

УДК 524.3-355/74

СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗД В НАЗЕМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ. I: ТЕХНИКА НАБЛЮДЕНИЙ

© 2009 В. Е. Панчук, В. Г. Ключкова, М. В. Юшкин, М. В. Якопов

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.; принята в печать 2 июля 2009 г.

Дается историческая справка об основных средствах спектроскопии вблизи коротковолновой границы окна атмосферной прозрачности. Наблюдения в наземном ультрафиолете предъявляют повышенные требования к оптике телескопа и спектрографа, а также к средствам калибровки. Необходимо учитывать сезонные изменения оптических свойств земной атмосферы. Рассмотрены возможности ультрафиолетовых наблюдений с высоким спектральным разрешением на БТА.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Область наземного ультрафиолетового диапазона (3000–3800 Å) по сравнению с видимой областью является более информативной. Спектры звезд и туманностей в этом диапазоне содержат много важных деталей. Наблюдения спектров звезд в наземном ультрафиолете всегда являлись задачей, технически более сложной, чем наблюдения в видимой области спектра. Поэтому перед рассмотрением астрофизических задач мы сочли необходимым дать описание условий наземных наблюдений и используемых технических средств.

Характер астрофизических задач для УФ-диапазона изменялся соответственно техническим возможностям. Первые наблюдения преследовали цель определения спектрофотометрических температур, до середины прошлого века основной задачей являлось изучение области бальмеровского скачка, затем, по мере возрастания спектрального разрешения, наступил период исследования звездных хромосфер, а также избранных линий и blends в спектрах звездных атмосфер. После миссии IUE сложилась парадоксальная ситуация: спектры звезд в заатмосферном УФ-диапазоне стали более изученными, чем спектры в наземном ультрафиолете.

2. НАБЛЮДЕНИЯ С ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

Первые наблюдения [1], включающие часть ультрафиолетового диапазона ($\lambda > 3400 \text{ \AA}$), выполнены вскоре после создания основ фотографической фотометрии. Использовалась ультрафиолетовая

линзовая камера ($d = 11 \text{ см}$, $f = 110 \text{ см}$) с 45-градусной предобъективной призмой. Спектры различных звезд сравнивались друг с другом, а затем со спектром центра Солнца; в последнем случае использовались наблюдения, выполненные при помощи специального коллиматора. Распределения энергии для 91 звезды в диапазоне 3300–5100 Å получены в работе [2], абсолютная калибровка распределений энергии выполнена по звезде В0. Наблюдения [3] были выполнены на 20-см касегреновском рефлекторе с 16-градусной предобъективной призмой. Калибровка распределений энергии в диапазоне ($\lambda = 3700 - 6400 \text{ \AA}$) осуществлялась по спектру Полярной звезды. Первые попытки стандартизации спектров в УФ-диапазоне по искусственным источникам света были неудачными. В результате наблюдений выяснилось, что цветовые температуры в сопоставлении со спектральными классами дают большее рассеяние (из-за неуверенных определений чернотельной температуры источника калибровки, из-за сложностей учета поглощения в земной атмосфере, а также из-за зависимости коэффициента непрерывного поглощения в звездной атмосфере от длины волны). Более надежно определялись относительные спектрофотометрические градиенты, но их зависимость от длины волны не соответствовала зависимости, получаемой для чернотельного излучения.

Дальнейшие наблюдения в ультрафиолете связаны именно с последней проблемой, т.к. вариации коэффициента поглощения с длиной волны сильнее всего проявляются вблизи бальмеровского скачка. Удачные исследования этой области продолжены на Ликской обсерватории: 20 звезд В0–В5 [4];

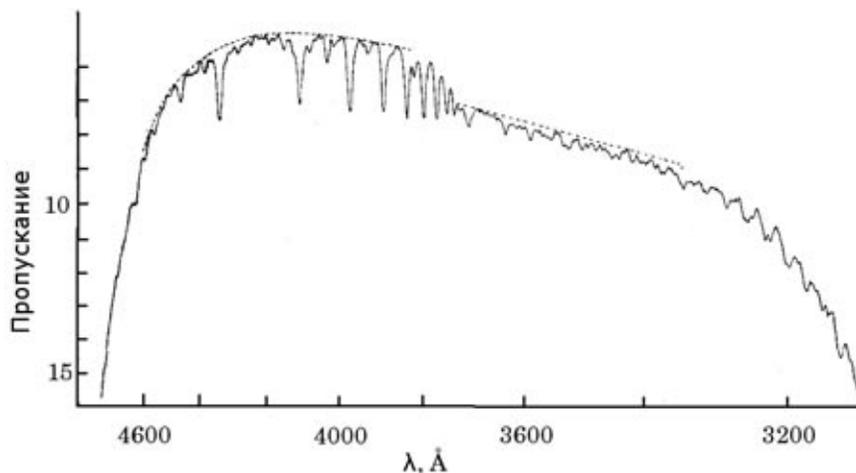


Рис. 1. Результат наблюдений ϵ Per (B1) на призменной камере конструкции Кудэ в фиолетовом и ультрафиолетовом диапазонах, по данным [5]. В коротковолновой части регистрограммы видны канты полос системы Хэггинса.

и в Швейцарских Альпах (на вершине Юнгфрау, 3457 м): 240 звезд в течение 1935–1939 гг. Во втором случае наблюдения выполнялись в диапазоне 3100–4860 Å на ультрафиолетовой камере [5] конструкции Кудэ ($d = 9$ см, $f = 60$ см), снабженной двумя 70-мм кварцевыми предобъективными призмами Корню. На фотопластинке регистрировался спектр длиной 28 мм. Расширение спектров осуществлялось за счет астигматизма (от 1.3 мм на 4861 Å до 0.7 мм на 3100 Å), вводимого путем наклона объектива на 8° к задней плоскости призмы Корню. На Рис. 1 приведен пример результатов таких наблюдений, послуживших основой двумерной и трехмерной спектральной классификации IAP для горячих звезд [6, 7].

Диаметр камер и телескопов ограничивался размерами дорогостоящих предобъективных кварцевых призм, поэтому дальнейший рост проникающей способности обеспечивался созданием подвесных щелевых призменных спектрографов, устанавливаемых на больших телескопах. Прибором, конструкция которого включает практически все усовершенствования призменных спектрографов, является кварцевый спектрограф [8] фокуса Кассегрена 2.1-м рефлектора обсерватории Мак Дональд. Спектрограф состоит из двух сменных коллиматоров ($d = 76$ мм, $f = 1$ м). Двухлинзовый коллиматор, с хорошим пропусканием в ультрафиолете, заменялся однолинзовым кварцевым, для работы вблизи границы атмосферной прозрачности (3250 Å). В качестве диспергирующего узла использовались либо две кварцевые призмы Корню с полным углом отклонения 90° на 3933 Å, либо две призмы из флинта с минимальным углом отклонения на 4341 Å. С призмами из флинта спектральное разрешение увеличивалось вдвое. Четы-

рехлинзовая камера Росса ($d = 86$ мм, $f = 500$ мм) обеспечивала обратную линейную дисперсию 40 Å/мм вблизи 3933 Å, а у границы пропускания оптики спектрографа (3250 Å) — 20 Å/мм . В комплект спектрографа входили две камеры Шмидта ($d = 94$ мм, $f_1 = 180$ мм, $f_2 = 90$ мм). Двухслойная теплозащитная оболочка, средства обогрева и активной вентиляции, ртутные термодатчики составили основу полуавтоматической системы термостабилизации, включение которой за несколько часов до наблюдений позволяло устранять температурные градиенты внутри призм. В отличие от рефлекторов начала XX века, оптика 2.1-м телескопа имела алюминиевое напыление, что делало этот инструмент наиболее эффективным в ультрафиолете.

Оригинальный призменный спектрограф [9] сконструирован Шалонжем для 1.9-м рефлектора обсерватории Верхнего Прованса. Кварц-флюоритовая оптика обеспечивала хорошее качество спектра в диапазоне 3100–6200 Å. Расширение спектра осуществлялось путем колебания пластинки вокруг точки, расположенной на оси спектра между 2500 и 3200 Å. Спектр получался более уширенным в том диапазоне, где плотность энергии выше. Положение точки колебания выбиралось в зависимости от спектрального класса звезды. Такой прием обеспечивал близкие плотности почернения эмульсии во всем указанном диапазоне, точность фотометрии возрастала, а производительность спектрографа увеличивалась почти втрое. С обратной линейной дисперсией 220 Å/мм вблизи H_γ регистрировались спектры звезд до 10-й величины.

Подвесной кварцевый спектрограф использовался в фокусе “ломаный Кассегрен” 1.2-м ре-

флектора Крымской АО [10]. Линзовый коллиматор ($d = 40$ мм, $f = 800$ мм), две призмы, камера ($d = 50$ мм, $f = 200$ мм), обеспечивали дисперсию $65 \text{ \AA}/\text{мм}$ вблизи 3400 \AA .

Первым отечественным промышленным прибором, предназначенным для спектрофотометрии в ультрафиолетовом диапазоне, является бесщелевой спектрограф АСИ-5, выпущенный небольшой серией в 1948 г. Параболический рефлектор диаметром 25 см формирует коллимированный пучок диаметром 40 мм, в котором установлена 60° призма Корню. Кварцевый объектив ($d = 46$ мм, $f = 280$ мм) обеспечивал дисперсию $70 \text{ \AA}/\text{мм}$ вблизи 3300 \AA . Один из спектрографов использовался на высоте 3200 м (Арагац). За 40 минут, без расширения, регистрировались спектры звезд 8-й величины [11].

Использование линзовых камер ограничивало длину одновременно регистрируемого спектрального интервала из-за быстрого изменения показателя преломления оптических стекол в ультрафиолете. С появлением светосильных катадиоптрических камер необходимость “подстройки под ультрафиолет” сохранилась, но одновременно регистрируемый диапазон длин волн значительно увеличился.

Уместно вспомнить и о полностью зеркальных системах. Первые шаги внеатмосферной спектроскопии сопровождалась испытанием аппаратуры в высокогорных условиях. В качестве прототипа камеры для КА Arolo была разработана зеркальная камера Шмидта [12], диаметр зеркала $d_1 = 300$ мм, диаметр корректора $d_2 = 150$ мм, фокус камеры $f = 610$ мм, поле 5° . Расположение дифракционной решетки на поверхности корректора позволяло выполнять спектроскопию в наземном ультрафиолете с обратной линейной дисперсией $150 \text{ \AA}/\text{мм}$. Достоинством этой схемы является отсутствие центрального экранирования и слабая чувствительность к ошибке коллимации. Сочетание функций шмидтовского корректора и дифракционной решетки применялось впоследствии в схеме фотографического спектрографа [13] для главного фокуса СФНТ. Использовалась асферическая решетка 1200 штр/мм, в первом порядке, с максимумом эффективности на 3200 \AA .

При разработке первого поколения спектральной аппаратуры БТА возможность наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне была предусмотрена в ряде приборов. В комплект спектрографа первичного фокуса [14] входили две камеры с кварц-увиолевой корректирующей оптикой. В звездном спектрографе со скрещенной дисперсией [15] для разведения порядков применялась

кварцевая призма. Пластины местных корректоров положения звезды также были изготовлены из плавленного кварца. Стоимость светосильной оптики, прозрачной в ультрафиолете, быстро растет с диаметром коллимированного пучка. Например, изготовленные из плавленного кварца коррекционные пластины светосильных камер больших спектрографов оказываются дороже, чем набор крупногабаритных дифракционных решеток. Поэтому большинство спектрографов фокуса куда оснащены корректирующей оптикой из легкого крона. Обе светосильные камеры Основного звездного спектрографа БТА (ОЗСП) снабжены кварцевыми коррекционными пластинами диаметром 405 мм каждая [16]. При работе в четвертом и втором порядках сменных дифракционных решеток (600 штр/мм) обратная линейная дисперсия составляла $6,7$, 13 и $26 \text{ \AA}/\text{мм}$. Расположенный на высоте, достаточной для понижения влияния приземного аэрозоля, ОЗСП являлся первым отечественным инструментом пригодным для наблюдений в ультрафиолете с высоким спектральным разрешением. Спектроскопия в ультрафиолетовом диапазоне на ОЗСП требовала хорошей подготовки наблюдателя, т.к. при визуальном гидировании необходимо было удерживать в центре щели именно ультрафиолетовое изображение, смещенное от видимого изображения вследствие атмосферной дисперсии. Общим недостатком спектральной аппаратуры БТА было отсутствие встроенных систем калибровки, пригодных для работы в ультрафиолете. Для калибровки фотоматериала использовался лабораторный дифракционный спектрограф, установленный в холодном помещении.

Техника фотографической спектрофотометрии в ультрафиолете за полвека своего развития прошла путь от применения 10 -сантиметровых камер до создания фотографических спектрографов на крупнейших телескопах, расположенных на высотах 2 – 4 км. Это обстоятельство свидетельствует о сохранении интереса к диапазону, наблюдения в котором являются технически более сложными и дорогостоящими.

3. СВОЙСТВА ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Коэффициент поглощения земной атмосферы принято представлять в виде суммы составляющих

$$\alpha(\lambda) = A(\lambda) + B\lambda^{-4} + C,$$

где функция A определяется поглощением в теллурических линиях и полосах, B — рассеянием на молекулах и мелких частицах по закону Рэлея, она характеризует плотность атмосферы, а коэффициент C — нейтральным поглощением пылью и аэрозолями, что характеризует мутность атмосферы.

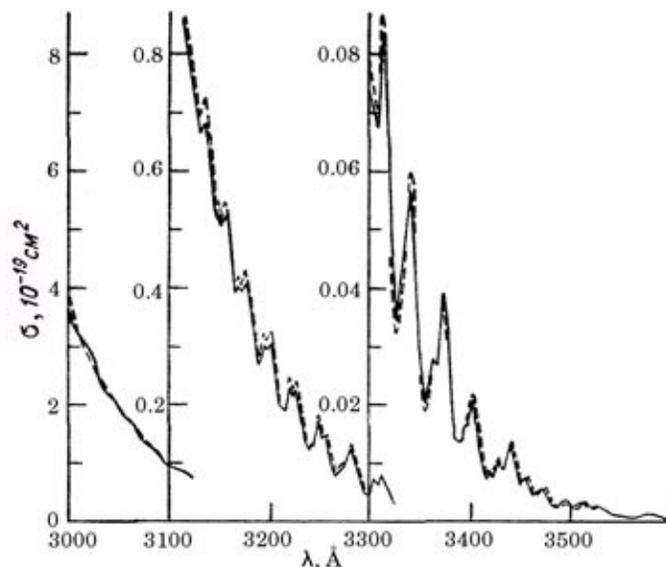


Рис. 2. Коэффициент поглощения σ (10^{-19} см^2) в области полос системы Хэггинса, по данным [17].

Положение коротковолновой границы окна атмосферной прозрачности определяется в основном поглощением на молекулах озона (в наиболее сильной полосе системы Хартли, 2100–3000 Å). На интервале от 3000 до 3400 Å коэффициент поглощения молекулами озона спадает более чем на два порядка [17] (см. Рис. 2). В диапазоне 3000–3450 Å насчитывается более 70 полос системы Хэггинса [18]. Максимум концентрации озона находится на высотах 15–25 км, так что высота места установки телескопа не влияет на положение границы атмосферной прозрачности. Среднее содержание озона в атмосфере имеет четко выраженную сезонную и широтную переменность [19] (см. Рис. 3). Широта места установки БТА находится в области наибольших сезонных вариаций содержания озона. Итак, эффективность спектральных наблюдений вблизи границы атмосферной прозрачности подвержена сильным сезонным вариациям, обусловленным поглощением в полосах системы Хэггинса.

Для подавляющего большинства пунктов наблюдается резкое изменение коэффициента прозрачности в фиолетовом диапазоне (3800–4500 Å). Это означает, что, по мере увеличения длины волны, роль поглощения молекулами озона быстро понижается и заменяется рэлеевским рассеянием на молекулах и микрочастицах. Результаты наблюдений [20] показывают, что внутриконтинентальные ходы годового изменения прозрачности характеризуются большей сезонной изменчивостью, чем окраинные районы (где влагосодержание воздушных масс выше). Такие изменения наблюдаются во всем оптическом диапазоне, поэтому в

работе [20] сделано предположение о воздействии влажности на атмосферный аэрозоль (обводнение частиц аэрозоля изменяет его оптические свойства). Данное предположение сопоставим с результатами годовичного мониторинга дневной атмосферы над БТА [21]. На Рис. 4 приведены средние дневные количества осаждаемой воды W и средние дневные коэффициенты прозрачности в полосе пропускания интерференционного фильтра с центром на 3800 Å. Коэффициент прозрачности на границе фиолетового и ультрафиолетового диапазона изменяется в пределах 0.46–0.68, что является типичным для высоты 2 км над уровнем моря. Хорошая корреляция коротковолновой прозрачности и содержания осаждаемой воды согласуется с гипотезой обводнения мелких частиц аэрозоля [20]. В пользу этой гипотезы свидетельствует и то обстоятельство, что при равных количествах осаждаемой воды (в интервале $W=2-5$ мм) прозрачность атмосферы на длинных волнах, где вклад аэрозолей преобладает, выше в холодные сезоны года [21].

В целом, высота места наблюдения является критичной для эффективности спектроскопии как в ультрафиолете (функция S определяется в основном рассеянием на аэрозолях), так и в ближней инфракрасной области (функция A определяется, в основном, поглощением молекул кислорода и воды). Результаты узкополосной ($\Delta\lambda/\lambda = 0.02 - 0.04$) фотометрии в диапазоне 3800–22000 Å, проведенной в районе установки БТА, свидетельствуют о том, что вкладом нейтрального поглощения на крупных аэрозолях можно пренебречь для всех сезонов [21].

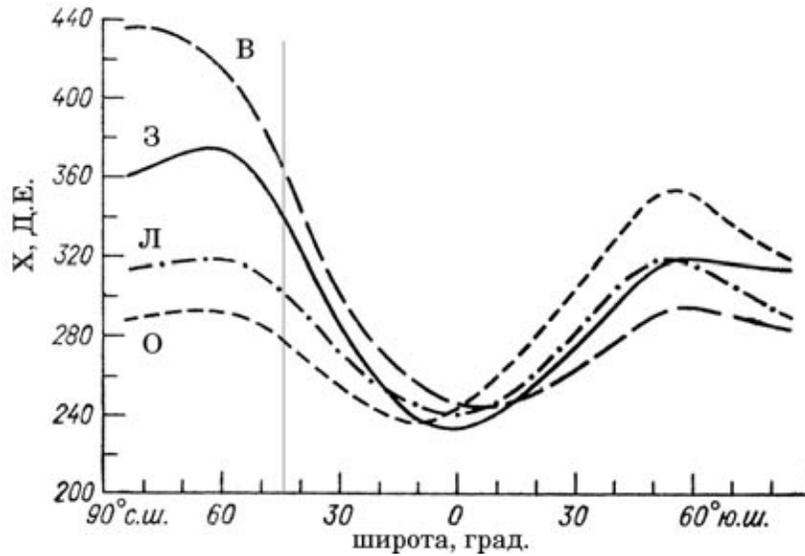


Рис. 3. Широтное распределение общего содержания озона X , в единицах шкалы Добсона (Д.Е.), усредненное для четырех сезонов, по данным [19]. Обозначения: В — весна, З — зима, Л — лето, О — осень. Вертикальной линией отмечена широта места установки БТА.

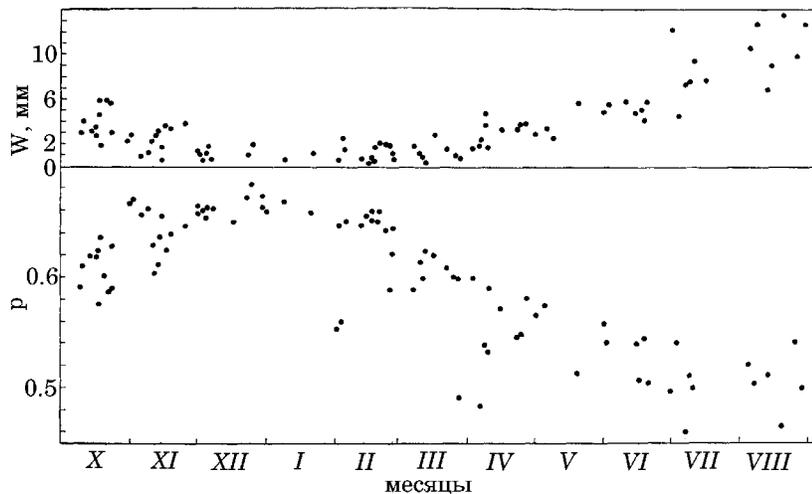


Рис. 4. Средние за день значения осажденной воды W в мм (вверху) и коэффициенты прозрачности p на $\lambda 3800 \text{ \AA}$ для места установки БТА, по данным [21].

Вычисления влияния атмосферной дисперсии на звездное изображение [22], выполненные для средних атмосферных условий и высоты места наблюдения 2 км, показывают, что на зенитном расстоянии 45° центры изображения звезды на 3000 и 3500 \AA отстоят от видимого изображения (5000 \AA) на $2''$ и $1.2''$ соответственно. При спектрофотометрических наблюдениях с низким разрешением проблема решается путем согласования положения щели с направлением вектора атмосферной дисперсии. При наблюдениях с высоким

разрешением потери света на щели могут достигать десятков процентов, а использование компенсатора атмосферной дисперсии не снимает проблемы полностью. Дело в том, что показатель преломления воздуха зависит от плотности, температуры и влажности [23], и для того, чтобы скомпенсировать изменения показателя преломления вследствие изменения этих величин, необходимо или измерять, или рассчитывать эффект изменения атмосферной дисперсии именно в ультрафиолете. Теоретический расчет влияния водяного пара выполнен только для

интервала 3611–6910 Å [24]. Увеличение парциального давления водяного пара понижает показатель преломления воздуха.

В завершение раздела отметим, что при наблюдениях в ультрафиолете необходимо учитывать существенно иную продолжительность астрономических сумерек, связанную с двумя эффектами: возрастанием с уменьшением длины волны рэлеевского рассеяния солнечного излучения в верхней атмосфере, и возрастанием с уменьшением длины волны поглощения света звезды в полосах системы Хэггинса.

4. НАБЛЮДЕНИЯ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

Роль одноканальных фотоэлектрических приемников в развитии ультрафиолетовой спектрофотометрии продемонстрируем на примере спектрофотометра СФ-68 [25–27]. Сканирование спектра осуществлялось поворотом плоской решетки, синхронно перемещались кварцевые линзы коллиматора и камеры (перефокусировка, компенсирующая продольный хроматизм), при этом регистрировался диапазон 3100–7400 Å с шагом 25 Å. Для эффективной работы в ультрафиолете были переоборудованы два телескопа АЗТ-7 ($D = 200$ мм, 1:15), в которых стеклянный мениск был заменен на эллиптическое кассегреновское зеркало. В результате наблюдений из двух пунктов в Чили, выполненных в период 1971–1973 гг., был составлен лучший в мире каталог распределений энергии в спектрах 303 звезд [28].

Ультрафиолетовые наблюдения ярких звезд с высоким спектральным разрешением были начаты на классических спектрографах кудэ с длиннофокусными камерами, где не требуется применение корректирующей линзовой оптики. Построенные для фотографической спектроскопии такие спектрографы затем были адаптированы под многоканальные фотоэлектрические приемники. Наиболее эффективным (в ультрафиолете) прибором этого класса являлся спектрограф 2.2-м телескопа Гавайского университета (первого крупного телескопа, установленного на высоте 4.2 км и работающего с 1970 г.).

Следующим шагом явилось создание эшелле-спектрографа фокуса кудэ с диаметром коллимированного пучка 200 мм — CES ESO [29]. Этот спектрограф изначально создавался только под применение различных фотоэлектрических приемников. Вместо разведения порядков эшелле-спектра в CES ESO выделяется только один избранный рабочий порядок путем установки перед

входной щелью одного из двух небольших призмных спектрографов предварительной дисперсии. Итак, для выделения рабочего диапазона используются небольшие призмы, в т.ч. и кварцевая, для ультрафиолета. Данное решение обеспечивает крайне низкий уровень рассеянного света в спектрографе ценой потери числа одновременно регистрируемых элементов спектра. Разработанный первоначально для 3.6-м телескопа, CES ESO использовался только с дополнительным 1.4-м телескопом САТ, где потери на тракте передачи света и на входной щели были значительно ниже.

Из многоканальных систем, пригодных для работы в ультрафиолетовом диапазоне, выделяется эшелле-спектрограф колледжа Лондонского университета [30], установленный в фокусе кудэ 3.89-м телескопа Англо-Австралийской обсерватории (UCLES AAT, рабочий диапазон 3000–10000 Å). В этом спектрографе после решетки установлены последовательно три призмы из плавленого кварца, что, в сочетании с длиннофокусной ($f = 700$ мм) камерой, обеспечившей спектральное разрешение $R = 80000$ при полусекундной щели, позволило выполнять наблюдения линии ВеII $\lambda 3130$ Å в спектрах F- и G-карликов. Близкими свойствами в ультрафиолетовом диапазоне обладал и Утрехтский эшелле-спектрограф, (UES [31]), установленный на нэсмитовской платформе 4.2-м телескопа “Вильям Гершель” — WHT. На этом спектрографе, являющемся адаптированной копией UCLES AAT, кроме двумерного телевизионного счетчика фотонов (IPCS) устанавливалась и матрица ПЗС. Применение счетчиков фотонов (когда записываются только координаты центров событий) позволяло достигать более высокого спектрального разрешения. Например, на UES при секундной щели с матрицей ПЗС обеспечивалось разрешение $R = 50000$, а с ИПС и более узкой щелью достигалось $R = 100000$. Гамильтоновский эшелле спектрограф [32] фокуса кудэ 3-м телескопа Ликской обсерватории, оснащенный двумя порядкоразводящими призмами из UVK-7, использовался в диапазоне 3400–11000 Å с разрешением $R = 30000$ –60000. Работы в ультрафиолете с высоким разрешением, требующие длительных экспозиций, были начаты в неподвижном фокусе кудэ (UCLES, Гамильтоновский эшелле), продолжены на платформе альт-азимутальной монтировки (UES WHT) и завершились созданием эшелле спектрографов HIRES [33] 10-м телескопа Кека-I и адаптированной копии HIRES-спектрографа HDS [34] 8.2-м телескопа Subaru. Диаметр коллимированного пучка (300 мм) на этих двух спектрографах имеет предельную величину, поэтому в качестве элементов скрещенной дисперсии установлены уже не призмы, а

составные дифракционные решетки. Спектрограф UVES [35] 8-м телескопа VLT принципиально отличается от своих предшественников (в т.ч. от UCLES и HIRES) за счет разделения спектра на две оптические ветви, каждая из которых оптимизирована под свой диапазон длин волн. Кроме того, в каждой ветви использована схема белого зрачка, что делает этот прибор наиболее экономичным по свету при относительно небольшой апертуре камерных объективов.

Мы не рассматриваем здесь спектрографы с оптоволоконном из-за их низкой эффективности в ультрафиолете.

Итак, в течение двадцати лет применения многоканальных фотоэлектрических приемников при развитии методов спектроскопии высокого разрешения в ряде случаев была учтена необходимость эффективной работы в ультрафиолете. Предельный диаметр коллимированного пучка, при котором изготовление кварцевых порядкоразводящих призм было еще доступно, составил 200 мм. Для спектроскопии в ультрафиолете, как правило, используются большие телескопы.

5. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА БТА

Спектроскопия в ультрафиолетовом диапазоне с фотоэлектрической регистрацией на БТА была начата после адаптации звездного спектрографа со скрещенной дисперсией (СП-161) под применение двумерного счетчика фотонов [36]. Реализованное при этом спектральное разрешение ($R = 3000$) было недостаточным для большинства интересующих нас задач, но прибор эффективно использовался при наблюдениях внегалактических источников. Эшелле-спектрографы первого поколения [37–39], с диаметром коллимированного пучка не выше 100 мм, обеспечивали более высокое спектральное разрешение, но использовались с первыми матрицами ПЗС, неэффективными в ультрафиолете (т.н. “толстые чипы”).

Нэсмитовский эшелле спектрограф [40] (НЭС) работает на 6-м телескопе БТА с 1998 г., но только с 2001 г., после установки матрицы с высокой чувствительностью в ультрафиолете (“тонкий чип”), может рассматриваться как эффективное средство наблюдений в коротковолновом диапазоне. Здесь остановимся только на тех конструктивных особенностях НЭС, которые принципиальны для работы в ультрафиолете. Локальный корректор положения звезды имеет плоско-параллельную пластину, изготовленную из плавленого кварца. Параметры эшелле-решетки и камеры таковы, что в сочетании с матрицей ПЗС форматом 2048 элементов обеспечивается полное перекрытие соседних порядков эшелле-спектра (в самых высоких

порядках — даже двукратное перекрытие). Решетки скрещенной дисперсии, разводящие порядки эшелле спектра, с плотностью 300 и 600 штр/мм, работают в первом порядке и установлены на механизме, позволяющем выполнять их смену. Это позволяет использовать, соответственно, либо плотную упаковку одиночных порядков [41, Рис. 2], либо работать с анализатором поляризации, когда каждый из порядков повторяется дважды. При этом длина одновременно регистрируемого диапазона уменьшается вдвое. Для НЭС изготовлен анализатор круговой и линейной поляризации [42], эффективность которого в фиолетовой области на 2 звездные величины превосходит классический анализатор на ромбах Френеля [43], непрозрачный в ультрафиолете. Применение резателя изображений [44] в ультрафиолете возможно только с решеткой 600 штр/мм. Микропризмы резателя выполнены из легкого крона, что при их толщине не приводит к заметному поглощению в ультрафиолете. Шмидтовский корректор камеры и зеркало Манжена (мениск двойного хода в качестве кассегреновского зеркала) изготовлены из плавленого кварца. Полеспрямляющая линза отсутствует, ее функции выполняет манженское зеркало. Защитное стекло криостата матрицы ПЗС — увиолевое. Используется матрица, квантовый выход которой в ультрафиолете достигает 70%. Оптический тракт спектрографа построен с минимальными потерями, в т.ч. и в ультрафиолете. Камера спектрографа проектировалась для работы в диапазоне $\lambda > 3400 \text{ \AA}$. Расчеты точечных диаграмм, выполненные при разных допусках на параметры схемы, показали, что камера может быть адаптирована и для более коротких длин волн, что иллюстрируется на [41, Рис. 2].

Более сложной оказалась задача сопровождения объекта при наблюдениях в ультрафиолете. Оптика подсмотров поля и щели — линзовая, визуализация звездных изображений, окрашенных вследствие атмосферной дисперсии, на телевизионном подсмотре — черно-белая, и направление вектора атмосферной дисперсии не определяется. Поэтому в канале подмотра установлена турель с цветными фильтрами [45], выделяющими спектральный диапазон, который регистрируется на светоприемнике камеры спектрографа. Стекланные фильтры, используемые для ультрафиолетового диапазона, имеют второе окно прозрачности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, влияние этого “красного пика” в фотометрических устройствах представляет проблему. Предложено несколько конструкций фильтров, приготовленных из полунасыщенных растворов $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, имеющих хорошее пропускание в синей и фиолетовой области, и подавляющих “красный пик”,

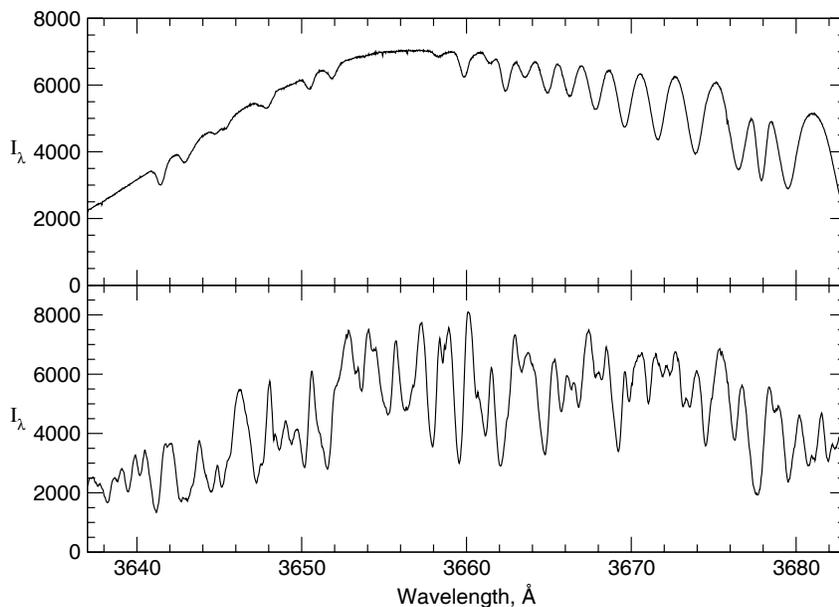


Рис. 5. Фотометрический разрез спектрального порядка, содержащего предел бальмеровской серии водорода. Вверху — сверхгигант α Cyg A2 Ia, внизу — гелиевая звезда KS Per [47]. По ординате указано число отсчетов на канал.

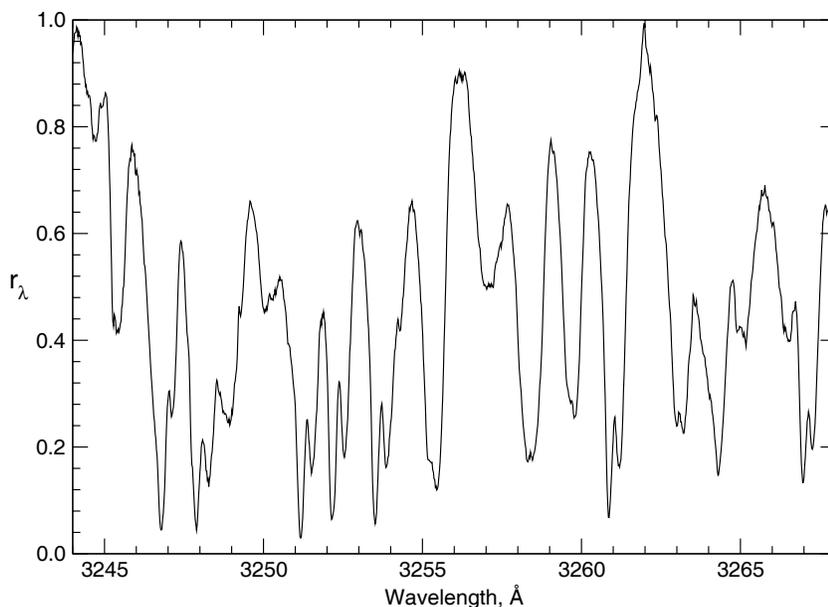


Рис. 6. Фрагмент спектра ρ Cas G2 Ia0e, (в остаточных интенсивностях g_λ), содержащий линии металлов, раздвоенные в разной степени. Более глубокие, коротковолновые компоненты принадлежат холодной оболочке.

детали см., например, в работе [46]. Мы используем стеклянный фильтр ПС11, который имеет хорошее пропускание в диапазоне 2600–4600 Å и красный пик, начинающийся при $\lambda = 6600$ Å. Таким образом, из изображения звезды, вытянутого за счет атмосферной дисперсии, в канале подсмотра выделяются два изображения: красное и фиолетовое. Система автоматического гидирования настраивается по фиолетовому участку изображения с учетом

направления и величины вектора атмосферной рефракции.

На Рис. 5 и 6 приведены фотометрические разрезы избранных спектральных порядков, выделенных из полученных нами на НЭС БТА эшелле спектров звезд разных типов. Спектральное разрешение составляет $R = 60000$.

6. ВЫВОДЫ

История техники спектроскопии в наземном ультрафиолете свидетельствует о постоянном интересе астрофизиков к этому диапазону. Этот интерес поддерживался ощутимыми затратами: повышенными (по сравнению с видимым диапазоном) требованиями к оптике телескопов и спектрографов, поддержанием работы ряда специализированных инструментов в течение длительного времени, совершенствованием светоприемников, оптимальных для данного диапазона, исследованиями свойств атмосферы вблизи границы прозрачности. Учет свойств земной атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне является столь же важным, что и оптимизация спектральной аппаратуры для этого диапазона. Нами созданы технические средства для работы в наземном ультрафиолетовом диапазоне на БТА с высоким спектральным разрешением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана РФФИ (проект 07-02-00247-а) и Программой Отделения физических наук РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Rosenberg, Abh. Leop.-Karol. D. Akad. Naturforsch **101**, № 2 (1914).
2. C. S. Yü, Lick Obs. Bull. **12**, 104 (1926).
3. H. Jensen, Astr. Nachr. **248**, № 5940-41 (1933).
4. B. G. Karpov, Lick Obs. Bull. **16**, 159 (1934).
5. A. Arnulf, D. Barbier, D. Chalonge, and R. Canavaggia, Journ. des Observateurs **19**, № 9-10, 149, (1936).
6. D. Barbier and D. Chalonge, Ann. d'Ap. **4**, 30 (1941).
7. D. Chalonge and L. Divan, Ann. d'Ap. **15**, 201 (1952).
8. G. W. Moffitt, Contrib. from the McDonald Obs., № 1, 74 (1940).
9. A. Baillet, D. Chalonge, and J. Gajan, Ann. d'Ap. **15**, 144 (1952).
10. И. М. Копылов, Изв. КрАО **11**, 44 (1954).
11. О. А. Мельников и Б. К. Иоаннисиани, Известия ГАО в Пулкове **18**, вып. 6, 55 (1951).
12. L. Epstein, Publ. Astronom. Soc. Pacific **79**, 132 (1967).
13. G. Lemaitre and L. Vigroux, in *Instrumentation for ground-based optical astronomy. Present and Future, Proc. 9-th Santa Cruz Summer Workshop in Astronomy and Astrophysics, July 13-24, 1987*, Ed. by L. V. Robinson (Lick Obs., 1988), p. 275.
14. Н. Г. Зандин, А. Е. Колесников, И. В. Пейсахсон и М. В. Лобачев, Оптико-механическая промышленность **2**, 34 (1977).
15. Н. Г. Зандин, О. Н. Гусев и И. В. Пейсахсон, Оптико-механическая промышленность **6**, 20 (1977).
16. А. С. Васильев, А. М. Евзеров, М. В. Лобачев и И. В. Пейсахсон, Оптико-механическая промышленность **2**, 31 (1977).
17. R. D. Hudson, Can. J. Chem. **52**, 1466 (1974).
18. В. Н. Кондратьев и А. В. Яковлева, ЖЭТФ **2**, 50 (1931).
19. J. London, R. Vojkov, S. Oltmans, and J. J. Kelley, *Atlas of global distribution of total ozone. 1957-1967* (NCAR, Boulder, 1976).
20. В. Е. Зуев, Б. Д. Белан и Г. О. Задде, *Оптическая погода* ("Наука", Новосибирск, 1990).
21. Ю. К. Бергнер, А. В. Крат, С. М. Морозова и др., Астрофизические исследования **10**, 52 (1978).
22. A. V. Filippenko, Publ. Astronom. Soc. Pacific **94**, 715 (1982).
23. W. D. Heasox, ASP Conf. Ser. **3**, 204 (1988).
24. J. C. Owens, Appl. Opt. **6**, 51 (1967).
25. Л. А. Каминко, В. С. Корепанов, В. Б. Новопащенко и др., Изв. КрАО **47**, 162 (1973).
26. А. П. Кульчицкий, Изв. КрАО **47**, 170 (1973).
27. В. И. Бурнашев и П. П. Петров, Изв. КрАО **47**, 176 (1973).
28. Н. Л. Алексеев, Г. А. Алексеева, А. А. Архаров и др., Труды ГАО в Пулкове **83**, 3 (1978).
29. D. Enard, Proc. SPIE **331**, 132 (1982).
30. D. D. Walker and F. Diego, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **217**, 355 (1985).
31. P. Barthel, Ann. Rep. Netherlands Foundation for Res. **29**, (1993).
32. S. S. Vogt, Publ. Astronom. Soc. Pacific **99**, 1214 (1987).
33. S. S. Vogt, in *Proc. of the ESO Workshop on High Resolution Spectroscopy with the VLT*, Ed. by M.-H. Ulrich (Garching, 1992), p. 223.
34. K. Noguchi, W. Aoki, S. Kawanomoto, et al., Publ. Astronom. Soc. Japan **54**, 855 (2002).
35. H. Dekker, S. d'Odorico, A. Kaufer, et al., Proc. SPIE **4008**, 534 (2000).
36. В. Г. Клочкова и В. Е. Панчук, Препринт № 70 (САО РАН, Нижний Архыз, 1991).
37. В. Г. Клочкова В. Е. Панчук и В. П. Рядченко, Pis'ma Astronom. Zh. **17**, 645 (1991).
38. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, Г. А. Галазутдинов и др., Письма в АЖ **19**, 1061 (1993).
39. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al. Bull. Spec. Astrophys. Obs. **44**, 127, (1998).
40. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин и И. Д. Найденов, Оптический журнал **76**, 42 (2009).
41. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук и М. В. Юшкин, в кн. *Ультрафиолетовая Вселенная. II.*, Под ред. Б. М. Шустова, М. Е. Сачкова и Е. Ю. Кильпио (Янус-К, Москва, 2008), сс. 46-59.
42. И. Д. Найденов, В. Е. Панчук и М. В. Юшкин, Астрофизический бюллетень **62**, 313 (2007).
43. И. Д. Найденов и Г. А. Чунтонов, Сообщения САО **16**, 63 (1976).
44. В. Е. Панчук, М. В. Юшкин и И. Д. Найденов, Препринт № 179 (САО РАН, Нижний Архыз, 2003).
45. В. Е. Панчук, Препринт № 154 (САО РАН, Нижний Архыз, 2001).

46. B. M. Lasker, Publ. Astronom. Soc. Pacific **78**, 329 (1966). 47. T. Kipper and V. G. Klochkova, Baltic Astronomy **17**, 195 (2008).

STELLAR SPECTROSCOPY IN GROUND-BASED ULTRAVIOLET. I: OBSERVATIONAL TECHNIQUE

V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, M. V. Yakopov

We present a historical note on the main spectroscopy instruments close to the short-wave boundary of the optical atmospheric window. Ground-based ultraviolet observations impose more stringent requirements to the optics of telescopes and spectrographs, as well as to the calibration means. We have to bear in mind the seasonal variations of the optical properties of the Earth's atmosphere. We consider the capabilities of ultraviolet observations with high spectral resolution on the 6-m BTA telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences.

Key words: *methods of astronomical observations, equipment and instruments*