

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СПЕКТРОГРАФ ШАО ДЛЯ СПЕКТРОВ С НИЗКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2023 г. Н. З. Исмаилов^{1,*}, С. А. Алышов¹, Ш. К. Исмаилова¹, Ф. С. Гусейнова²

¹Шамахинская астрофизическая обсерватория им. Н. Туси, пос. Ю. Маммадалиева, Шамахи, Азербайджан

²Батабатская астрофизическая обсерватория, Нахичеван, Азербайджан

*E-mail: ismailovnshao@gmail.com

Поступила в редакцию 20.05.2023 г.

После доработки 05.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В работе приводится описание усовершенствованного спектрографа касегреновского фокуса 2 м рефлектора ШАО, оснащенного ПЗС камерой. Классический спектрограф Universal Astro Grid Spectrograph (UAGS) был адаптирован для применения ПЗС камеры Andor для получения спектров объектов со слабым блеском в диапазоне 3600–8000 Å. Спектрограф с дифракционной решеткой 651 шт/мм позволяет получить спектры звезд на 2 м телескопе ШАО до 18 звездной величины с разрешением $R = 1200$ с отношением сигнала к шуму около 50 за полчаса экспозиции. Максимально допустимое разрешение составляет $R = 3400$. Комплекс можно применить для наблюдений различных типов транзиентных объектов, звезд, внегалактических объектов.

Ключевые слова: астрономические инструменты, спектрографы, ПЗС спектроскопия

DOI: 10.31857/S0004629923080054, EDN: HLYOJW

1. ОПИСАНИЕ СПЕКТРОГРАФА

Как известно, с началом применения ПЗС матриц в спектральных наблюдениях, учитывая компактные размеры светоприемника, во многих обсерваториях классические спектрографы были заменены эшелле спектрографами. При проектировании эшелле спектрографа в ШАО [1] основной целью было получение спектров с высоким разрешением. На 2 м телескопе такой спектрограф позволяет получить спектры только относительно ярких объектов. Для выполнения научных работ часто необходимо получение спектров слабых по блеску источников излучения. Выполнение спектроскопии слабых звезд и галактик на телескопах умеренного и среднего размера, с апертурой 1–2 м, всегда является актуальной наблюдательной задачей (см., напр., [2, 3]).

Для решения этой наблюдательной задачи в ШАО нами использован имеющийся в комплекте 2 м телескопа классический спектрограф UAGS (Karl Zeiss), раньше применявшийся для фотографической спектрофотометрии (см., напр., [4, 5]). Спектрограф был обновлен так, чтобы его можно было использовать для современных ПЗС светоприемников. Для адаптации ПЗС к спектрографу в камере спектрографа применялся светосильный объектив Canon EF ($f = 200$ mm, $f/2$). Остальные штатные части спектрографа были сохранены и адаптированы к данной камере. Об-

щий вид и оптическая схема спектрографа приводятся на рис. 1.

В качестве светоприемника применялась ПЗС камера Andor (ikonL-936-BEX2-DD), (матрица 2048×2048, размер пикселя 13.5 мкм). Спектрограф оснащен различными классическими дифракционными решетками, которые позволяют получить спектры в различных диапазонах с разным разрешением. Фокусное расстояние коллиматора $f_{\text{coll}} = 1100$ мм, камеры $f_{\text{cam}} = 200$ мм, углы падения α и дифракции β , соответственно, равны 27.5° и 20.5°. Тогда ширина монохроматического изображения щели на фокальной плоскости S' определится соотношением

$$S' = S \frac{f_{\text{cam}} \cos \alpha}{f_{\text{coll}} \cos \beta}.$$

Здесь S – ширина входной щели. Зная вышеуказанные параметры, в качестве рабочей формулы для входной ширины щели S можно получить следующее выражение:

$$S = 5.275S'.$$

Элемент разрешения приемника в фокальной плоскости равен размеру двух пикселей, поэтому для binning 1 × 1 максимальная ширина монохроматического изображения равна $S' = 2px = 0.027$ мм, и, соответственно, для ширины входной щели получим $S = 0.14$ мм. Эквивалентное

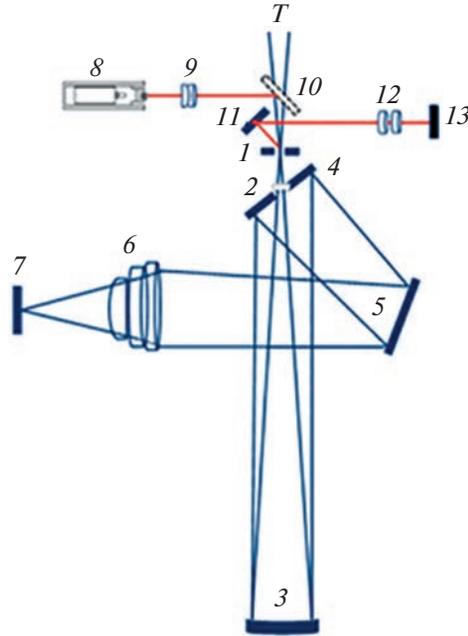
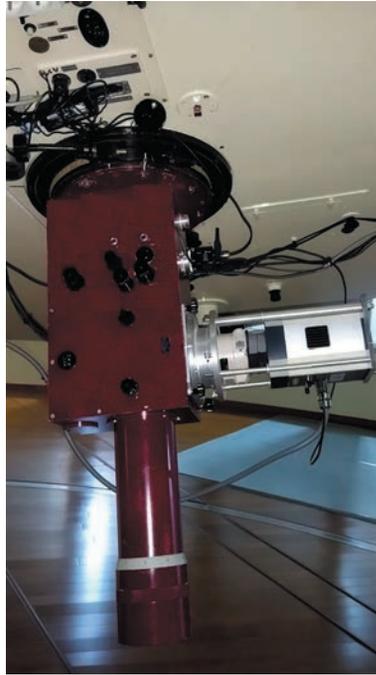


Рис. 1. Общий вид и оптическая схема спектрографа. Числами обозначены: 1 – входная щель, плоское зеркало 4 с отверстием 2, 3 – коллиматор, 5 – дифракционная решетка, 6 – камера Canon, 7 – окно ПЗС матрицы, 8 – лампа освещения щели, 9 – набор направляющих линз, 10, 11 – откидывающие зеркала, 12 – направляющие линзы для подмотки щели, 13 – монитор для слежения щели.

фокусное расстояние фокуса Кассегрена 2 м телескопа равно $F = 29\,500$ мм, масштаб в фокальной плоскости составляет $\mu = 6.99''/\text{мм}$. Тогда для угловой ширины входной щели получим значение $0.99''$, а при использовании режима объединения пикселей $2 \times 2 - 1.99''$. С целью одновременного получения спектра близлежащего фона и объекта высота щели устанавливалась около $10''$.

Применялась дифракционная решетка с 651 штр/мм, которая при угле блеска 20.5° в первом порядке дает спектр с линейной обратной дисперсией около $144 \text{ \AA}/\text{мм}$ в диапазоне λ 3600–8000 \AA . Это наиболее оптимальный вариант комбинации параметров для выполнения спектральных наблюдений объектов со слабым блеском. В табл. 1 приведены следующие параметры: размер входной щели S (мм); размер монохроматического изображения щели S' (мм) для данного

binning; обратная линейная дисперсия в пикселях d ($\text{ \AA}/\text{px}$); обратная линейная дисперсия D ($\text{ \AA}/\text{мм}$); соответствующее спектральное разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda$ в области линии $H\alpha$ для данной комбинации параметров. Из табл. 1 видно, что наилучшее разрешение можно получить при комбинации binning 1×1 с обратной линейной дисперсией $d = 1.9 \text{ \AA}/\text{px}$. Другими словами, в области линии $H\alpha$ (λ 6562.816 \AA) в таком режиме мы получим умеренное спектральное разрешение, около $R = 3400$. С таким разрешением спектр звезды $V = 12$ mag величины можно получить за 15 мин с соотношением сигнала к шуму около 50.

2. НАБЛЮДЕНИЕ И ОБРАБОТКА

2.1. Первичная обработка наблюдательного материала

Нами получено множество спектрограмм стандартных звезд, а также спектры звезд типа Г Тельца и AeVe Хербига и др. Кроме того, на этом комплексе были получены спектры различных транзиентных объектов по программе Gaia (см., напр., [6, 7]). Во время наблюдений нужно получить по 3 спектра исследуемой звезды и стандартных звезд, а далее усреднить их. Были сняты вспомогательные кадры flat, bias, dark, а также спектр сравнения лампы ThAr для калибровки по длинам волн. Программа управления ПЗС ка-

Таблица 1. Некоторые параметры спектрографа

Binning	S (mm)	S' (mm)	d ($\text{ \AA}/\text{px}$)	D ($\text{ \AA}/\text{мм}$)	R ($H\alpha$)
1×1	0.142	0.027	1.94	144	3400
2×2	0.285	0.054	3.89	288	1700
3×3	0.427	0.081	5.60	415	1170
4×4	0.570	0.108	7.56	560	870

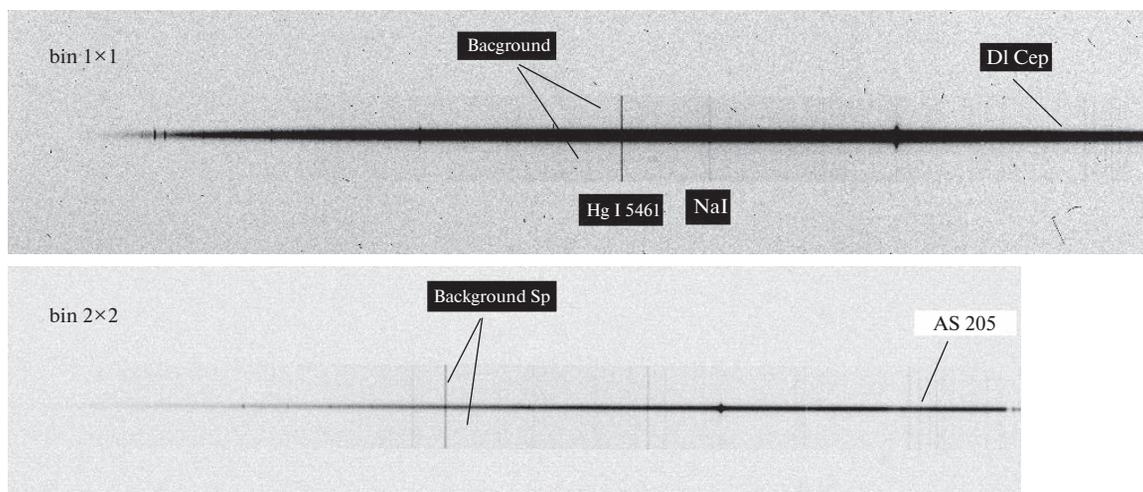


Рис. 2. Позитивные fits изображения спектров классических звезд типа Т Тельца DI Cep (binning 1×1) и AS 205 (binning 2×2). Отмечено положение линий Hg I и Na I от спектра фона.

мерой Andor Solis 4.31 позволяет в ходе наблюдений менять различные параметры, такие как режим объединения пикселей (binning), время экспозиции, режим работы и т.д. Полученные спектры далее обрабатывались с помощью программы DECH20 и ее модификаций (Galazutdinov G., <http://www.gazinur.com/DECH-software.html>).

Процедура первичной обработки спектрального материала состоит в следующем: медианное усреднение кадров dark, bias, flat, усреднение полученных трех изображений спектров программного объекта и спектров звезд-стандартов. При процессе усреднения программой одновременно устраняются следы частиц космических лучей, которые при больших экспозициях вносят немало искажений в спектр. Затем выполняется вычитание кадров dark и bias из кадров со спектрами наблюдаемых объектов, построение маски, определяющей положение спектра, его извлечение с помощью этой маски, т.е. получение файла в векторном формате *.200. Такая же процедура была выполнена для спектра плоского поля flat и калибровочной лампы ThAg, которая нужна для калибровки по длине волны. Если по каким-то причинам в ходе наблюдений получено не 3, а 2 спектра программной звезды, процедура извлечения ведется без усреднения, и лишь после того, как завершится извлечение файла и перевод в формат *.200, проводилось усреднение полученных спектров. При таком усреднении программа также очищает неповторяющиеся детали в спектре, которые в основном возникают от космических лучей.

2.2. Очищение спектров от фоновой засветки и рассеяния света спектрографа

Поскольку в последние годы наблюдается значительное световое загрязнение фона атмосферы в зоне расположения ШАО, то в спектрограммах, полученных с достаточно длительными экспозициями, наблюдаются детали этого загрязнения в виде эмиссионных линий от ртутных и других ламп и слабого континуума. К этому искажению также добавляется рассеяние света внутри спектрографа, которое сложным образом распределено по наблюдаемому диапазону длин волн и накладывается на спектр объекта наблюдений. Учет влияния спектра неба выполнен по участкам, не засвеченным светом наблюдаемой звезды, благодаря достаточной высоте щели (до 10 угловых секунд). В результате на одном изображении мы получаем спектр объекта и спектр фона снизу и сверху спектра объекта.

На рис. 2 показан пример инвертированных (негативных) fits изображений полученного спектра классических звезд типа Т Тельца DI Cep (binning 1×1) и AS 205 (binning 2×2), где выделяются спектр звезды по центру и широкий спектр фона по краям. По спектрам объектов хорошо видна яркая линия от ртутных ламп $\lambda 5461 \text{ \AA}$.

При извлечении такого fits изображения, помимо основного спектра объекта, также строится маска и для верхнего и нижнего фона с каждой стороны. По полученным отдельным маскам фона и спектра можно получить отдельные спектры фона и объекта в векторном формате *. 200.

Из полученного спектра вычитывается усредненный спектр фона, что позволяет очистить фоновое загрязнение и рассеяние света в спектрографе. На рис. 3 приводится пример получен-

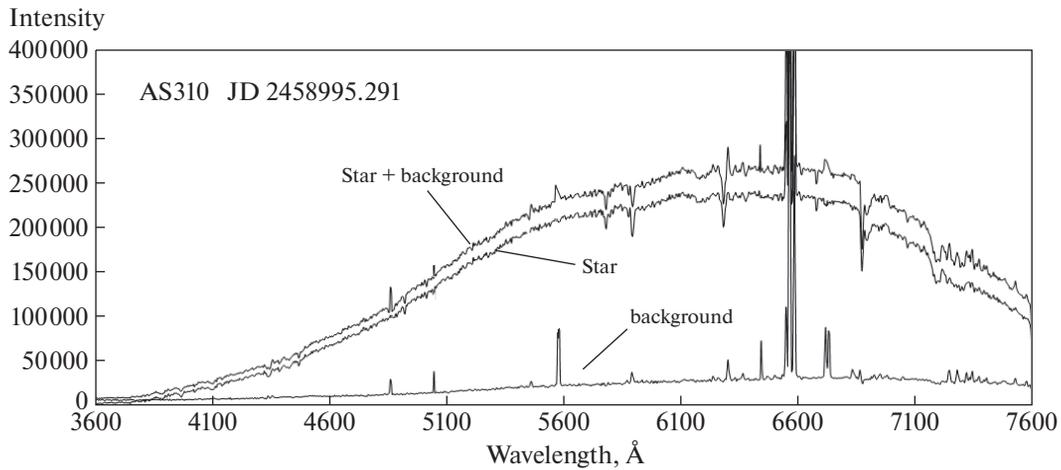


Рис. 3. Спектры при наблюдении звезды AS 310: (Star+background) звезды с фоном, (background) фона, (Star) звезды после очищения от паразитного фона.

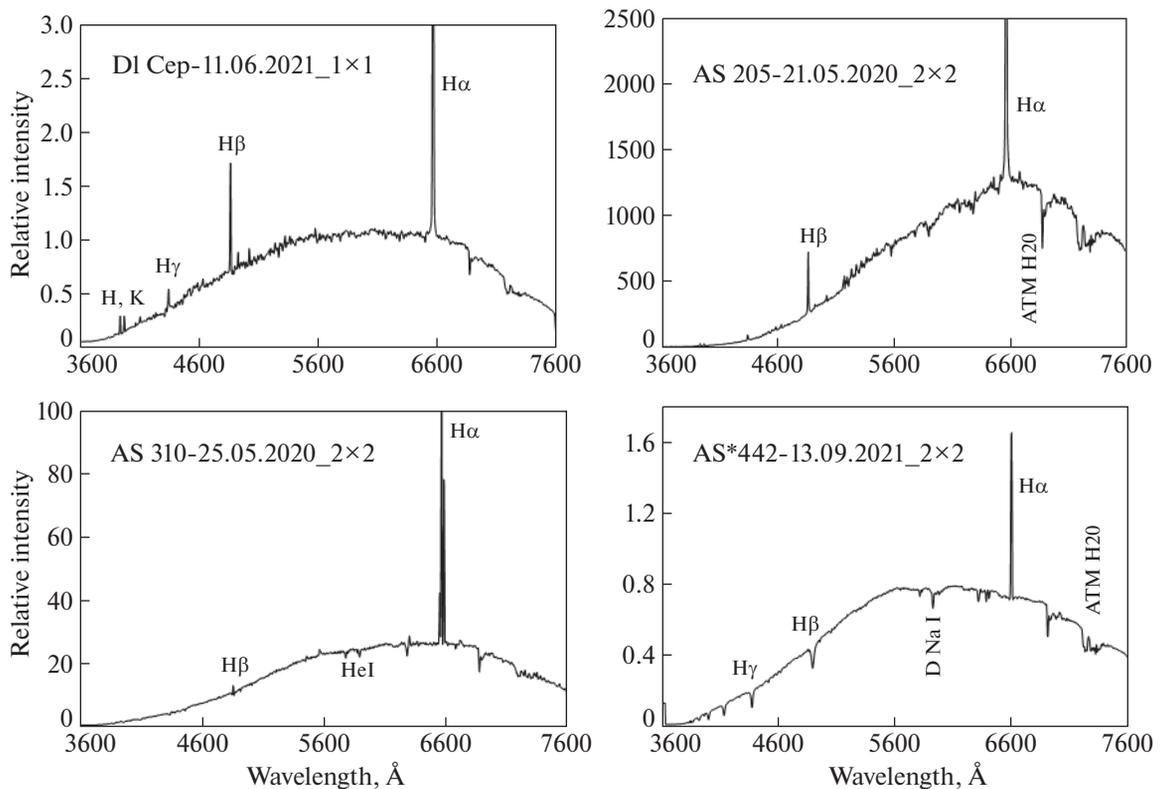


Рис. 4. Спектрограммы звезд типа Т Тельца DI Cep, AS 205 и звезд AeBe Хербига AS 310 и AS 442. Текстовые поля содержат названия объектов, даты получения спектра и binning.

ного *. 200 файла звезда+фон, фон и очищенный спектр у звезды типа Ве Хербига AS 310. Эта процедура позволяет практически полностью избавиться от фонового излучения и излучения рассеянного света спектрографа.

На рис. 4 показаны примеры полученных спектрограмм двух звезд типа Т Тельца DI Cep и AS205, и двух звезд типа AeBe Хербига AS310 и AS 442. По спектру отмечены наиболее интенсивные линии. На рис. 5 приводятся участки спектров

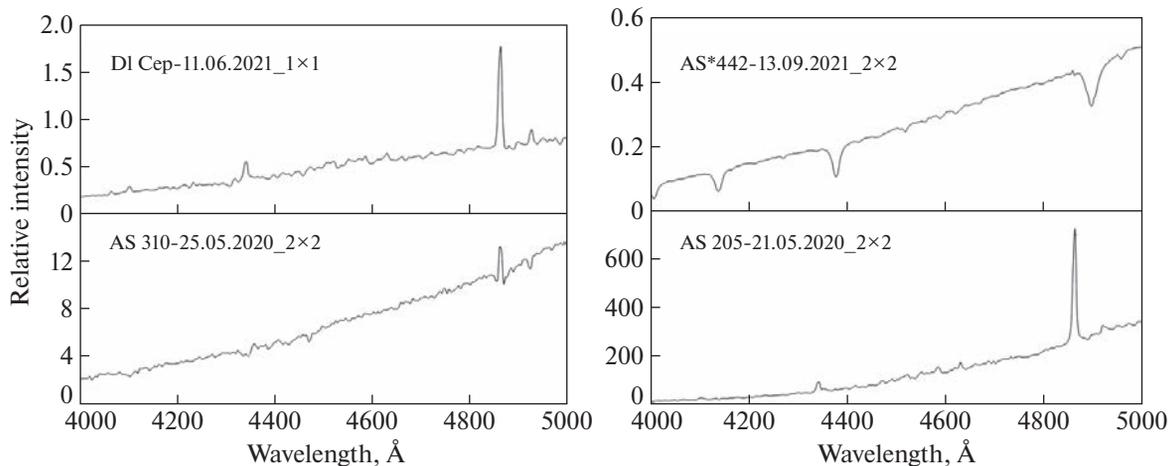


Рис. 5. Участок (λ 4000–5000 Å) спектров звезд из рис. 4.

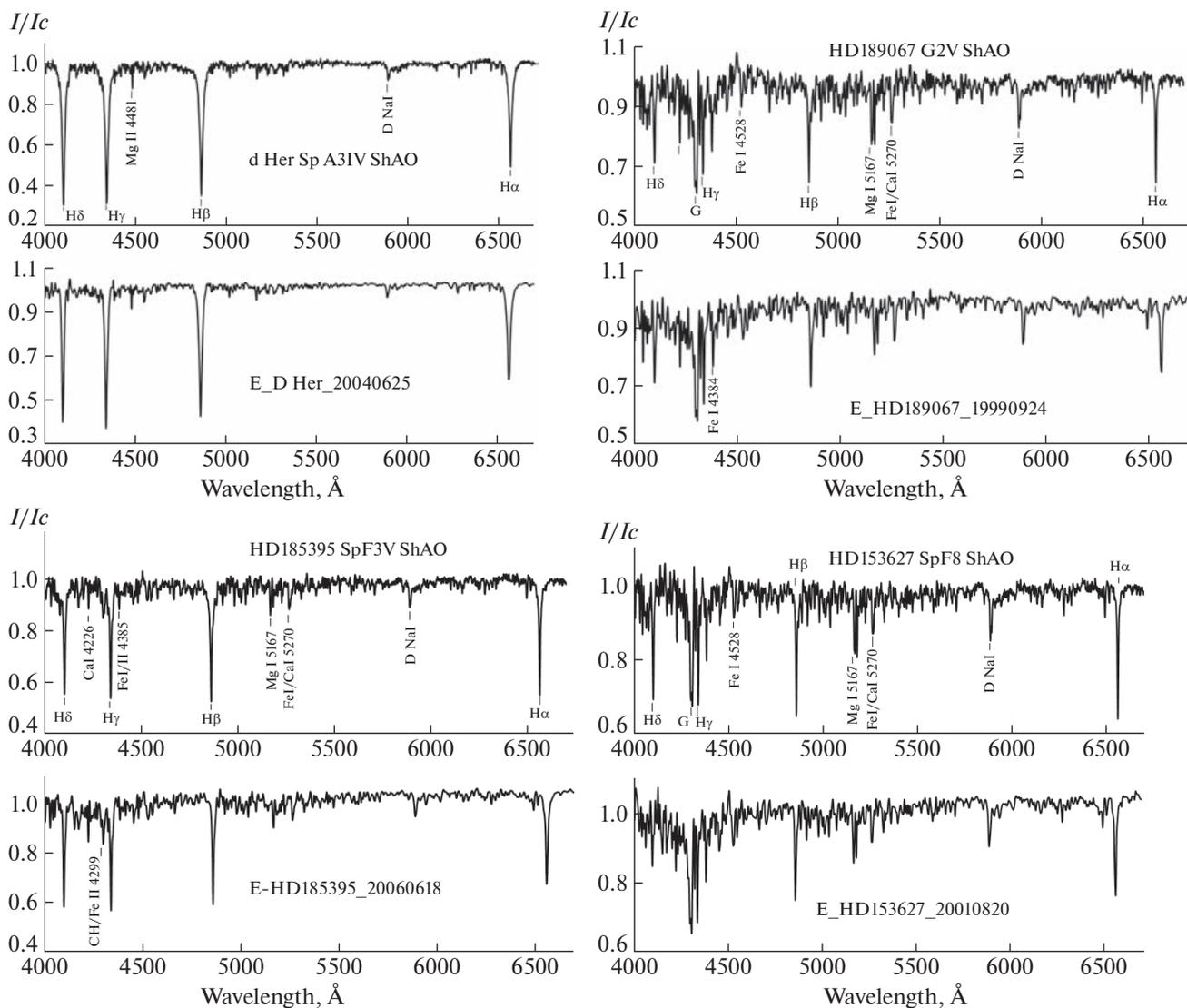


Рис. 6. Примеры сравнений нормированных участков λ 4000–6700 Å для спектров разных звезд, приведенных из каталога ELODIE [8] и полученные на нашем спектрографе. Спектры в ШАО получены со спектрографом UAGS при binning 1 × 1.

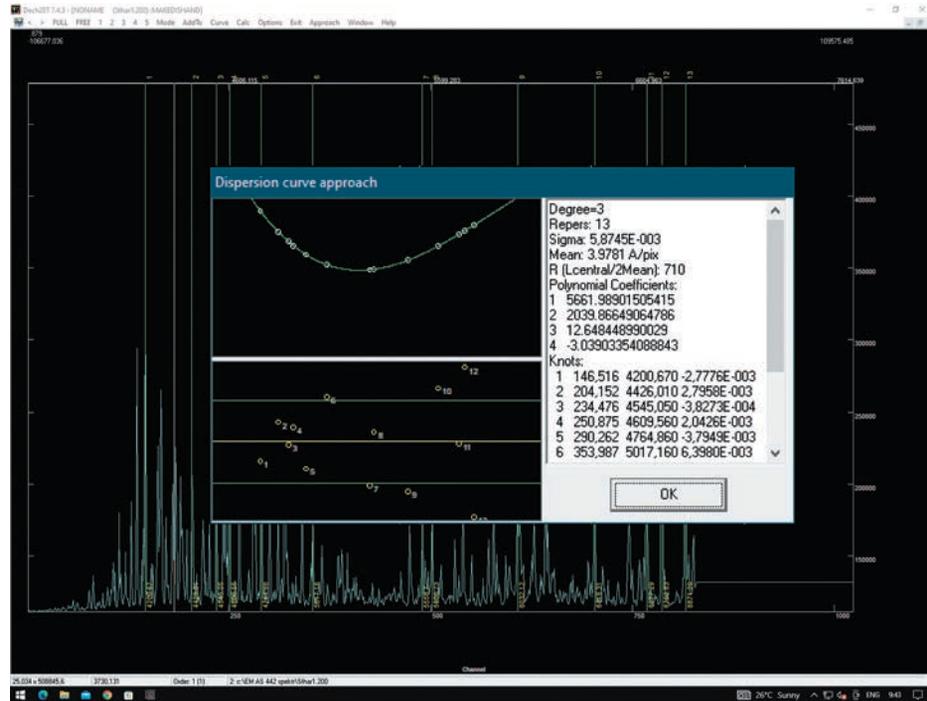


Рис. 7. Пример построенной кривой дисперсии по спектру лампы ThAr в окно программы DECH20.

этих звезд в области $\lambda 4000\text{--}5000 \text{ \AA}$. Как видно по спектру, можно измерить параметры отдельных деталей по спектрам.

2.3. Калибровка по длинам волн

Для калибровки по длинам волн использованы спектры лампы ThAr, а также спектры стандартных звезд с известными лучевыми скоростями. При калибровке по спектру стандартной звезды реперы устанавливались с учетом ее лучевой скорости и барицентрической скорости Земли.

Для оценки инструментального профиля спектрографа UAGS мы измерили полуширины наиболее чистых спектральных линий из спектра калибровочной лампы ThAr. Из отобранных около 10 линий для полуширины получено значение $2.20 \pm 0.18 \text{ px}$. При binning 1×1 такой инструментальный контур составляет $\delta\lambda = 4.27 \pm 0.34 \text{ \AA}$.

На рис. 6 для сравнения приводятся участки спектров ($\lambda 4000\text{--}6700 \text{ \AA}$) разных звезд, полученные на нашем спектрографе, а также спектры тех же звезд, полученные на 1.93 м телескопе обсерватории Haute Provence (архив ELODIE <http://atlas.obs-hp.fr/elodie/> [8]). Спектры этого архива можно свернуть с инструментальным профилем, который равен инструментальному профилю нашего спектрографа. Сравнение показало, что наши спектры демонстрируют хорошее согласие со сравниваемыми спектрами.

На рис. 7 показан пример кривой дисперсии, построенный в программе DECH20 по спектру лампы ThAr при аппроксимации полиномом 3-й степени. Среднеквадратичное отклонение позиций точек у линий реперов от полиномиальной кривой составляет $\pm 0.008 \text{ мм}$ ($\pm 1.115 \text{ \AA}$). При этом ошибки определения лучевых скоростей по отдельным линиям составляют $\pm 3\text{--}10 \text{ км/с}$.

2.4. Измерение некоторых спектрофотометрических параметров

Программа DECH позволяет провести континуум и выполнить нормировку спектра. После этой процедуры задается длина волны участка и производится нужное измерение спектрофотометрических параметров отдельных спектральных линий. Программа также позволяет вывести данные спектра в цифровом виде (ASCII), как длина волны-интенсивность, а также есть возможность сохранения отдельных участков спектра в виде файла в формате BMP.

Эквивалентные ширины наиболее сильных линий водорода у звезд спектрального класса A0–A6 можно определить со средней ошибкой $\pm 0.5\text{--}1.0 \text{ \AA}$. На рис. 8 демонстрируется пример результатов измерений эквивалентных ширин EW водородных линий $H_\alpha\text{--}H_8$ серии Бальмера по результатам 6 ночей наблюдений августа 2022 г. у звезды-стандарта 56 Cyg со спектром A6V. Среднеквадратичное отклонение от средне-

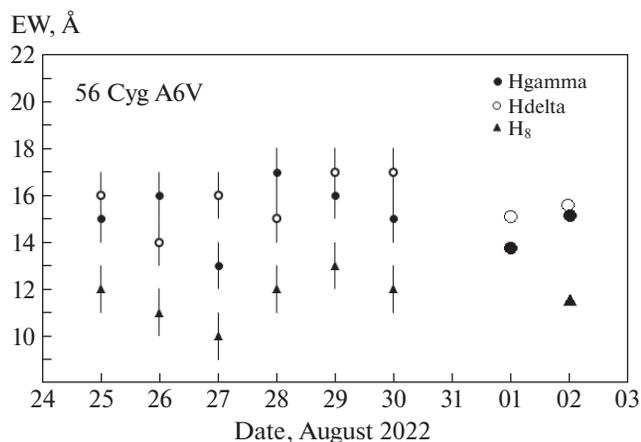


Рис. 8. Результат измерений эквивалентных ширин бальмеровских линий $H\gamma$, $H\delta$ и $H\epsilon$ по 6 ночам наблюдений у спектра стандартной звезды 56 Cyg. Вертикальными барами показан уровень средней ошибки измерений. Справа крупными по размеру отдельными символами приведены результаты, взятые из работ [9] и [10] звезд со спектрами A6V.

го EW не превышает 10%. Для сравнения, на рис. 8 справа крупными по размеру символами приведены результаты, взятые из работ [9] и [10] для стандартной звезды спектром A6V. Как видно, по отдельным шести ночам наблюдений спектра 56 Cyg наши результаты измерения линий $H\gamma$, $H\delta$ и $H\epsilon$ удовлетворительно согласуются с данными [9, 10].

2.5. Выражение спектра в абсолютных потоках

Поскольку весь спектр объекта получается на одном порядке в классической линейной форме, трансформация такого спектра в абсолютные потоки не составляет трудности. Для выражения спектра в абсолютных единицах нужно учитывать кривую реакции аппаратуры (DQE). Для получения инструментального искажения к данному спектру нужно получить спектр стандартной звезды с известным распределением спектра в абсолютных потоках. На рис. 9 для примера приводятся полученный инструментальный спектр стандартной звезды HR 0655 спектрального класса A0V и кривая реакции DQE аппаратуры в этом диапазоне. Когда известна кривая реакции аппаратуры, для трансформации спектра в абсолютные потоки нужно инструментальный спектр разделить на кривую реакции и учитывать спектральное поглощение из-за воздушной массы. Если при получении спектра исследуемого объекта одновременно получить спектр звезды с известным спектральным распределением в абсолютных потоках, которая расположена достаточно близко к звезде, то задача трансформации в абсолютный поток значительно упрощается.

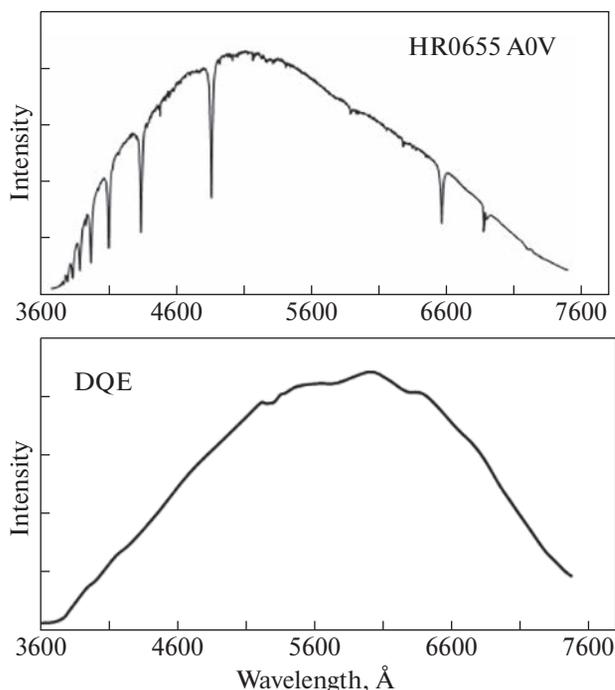


Рис. 9. Пример инструментального спектра стандартной звезды HR 0655 спектром A0V (верхняя панель) и аппаратная кривая DQE для данной области спектра.

На рис. 10 показаны примеры спектров разных транзиентных объектов, выраженных в абсолютных потоках. Предварительные результаты исследований этих звезд нами были опубликованы в сообщениях [6, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено описание модифицированного классического спектрографа UAGS в сочетании с ПЗС камерой Andor. Прибор позволяет получить спектры объектов с блеском до 18 величины с разрешением $R = 1200$ в спектральном диапазоне λ 3600–8000 Å за 60 мин экспозиции с отношением сигнала к шуму 20. Наилучшее разрешение в этой системе составляет $R = 3400$; при параметрах binning 1×1 и $R = 3400$ и при соотношении сигнала к шуму около 100 проникающая способность спектрографа на 2 м рефлекторе ШАО составляет около 15 величины при экспозиции 30 мин. Описана методика очищения паразитного излучения на спектре программного объекта. Выполнена оценка инструментального контура спектрографа и сравнены профили разных звезд, приведенные в литературе и полученные в ШАО.

Приводится методика получения спектра в абсолютных потоках, что важно при исследовании спектров галактик, квазаров, сверхновых звезд и

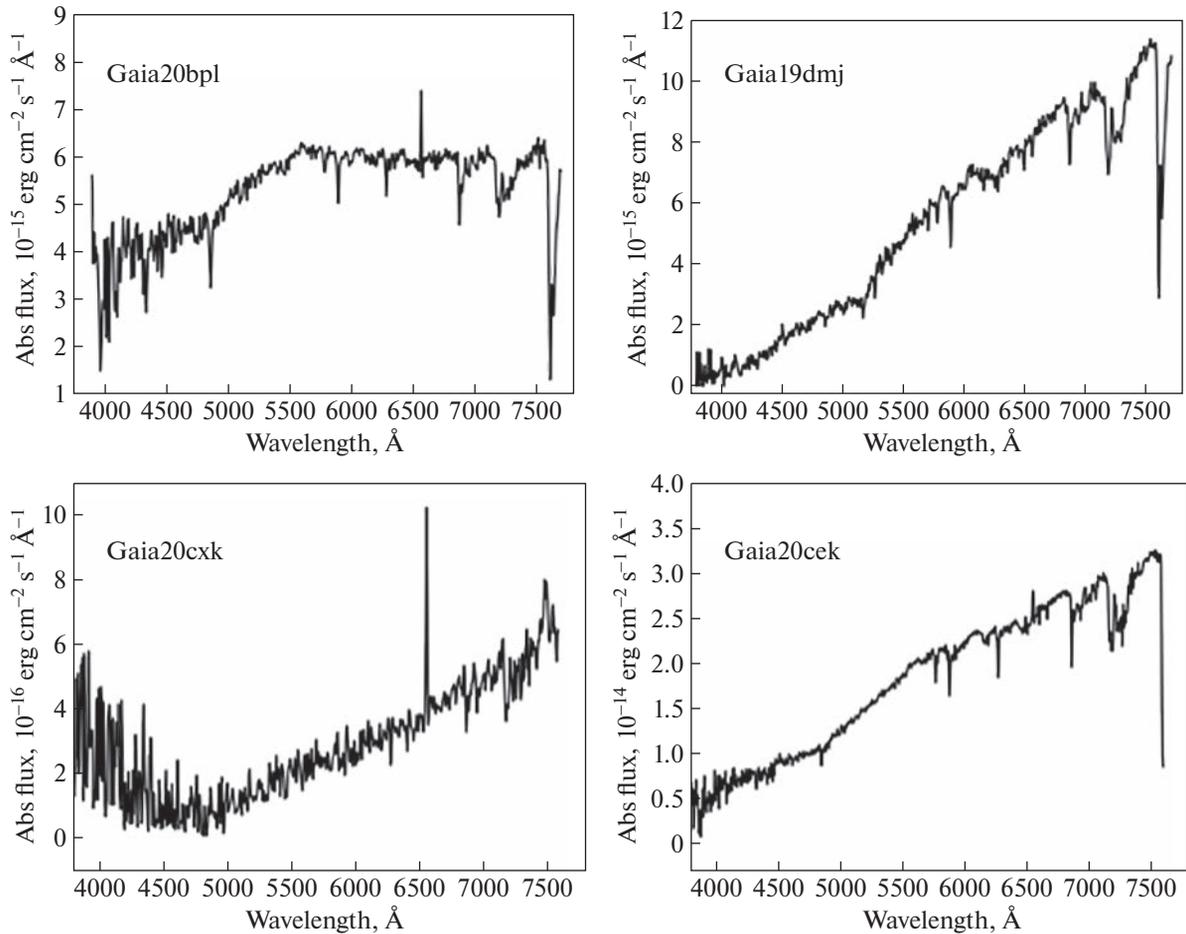


Рис. 10. Спектры разных транзиентных объектов Gaia, выраженные в абсолютных потоках.

других транзиентных объектов. Приведены примеры спектров некоторых эмиссионных звезд, выраженные в абсолютных потоках. По спектрам стандартных звезд показаны величины ошибок измерений эквивалентных ширин и лучевых скоростей. Спектрограф успешно может быть применен как для выполнения текущих плановых научных работ, так и при выполнении различных международных коопераций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят инженеров технического состава 2 м телескопа А. Исмаилову, М. Шукюрову и И. Алекперову за помощь при выполнении технических задач по совершенствованию спектрографа. Авторы также благодарят анонимного рецензента за весьма ценные замечания и советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kh. M. Mikailov, F. A. Musaev, I. A. Alekberov, B. N. Rustamov, O. V. Khalilov*. Kinematics and Physics of Celestial Bodies **36**, 1, 22 (2020).
2. *V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, V. R. Amirkhanyan, A. V. Moiseev*, Astrophysical Bulletin **71**, 4, 479 (2016).
3. *M. A. Nalivkin, I. S. Savanov, S. A. Naroenkov, V. E. Shmagin*, INASAN Science Reports **3**, 72 (2019).
4. *И. А. Асланов, Г. Ф. Султанов*, Циркуляр ШАО № 2, 3 (1970).
5. *И. П. Салманов*, Циркуляр ШАО № 44, 7 (1975).
6. *I. Gezer, N. Z. Ismailov, Kh. M. Mikailov, O. V. Khalilov, I. A. Alekberov, S. Bagirli, S. A. Alishov, P. Zielinski, L. Wyrzykowski, M. Lam, K. Kruszynska, K. A. Rybicki, N. Ihanec, J. Zdanavicius, M. Maskoliunas, E. Pakstiene*, The Astronomer's Telegram 13992 (2020).
7. *P. Zielinski, L. Wyrzykowski, M. Lam, I. Gezer, K. Kruszynska, K. A. Rybicki, N. Ihanec, J. Zdanavicius, M. Maskoliunas, E. Pakstiene, N. Z. Ismailov, Kh. M. Mikailov, O. V. Khalilov, I. A. Alekberov, S. Bagirli, S. A. Alishov*, The Astronomer's Telegram 13907 (2020).
8. *J. Moultaqa, S. A. Ilovaisky, P. Prugniel, C. Soubiran*, Publ. Astron. Soc. Pacif. **116**, 693 (2004).
9. *K. Cananzi, R. Augarde, J. Legueux*. Astron. and Astrophys. Supple Ser. **101**, 599 (1993).
10. *R. M. Gonzalez Delgado, C. Leitherer*, Astrophys. J. Suppl. Ser. **125**, 479 (1999).

MODIFIED SHAO SPECTROGRAPH FOR SPECTRA WITH LOW RESOLUTION

N. Z. Ismailov^a, S. A. Alyshov^a, Sh. K. Ismailova^a, and F. S. Huseynova^b

^a*Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi, Yu. Mammadaliyev settlement, Shamakhy, Azerbaijan*

^b*Batabat Astrophysical Observatory, Nakhichevan, Azerbaijan*

The paper describes an improved spectrograph of the Cassegrain focus of the 2 m ShAO reflector using a CCD camera. The classic Universal Astro Grid Spectrograph (UAGS) was adapted to use the Andor CCD camera to obtain spectra of objects with low brightness in the range of 3600–8000 Å. A spectrograph with a diffraction grating of 651 line/mm makes it possible to obtain the spectra of stars on the 2 m ShAO telescope up to 18 mag with a resolution of 1200, with a signal-to-noise ratio of about 50 for half an hour of exposure. The maximum allowable resolution is $R = 3400$ with binning 1×1 . The complex can be used for observations of various types of transient objects, variable stars, and extragalactic objects.

Keywords: astronomical instruments, spectrographs, CCD spectroscopy