

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.3+520.4+520.8

### СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2022 г. А. В. Панчук<sup>a,b</sup>, К. Г. Якопов<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
Россия, 369167, Карачаево-Черкесская республика, п. Нижний Архыз

<sup>b</sup> Северо-Кавказский федеральный университет  
Россия, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

<sup>c</sup> Национальный исследовательский университет “Московский институт электронной техники”  
Россия, 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, 1

\*e-mail: yakorov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 17.06.2022 г.

Принята к публикации 08.07.2022 г.

Разработан дифракционный спектрограф высокого разрешения, предназначенный для круглосуточного мониторинга атмосферы Земли в оптическом диапазоне. Для регистрации прямого солнечного излучения спектрограф оснащен устройством сопровождения и оптическим волокном. Спектрограф используется для определения содержания водяного пара по отдельным линиям полос в красной и близкой инфракрасной областях спектра.

DOI: 10.31857/S0032816222060167

#### ВВЕДЕНИЕ

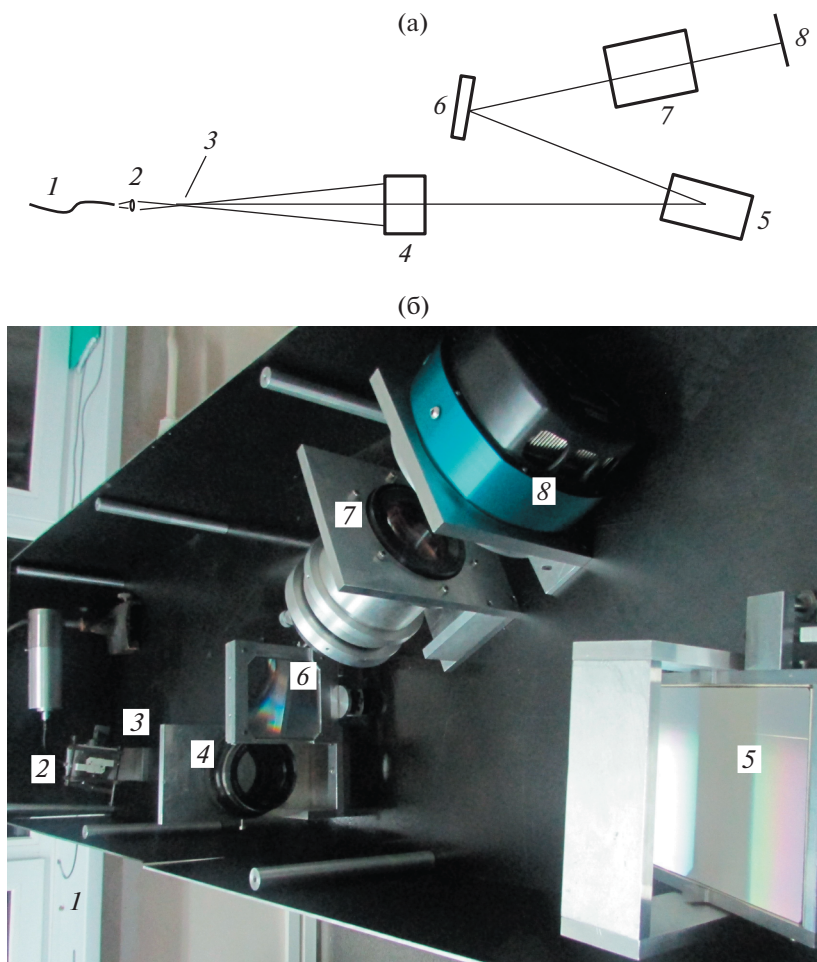
В процессе спектроскопических и фотометрических наблюдений, выполняемых на астрономических обсерваториях, накапливается информация о состоянии ночной атмосферы. Эта информация может быть использована как в астрофизических задачах, так и в проектах изучения ионосферы и тропосферы [1]. Спектры дневной атмосферы регистрируются только при наблюдениях фотосферы Солнца, т.е. далеко не на всех астрофизических обсерваториях. Для места установки 6-метрового телескопа БТА (Большой телескоп азимутальный) возможность спектроскопического мониторинга дневной атмосферы пока отсутствует. Поэтому было решено построить спектрограф, регистрирующий абсорбционные спектры дневной атмосферы со спектральным разрешением  $R = \lambda/\delta\lambda$  (здесь  $\delta\lambda$  – ширина аппаратной функции спектрографа), сопоставимой с характеристиками приборов NES [2] ( $R = 60000$ ) и MSS [3] ( $R = 14000$ ), работающих на БТА ночью.

#### КОНСТРУКЦИЯ СПЕКТРОГРАФА

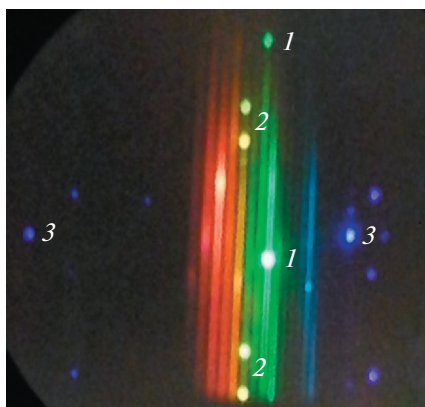
Оптимальным способом согласования высокого спектрального разрешения  $R$ , длины одновременно регистрируемого диапазона длин волн  $\lambda$  и формата светоприемника (матрицы ПЗС) является схема спектрографа скрещенной дисперсии, работающего в высоких порядках ди-

фракции. Для пространственного разделения высоких порядков, распространяющихся от дифракционной решетки под близкими углами, используется дополнительный диспергирующий элемент, плоскость дисперсии которого ортогональна плоскости дисперсии основной дифракционной решетки. Таким элементом, имеющим пониженную угловую дисперсию относительно основной дифракционной решетки, является призма или дифракционная решетка, работающая в первом порядке дифракции. Особенности конструирования схемы скрещенной дисперсии можно найти в работе [4]. На рис. 1а приведена схема спектрографа скрещенной дисперсии (так называемого эшелле-спектрографа), по которой построена стационарная часть нашего прибора для мониторинга абсорбционных спектров дневной атмосферы. На рис. 1б дано изображение основных элементов стационарной части, смонтированных на макете.

В качестве коллиматора используется покупной линзовый объектив О-2 производства ЛОМО (фокусное расстояние  $F_{coll} = 600$  мм, диаметр  $D_{coll} = 60$  мм, относительное отверстие 1:10). В качестве основного диспергирующего элемента используется дифракционная решетка эшелле с углом блеска  $\Theta_b = 63.5^\circ$ , плотностью 75 штрихов/мм и размером заштрихованной области  $120 \times 170$  мм. В качестве элемента, разводящего порядки эшелле-спектра, используется дифракционная решетка (300 штрихов/мм) с концентрацией энергии в



**Рис. 1.** Принципиальная схема (а) и макет (б) стационарной части спектрографа (масштабы и пропорции не соблюдены). 1 – оптоволокно; 2 – согласующая оптика; 3 – узел щели (в положении промежуточного изображения); 4 – линзовый коллиматор; 5 – эшелле (штрихи параллельны плоскости рисунка); 6 – решетка скрещенной дисперсии (штрихи перпендикулярны плоскости рисунка); 7 – линзовая камера; 8 – плоскость светоприемника.



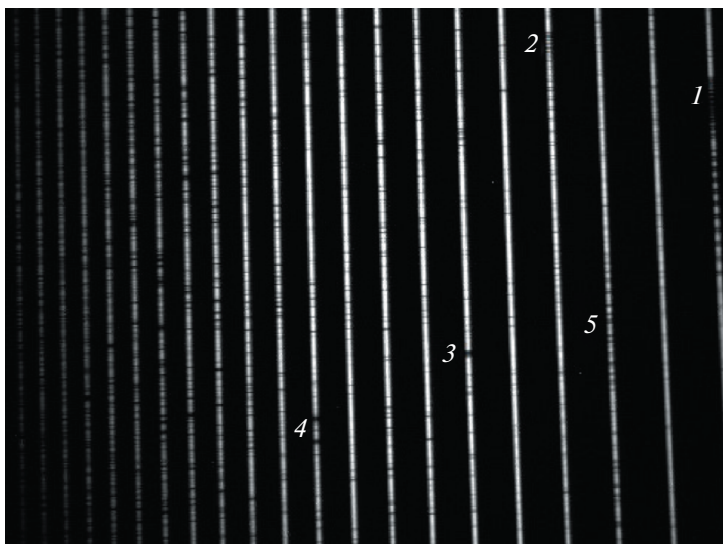
**Рис. 2.** Эшелле-спектр лабораторного источника. На фоне непрерывного спектра люминофора видны эмиссионные линии атомов HgI. 1 – зеленая линия  $\lambda = 546.07$  нм; 2 – желтый дублет  $\lambda = 576.96$  нм,  $579.07$  нм; 3 – фиолетовая линия  $\lambda = 404.67$  нм.

1-м порядке. Камерой является покупной линзовый объектив П-5 производства ЛОМО ( $F_{cam} = 180$  мм,  $D_{cam} = 90$  мм, относительное отверстие 1:2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Макет спектрографа испытан с лабораторным источником света, изображение спектра, зарегистрированное на цифровую камеру, приведено на рис. 2.

В средней части кадра, в соседних порядках эшелле-спектра, видны компоненты желтого дублета HgI,  $\lambda = 576.96$  нм,  $579.07$  нм. В соседних порядках повторяется и зеленая линия HgI  $\lambda = 546.07$  нм. Это означает, что в интересующем нас диапазоне длин волн спектр регистрируется с перекрытием в соседних порядках, без пропущенных участков. В левой части кадра видны слабые фиолетовые линии HgI, регистрируемые во



**Рис. 3.** Эшелле-спектр холодной звезды. 1, 2 — головы полос молекулярного кислорода,  $\lambda = 760$  нм и  $\lambda = 680$  нм, соответственно; 3 — линия H-alpha бальмеровской серии водорода ( $\lambda = 656.3$  нм); 4 — резонансный дублет NaI ( $\lambda = 589.0$  нм и  $\lambda = 589.6$  нм); 5 — участок, содержащий A-полосу водяного пара (переход 000-301,  $\lambda = 747.3$  нм).

втором, нерабочем, порядке решетки скрещенной дисперсии. Из-за перекрытия с первым, рабочим, порядком получаем ограничение на длину одновременно регистрируемого диапазона длин волн:  $\lambda\lambda \sim 404\text{--}808$  нм. Этого достаточно, чтобы за одну экспозицию зарегистрировать отдельные ненасыщенные линии в полосах водяного пара в районах  $\lambda\lambda \sim 590, 660, 690, 720, 730$  нм.

Приемником излучения служит матрица ПЗС KAF-16803 формата  $4096 \times 4096$  с охлаждением на эффекте Пельтье (размер пикселя  $9 \times 9$  мкм<sup>2</sup>, шум считывания  $10 e^-$ ).

Температурные вариации чувствительности такого приемника несущественны, так как глубины абсорбционных линий в спектрах Солнца и звезд измеряются относительно уровня непрерывного спектра.

Оценим требования к согласующей оптике спектрографа. При факторе широкощельности  $F_{coll}/F_{cam} = 3.33$  двухпиксельному линейному разрешению на приемнике соответствует ширина входной щели астрономического спектрографа 0.06 мм. С учетом параметров основного диспергирующего узла получаем предельную оценку спектрального разрешения  $R \sim 40000$ .

В спектрограф, размещенный стационарно, излучение подается по оптическому волокну. При этом относительное отверстие коллиматора следует согласовать с апертурой пучка, выходящего из оптического волокна. Апертура выходящего пучка всегда больше, чем относительное отверстие пучка, проецируемого на вход оптического волокна, см., например, [5]. Для измерения эффекта деградации апертуры разработано не-

сколько методов, наиболее подходящим считаем приведенный в работе [6]. Согласование апертуры оптического волокна и апертуры коллиматора выполняется микрообъективом (поз. 2 на рис. 1а). Позицией 3 на рис. 1а, 1б показана щель, раскрывая которую можно понижать спектральное разрешение относительно предельной величины  $R \sim 40000$ .

Использование оптического волокна позволяет выполнять спектроскопические наблюдения как в дневное, так и в ночное время суток. В дневное время используется малогабаритное устройство, отслеживающее перемещение солнечного диска по небосводу (так называемый трекер). Метод сопровождения основан на анализе сигналов, поступающих от квадрантного фотодетектора. В ночное время питающей оптикой служит телескоп небольшого диаметра ( $D_{tel} = 250$  мм), сопровождающий перемещение освещенной части лунного диска или суточное движение яркой звезды. Входная часть оптического волокна установлена в фокальной поверхности телескопа. Эти приемы, в принципе, позволяют проводить круглосуточный мониторинг содержания водяного пара на луче зрения.

На рис. 3 приведен фрагмент изображения эшелле-спектра, полученного в ночное время от яркой звезды (диапазон длин волн 460–760 нм). Отмечено положение полос атмосферного кислорода (позиции 1 и 2), прослеживается и вращательная структура этих полос. Колебательно-вращательный спектр молекул водяного пара (переход 000–103,  $\lambda = 698$  нм) можно найти в порядке, содержащем полосу кислорода (2,  $\lambda = 680$  нм), и в

порядке, содержащем линию H-alpha (поз. 3), см. также рис. 1 в работе [7].

### ВЫВОДЫ

Разработан и изготовлен спектрограф высокого разрешения, позволяющий в безоблачную погоду регистрировать абсорбционные спектры дневной и ночной атмосферы. Прибор используется для определения содержания водяного пара по отдельным линиям колебательно-вращательного спектра. Данные наблюдений могут быть полезны при оценке величины тропосферной задержки сигналов глобального позиционирования.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panchuk V.E., Tavalzhanskaya N.S., Chepizhko A.V.* // Bulletin of the Special Astrophysical Observatory. 1996. V. 41. P. 154.
2. *Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V.* // Astronomy Reports. 2017. V. 61. Issue 9. P. 820. <https://doi.org/10.1134/s1063772917080091>
3. *Panchuk V.E., Chuntunov G.A., Naidenov I.D.* // Astrophysical Bulletin. 2014. V. 69. Issue 3. P. 339. <https://doi.org/10.1134/s1990341314030109>
4. *Schroeder D.J.* // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1970. V. 82. № 490. P. 1253.
5. *Barden S.C.* // Astronomical Society of the Pacific Conference Series #3, Proc. of a Conference. Held at Tucson (April 11-14, 1988) / Ed. by S.C. Barden. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific (ASP), 1988.
6. *Carrasco E., Parry I.R.* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1994. V. 271. P. 1. <https://doi.org/10.1093/mnras/271.1.1>
7. *Панчук А.В.* // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. Вып. S674. С. 239.