

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНОГО ЗВЕЗДНОГО СПЕКТРОГРАФА 6-м ТЕЛЕСКОПА (БТА)

И. Ф. Бикмаев, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук

Систематизированы результаты определения проникающей способности различных режимов работы Основного звездного спектрографа БТА. Даны результаты определений точности фотометрирования спектрограмм, проанализирована эффективность использования спектрографа.

The results of determination of capability for various regimes of work of the Main stella spectrograph of BTA are systematized. The results of accuracy determination of the spectrogram photometry are given, an efficiency of the use of the spectrograph is analyzed.

Набор обратных дисперсий, реализуемый теперь в результате изменения схемы диспергирующего узла камеры № 1 Основного звездного спектрографа (ОЗСП) БТА [1], является типичным для кудэ-спектрографов, но позиционная нестабильность ОЗСП несколько понижает характерное спектральное разрешение [2]. Поэтому ОЗСП БТА отличается от кудэ-спектрографов 2-м телескопов в основном повышенной точностью спектрофотометрии, определяемой количеством собираемого телескопом света. Другим преимуществом ОЗСП может являться более высокая скорость получения спектрограмм объектов, принципиально доступных 2-м телескопам. Ниже приведем сводку рекомендуемых вариантов использования ОЗСП, результаты измерения проникающей способности спектрографа, сведения о точности спектрофотометрии и статистику использования ОЗСП в 1977—1984 гг.

Варианты работы ОЗСП. Вариантом работы ОЗСП назовем такую комбинацию его элементов (размер входной щели, параметры порядкоразделительного фильтра, характеристики дифракционной решетки и камеры), которая в сочетании с необходимой фотоэмульсией позволяет от звезды данного спектрального класса зарегистрировать спектр необходимого качества в минимально короткое время. В табл. 1 дан перечень исследованных вариантов. В последней колонке таблицы указана звездная величина объекта, спектр которого может быть зарегистрирован на негиперсенсibilизированных фотоэмульсиях до плотности почернения $D=1.0$ за 1 ч экспозиции при диаметре изображения 2.5 сек. дуги и зенитном расстоянии $Z=45^\circ$. Ширина входной щели при этом равна 0.15, 0.45 и 0.9 сек. дуги, а высота спектрограмм 1.0, 0.7 и 0.35 для камер № 1, 2 и 3 соответственно.

Число возможных вариантов работы ОЗСП и многопрограммный статус БТА не позволяют в большинстве случаев набрать достаточную наблюдательную статистику, на основании которой можно выработать рекомендации по оптимальному использованию ОЗСП. Поэтому первый этап поиска и оптимизации вариантов мы выполнили, прибегнув к расчетам на ЭВМ. При этом были использованы относительные распределения энергии из [3], средняя кривая прозрачности атмосферы из [4], приведенная на высоту места наблюдения, характеристики пропускания различных сортов оптического стекла из каталога [5], кривые концентрации энергии в первых четырех-пяти порядках имеющих у нас дифракционных решеток, кривые спектральной чувствительности используемых сортов фотоэмульсий. Отсутствие экспериментальных определе-

Характеристики вариантов использования ОЗСН

Номер ха-меры	Номер варианта N	Угол блеска решетки α	Угол наклона решетки φ	Порядковый номер дифракционного фильтра	Номер рабочего порядка n	Центральная длина волны $\lambda_c, \text{Å}$	Сорт фотоэмульсии Kodak	Диапазон длин волн $\lambda, \text{Å}$	Обратная дисперсия D, $\text{Å}/\text{мм}$	Проницающая способность m
1	1	8°	—2°44'	—	1	4400	IIaO	3700—5100	5.3	B=7.0
	2	8	—2 44	—	1	5900	103aF	5100—6700	5.3	V=5.6
	3	12	1 50	—	2	4000	IIaO	3200—4800	2.7	U=6.6
	4	17	8 20	ЖС-17	2	5800	103aF	4800—6800	2.7	V=4.8
	5	25	12	БС-8	3	4400	IIaO	3700—5200	1.8	B=6.0
	6	8	0 30	—	1	4200	IIaO	3300—5100	28	B=9.6
	7	8	2	—	1	5100	103aF	3300—6800	28	V=7.6
	8	8	1 30	—	1	4800	103aD	3300—6300	28	—
	9	8	1 30	—	1	4400	IIIaJ	3300—5000	28	—
	10	12	7	—	2	4000	IIaO	3300—4600	14	U=8.8
3	11	17	14	ЖС-17	2	5900	103aF	5000—6800	14	V=7.4
	12	17	7	БС-10	2	3900	IIIaJ	3400—5000	14	—
	13	25	14 30	ЖС-17	2	6000	103aF	5100—6800	14	V=6.8
	14	25	17	БС-8	3	4400	IIaO	3700—4900	9	B=8.2
	15	25	19	УФС-5	4	3600	IIaO	3300—3900	7	U=5.8
	16	8 (2)	0 20	—	1	4200	IIaO	3500—4900	56	B=11.8
	17	8 (3)	3 40	ЖС-17	1	6200	103aF	5500—6900	56	V=9.8
	18	12 (4)	5 40	КС-15	1	7600	IN	6200—9000	56	—
	19	12 (1)	6	—	2	3700	IIaO	3100—4400	28	U=10.0
	20	17 (2)	8	БС-10	2	4300	IIaO	3600—5000	28	B=10.8
	21	17 (3)	12 20	ЖС-16	2	5400	103aD	4700—6100	28	—
	22	25 (3)	15 20	ЖС-17	2	6200	103aF	5500—6900	28	V=8.5
	23	25 (2)	16 40	БС-8	3	4400	IIaO	4100—4600	18	B=10.4

Примечание. В скобках указаны номера коррекционных пластин камеры № 3.

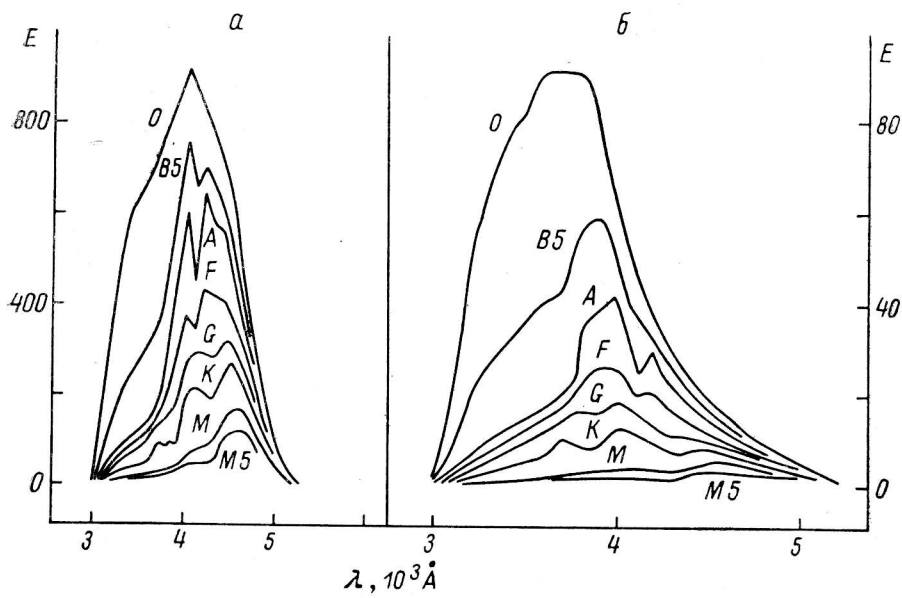


Рис. 1. Результаты расчета спектральной чувствительности вариантов 6 и 9 (б), выполненных для фотоэмульсий Kodak 103aO и IIIaJ соответственно.

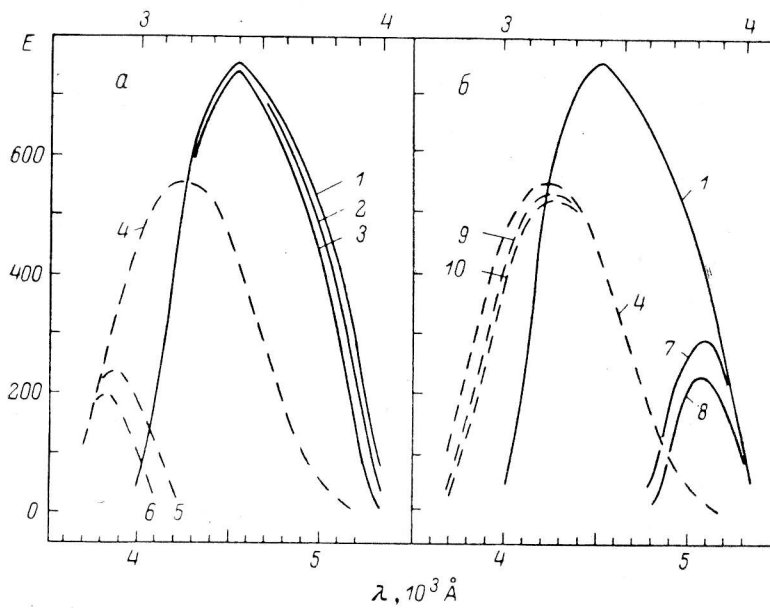
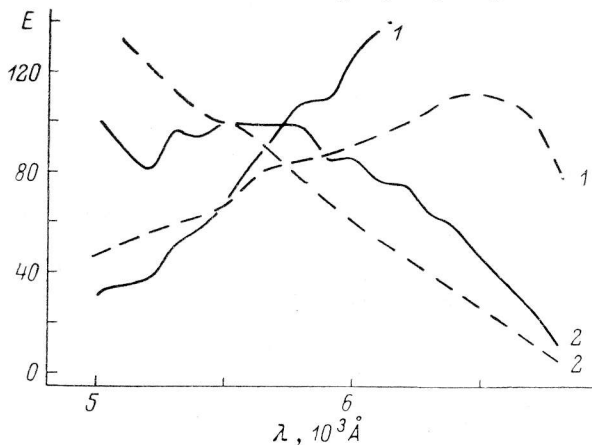


Рис. 2. Пример выбора параметров порядкоразделительных фильтров для вариантов 15 (а) и 14 (б).

Верхняя ось абсцисс — шкала длин волн в 4-м порядке, нижняя — в 3-м порядке решетки с углом блеска 25° . 1 — спектральная чувствительность в 4-м порядке; 4 — спектральная чувствительность в 3-м порядке; 2, 5 и 3, 6 — эффект применения фильтра УФС-5 толщиной 1 и 2 мм соответственно (рабочий порядок 4-й); 9, 7 и 10, 8 — эффект применения фильтра БС-8 толщиной 2 и 3 мм (рабочий порядок 3-й). Вычисления выполнены для звезды спектрального класса O и фотоэмульсии Kodak 103aO.

ний концентрации энергии в некоторых порядках спектра мы компенсировали расчетами по формулам из [6]. При составлении алгоритмов программ мы пренебрегли виньетированием поля камер.

В качестве примера результатов вычислений на рис. 1 приведены два варианта работы ОЗСП, не требующие применения порядкоразделительных фильтров.



По оси ординат указана итоговая чувствительность в условных единицах, но сравнение вариантов между собой возможно, так как в расчетах учтены различия в чувствительности фотоэмульсий разного сорта. Кривые общей спек-

Рис. 3. Пример подбора вариантов в зависимости от спектрального класса звезды.

Штриховой линией обозначена О-звезда, сплошной — К-звезда; 1 — наблюдения в варианте 13; 2 — в варианте 11.

тральной чувствительности различных вариантов позволяют оценить ту часть рабочего поля, на которой спектр будет зарегистрирован в оптимальном диапазоне плотностей, что необходимо для обеспечения заданной фотометрической точности. Именно на этой части рабочего поля необходимо реализовывать максимально возможное спектральное разрешение.

Процедура подбора сорта стекла и толщины порядкоразделительного фильтра показана на рис. 2. Здесь основным условием является снижение вклада

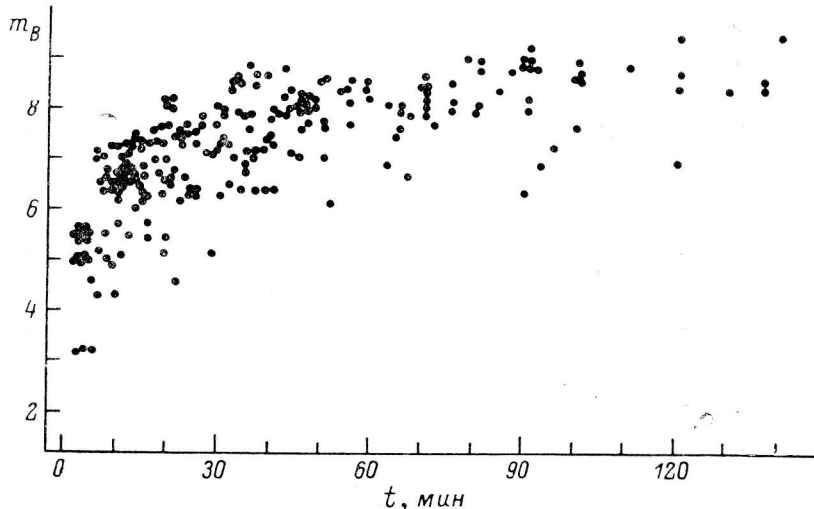


Рис. 4. Проницающая способность варианта 14 в функции времени экспозиции.

от нерабочего порядка до величины, меньшей, чем ошибки фотометрирования сильных и слабых линий. Если же задаться целью полного уничтожения вклада в интенсивность от соседних порядков, то световая эффективность в центре рабочего порядка существенно понижается.

Всю совокупность выбранных таким образом вариантов условно разделим на варианты, реализующие максимальную световую эффективность в относительно узком спектральном интервале, и варианты, реализующие максимальную информативную способность данной камеры, т. е. максимально возможное расширение доли рабочего поля камеры. Пример такого разделения приведен на рис. 3, где различие между сравниваемыми вариантами состоит только в углах

блеска используемых дифракционных решеток. Если потребовать, чтобы плотность почернения спектрограмм заключалась в пределах 0.8—1.2, то использование решетки с углом блеска 17° позволяет регистрировать в спектре звезды спектрального класса К участок $5000\text{--}6300 \text{ \AA}$, тогда как с решеткой ($\alpha=25^\circ$) этот участок сокращается до 300 \AA ($5500\text{--}5800 \text{ \AA}$). В результате таких расчетов стала очевидной потребность доукомплектования ОЗСП дифракционными решетками с промежуточными значениями величины угла блеска. Кроме того, процедура замены решеток должна быть механизирована.

В результате подобных вычислений и последующей наблюдательной проверки в щелевой части ОЗСП выполнены некоторые конструктивные изменения. С целью снижения световых потерь на отражение функция порядкоразделительного фильтра сочетается с функцией расширителя спектра — сменные плоскопараллельные пластины расширителя изготовлены из различных сортов стекла. Строго говоря, такой способ выделения рабочего порядка приводит к неоднородной плотности почернения по высоте спектра в тех участках длин волн, где кривая пропускания фильтра сильно зависит от угла наклона пластины расширителя, т. е. от эффективной толщины фильтра, но такие неоднородности наблюдаются на краях рабочего поля камеры, используемых редко. Для съемки нерасширенных спектров (высота нерасширенной спектрограммы для камеры № 1 при диаметре изображения 2.5 сек. дуги составляет 1 мм) изготовлена турель с гнездами для 12 фильтров необходимого сорта и толщины. Кроме того, под турелью с порядкоразделительными фильтрами располагается устройство ввода нейтральных фильтров, используемых при наблюдениях на БТА очень ярких звезд. Такое ослабление потока необходимо для выравнивания времени экспозиции спектров стандартов эквивалентных ширин, лучевых скоростей, распределения энергии, со средним временем экспозиции спектров исследуемых звезд, с целью устранения влияния отклонений от закона взаимозаменяемости. Роль порядкоразделительных фильтров для некоторых вариантов могут выполнять дихроичные светоделители, используемые в новой схеме щелевой части ОЗСП [1].

Проницающая способность ОЗСП. На рис. 4 приведена кривая проницающей способности варианта 14, построенная по результатам выполнения на БТА

ТАБЛИЦА 2
Поправки к кривым проницающей способности ОЗСП

Угол блеска решетки α	Номер варианта N	Δm	O	B5	A	F	G	K	M	M5
8°	1, 6, 16	ΔU	0.9	0.0	-0.9	-1.7	-2.3	-3.1	-5.0	-5.6
	1, 6, 16	ΔB	0.4	0.0	-0.4	-1.1	-1.7	-2.1	-3.2	-3.8
	2, 7	ΔU	1.0	0.0	-0.8	-1.6	-2.4	-3.2	-5.0	-5.5
	2, 7	ΔB	0.4	0.0	-0.3	-1.0	-1.7	-2.2	-3.2	-3.7
	2, 7, 17	ΔV	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.5	1.0	1.3
	8	ΔU	0.9	0.0	-0.8	-1.5	-2.1	-2.9	-4.8	-5.3
	8	ΔB	0.3	0.0	-0.2	-0.9	-1.5	-1.9	-3.0	-3.4
	8	ΔV	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
	9	ΔU	1.1	0.0	-1.0	-1.8	-2.5	-3.3	-5.1	-5.4
	9	ΔB	0.5	0.0	-0.4	-1.2	-1.9	-2.3	-3.3	-3.6
	12	3, 10, 19	ΔU	1.1	0.0	-0.9	-1.8	-2.5	-3.4	-5.8
17	12	ΔB	0.5	0.0	-0.4	-1.2	-1.6	-2.0	-3.0	-3.3
	4, 11	ΔV	0.7	0.5	0.4	0.0	-0.4	-0.6	-1.0	-1.3
	20	ΔB	0.3	0.0	-0.2	-0.9	-1.5	-2.0	-3.1	-3.5
	21	ΔV	0.3	0.0	-0.1	-0.4	-0.8	-0.9	-1.3	-1.2
25	5, 14	ΔB	0.3	0.0	-0.2	-1.0	-1.5	-1.9	-3.1	-3.6
	15	ΔU	1.7	0.0	-1.6	-2.2	-2.7	-3.7	-6.6	-7.1
	13, 22	ΔV	-0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.6	1.0	1.3

(1978—1984) программы спектрофотометрии пекулярных и нормальных звезд в рассеянных скоплениях и динамических группах. Спектральные классы исследованных звезд заключены в интервале В5—А2, все спектры получены с одинаковой шириной щели (0,45 мм), имеют одинаковую высоту (0,7 мм) и экспонированы до плотности почернения 1,0. Разброс точек на рис. 4 определяется как сезонной и кратковременной переменностью астроклиматических характеристик (диаметр изображения и средняя прозрачность), так и различием условий наблюдений для скоплений в среднем (значительная часть звезд программы

принадлежит к скоплениям низких и южных склонений — Ori OB1 и Sco—Cen).

На рис. 5 приведены средние кривые проникающей способности для избранных вариантов из табл. 1, полученные по результатам наблюдений. Суммарное время экспозиции, соответствующее точкам на рис. 4, составляет 145 ч., поэтому кроме кривых проникающей способности, полученных по результатам наблюдений, мы рассмотрели способ оценки проникающей способности вариантов, исключая необходимость пробных наблюдений. С целью сравнения относительной чувствительности вариантов мы фотографировали на ОЗСП спектр стандартного источника света. В результате фотометрической обработки спектрограмм получены оценки относительной освещенности, необходимой для получения спектрограмм заданной плотности почернения $D=0.8$ над вуалью. Сравнение вариантов выполнено как внутри синего и красного диапазонов, так и для вариантов, различающихся по диапазонам длин волн. Коэффициент перехода от

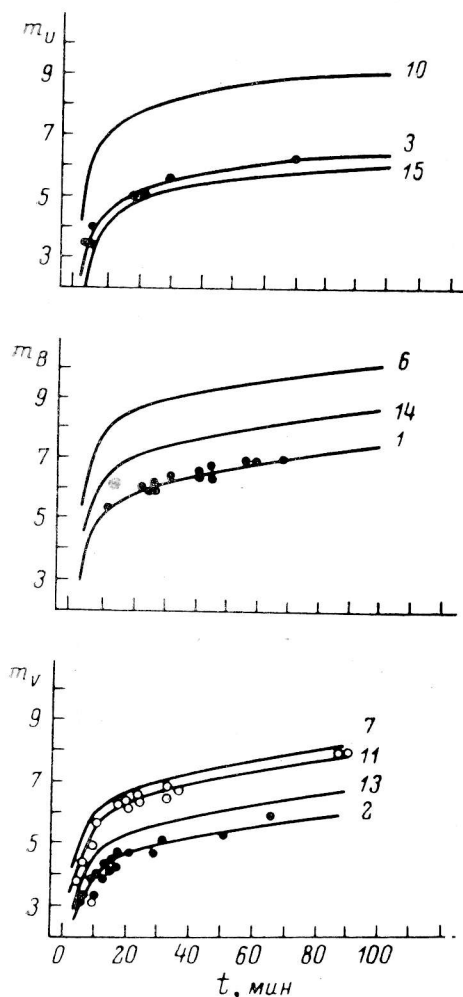


Рис. 5. Кривые проникающей способности ОЗСП.

a — в ультрафиолетовом диапазоне. Цифрами указаны номера вариантов из табл. 1. Точками отмечены результаты наблюдений в варианте 3. Спектральный класс В5; *b* — то же для синего диапазона; *v* — кривые проникающей способности для красного диапазона (кружки — результаты наблюдений F-звезд в варианте 11, остальные — для звезд В5).

варианта к варианту, выраженный в звездной величине, определяет соответствующую величину сдвига известной кривой проникающей способности вдоль оси ординат для получения кривой проникающей способности в новом варианте. Если при переходе от варианта к варианту сорт фотоэмульсии не изменяется, то форма кривой проникающей способности также не изменяется, так как эта кривая является преобразованием характеристической кривой (при фиксированной плотности почернения) в систему координат время—логарифм освещенности. Для контроля метода мы получили кривые проникающей способности вариантов независимо от исследованных на основании статистики наблюдений. Ошибки метода лежат в пределах 0,2—0,3 звездной величины, т. е. сравнимы с поправками, которые необходимо вводить в кривую проникающей способности из-за старения фотоматериала или различия астроклиматических характеристик.

Кривые проникающей способности ОЗСП, приведенные для избранных вариантов на рис. 5, получены преимущественно для звезд спектрального класса

В5. Если требуется пересчитать положение кривой проникающей способности с учетом изменения спектрального класса при сохранении остальных параметров варианта, то необходимо учесть поправки, приведенные в табл. 2. Эти поправки получены на основании теоретических расчетов, пример которых дан на рис. 1. Учет этих поправок сводится к прибавлению их к последней колонке табл. 1 с учетом знака или соответствующему сдвигу кривых проникающей способности вдоль оси ординат.

Точность фотометрирования спектрограмм. Большинство спектрофотометрических программ, выполнение которых мы обеспечивали, характерно своей эпизодичностью и кратковременностью. Это вызывает повышенные требования к работе с фотоматериалом, свойства которого существенно изменяются в течение срока выполнения одной программы. В каждую наблюдательную ночь для всех характерных времен экспозиции мы выполняем фотометрическую калибровку. Спектрограммы звезд и спектры калибровки регистрируются затем на микрофотометре интенсивностей, сконструированном С.Н. Ключковым на базе микрофотометра почернений. Принцип работы прибора основан на аппроксимации характеристической кривой ступенчатой фигурой из 250 ступенек, что обеспечивает

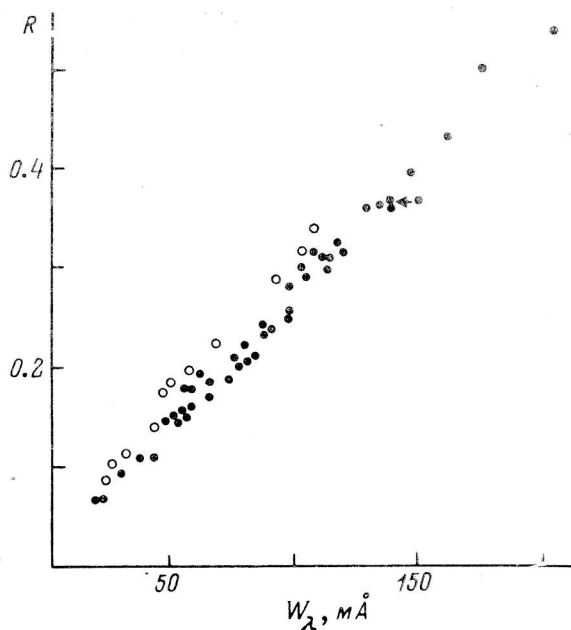


Рис. 6. Зависимость эквивалентной ширины W_λ от глубины R линий в спектре G-карлика, построенная по участкам поля камеры № 2, различающимся величиной отклонения фокальной поверхности от плоскости фотопластины (см. текст).

Стрелкой показана величина коррекции эквивалентной ширины за эффект блендирования.

высокую точность перехода от почернений к интенсивностям (шаг одной ступени соответствует 0.006 ед. плотности почернения).

Приведем два примера, характеризующие точность измерения спектрограмм, получаемых на ОЗСП БТА.

1. Точность измерения крыльев водородных линий в спектрах нормальных A-звезд составляет 1 % от интенсивности в континууме. Эта оценка получена путем сравнения профилей H_γ и H_δ в спектрах, полученных в разные ночи одного наблюдательного сета и в разные сеты.

2. Точность определения эквивалентных ширин σW_λ в спектрах A-звезд составляет 16, 10 и 5 % в интервалах 20—80, 80—200 и 200—500 мÅ соответственно. Если допустить, что точность измерения W_λ определяется точностью измерения центральной глубины R , то указанная величина ошибок согласуется с результатом п. 1.

Дополнительное повышение точности определения W_λ возможно при детальном учете качества спектрограмм. Так, например, при изучении атмосфер холодных звезд широко используется прием массового определения эквивалентных ширин линий по измеренным центральным глубинам с использованием зависимости $W_\lambda(R)$, построенной по неблендированным линиям. Эта зависимость чувствительна к величине спектрального разрешения и к доле рассеянного света. При использовании короткофокусных камер № 2 и 3, несмотря на присутствие полеспрямляющих линз, спектральное разрешение является функцией координаты рабочего поля (см. рис. 10 из [2]). На рис. 6 показан эффект искажения эквивалентных ширин, определяемых по центральным глубинам.

Кружками отмечена зависимость, полученная по участкам спектрограммы, совпадающим с минимальными отклонениями фокальной кривой камеры № 2 от плоскости фотопластинки. В этом случае при обработке спектрограммы методом измерения центральных глубин всю совокупность измеряемых линий следует разбивать на два-три группы в зависимости от координаты рабочего поля камеры.

Статистика использования ОЗСП. Из сведений о доле календарного времени, выделяемого для наблюдений на ОЗСП, видно, что в 1981—1984 гг. степень использования ОЗСП стабилизировалась, %:

1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
15	17	18	28	28	32	30	27

Рассмотрим, какое из двух перечисленных во введении преимуществ ОЗСП перед классической схемой высокодисперсионной спектроскопии «2-м телескоп

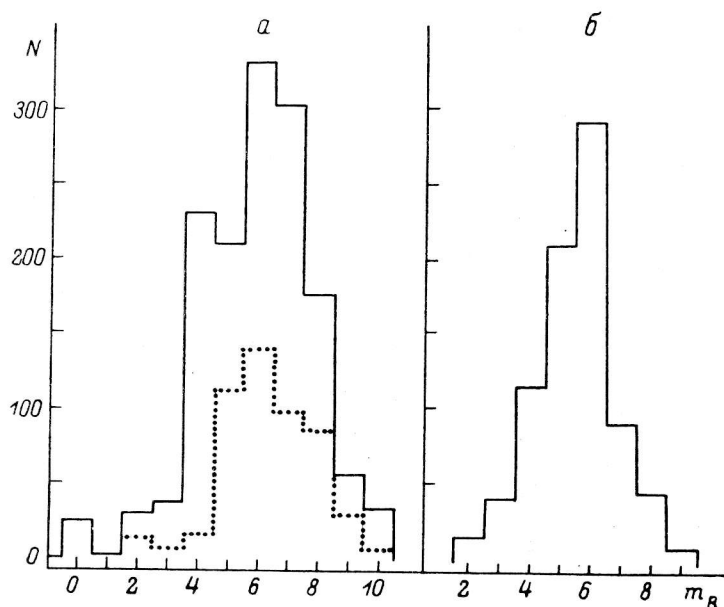


Рис. 7. Число спектрограмм в функции звездной величины, полученных на ОЗСП БТА в варианте 14.

Точками отмечена статистика программы спектрофотометрии звезд в рассеянных скоплениях; а — нормальное уширение спектрограмм; б — спектрограммы, полученные с ахроматическим анализатором.

с кудэ-спектрографом» было реализовано. С этой целью на рис. 7 мы приводим гистограммы числа спектрограмм, полученных на ОЗСП БТА в 1977—1984 гг., в зависимости от звездной величины. Если учесть, что светосила кудэ-фокуса практически не зависит от диаметра телескопа и близка к светосиле фокуса Нэсмита БТА, и использовать кривую проникающей способности (рис. 5, б), полученную по спектрам этого же варианта, то гистограмму рис. 7 можно преобразовать в гистограмму число спектрограмм—время, затраченное на получение всех спектрограмм в заданном интервале звездных величин. Учитывая, что проникающая способность сравниваемых спектрографов пропорциональна диаметру телескопа, получим, что ОЗСП БТА в 59 % времени реализовывал мощность 6-м зеркала, в 22 % был эквивалентен телескопу диаметром 2.6 м и в 19 % работал как кудэ-спектрограф 1-м телескопа. Следовательно, в большинстве случаев реализовывалось первое преимущество ОЗСП — повышенная точность спектрофотометрии. Что касается второго преимущества — высокой скорости получения спектрограмм, которые можно получить и на телескопах меньшего диаметра, то оно в определенной степени ослабляется большим количеством программ, распределяемых на ОЗСП в течение года (в среднем 15 заявок). В итоге среднее число календарных ночей, выделяемых на одну программу в те-

чение года, не превосходит 7—8, что приводит к затягиванию сроков завершения программ вплоть до их идейного старения.

Поэтому дальнейшее повышение эффективности ОЗСП БТА мы видим не только в его непрерывной модернизации и развитии технологии обработки и анализа спектрограмм, но и в реализации новых принципов распределения наблюдательного времени и выполнения программ.

Авторы выражают благодарность Е. Л. Ченцову за возможность использования неопубликованных данных о проицирующей способности вариантов 13 и 15.

Литература

1. Улучшение характеристик Основного звездного спектрографа БТА. Повышение эффективности камеры № 1 / Э. Б. Гажур, И. Д. Найденов, В. Е. Панчук, Е. И. Перепелицын. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1986, 23, с. 106—111.
2. Бикмаев И. Ф., Панчук В. Е. Исследование позиционных характеристик Основного звездного спектрографа 6-м телескопа (БТА). — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1986, 23, с. 112—117.
3. Страйжис В., Свидерскене Э. Распределение энергии в спектрах звезд различных спектральных классов и светимостей. — *Бюл. Вильнюс. астрон. обсерв.*, 1972, № 35, с. 3—92.
4. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Моклас, 1977, с. 52—55.
5. ГОСТ 9411—66. Стекло цветное оптическое.
6. Тарасов К. И. Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1977, с. 61—69.

Поступила в редакцию 23.04.85