершенствованной версии пакета программ DECH 30. В процессе экстракции порядков эшелес-спектров осуществлено вычитание рассеянного света. Спектры в красной области ( $\lambda > 670$  нм) очищены от фрингов. С целью измерения

были выбраны в основном слабые и средние спектральные линии в интервале значений эквивалентных ширин  $W = 0.001...0.04$  нм.

Измерения эквивалентных ширин проводились тремя способами: прямым интегрированием; по профилю Гаусса; с помощью профиля Фойгта. Способом прямого интегрирования измерены эквивалентные ширины сильных и неблендированных спектральных линий. Эквивалентные ширины слабых блендированных линий измерены по профилю Гаусса. Профиль Фойгта применялся в случае линий с депрессивными крыльями (дублет Na I D, триплет Mg I и т. д.). В спектре звезды Луг эквивалентные ширины всех линий измерены способом прямого интегрирования. Результаты наших измерений эквивалентных ширин по трем стандартным звездам (CMi, Boo, Луг) были сравнены с аналогичными данными из литературы.

CMi. На рис. 15 сравниваются полученные нами значения эквивалентных ширин 110 линий в спектре звезды CMi (в интервале значений  $W = 0.001...0.04$  нм) с данными других инструментов [7, 9, 17], спектральное разрешение которых сравнимо с параметрами спектрографа ShaFES. Следует отметить, что разница значений эквивалентных ширин, полученных спектрографом ShaFES, и оценок, сделанных в работах [9, 17], для некоторых линий достигает до 10 %, а по 47 линиям стандартное отклонение составляет  $= 0.000715$  нм. Вместе с тем средние значения эквивалентных ширин, измеренных нами, и оценки [9, 17] согласуются достаточно хорошо:  $W_{\text{ШАО}} - W_{[9, 17]} = -0.000135$  нм. Можно предположить, что спектры в работах [9, 17], полученные в 1965 и 1981 гг., были обработаны классическими методами, и не исключено, что разница в значениях эквивалентных ширин связана с недоучетом рассеянного света в спектрографе на этапе обработки классических спектров. Косвенным доказательством данного предположения можно считать совпадение значений эквивалентных ширин, полученных нами и в работе [7]. По данным измерений для 63 линий спектра стандартное отклонение равно  $= 0.000239$  нм, а разница значений эквивалентных ширин составляет всего 3...5 %, т. е. на-

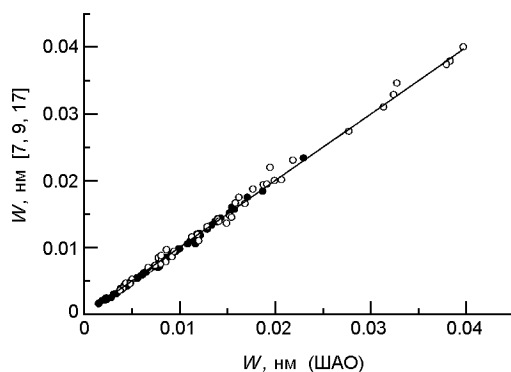


Рис. 15. Корреляционная зависимость значений эквивалентных ширин 110 линий спектра звезды CMi, полученных нами с помощью спектрографа ShaFES, и значений, полученных в работах [7] (точки) и [9, 17] (кружки). Прямая — линия равных значений

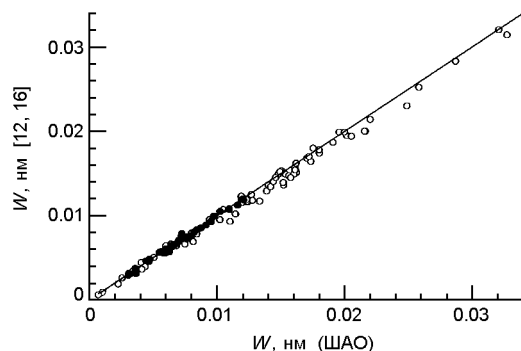


Рис. 16. Корреляционная зависимость значений эквивалентных ширин 110 линий спектра звезды Boο, полученных нами с помощью спектрографа ShaFES, и значений, полученных в работах [16] (точки) и [12] (кружки). Прямая — линия равных значений

ходится в пределах ошибок измерений. Спектры в работе [7] были получены в 1999 г. со спектральными разрешениями  $R = 60000$  и обработаны с помощью программы IRAF. Средние значения эквивалентных ширин практически совпадают:  $W_{\text{ШАО}} - W_{[7]} = 0.0001117$  нм.

Уравнения связи между нашими оценками эквивалентных ширин линий в спектре CMi (спектрограф ShaFES) и оценками работ [7, 9, 17] имеют вид

$$W_{\text{ШАО}} = 0.9884 W_{[7]} + 0.0002 \text{ нм},$$

$$W_{\text{ШАО}} = 0.9837 W_{[9, 17]} + 0.0001 \text{ нм}.$$

Boο. В спектре звезды Boο для 114 линий измерены значения эквивалентных ширин (в интервале  $W = 0.0005 \dots 0.03$  нм) и выполнено сравнение с аналогичными данными [12, 16] (см. рис. 16). Данные измерений ShaFES хорошо согласуются с данными измерений [16], полученными в 2011 г. По результатам измерений параметров 38 линий спектра стандартное отклонение составляет  $\sigma = 0.000225$  нм. Средние значения эквивалентных ширин практически не различаются в пределах ошибки измерения:  $W_{\text{ШАО}} - W_{[16]} = 0.000096$  нм. Сравнение данных измерений спектрографа ShaFES для 76 линий, с данными работы [12], полученными в 1975 г., показывает систематические различия до 8 %. Значения эквивалентных ширин измеренных в ShaFES систематически завышены по сравнению с измерениями в работе [12]:  $W_{\text{ШАО}} - W_{[12]} = 0.00047$  нм. Стандартное отклонение, вычисленное по данным измерений профилей 76 линий, составляет  $\sigma = 0.00058$  нм.

Уравнения связи между нашими измерениями и данными из [12, 16] эквивалентных ширин линий в спектре звезды Boο имеют вид

$$W_{\text{ШАО}} = 1.0115 W_{[12]} + 0.0003 \text{ нм},$$

$$W_{\text{ШАО}} = 0.999 W_{[16]} + 0.0001 \text{ нм}.$$

Спектры, полученные на спектрографе ShaFES, обрабатывались программой DECH, а данные в работах [12] и [16] — программами IRAF и классическим методом соответственно.

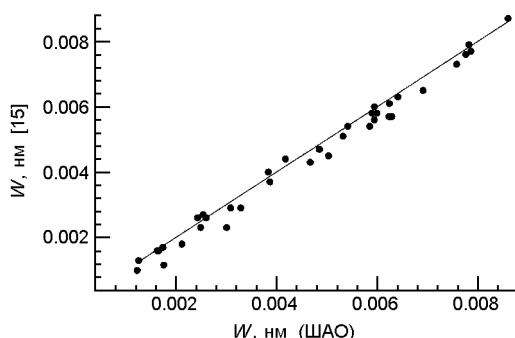


Рис. 17. Корреляционная зависимость значений эквивалентных ширин 110 линий спектра звезды  $\gamma$  Лyr, полученных нами с помощью спектрографа ShaFES, и значений, полученных в работе [15]. Прямая — линия равных значений

Лyr. Были измерены эквивалентные ширины (в интервале значений  $W = 0.001 \dots 0.009$  нм) для 36 линий в спектре стандартной звезды Вега ( $\gamma$  Лyr) и проведено сравнение с данными измерений из работы [15]. Обработка данных выполнялась программами DECH и MIDAS соответственно. Результаты сравнения приведены на рис. 17. Виден определенный разброс значений эквивалентных ширин, полученных ShaFES, и оценок [15]. Этот разброс частично может быть связан со сложностью структур профилей спектральных линий в спектре  $\gamma$  Лyr. Стандартное отклонение по 36 линиям равно  $\sigma = 0.00024$  нм.

Для некоторых линий отклонения значений эквивалентных ширин достигало 10 %, тогда как их средние значения были достаточно близкими, и их разность невелика:  $W_{\text{ШАО}} - W_{[15]} = 0.00016$  нм.

Уравнения связи между нашими оценками эквивалентных ширин линий в спектре звезды  $\gamma$  Лyr и данными из [15] имеет вид

$$W_{\text{ШАО}} = 0.9958 W_{[15]} + 0.0002 \text{ нм.}$$

Оценка качества спектров ShaFES проводилась путем сравнения наблюдаемых эквивалентных ширин в спектре стандартных звезд с данными других инструментов [7, 9, 12, 15—17]. Приведенные выше уравнения связи показывают низкий уровень систематических ошибок и хорошее совпадение результатов измерений ShaFES и других инструментов при небольшом значении сдвига нулевой точки в пределах  $0.0001 \dots 0.0003$  нм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках программы модернизации и усовершенствования парка научного оборудования 2-м телескопа ШАО НАН Азербайджана был изготовлен и внедрен в наблюдения оптоволоконный эшелле-спектрограф высокого разрешения. Спектрограф работает в двух режимах спектрального разрешения ( $\lambda / \Delta\lambda = 55000$  и  $27000$ ). В процессе наблюдений смена спектрального разрешения происходит за короткое

время программным образом, путем перехода в другой режим считывания кадра.

Неподвижность компонентов в процессе наблюдений и компактность спектрографа, а также единый канал подачи светового потока для исследуемого объекта и калибровочных ламп позволили практически исключить инструментальные систематические ошибки. Для калибровки спектров применяются торий-аргоновые (ThAr) лампы и свет дневного неба. Полученная при измерениях ширина узких не-блендированных линий ThAr ламп практически формируется шириной инструментального контура спектрографа. По этим линиям была выполнена оценка ширины инструментального профиля (*FWHM*) спектрографа, соответствующая разрешению в 2 пкл на изображении спектра. Установлено, что ошибка измерений эквивалентных ширин линий спектра достигает 1...5 %. Погрешность измерения лучевых скоростей составляет несколько десятков метров в секунду.

Наблюдения показывают, что на данном оборудовании можно получить спектры звезд 8-й и 10-й звездной величины с отношением сигнал/шум 150...200  $y = 580$  нм, за 1 ч в случае с разрешением  $R = 55000$  и  $R = 27500$  соответственно при изображении 2-3 .

Процесс гидирования объектов наблюдений полуавтоматизирован, и их изображение передаются в наблюдательную комнату.

В качестве светоприемника использована большая ПЗС-камера с азотным охлаждением с размерами 4096 4096 пкл, что позволяет получить в одном кадре широкий оптический диапазон ( $\lambda = 360...900$  нм). Оптимальный рабочий диапазон длин волн  $\lambda = 370...850$  нм ограничен призмой кросс-дисперсии и фрингами. В данной работе продемонстрирован эффективный способ очищения спектров от фрингов путем деления экстрагированного спектра на калибровочный спектр (в одинаковых спектральных порядках). В работе рассматривался вопрос корректного проведения непрерывного спектра, которое, как известно, для эшеле-спектров является проблематичным, в особенности в тех спектральных порядках, где содержатся линии с широкими крыльями (к примеру, бальмеровские линии водорода). На примере спектра звезды  $\gamma$  Лун апробирована методика восстановления истинного уровня континуума в 72-м спектральном порядке, где находится линия H . С целью облегчения данной процедуры формат чипа преднамеренно был выбран большим, чтобы получить область, свободную от влияния крыльев линии H .

Результаты сравнительного анализа позиционных и фотометрических характеристик данного спектрографа с аналогичными данными из литературных источников показали, что данный комплекс вполне пригоден для выполнения высокоточных исследований атмосфер относительно ярких звезд (до  $8^m ... 10^m$  в зависимости от режима спектрального разрешения); для спектрального мониторинга звезд с разными спектральными особенностями (молодые звезды с малыми и промежуточными массами, симбиотические звезды, спектрально

двойные и кратные звезды и т. д.); для исследования временных характеристик стохастического звездного ветра звезд-сверхгигантов; для астросейсмологических исследований; исследования звездного магнетизма; для спектральных исследований тел Солнечной системы и т. д.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту за внимательное прочтение рукописи и сделанные ценные замечания.

1. Валявин Г. Г., Бычков В. Д., Юшкин М. В., Галазутдинов Г. А., Драбек С. В., Шергин В. С., Семенко Е. А., Бурлакова Т. Е., Кравченко В. М., Кудрявцев Д. О., Притыченко А. М., Крюков П. Г., Семёнов С. Л., Мусаев Ф. А., Фабрика С. Н. Эшелльный спектрограф высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для БТА. I. Оптическая схема, размещение, система контроля. *Астрофиз. Бюл.* 2014. 69, № 2. С. 239—255.
2. Микаилов Х. М., Халилов В. М., Алекберов И. А. Эшелле-спектрометр фокуса Кассегрена 2-м телескопа ШАО. *Циркуляр ШАО.* 2005. № 109. С. 21—28.
3. Мусаев Ф. А. Куда эшелле спектрометр. *Письма в Астрон. журн.* 1993. 19. С. 776—783.
4. Панчук В. Е., Юшкин М. В., Ключкова В. Г., Якопов Г. В., Верич Ю. Б. Проект спектрографа высокого разрешения, для 1-метрового телескопа САО. *Астрофиз. Бюл.* 2015. 70, № 2. С. 237—243.
5. Пейсахсон И. В. *Оптика спектральных приборов.* Изд. 2-е, Ленинград, 1975. 196 с.
6. Рзаев А. Х., Микаилов Х. М., Алекберов И. А. Эшелле спектрометр фокуса куда 2-м телескопа ШАО АН Азербайджана. *Циркуляр ШАО.* 1999. № 95. С. 3—7.
7. Allende P. C., Asplund M., García L. R. J., Lambert D. L. Signatures of convection in the spectrum of Procyon: Fundamental parameters and Iron abundance. *Astrophys. J.* 2002. 567. P. 544—565.
8. Bonev T., Markov H., Tomov T., Bogdanovski R., Markishki P., Belcheva M., Dimitrov W., Kamiński K., Milushev I., Musaev F., Napetova M., Nikolov G., Nikolov P., Tenev T. ESpeRo: Echelle Spectrograph Rozhen. *Bulg. Astron. J.* 2017. 26. P. 67—90.
9. Edmonds F. N. A Spectrophotometric analysis of Procyon. I. Equivalent widths and line profiles. *Astrophys. J.* 1965. 142. P. 278—298.
10. Furenlid I., Cardona O. A CCD spectrograph with optical fiber feed. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 1988. 100. P. 1001—1007.
11. Irwin A. W., Fletcher J. M., Yang S. L. S., Walker G. A. H., Goodenough C. The orbit and mass of Procyon. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 1992. 104. P. 489—499.
12. Mäcke R., Griffin R., Griffin R., Holweger H. A model-atmosphere analysis of the spectrum of Arcturus. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1975. 19. P. 303—319.
13. Panchuk V. E., Yushkin M. V., Yakopov M. V. High-resolution fiber-fed spectrographs. *Astrophys. Bull.* 2011. 66. № 3. P. 355—370.
14. Pfeier M. J., Frank C., Baumüller D., Fuhrmann K., Gehren T. FOCES-a fibre optics Cassegrain echelle-spectrograph. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. 130. P. 381—393.
15. Qiu H. M., Zhao G., Chen Y. Q., Li Z. W. The abundance patterns of Sirius and Vega. *Astrophys. J.* 2001. 548. P. 953—965.
16. Ramírez I., Allende P.C. Fundamental parameters and chemical composition of Arcturus. *Astrophys. J.* 2011. 743. № 2. P. 1—14.

17. Smith G. Non-resonance lines of neutral calcium in the spectra of the Sun and Procyon. *Astron. and Astrophys.* 1981. 103. № 2. P. 351—357.

## REFERENCES

1. Valyavin G. G., Bychkov V. D., Yushkin M. V., Galazutdinov G. A., Drabek S. V., Shergin V. S., Sarkisyan A. N., Semenko E. A., Burlakova T. E., Kravchenko V. M., Kudryavtsev D. O., Pritychenko A. M., Kryukov P. G., Semjonov S. L., Musaev F. A., Fabrika S. N. (2014) High-Resolution Fiber-Fed Echelle Spectrograph for the 6-m Telescope. I. Optical Scheme, Arrangement, and Control System. *Astrofizicheskiy Byulleten' Astrophysical Bulletin*. 69(2). 239—255. [In Russian].
2. Mikailov Kh. M., Khalilov V. M., Alekberov I. A. (2005) Echelle spectrometer of the Cassegrain focus of the 2-m ShAO telescope. *Tsirkulyar ShAO. Circular ShAO*. 109. 21—28. [In Russian].
3. Musaev F. A. (1993) Coude echelle spectrometer. *Pis'ma v Astron. zhurnal. Letters to Astron. J.* 19. 776—783. [In Russian].
4. Panchuk V. E., Yushkin M. V., Klochkova V. G., Yakopov G. V., Verich Yu. B. (2015) Design of a high resolution spectrograph for the SAO 1-m telescope. *Astrofizicheskiy Byulleten. Astrophys. Bull.* 70(2). 237—243. [In Russian].
5. Peysakhson I. V. (1975) *Optics of spectral instruments*. Ed. 2nd, Leningrad. 196 p. [In Russian].
6. Rzaev A. Kh., Mikailov Kh. M., Alekberov I. A. (1999) Echelle coude focus spectrometer of the 2-m telescope of the ShAO Academy of Sciences of Azerbaijan. *Tsirkulyar ShAO. Circular ShAO*. 95. 3—7. [In Russian].
7. Allende P. C., Asplund M., García L. R. J., Lambert D. L. (2002) Signatures of convection in the spectrum of Procyon: Fundamental parameters and Iron abundance. *Astrophys. J.* 567. 544—565.
8. Bonev T., Markov H., Tomov T., Bogdanovski R., Markishki P., Belcheva M., Dimitrov W., Kamiński K., Milushev I., Musaev F., Napetova M., Nikolov G., Nikolov P., Tenev T. (2017) ESpeRo: Echelle Spectrograph Rozhen. *Bulg. Astron. J.* 26. 67—90.
9. Edmonds F. N. (1965) A spectrophotometric analysis of Procyon. I. Equivalent widths and line profiles. *Astrophys. J.* 142. 278—298.
10. Furenlid I., Cardona O. (1988) A CCD spectrograph with optical fiber feed. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 100. 1001—1007.
11. Irwin A. W., Fletcher J. M., Yang S. L. S., Walker G. A. H., Goodenough C. (1992) The orbit and mass of Procyon. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 104. 489—499.
12. Mäcke R., Griffin R., Griffin R., Holweger H. (1975) A model-atmosphere analysis of the spectrum of Arcturus. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 19. 303—319.
13. Panchuk V. E., Yushkin M. V., Yakopov M. V. (2011) High-resolution fiber-fed spectrographs. *Astrophys. Bull.* 66(3). 355—370.
14. Pfeier M. J., Frank C., Baumuller D., Fuhrmann K., Gehren T. (1998) FOCES-a fibre optics Cassegrain echelle-spectrograph. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 130. 381—393.
15. Qiu H. M., Zhao G., Chen Y. Q., Li Z. W. (2001) The abundance patterns of Sirius and Vega. *Astrophys. J.* 548. 953—965.
16. Ramirez I., Allende P. C. (2011) Fundamental parameters and chemical composition of Arcturus. *Astrophys. J.* 743(2). 1—14.
17. Smith G. (1981) Non-resonance lines of neutral calcium in the spectra of the Sun and Procyon. *Astron. and Astrophys.* 103(2). 351—357.

*Х. М. Мікаїлов<sup>1</sup>, Ф. А. Мусаєв<sup>2</sup>, І. А. Алекберов<sup>1</sup>,  
Б. Н. Рустамов<sup>1</sup>, О. В. Халілов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси  
Национальной академии наук Азербайджана,  
пос. Ю. Мамедалиева, Шамахинский район, Азербайджан

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,  
сел. Нижний Архыз, Зеленчукский район,  
Карачаево-Черкесская республика, Россия

# ОПТОВОЛОКОННЫЙ ЭШЕЛЕ-СПЕКТРОГРАФ ШАМАХИНСЬКОЇ АСТРОФІЗИЧНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ (ShaFES)

Приведено опис оптоволоконного ешелє-спектрографа високого розділення, розробленого для фокуса Кассегрена 2-м телескопа Шамахинської астрофізичної обсерваторії (ShaFES). Представлено принципову оптичну схему і схему підвісної частини спектрографа. Спектрограф працює у двох режимах із спектральним розділенням 27500 і 55000 в області довжин хвиль 370...850 нм. Аналізуються результати тестування параметрів спектрографа. Представлено результати і методика тестових спостережень, проведено порівняльний аналіз як самого приладу, так і цих спостережень ShaFES з аналогічними інструментами. Спектрограф дозволяє отримати спектри зірок до 8<sup>m</sup> і 10<sup>m</sup> з відношенням сигнал/шум  $S/N = 150...200$  при  $\lambda = 580$  нм, експозиції 1 год і розділенні  $R = 55000$  та  $R = 27500$  відповідно.

**Ключові слова:** спектроскопія високого розділення, прилади та інструменти, ешелє-спектрограф.

*Kh. M. Mikailov<sup>1</sup>, F. A. Musaev<sup>2</sup>, I. A. Alekberov<sup>1</sup>, B. N. Rustamov<sup>1</sup>, O. V. Khalilov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi  
of the Azerbaijan National Academy of Sciences

<sup>2</sup>Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,  
Nizhnij Arkhyz, Russia

## ShaFES: SHAMAKHY FIBRE ECHELLE SPECTROGRAPH

The paper describes the high-resolution fiber-optic echelle spectrograph for the Cassegrain focus of the 2-m telescope at the Shamakhy Astrophysical Observatory. The schematic optical circuit and circuit of a suspended part of the spectrograph are presented. Spectrograph operates in two modes with spectral resolutions: 27500 and 55000, in  $\lambda = 370...850$  nm region of wavelengths. Results of testing of spectrograph property are analyzed. Results and methods of performed test observations are presented, comparative analysis of both the instrument itself and ShaFES observation data with similar tools is carried out. It is possible to obtain spectra of stars of 8 and 10 star magnitude, with signal-to-noise ratio  $S/N = 150...200$ ,  $\lambda = 580$  nm, at hourly exposure in case of resolution  $R = 55000$  and  $R = 27500$ , respectively.

**Keywords:** high resolution spectroscopy, instruments and devices, echelle spectrograph.

Стаття надійшла до редакції 09.01.2019

Після доопрацювання 21.08.2019

Прийнята до друку 11.10.2019