

УДК 520.84

## Эшелльный спектрограф 2.6-м телескопа им. академика Г.А. Шайна

*А.Ф. Лагутин, С.И. Плачинда, Д.Н. Шаховской, Е.М. Нехай,  
Д.Н. Бакланова, П.П. Петров*

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
*dilyara@srao.crimea.ru*

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

**Аннотация.** Дано описание эшелльного спектрографа высокого разрешения, установленного в фокусе куде телескопа ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории РАН. Спектрограф является штатным прибором и используется в наблюдениях начиная с 2013 г. Приводится оценка эффективности спектрографа по результатам наблюдений звезд.

ESHELLE SPECTROGRAPH OF THE 2.6 M SHAJN TELESCOPE, *by A.F. Lagutin, S.I. Plachinda, D.N. Shakhovskoy, E.M. Nekhay, D. Baklanova, P.P. Petrov.* The paper describes the high resolution echelle spectrograph ESPL developed for the coude focus of the 2.6 m Shajn reflector of the Crimean Astrophysical Observatory. The spectrograph has been regularly operated since 2013. Efficiency of the spectrograph is estimated from observations of stars.

**Ключевые слова:** астрономия, инструменты, средства наблюдений, спектрометрия

---

## 1 Введение

Зеркальный телескоп им. академика Г.А. Шайна (ЗТШ), введенный в строй в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР (КрАО) в начале 1960-х, был оснащен классическим спектрографом АСП-14 в фокусе куде (Васильев, 1976). Спектрограф имел три оптические камеры с разными обратными дисперсиями, от 1.6 до 12 Å/мм. Спектры регистрировались на фотопластинках. В 1985 г. в АСП-14 впервые была установлена ПЗС-камера для регистрации спектров с разрешением  $R$  30000 при ширине щели 1 угл. сек. Небольшие размеры ПЗС-приемника значительно ограничивали регистрируемый диапазон спектра. Возникла необходимость создания нового – эшелльного – спектрографа, который позволял бы проецировать на ПЗС много спектральных порядков и, благодаря этому, регистрировать существенно больший диапазон длин волн.

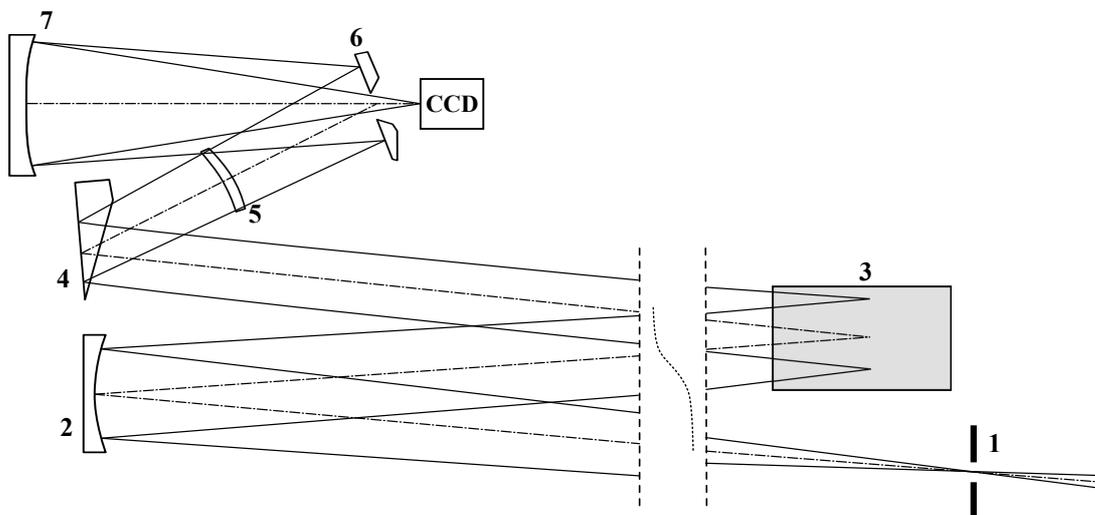
Первый опыт создания эшелльного спектрографа для ЗТШ был описан И.М. Копыловым и Н.В. Стешенко в 1965 г. (Копылов и Стешенко, 1965).

В конце 1990-х в КрАО был спроектирован и в начале 2000-х изготовлен новый эшелльный спектрограф для фокуса куде ЗТШ. После оснащения в 2013 году ПЗС-камерой ANDOR с чипом  $2k \times 2k$  и размером пиксела 13.5 мкм на спектрографе были начаты систематические спектральные и спектрополяриметрические наблюдения. Спектрограф получил сокращенное название ЭСПЛ (Эшелльный Спектрограф Проника и Лагутина), в честь двух главных его разработчиков.

В данной статье приводится краткое описание оптической схемы и механической конструкции спектрографа, а также его характеристики, полученные в результате наблюдений звезд.

## 2 Оптическая схема спектрографа

Классическая оптическая схема эшелюного спектрографа для фокуса куде ЗТШ была рассчитана В.И. Прониюком. Оптические элементы и ход лучей в спектрографе показаны схематически на рис. 1. Сходимость светового пучка в фокусе куде 1:40, поэтому спектрограф имеет сравнительно большие габариты: при диаметре коллимированного пучка 150 мм расстояние от входной щели до коллиматора составляет 6 метров.

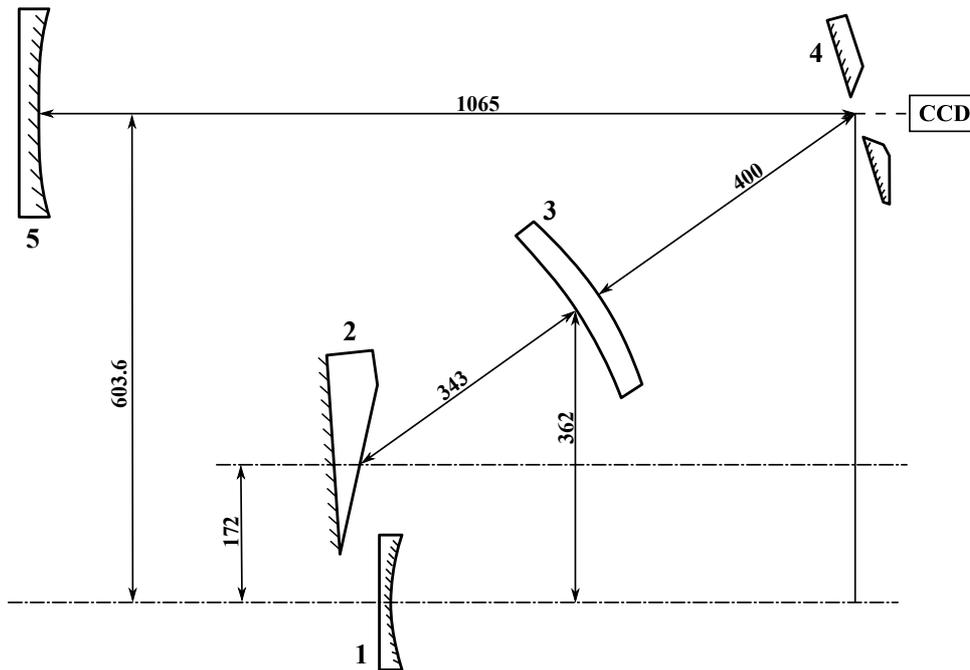


**Рис. 1.** Оптическая схема спектрографа: 1 – входная щель, 2 – коллиматор, 3 – эшелле, 4 – кросс-дисперсор, 5 – корректор, 6 – плоское зеркало, 7 – камерное зеркало, 8 – ПЗС-камера

Диаметр коллиматорного зеркала  $D_{col} = 160$  мм, фокус коллиматора  $F_{col} = 6020$  мм. Эшелле представляет собой реплику, которая была изготовлена в ГОИ им. С.И. Вавилова в 2005 г. Размеры заштрихованной области  $410 \times 200$  мм, число штрихов на миллиметр 37.5, общее число штрихов 15375. Угол блеска  $63^\circ 10'$ . Расстояние от коллиматора до эшелле 4000 мм. Расстояния между оптическими элементами в блоке коллиматора и камеры приведены на рис. 2.

В спектрографе имеются два сменных кросс-диспергирующих элемента: призма и дифракционная решетка. Призма изготовлена из стекла Ф1. Задняя сторона призмы алюминирована. Свет проходит призму дважды, в результате преломляющий угол призмы равен  $34^\circ$ . Дифракционная решетка (реплика) также была изготовлена в ГОИ им. С.И. Вавилова в 2005 г. Размеры заштрихованной области реплики  $200 \times 300$  мм, 150 штрихов на 1 мм, общее число штрихов 30000. Решетка дает преимущественную концентрацию света в области  $4000\text{--}12000 \text{ \AA}$  в первом порядке. При этом на длине волны  $\lambda 6328 \text{ \AA}$  решетка концентрирует  $\sim 70\%$  отраженного света.

После кросс-дисперсора свет направляется через корректор (мениск) на плоское зеркало и отражается на сферическое камерное зеркало. Мениск изготовлен из стекла К8, радиусы кривизны вогнутой и выпуклой поверхностей равны 445.5 и 466.4 мм соответственно. Диаметр камерного зеркала  $D_{cam} = 350$  мм, радиус кривизны  $R_{cam} = 2211$  мм. Фокусное расстояние камеры, с учетом оптической силы мениска и расстояния между двумя элементами, составляет 1105.5 мм. От камерного зеркала сходящийся световой пучок проходит через центральное отверстие в плоском зеркале



**Рис. 2.** Оптическая схема блока коллиматора и камеры: 1 – коллиматор, 2 – кросс-диспергирующая призма, 3 – корректор, 4 – плоское зеркало, 5 – камерное зеркало. Расстояния указаны в мм

и фокусируется на светоприемник (см. ниже). Поскольку в световом пучке от ЗТШ имеется центральное экранирование вторичным зеркалом телескопа, отверстие в плоском зеркале в камере спектрографа не приводит к дополнительной потере света.

Фокусное расстояние системы куде ЗТШ равно 104204 мм (Васильев, 1976). Моделирование оптической системы спектрографа в программе ZEMAX дает значение эквивалентного фокусного расстояния системы “телескоп + спектрограф”  $F_e = 18488$  мм. Соответствующий масштаб в фокальной плоскости спектрографа составляет 0.0896 мм/угл. сек.

На рис. 3 показано изображение спектра при использовании призмы для кросс-дисперсии, а на рис. 4 – изображение спектра при использовании дифракционной решетки. Во втором случае расстояние между спектральными порядками больше, что позволяет установку анализатора циркулярно-поляризованного света, т. н. “стоксметр” (Plachinda, 2005).

Предусмотрена также возможность введения плоского зеркала перед эшелле. В этом случае диспергирующим элементом является только призма (или решетка). Этот вариант используется, в основном, при юстировке спектрографа.

Первоначально спектрограф проектировался исходя из размера пиксела ПЗС равного 24 мкм. В этом случае, при ширине входной щели 1 угл. сек. (0.505 мм), ее проекция на ПЗС составляла бы  $\sim 3.7$  пиксела. Сейчас в качестве штатной камеры используется камера ANDOR с размером чипа  $2k \times 2k$  и размером пиксела 13.5 мкм. При этом проекция входной щели 1 угл. сек. на ПЗС равна  $\sim 6.637$  пиксела и соответствующее спектральное разрешение  $R \sim 48026$ .

Наибольшее число ясных ночей в КраО приходится на летне-осенний период, когда среднее качество изображения составляет около 2 угл. сек., поэтому многие программы наблюдений на ЭСПЛ проводятся с входной щелью 2 угл. сек. В этом случае проекция входной щели на ПЗС равна  $\sim 13.3$  пиксела и спектральное разрешение  $R \sim 24013$ . Для увеличения динамического диапазона и уменьшения шумов иногда применяется бинирование по 4 пиксела вдоль дисперсии, так что на ширину входной щели приходится  $\approx 3.3$  бина.



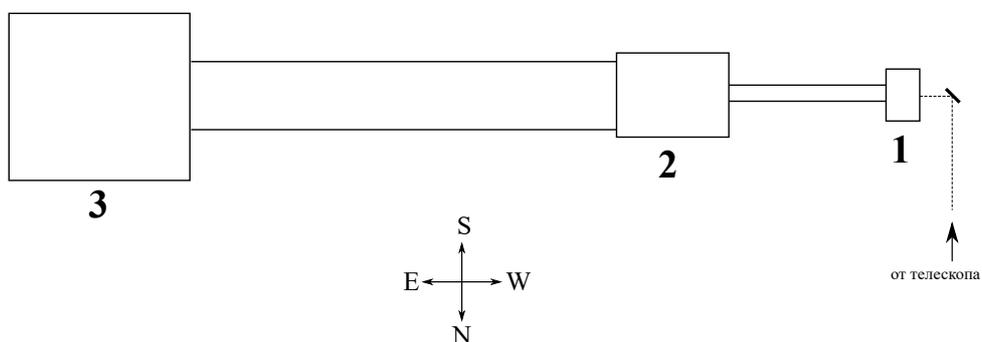
**Рис. 3.** Изображения спектра звезды SU Aur (G2 IVe) на экране монитора при использовании призмы в качестве кросс-дисперсора. Красная область вверху. Широкая эмиссионная линия  $H_{\alpha}$  с центральной абсорбцией заметна слева вверху, а ниже справа виден дублет натрия



**Рис. 4.** Изображение спектра  $\beta$  Aql (G8 IV) на экране монитора при использовании дифракционной решетки в качестве кросс-дисперсора. Красная область внизу. Спектр получен с анализатором циркулярно-поляризованного света, поэтому каждый порядок разделен на два спектра. Сильная линия в нижней части изображения –  $H_{\alpha}$ . Хорошо заметен в правом верхнем углу дублет натрия

### 3 Механическая часть спектрографа

Спектрограф имеет большие продольные расстояния между оптическими элементами, сгруппированными в основном по концам прибора – отсюда повышенные требования к жесткости механической части, связывающей оптические узлы. Расположение основных узлов спектрографа показано схематически на рис. 5.



**Рис. 5.** Схема расположения основных узлов спектрографа (вид сверху): 1 – блок входной щели, 2 – блок эшелле, 3 – блок коллиматора и камеры

Спектрограф расположен на бетонном фундаменте, который развязан от фундаментов телескопа и подвижной части купола башни. Основание прибора представляет собой железобетонный мост желобчатого сечения на двух опорах. Бетон перекрыт массивными стальными плитами, к которым крепятся оптико-механические узлы спектрографа. Все оптические детали закреплены в оправках или на несущих корпусах, которые имеют возможность малых перемещений посредством юстировочно-крепежных винтов, затягиваемых по завершении юстировки прибора.

Спектрограф установлен горизонтально в изолированной комнате восточной части башни телескопа, что обеспечивает минимальные ( $\leq 2^\circ\text{C}$ ) температурные изменения в течение астрономической ночи. Световой пучок телескопа перехватывается небольшим переключающимся плоским зеркалом близ фокуса куда и направляется горизонтально ко входной щели спектрографа.

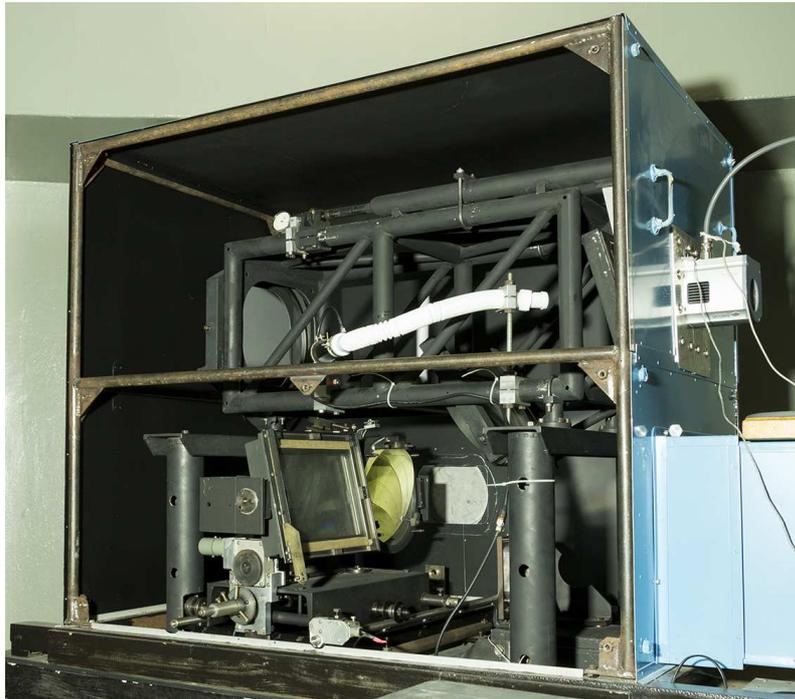


Рис. 6. Блок коллиматора и камеры

*Входная щель* спектрографа имеет стандартную конструкцию с микрометренным винтом, позволяющим точную установку ширины щели. Передняя плоскость щёчек щели зеркальная, что позволяет использовать края изображения звезды в фотогиде телескопа, в системе визуального контроля и прочих элементах прищелевой части, описанной ранее в (Лагутин, 2011).

*Эшелле* находится в оправе, снабженной двумя шариковыми подпятниками, фиксирующими в вертикальном положении ось поворота эшелле (штрихи эшелле вертикальны). Поворот эшелле осуществляется посредством арксинусного механизма, в котором толкателем является стандартный микрометренный винт, вращаемый шаговым двигателем.

*Плоское зеркало* перед эшелле установлено в конструкции, позволяющей вводить зеркало в световой пучок поворотом вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости зеркала.

Кросс-диспергирующие элементы – *призма* и *дифракционная решетка* (штрихи решетки горизонтальны) – закреплены рядом на жесткой коленчатой детали, имеющей возможность наклоняться вокруг горизонтальной оси на двух шариках посредством механизма с толкателем, аналогичного механизму эшелле. Вся сборка закреплена на тележке, перемещаемой ходовым винтом по направ-

ляющим в поперечном направлении для ввода в пучок призмы или решетки. Повороты эшелле, призмы и решетки, задаваемые дистанционно с помощью шаговых двигателей, позволяют вводить в кадр ПЗС нужные участки спектра.

*ПЗС-камера* подвешена на фокусирующей раме, имеющей возможность перемещаться вдоль оптической оси с жесткой фиксацией положения после фокусировки; для отсчета величины перемещения установлен стрелочный индикатор стандартного типа. Оптические элементы камеры связаны между собой жесткой фермой, сваренной из труб и являющейся основанием для фокусирующей рамы.

Вся конструкция спектрографа заключена в светонепроницаемый кожух, состоящий из двух – восточного и западного – коробов и соединяющей их трубы коробчатого сечения. Элементы кожуха собраны из листового алюминия на стальных каркасах. На всем пути световых пучков в нескольких местах спектрографа имеются элементы ограничения пучков – диафрагмы, отсекающие возможные паразитные засветки. Все внутренние поверхности кожуха, а также светоизолированной комнаты, в которой расположен спектрограф, выкрашены в черный цвет.

Общий вид блока коллиматора и камеры приведен на рис. 6.

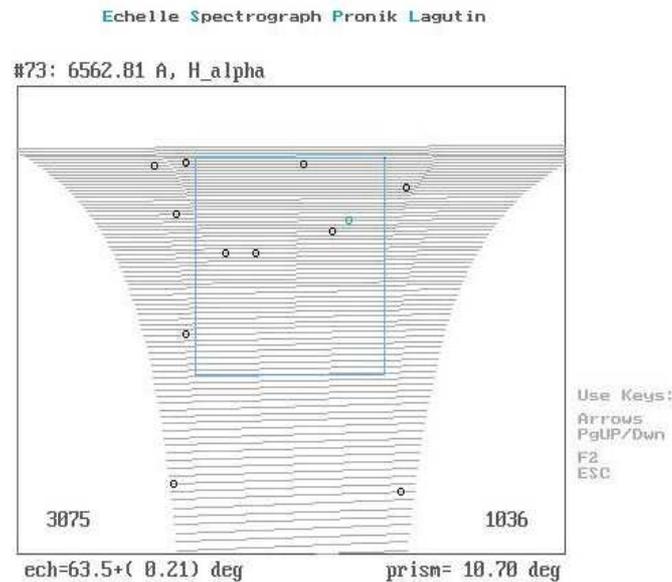
## 4 Система управления и регистрации

Управление элементами спектрографа осуществляется при помощи контроллера, изготовленного в КраО. Программа, написанная специально для обмена данными с этим контроллером, используя компьютерный порт RS-232, позволяет управлять включением ламп спектра сравнения и плоского поля и тремя шаговыми двигателями. Два двигателя регулируют угол горизонтального поворота эшелле и угол вертикального наклона кросс-дисперсора. Безлюфтовые приводы этих оптических элементов реализованы с помощью микрометрических винтов, толкающих подпружиненную оправу оптического элемента. Третий шаговый двигатель предназначен для введения в световой пучок перед щелью плоского зеркала. При выведенном зеркале на щель попадает изображение объекта, при введенном – изображение ламп. Зеркало закреплено непосредственно на оси шагового двигателя.

Пользовательский интерфейс программы позволяет в режиме реального времени контролировать состояние подвижных оптических компонентов спектрографа. Также есть возможность запоминать и восстанавливать положение призмы и решетки для различных спектральных областей. Контроль положения оптических элементов осуществляется счетом шагов соответствующего двигателя с сохранением данных на дисковом накопителе.

В качестве детектора в спектрографе используется ПЗС-камера Andor iKon-L 936 с back-illuminated E2V CCD42-40 с  $2048 \times 2048$  пикселей размером 13.5 мкм, шум считывания 3 электрона при частоте оцифровки 50 кГц, 7 электронов при частоте 1 МГц. Охлаждение ПЗС термоэлектрическое, обычно используется режим воздушного охлаждения, обеспечивающий поддержание температуры  $-60^\circ\text{C}$ . Возможно понижение температуры до  $-100^\circ\text{C}$  системой водяного охлаждения. Для управления экспозицией используется встроенный затвор ПЗС-камеры. Для получения изображений используется программное обеспечение Andor Solis. Подсмотр и гидирование объекта на входной щели спектрографа осуществляется с помощью камеры Meade DSI.

В настоящее время, при использовании ПЗС-матрицы формата  $27.5 \times 27.5$  мм, спектральные порядки в кадре ПЗС не перекрываются по длинам волн, поэтому при планировании наблюдений заранее выбираются такие углы поворота эшелле и кросс-диспергирующего элемента, при которых формат ПЗС охватывает требуемые участки спектра. Для этого была написана программа, моделирующая изображение спектральных порядков в фокальной плоскости, где в интерактивном режиме, задавая углы поворота, можно приводить заданные спектральные линии в кадр ПЗС. На рис. 7 показано изображение на экране монитора при работе с этой программой в случае использования призмы. В кадре ПЗС находятся линии CaII 8542 Å (вверху), H $\alpha$  и дублет DNa I.



**Рис. 7.** Диаграмма, показывающая расположение спектральных порядков в фокальной плоскости спектрографа. Красная область вверху. Прямоугольником показан кадр ПЗС. Кружками отмечены положения заданных спектральных линий. Числа в нижней части рисунка – углы поворота эшелле и призмы

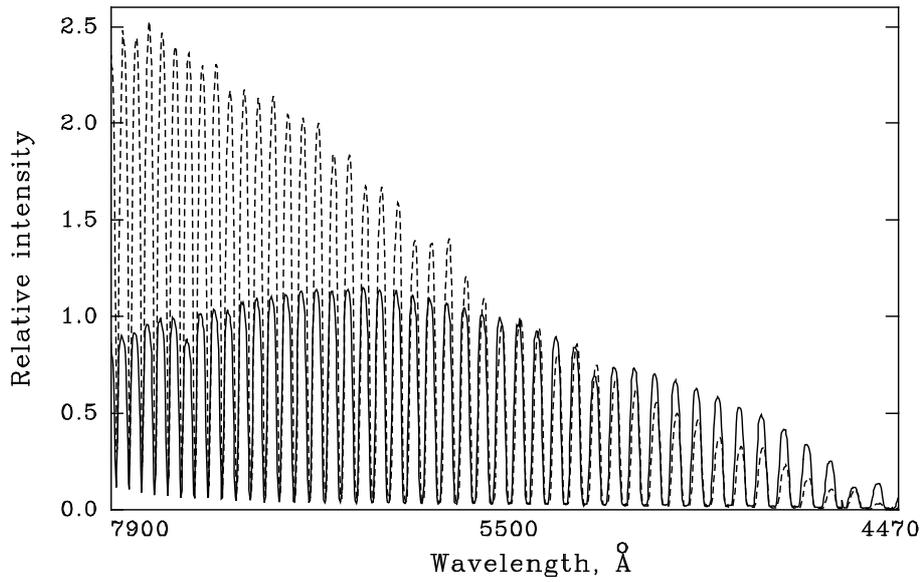
## 5 Эффективность спектрографа

Относительная интенсивность разных спектральных порядков зависит от спектральной чувствительности ПЗС-матрицы и спектрального класса звезды. На рис. 8 показаны фотометрические разрезы поперек спектральных порядков при наблюдении звезд раннего и позднего спектрального типа.

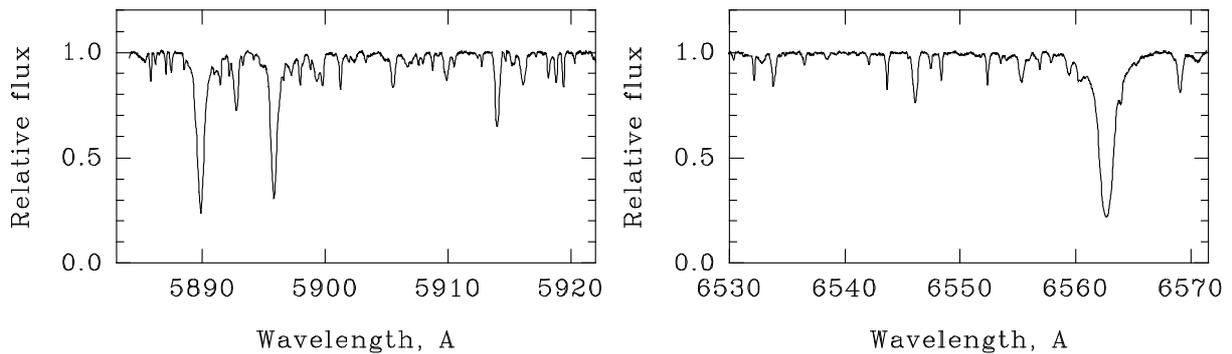
На рис. 9 и 10 показаны примеры спектров звезд.

Точность измерения лучевых скоростей зависит от спектрального разрешения и стабильности положения элементов оптической системы спектрографа. Элемент спектрального разрешения, определенный как полуширина (FWHM) слабых атмосферных линий воды в красной области спектра, при входной щели 2 угл. сек. равен  $\approx 12$  км/с, что соответствует расчетному спектральному разрешению. Шкала длин волн определяется по спектру сравнения лампы Th-Ag. В нашем случае, при использовании ПЗС-матрицы формата  $27.5 \times 27.5$  мм, спектральные порядки не перекрываются по длинам волн, поэтому шкала длин волн определяется по каждому порядку отдельно, и точность этого определения ограничена малым числом реперных линий в спектре сравнения Th-Ag. По измерениям десяти спектров звезды  $\varphi$  Tau, полученным в разные ночи в октябре-ноябре 2018 г. с широкой щелью (2 угл. сек.), среднеквадратическое отклонение лучевой скорости звезды составляет  $\pm 0.5$  км/с. В красной области спектра это соответствует  $\sim 1/20$  ширины входной щели. При использовании более узкой входной щели (1 угл. сек.) среднеквадратическое отклонение в два раза меньше. Более точные измерения лучевой скорости требуют применения йодной ячейки (Perdelwitz, Huke, 2018).

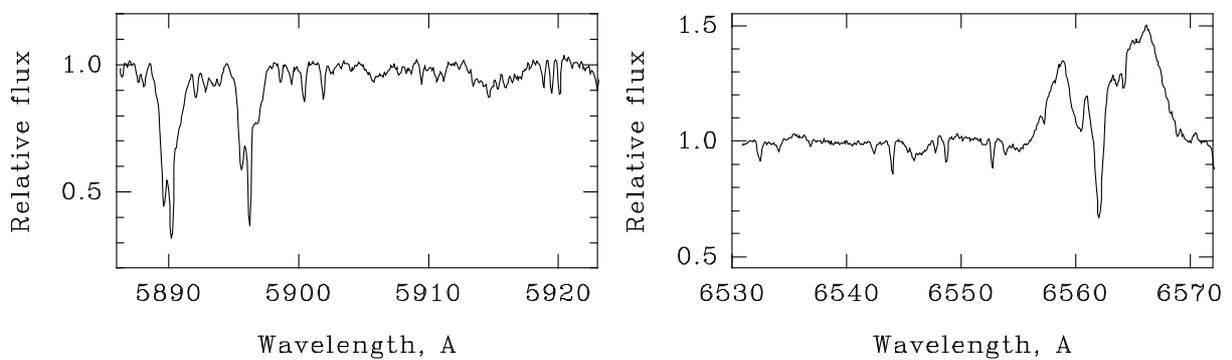
Эффективность спектрографа можно оценить по отношению сигнал/шум (S/N) в спектрах звезд в зависимости от яркости звезды и продолжительности экспозиции. Для иллюстрации на рис. 11 приведены фрагменты спектров RY Tau, полученных 11/12 октября 2018 г., когда качество изображения было около 1 угл. сек. Это звезда спектрального типа G2 IV, ее яркость на момент наших наблюдений, по данным AAVSO,  $V = 9^m.40$ . Спектры были получены с входной щелью 2 угл. сек., то есть потери света на входной щели были пренебрежимо малы. Звезда наблюдалась при зенитном расстоянии  $\approx 20^\circ$ . Несколько последовательных 30-минутных экспозиций звезды позволяют оценить отношение сигнал/шум. Для анализа мы выбрали спектральный порядок в красной области.



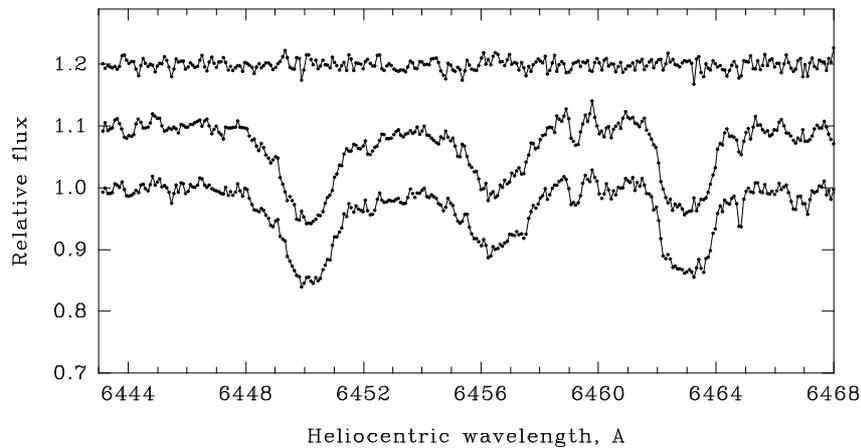
**Рис. 8.** Фотометрические разрезы спектральных порядков (поперек дисперсии, в центре порядка) звезд одинаковой звездной величины  $V$ , но разных спектральных классов: сплошная линия – звезда O7 V, пунктирная линия – звезда K0 V



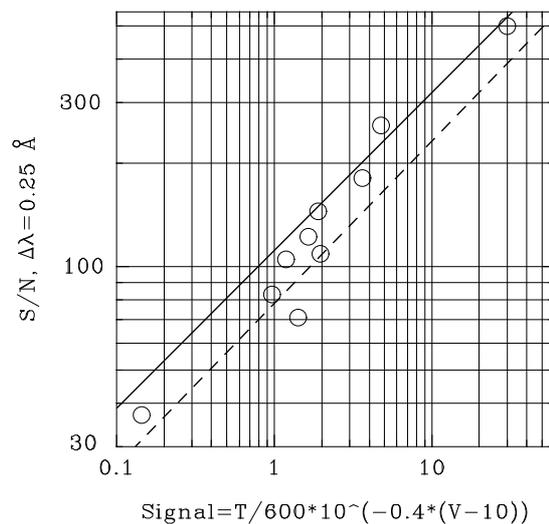
**Рис. 9.** Фрагменты спектра звезды  $\eta$  Boo, G0 IV (спектральные порядки 81 и 73), полученные с входной щелью 1 угл. сек. Спектральное разрешение  $R = 48000$



**Рис. 10.** Фрагменты спектра звезды SU Aur, G2 IVe (спектральные порядки 81 и 73), полученные с входной щелью 2 угл. сек. Спектральное разрешение  $R = 24000$



**Рис. 11.** Участок спектра звезды RY Тау ( $V = 9^m.4$ ). Нижние кривые – две 30-минутные экспозиции, полученные в ночь с хорошим качеством изображения. Верхняя кривая – шумовая дорожка, полученная при делении одного спектра на другой. Спектры сдвинуты по шкале интенсивности



**Рис. 12.** Отношение сигнал/шум на элемент спектрального разрешения ( $R = 24000$ ) в зависимости от экспозиции  $T$  (сек) и звездной величины  $V$ . Сигнал = 1 соответствует 10-минутной экспозиции звезды  $V = 10^m$

После стандартной обработки изображения спектры делились один на другой. В результате получалась шумовая дорожка, где шумы в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем на каждом из спектров. В данных экспозициях применялось бинирование по 4 пиксела. На рис. 11 каждая точка – это один бин. На элемент спектрального разрешения ( $\sim 0.27 \text{ \AA}$ ) приходится  $\approx 3.3$  бина. В шумовой дорожке, полученной при делении одного спектра на другой, отношение сигнал/шум  $S/N \approx 110$  на один бин, что соответствует  $S/N = 110 \times \sqrt{2} \times \sqrt{3.3} \approx 282$  на элемент спектрального разрешения в каждом из спектров.

На рис. 12 приведена диаграмма, позволяющая определить ожидаемое отношение  $S/N$  на элемент разрешения в красной области спектра в зависимости от яркости звезды (с учетом воздушной массы) и продолжительности экспозиции, при входной щели 2 угл. сек. Кружки – данные, полу-

ченные по спектрам звезд от  $5^m$  до  $10^m$ . Сплошной линией показано соотношение при отсутствии потерь света на входной щели. Пунктирной линией показано то же соотношение при 50 % потерях света. Наклон линий соответствует зависимости, определяемой статистикой квантов:  $S/N \sim \sqrt{N}$ . Данные получены для звезд спектральных классов G–K.

## 6 Заключение

Использование спектрографа ЭСПЛ в регулярных наблюдениях звезд в течение нескольких лет показало, что прибор является достаточно эффективным для решения многих астрофизических задач. Результаты исследований, выполненных с помощью этого спектрографа, можно найти, например, в публикациях (Butkovskaya et al., 2017; Butkovskaya et al., 2018; Погодин и др., 2018; Petrov et al., 2019; Butkovskaya, Plachinda, 2018; Козлова и др., 2017; Babina et al., 2016; Potravnov et al., 2017). Разрешающая способность спектрографа не вполне реализуется при типичном для КраО качестве изображений. Эффективность прибора может быть повышена за счет применения более широкоформатного ПЗС.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность С.А. Артеменко за обработку наблюдательного материала, использовавшегося в данной статье.

## Литература

- Васильев А.С., 1976. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 55. С. 224. [Vasil'ev A.S., 1976. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 55, p. 224. (In Russ.)]
- Козлова О.В. и др., 2017. Астрофизика. Т. 60. № 1. С. 41. [Kozlova O.V. et al., 2017. *Astrofizika*, vol. 60, no. 1, p. 41. (In Russ.)]
- Копылов И.М., Стешенко Н.В., 1965. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 33. С. 308. [Kopylov I.M., Steshenko N.V., 1965. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 33, p. 308. (In Russ.)]
- Лагутин А.Ф., 2011. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 107. № 1. С. 183. [Lagutin A.F., 2011. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 107, no. 1, p. 183. (In Russ.)]
- Погодин М.А. и др., 2018. Астрофизика. Т. 61. С. 15. [Pogodin M.A. et al., 2018. *Astrofizika*, vol. 61, p. 15. (In Russ.)]
- Babina E.V. et al., 2016. *Astron. Lett.*, vol. 42, p. 193.
- Butkovskaya V.V. et al., 2017. *Astron. Nachr.*, vol. 338, p. 896.
- Butkovskaya V.V., Plachinda S.I., 2018. *Contr. of the Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, vol. 48, p. 275.
- Butkovskaya V.V. et al., 2018. *Contr. of the Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, vol. 48, p. 273.
- Perdelwitz V., Huke, P., 2018. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 479, p. 768.
- Petrov P.P. et al., 2019. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 483, p. 132.
- Plachinda S.I., 2005. *Astrophysics*, vol. 48, no. 1, p. 9.
- Potravnov I. S. et al., 2017. *Astron. Astrophys.*, vol. 599, p. A60.