

SCORPIO: редуктор светосилы первичного фокуса БТА

В.Л.Афанасьев, Э.Б.Гажур, С.Р.Желенков, А.В.Моисеев

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 23.11.2004; принята к печати 12.12.2004.

Описывается редуктор светосилы SCORPIO, с осени 2000 г. применяющийся для наблюдений на 6-м телескопе САО РАН. Разбираются особенности конструкции и параметры прибора при различных режимах наблюдений (фотометрия, спектроскопия с длинной щелью и многощелевая, спектрополяриметрия, панорамная спектроскопия с интерферометром Фабри-Перо). Даны подробные характеристики сменного оборудования (светофильтры, диспергирующие элементы и пр.). Возможности SCORPIO демонстрируются на примерах наблюдений различных астрономических объектов.

Ключевые слова: приборы для астрономических наблюдений

SCORPIO: PRIME FOCUS REDUCER OF THE BTA, by V.L.Afanasyev, E.B.Gazhur, S.R.Zhelenkov, A.V.Moiseev. The focal reducer SCORPIO is described, which has been used for observations at the 6 m telescope of SAO RAS since the autumn of 2000. We described the features of the design and parameters of the device in different modes of observations (photometry, longslit and multislit spectroscopy, spectrophotometry and panoramic spectroscopy with Fabry-Perot interferometer). Detailed characteristics of changeable equipment (filters, dispersers, etc.) are given. The capabilities of SCORPIO are demonstrated by examples of observations of different astronomical objects.

Key words: instrumentation: miscellaneous

1. Введение

Идея применения на телескопе укорачивающей фокус оптической системы (фокального редуктора) была предложена и реализована Куртесом еще в 50-60 гг. прошлого века (см., к примеру, Куртес, 1960, 1964). Фокальный редуктор позволяет одновременно решать несколько задач. Во-первых, увеличиваются эквивалентная светосила системы и поле зрения, что важно для исследования протяженных объектов. Во-вторых, использование специально рассчитанной оптики позволяет скомпенсировать внеосевые аберрации главного зеркала. В-третьих, появляется возможность установки в параллельном пучке между коллиматором и камерой диспергирующих элементов (гризм, интерферометров Фабри-Перо и т.п.), что превращает редуктор в универсальный спектрограф.

Построенные по такой схеме приборы, в первую очередь предназначенные для спектроскопии и фотометрии слабых протяженных объектов, получили в последние два десятилетия широкое распространение. Достаточно назвать камеру EFOSC 3.6-м телескопа ESO (Бузони и др., 1984), во мно-

гом ставшую прототипом современных спектрографов 8–10-м телескопов, таких как FORS на VLT (Никлас и др., 1997).

Первый фокальный редуктор для интерферометрических наблюдений на 6-м телескопе БТА был создан в САО РАН в середине 80-х годов с использованием коммерческих фотообъективов. Несмотря на такие недостатки, как плохое качество изображений на краю поля зрения, малое пропускание оптики (около 30% в максимуме) и отсутствие автоматизации, редуктор использовался на БТА более десяти лет, пока не встал вопрос о его модернизации. В 1999 г. в САО РАН были начаты работы по созданию нового редуктора светосилы для первичного фокуса БТА.

Новый редуктор светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) позволяет реализовать в первичном фокусе 6-м телескопа БТА следующие виды наблюдений протяженных и звездобразных объектов:

- ПЗС-фотометрию в широких, средних и узких полосах.

Таблица 1: Основные характеристики SCORPIO

Эквивалентная светосила	$F/2.6$
Поле зрения	
Полное ¹	$6.1' \times 6.1'$
В многоцелевом режиме ¹	$2.9' \times 5.9'$
Масштаб изображения ¹	$0.18''/\text{пиксель}$
Спектральный диапазон	$3\,600 - 10\,000\text{\AA}$
Спектральное разрешение	
С призмами (для ширины щели $1''$)	$1.5 - 20\text{\AA}$
С интерферометрами Фабри-Перо	$0.8 - 2.5\text{\AA}$
Максимальная квантовая эффективность (телескоп+SCORPIO+ПЗС)	
Для прямых снимков	70%
Для спектроскопии	40%
Для наблюдений с ИФП	20%

¹ при использовании детектора ПЗС EEV-42-40

- Панорамную спектроскопию с интерферометром Фабри-Перо.
- Спектроскопию с “длинной щелью”.
- Бесщелевую спектроскопию.
- Многообъектную спектроскопию с 16-ю щелями, дистанционно перемещаемыми в фокальной плоскости.
- Поляриметрию в полосах разной ширины и спектрополяриметрию.

Первые наблюдения на БТА состоялись в сентябре 2000 г. со старым вариантом адаптера первичного фокуса. Новая платформа-адаптер стала применяться с мая 2001 г. Первые успешные наблюдения в режиме многощелевой спектроскопии были проведены в сентябре 2003 г., а летом 2004 г. завершены работы по внедрению спектрополяриметрического режима и проведены пробные наблюдения.

Механические и оптические части редуктора были изготовлены в макетных мастерских САО РАН по проекту В.Л. Афанасьева и Э.Б. Гажура. Оптика спектрографа изготовлена Е.И. Перепелицыным согласно расчетам В.Л. Афанасьева. Сборка механики прибора осуществлялась В.В. Веретеновым. Платы дистанционного управления прибором спроектированы и изготовлены С.Р. Желенковым, а электросиловая часть — В.И. Фатеевым. Управляющее программное обеспечение написано А.В. Моисеевым.

Ниже последовательно описываются особенности конструкции прибора и методика наблюдений с ним на БТА. Оптико-механическая схема SCORPIO, включающая редуктор светосилы,

платформу-адаптер и ПЗС-детектор, рассматривается в главе 2. В главе 3 приводятся характеристики сменных оптических элементов (светофильтров, призм и т.п.). Система управления спектрографом описывается в главе 4. Особенности наблюдений в различных режимах рассмотрены в главе 5, здесь же приводятся примеры некоторых наблюдательных результатов, полученных на 6-м телескопе во время пробной эксплуатации прибора. В главе 6 даются некоторые рекомендации по обработке получаемого материала, а в главе 7 кратко рассматриваются перспективы дальнейшей модернизации SCORPIO.

2. Описание спектрографа

Основные характеристики прибора сведены в табл. 1. Конструктивно SCORPIO состоит из трех основных узлов — редуктора светосилы, платформы-адаптера первичного фокуса и ПЗС-детектора, каждый из которых допускает независимое использование. Редуктор светосилы включает в себя оптику спектрографа и многощелевой блок. Платформа-адаптер содержит оптику и лампы калибровки, два поля для поиска гидрированных звезд, телевизионный подсмотр и качающуюся пластину из плавленного кварца для быстрого гидрирования (tip-tilt)¹.

2.1. Редуктор светосилы

Оптика редуктора светосилы (схема на рис. 1) включает в себя линзу поля и коллиматор — 4-линзовый апохромат ($F/2.2$) с фокусным расстоянием 160 мм, формирующий выходной зрачок системы, камерный объектив — 6-линзовый апохромат ($F/1.8$) с фокусным расстоянием 109 мм и сменные оптические элементы — ИФП, дифракционные решетки, светофильтры, анализатор поляризации, фазовые пластинки, маски и щели. Эквивалентная светосила системы в первичном фокусе 6-м телескопа составляет $F/2.6$. Все оптические поверхности просветлены в диапазоне $3\,600 - 10\,000\text{\AA}$. Просветляющие покрытия нанесены в ИПФ (г. Н. Новгород). Результаты лабораторных измерений пропускания оптики SCORPIO на разных длинах волн приводятся на рис. 2.

Оптическая схема редуктора рассчитана с использованием пакета ZEMAX и оптимизирована под реальные изображения на БТА, которые в среднем составляют $1.5''$. Это позволило реализовать достаточно большое поле зрения прибора без использования асферических поверхностей.

¹ Работы по изготовлению системы быстрого гидрирования планируется завершить в 2005 г.

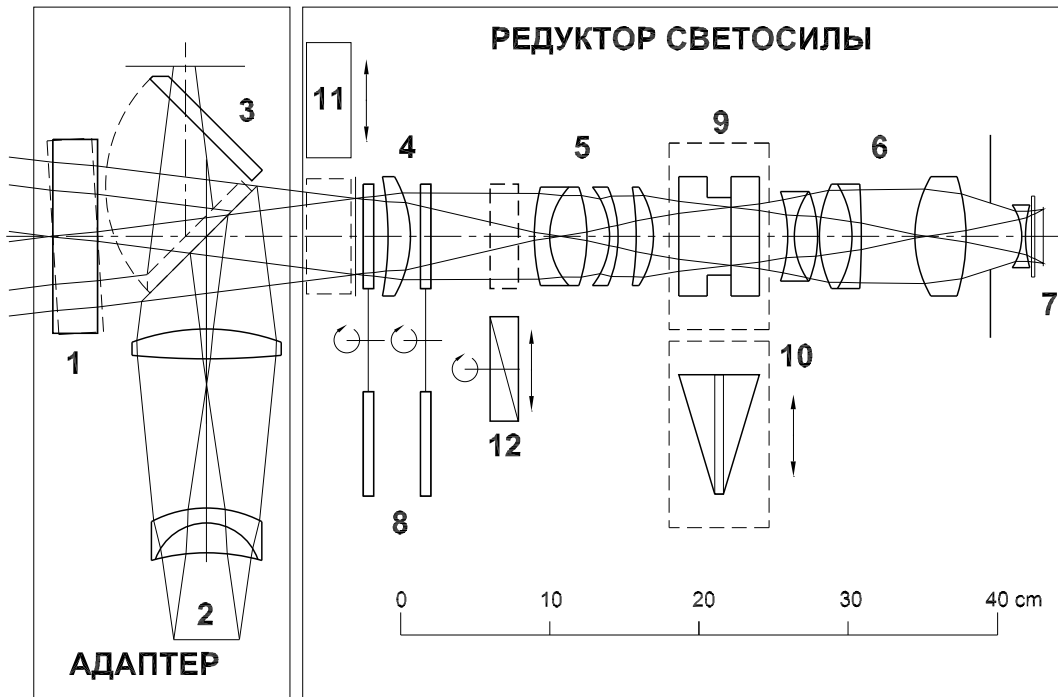


Рис. 1: Оптическая схема SCORPIO: 1 – качающаяся пластина, 2 – оптика калибровки, 3 – плоское зеркало, 4 – полевая линза, 5 – коллиматор, 6 – камера, 7 – ПЗС, 8 – турели со светофильтрами, 9 – ИФП, 10 – призма прямого зрения, 11 – многоцелевой блок, 12 – анализатор поляризации.

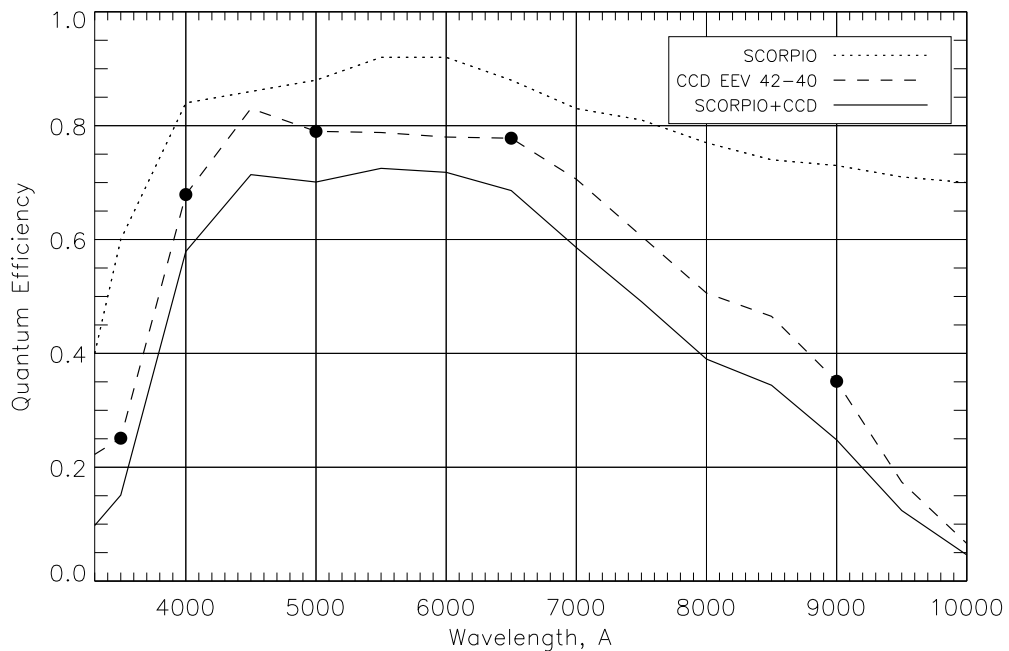


Рис. 2: Вид кривой пропускания оптики SCORPIO, кривой квантовой эффективности EEV-42-40 и кривой полной квантовой эффективности (SCORPIO+ПЗС). Жирными точками отмечены данные фирмы-изготовителя, пунктир соответствует нормированной кривой квантовой эффективности для аналогичной ПЗС, работающей на телескопе TNG.

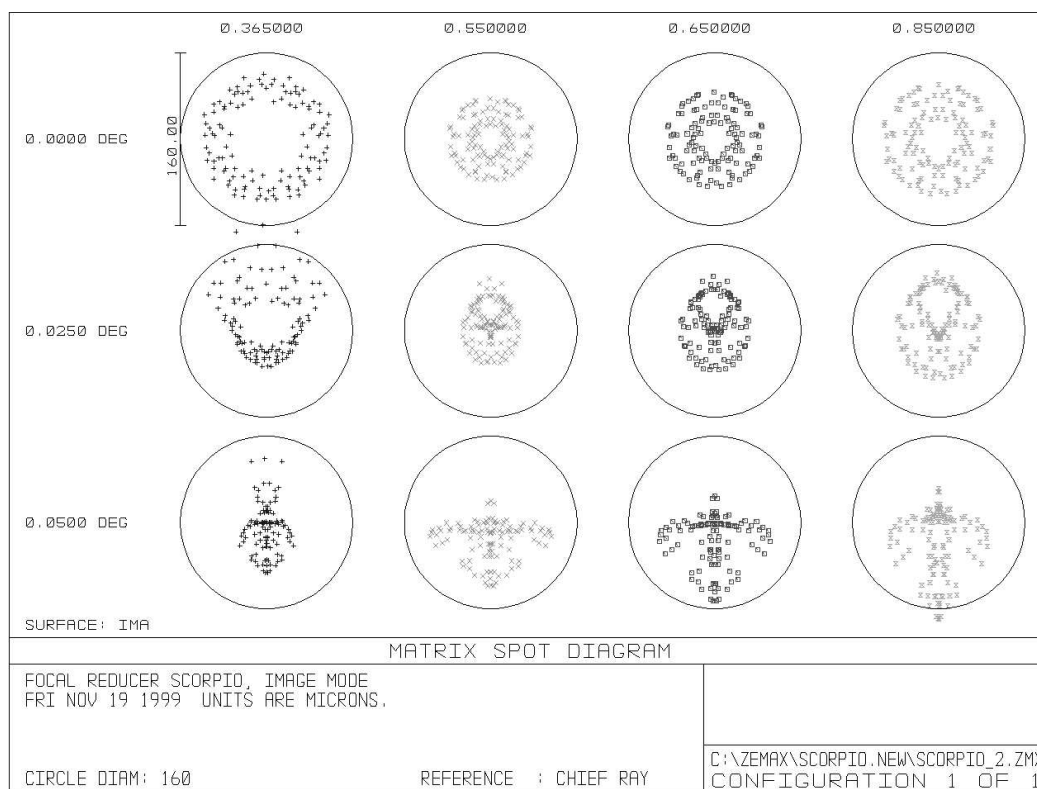


Рис. 3: Точечная диаграмма оптики SCORPIO в режиме прямых изображений в фокальной плоскости светоприемника для фильтров B, V, R, I. Диаметр кружка соответствует $2''$.

Для апохроматизации в видимом диапазоне длин волн в редукторе используется комбинация стекол СТК-12 и ОК-4, которые имеют разность чисел Аббе больше 37. На рис.3 показана точечная диаграмма SCORPIO, рассчитанная для всего оптического тракта с учетом aberrаций главного зеркала БТА. Оптика коллиматора компенсирует кому и кривизну поля главного зеркала телескопа, что позволяет отказаться от использования в наблюдениях штатного непросветленного линзового корректора. Расчетное распределение энергии на разных расстояниях от центра поля зрения показано на рис. 4. Как видно из рис.3, оптика SCORPIO имеет остаточный астигматизм на краю поля зрения, который практически не влияет на качество изображений при атмосферных изображениях $1.5-2''$. При качестве атмосферных изображений лучше $1-1.5''$ рабочее поле зрения уменьшается до 4 угловых минут. Aberrации объектива камеры исправлены для плоского поля 30×30 мм и реальный кружок рассеяния камеры не превышает 50 мкм в рабочем спектральном диапазоне. На рис. 5 показаны точечные диаграммы прибора при работе в спектральном режиме с решеткой 300 штр/мм. Как следует из расчета, вторичный спектр SCORPIO не превышает 100 мкм, а хроматизм положе-

ния не более $0.5''$ на краю поля зрения во всем видимом диапазоне длин волн.

Вынос выходного зрачка от последней поверхности коллиматора 60 мм. Расстояние между последней линзой коллиматора и первой камерного объектива составляет 90 мм. Диаметр коллимированного пучка 40 мм. Рабочий участок камеры равен 14 мм. Эквивалентное фокусное расстояние редуктора, установленного на БТА, равно 15.6 м, что соответствует масштабу изображения $75 \text{ мкм}/''$. Линейный размер невиньетированного поля зрения составляет 28×28 мм в плоскости приемника.

Конструктивно редуктор выполнен в виде отдельных блоков, смонтированных в общем корпусе и расположенных в следующем порядке (по направлению от переднего фланца):

- вводимый перед фокальной плоскостью многощелевой блок;
- две вращающиеся турели;
- вводимый перед коллиматором анализатор поляризации;
- механизм фокусировки коллиматора;
- механизм ввода/вывода в коллимированный пучок диспергирующего элемента.

Редуктор содержит две турели с шестью пози-

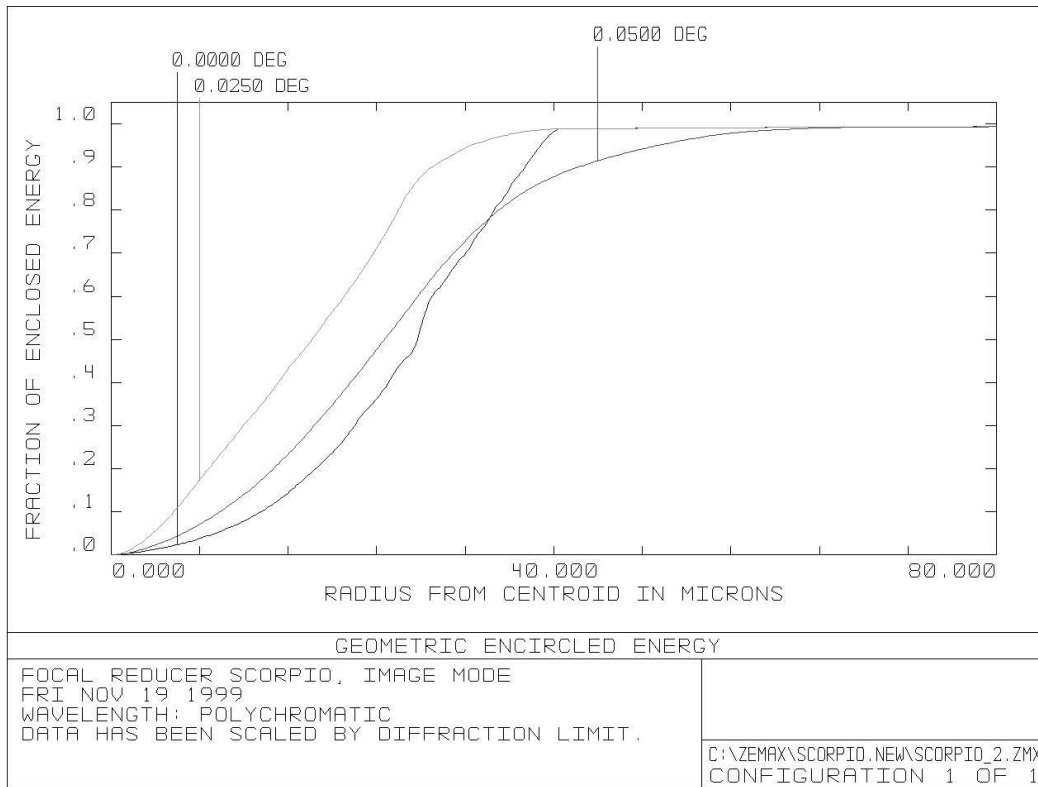


Рис. 4: Полихроматическое распределение энергии в кружке рассеяния SCORPIO в фокальной плоскости светоприемника для источника размером $1''$. Масштаб изображения $75 \text{ мкм}/''$.

циями (0...5) для ввода в пучок различных сменных элементов — светофильтров, щелей, масок и пр. Турель 1 располагается в фокальной плоскости телескопа, а турель 2 — за полевой линзой, перед коллиматором. В турели 1 обычно установлены средне- и узкополосные интерференционные фильтры, а также щель для спектральных наблюдений (позиция 3). В турели 2 — широкополосные стеклянные светофильтры и маска для бесщелевой спектроскопии (позиция 5). Все устанавливаемые в турель элементы смонтированы в байонетных оправках, позволяющих оперативно производить их замену. Позиция 0 в каждой из турелей всегда остается свободной, чтобы при наблюдениях могли использоваться все установленные светофильтры.

Между коллиматором и камерой расположена каретка с двумя переключаемыми позициями (номера 0 и 1) для ввода в параллельный пучок диспергирующих элементов (интерферометров Фабри-Перо или призмы прямого зрения). При этом призмы могут закрепляться только в позиции 0, а ИФП — только в позиции 1. Для визуального контроля точности настройки выведенного из пучка ИФП предусмотрена неоновая лампа, установленная на подвижном кронштейне, и жестко за-

крепленное диагональное зеркало.

Фокусировка камерного объектива осуществляется вручную с помощью микрометрического винта. Оправа коллиматора снабжена шаговым двигателем для дистанционной фокусировки. Механизм фокусировки коллиматора обеспечивает его линейное перемещение в пределах 12 мм с точностью отсчета 0.01 мм. На переднем (ближайшем к главному зеркалу) фланце прибора располагается центральный электромагнитный затвор со временем срабатывания около 0.1 сек.

2.2. Многощелевой блок

Многощелевой блок постоянно установлен внутри редуктора светосилы, вблизи фокальной плоскости телескопа (рис. 1). Он состоит из 16-ти металлических полосок с щелями, перемещаемыми в поле размером $2.9' \times 5.9'$ (рис. 6). Высота щелей — около $18''$, расстояние между центрами щелей — около $22''$. Положение каждой щели фиксируется с помощью двух электромагнитов — удерживающего и захватывающего. Удерживающие магниты закреплены неподвижно, захватывающие укреплены на раме, перемещающейся по одной координате с помощью шагового двигателя. Сопротивление электромагнитов около 90 Ом, напряжение на

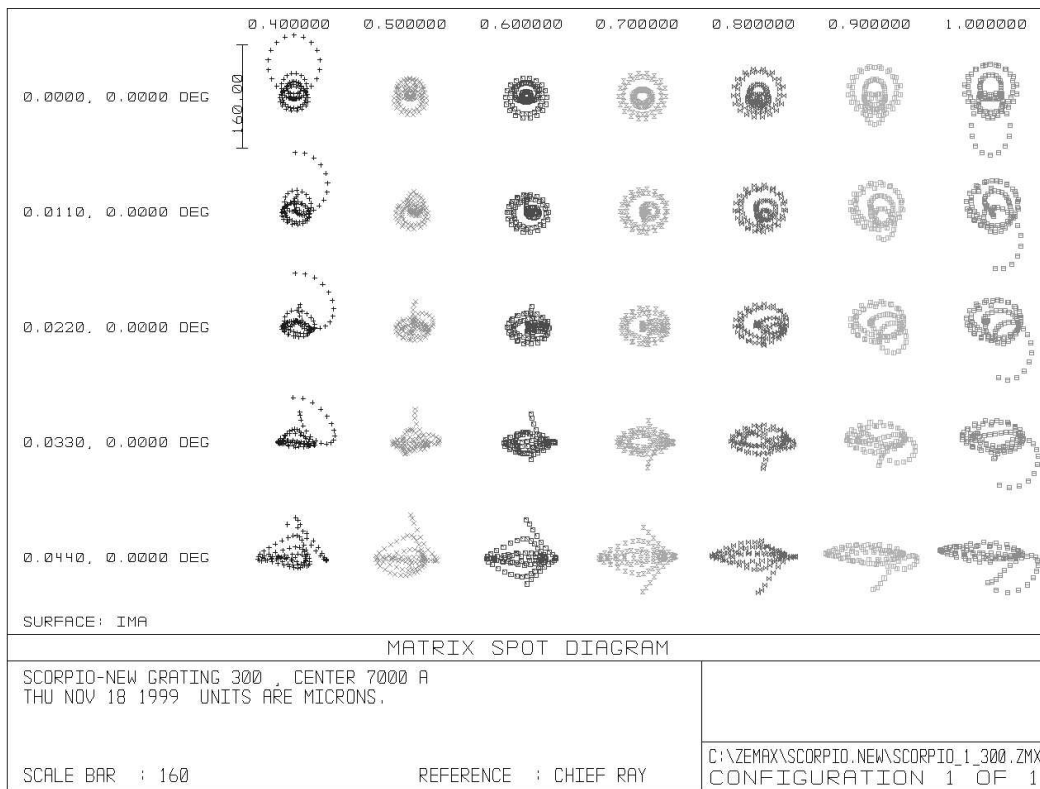


Рис. 5: Точечная диаграмма оптики SCORPIO в спектральном режиме в фокальной плоскости светоприемника для размера источника 1" и решетки 300 штр/мм.

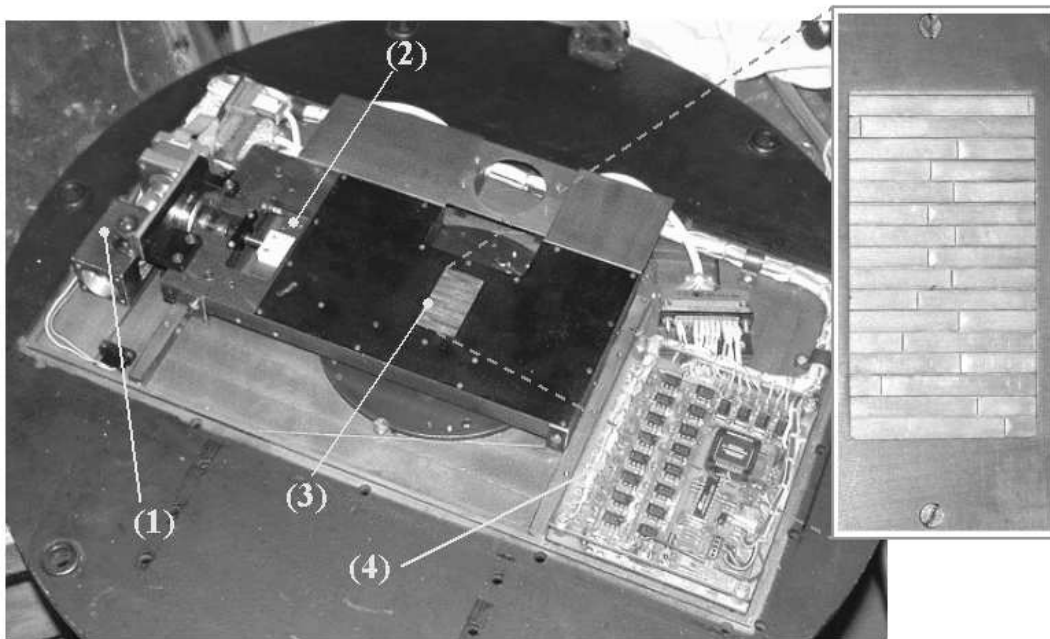


Рис. 6: Фотография многоцелевого блока. (1) — механизм ввода-вывода блока из пучка; (2) — перемещаемая рамка с захватывающими магнитами; (3) — стальные полоски со щелями (показанные на увеличенном фото справа); (4) — плата с управляющим микропроцессором.

удерживающих магнитах 5 В, на захватывающих 12 В. Отдельный электромагнит фиксирует положение одновременно всех щелей в фокальной плоскости. Устройство вводится в пучок с помощью шагового двигателя. Время полной расстановки всех щелей (при требуемой точности 0.2 – 0.3'') составляет около 10 минут.

2.3. Спектрополяриметр

В качестве анализатора линейной поляризации используется пластина Савара толщиной 14 мм, разводящая пучки взаимно перпендикулярной поляризации на 9'' в фокальной плоскости. Анализатор может вращаться вокруг оси, принимая два фиксированных положения, с углами поворота 0 и 45°. Ввод-вывод анализатора в световой пучок и его поворот осуществляется шаговым двигателем. Для измерения круговой поляризации во вторую турель устанавливается ахроматичная четвертьволновая пластина толщиной 6 мм, работающая в диапазоне 0.38-0.8 мкм. В табл. 2 приведены характеристики используемой нами пластины — изменение величины разности фаз и угла отклонения оптической оси для разных длин волн.

2.4. Адаптер первичного фокуса

Платформа-адаптер закрепляется на поворотном столе в кабине первичного фокуса БТА и применяется для гидирования по внесосевым звездам и для засветки спектрографа калибровочными лампами. На ней может быть установлен как фокальный редуктор, так и другие устройства, например спектрограф MPFS.

В адаптере имеются два прямоугольных поля для поиска гидировочных звезд². Центры полей отстоят на 12' от центра поля зрения. В каждом из полей находится жгут световодов, перемещаемый с помощью шаговых двигателей в прямоугольной системе координат (см. рис. 7). Внеосевой линзовый корректор, установленный перед каждым гидировочным полем, компенсирует кому главного зеркала телескопа. Эквивалентное фокусное расстояние с корректором равно 19.2 м, так что перемещение световодов на 1 мм соответствует 10.7''. Пределы перемещения световодов составляют 8.5' × 4.5', диаметр поля зрения жгута световодов — около 40''.

Плоское диагональное зеркало, обозначенное как (3) на рис. 1 и как (2) на рис. 7, имеет два

Таблица 2: Характеристики $\lambda/4$ пластины

$\lambda(\text{Å})$	Сдвиг фазы (°)	Угол (°)
3800	81.4	-4.1
4000	87.1	-1.3
4500	90.0	-0.3
5000	90.7	0
5500	91.0	-0.3
6000	91.3	-0.5
6500	91.5	-0.5
7000	91.4	-0.5
7500	90.6	-0.3
8000	88.7	-0.1

фиксированных положения: “Fibers” и “Field”. В положении “Fibers” зеркало выведено из пучка и перебрасывает изображения со жгутов световодов на телевизионный подсмотр. В положении “Field” зеркало перекрывает центральный пучок света от телескопа и перебрасывает в подсмотр изображение центра поля зрения прибора. Размер поля на подсмотре 3' × 2'. Этот режим используется при грубом наведении телескопа на объект в поле. Кроме того, при таком положении зеркала в спектрограф перебрасывается свет от калибровочных ламп. В центр поля зрения и в центры жгутов световодов проецируются изображения крестов с регулируемой подсветкой.

Оптическая схема адаптера содержит оптику осветителя калибровки (рис. 1), формирующую на входе редуктора сходящийся пучок со светосилой, эквивалентной светосиле телескопа ($F/4$). Такая схема тракта калибровки формирует выходной зрачок системы там же, где находится изображение зеркала телескопа, что позволяет проводить не только корректную калибровку шкалы длин волн лампой линейчатого спектра, но и калибровку пропускания системы по полю в различных режимах работы (“плоское поле”).

Входная площадка тракта калибровки освещается через интегрирующую сферу (шар Ульбрихта) двумя калибровочными лампами: с He-Ne-Ar наполнением для калибровки шкалы длин волн (далее — лампа NEON), и галогеновой лампой непрерывного спектра для создания “плоского поля” (далее лампа — FLAT).

Для ускорения процесса наведения и поиска гидировочных звезд мы используем пакет программ IDENTSTAR, написанный на языке IDL, позволяющий по переданным из управляющего компьютера БТА координатам и ориентации поворотного стола вычислить текущие инструментальные координаты полей звезд гидирования в поле зрения платформы. Положения и звездные величини

² Поскольку монтаж 6-м телескопа альтазимутальная, то в процессе гидирования необходимо контролировать как положение телескопа по A и z , так и вращение поля зрения. Поэтому используются две гидировочные звезды

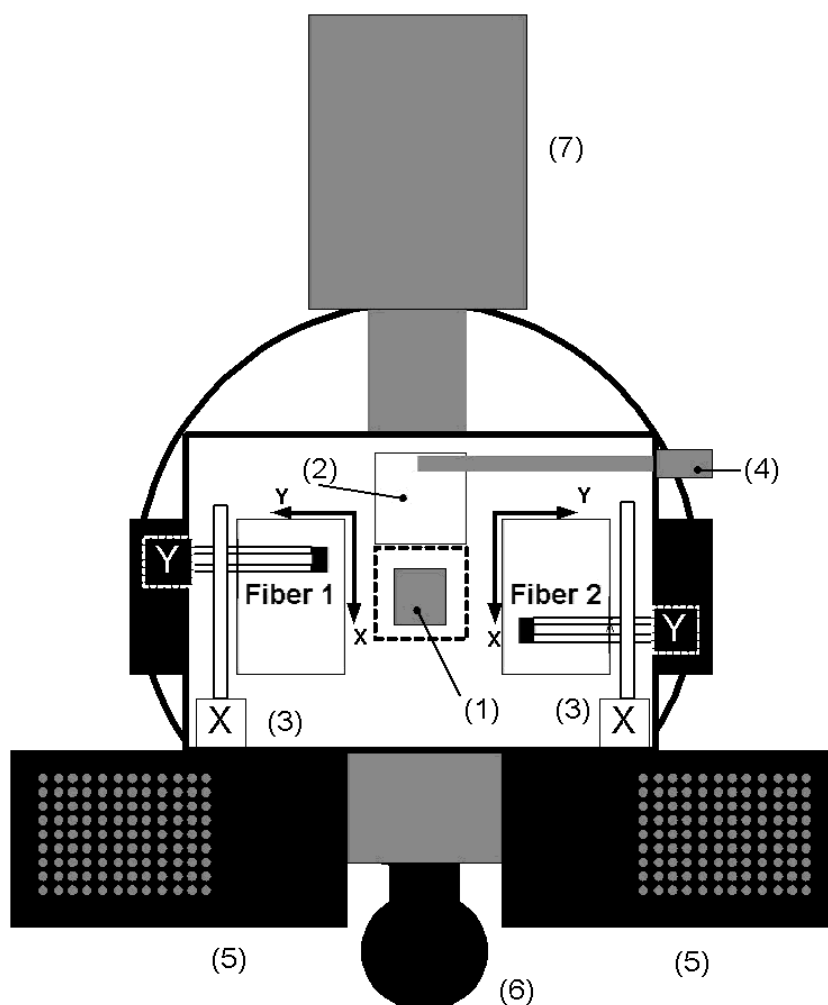


Рис. 7: Платформа-адаптер первичного фокуса. Вид со стороны главного зеркала БТА. (1) — затвор, (2) — плоское зеркало, (3) — механизмы перемещения световодов в гидировочных полях, (4) — подсветка крестов, (5) — блоки питания и микропроцессор, (6) — интегрирующая сфера с калибровочными лампами NEON и FLAT, (7) — телевизионный подсмотр.

ны звезд в этом поле определяются из каталога USNO2.0. На рис. 8 показан вид интерфейса программы поиска звезд. Программа автоматически выбирает ярчайшие звезды в пределах движения полей гидирования. При необходимости наблюдатель имеет возможность выбрать другие звезды в интерактивном режиме. Инструментальные координаты звезд передаются по сети в управляющую редуктором и платформой программу. Как правило, время поиска и установки звезд гидирования не превышает 3–5 минут.

2.5. ПЗС-приемник

С 2000 по 2003 г. в качестве детектора применялась ПЗС-матрица ТК1024 размером 1024×1024 элемента. Начиная с апреля 2003 г., на SCORPIO используется ПЗС-матрица EEV-42-40

размером 2048×2048 элементов. Основные параметры обоих детекторов приводятся в табл. 3. Следует отметить, что для EEV-42-40 возможен программный выбор режимов, характеризующихся различными значениями кванта усиления (gain), скорости и шумов считывания. На рис.2 показан график квантовой эффективности для EEV-42-40. График построен на основании паспортных данных, приводимых изготовителями чипа (жирные точки на рисунке), и нормированной кривой квантовой эффективности для аналогичной ПЗС, работающей на телескопе TNG.

Охлаждение детектора осуществляется жидким азотом. Весь комплект для наблюдений с ПЗС (криостат, электроника и программы управления) разработан и изготовлен в Лаборатории перспективных разработок САО РАН.

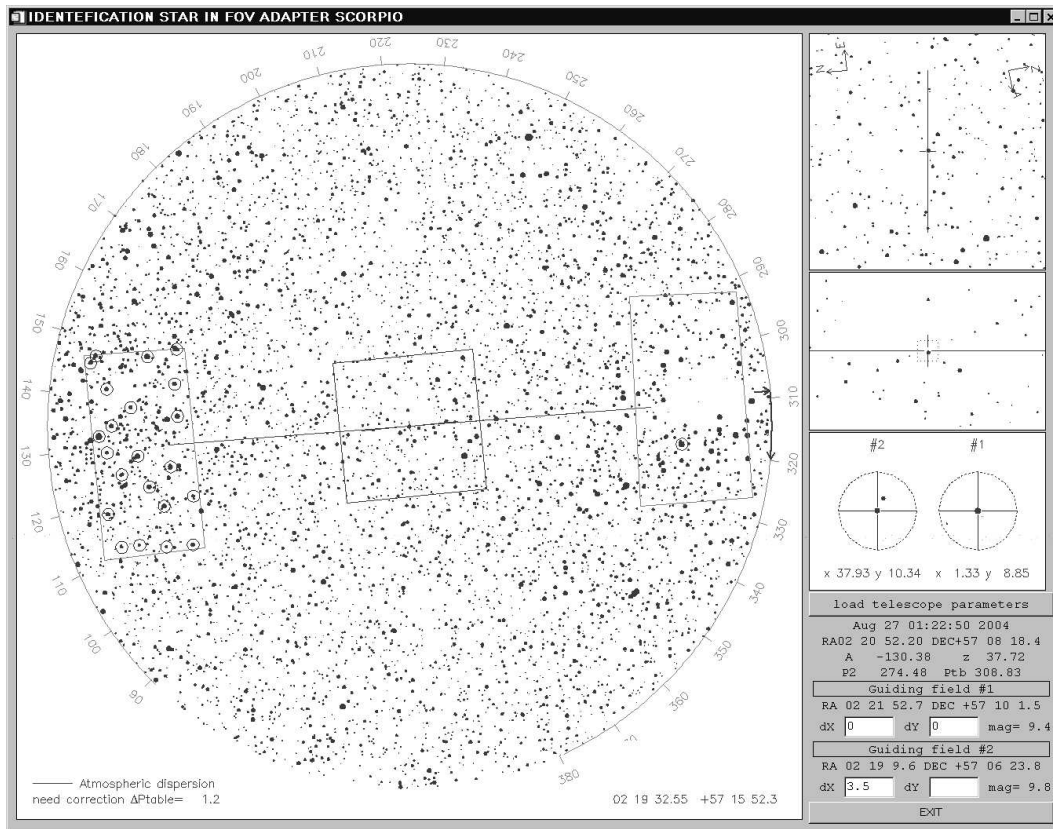


Рис. 8: Меню программы отождествления и поиска гидрирующих звезд. Правые поля (сверху вниз) — поле зрения редуктора SCORPIO с отмеченным положением щели, поле зрения телевизионного под-смотра в режиме наведения, поле зрения в режиме гидрирования. На большом левом поле прямоугольниками отмечены пределы перемещения гидрирующих полей, которые показаны окружностями.

(<http://www.sao.ru/hq/adlab/>).

Как видно из табл. 3, используемые приемники обладают высокой квантовой эффективностью, низкими шумами и малым темновым током. Кроме того, оба детектора имеют почти идеальную “косметику”: малое число “плохих столбцов” и “горячих пикселей”. Пожалуй, единственным недостатком является интерференция проходящего света (“муар”), которая наблюдается для длин волн более 7500\AA у ПЗС ТК1024, и более 6600\AA — у ЕЕV-42-40. Для правильного вычитания интерференционного узора используется соответствующая методика проведения наблюдений (см. главу 6).

3. Сменные элементы

3.1. Щели и маски

Длинная щель для спектральных наблюдений установлена в позиции 3 на турели 1. Ширина щели фиксирована — $1''$, длина — около $6'$, т.е. она перекрывает все поле зрения. По желанию на-

блюдателя в турель 1 может быть установлена щель произвольно меняющейся ширины или маска, формирующая пунктирную щель (dash) для спектрополяриметрических наблюдений. Высота каждой щели при этом составляет $7.5''$, а расстояние между центрами щелей — $9.8''$. Пунктирная щель обычно устанавливается в позиции 5.

Наблюдения звезд — спектрофотометрических стандартов рекомендуется проводить в режиме бесщелевой спектроскопии. При этом для выделения объекта в центре поля зрения используется круглая маска, обычно устанавливаемая в позиции 5 на турели 2. Она обеспечивает невиньетированное поле зрения диаметром около $30''$.

3.2. Светофильтры

Все используемые на SCORPIO светофильтры снабжены металлическими байонетными оправами с внутренним диаметром 72 мм , позволяющими легко и быстро производить смену фильтров в турелях с помощью специального фильтросъемника. Говоря в дальнейшем о диаметре фильтров,

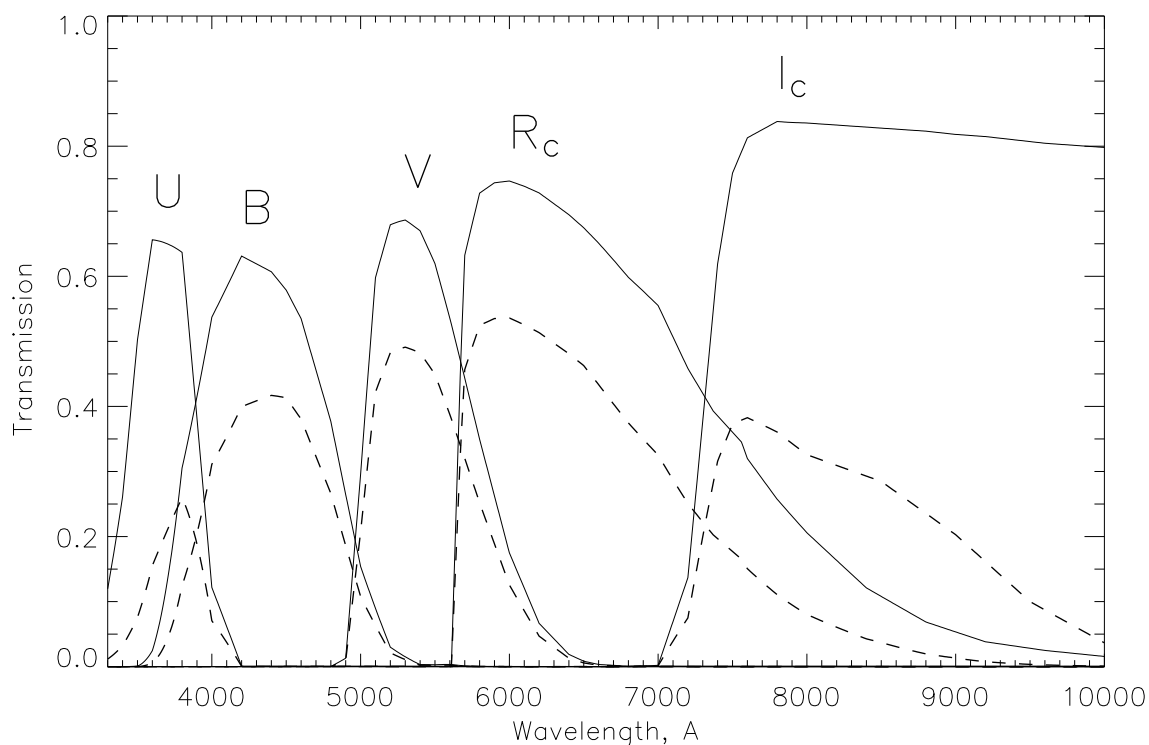


Рис. 9: Кривые спектрального пропускания стеклянных светофильтров (сплошные линии). Штрихованные кривые — то же с учетом пропускания SCORPIO и кривой чувствительности ПЗС EEV-42-40.

мы будем иметь в виду их световой (внутренний) диаметр, который меньше диаметра самих оправ.

3.2.1. Широкополосные фильтры

Стеклянные широкополосные светофильтры используются для реализации в режиме прямых снимков фотометрической системы Джонсона-Казинса (UBVR_cI_c). Диаметр светофильтров — 70 мм, толщина — 4–5 мм. Теоретические кривые спектрального пропускания фильтров с учетом квантовой эффективности SCORPIO и ПЗС приведены на рис.9. Характеристики цветных оптических стекол (марка стекла и толщина), из которых составлены светофильтры, приводятся в табл.4. Фильтры BVR_cI_c обычно постоянно установлены в турели 2.

Таблица 3: Параметры используемых ПЗС

	Детектор	
	TK1024	EEV-42-40
Тип	Thin, back-illuminated	
Формат с учетом overscan	1024 × 1024 1034 × 1034	2048 × 2048 2068 × 2072
Размер пикселя, мкм	24	13.5
Масштаб ¹ , "/px	0.32	0.18
Поле зрения ¹ , arcmin	5.4	6.1
Макс. квант. эфф., %	80	83
Gain, ē/ADU	1.3	0.50 и 2.07
Шум считывания, ē	3	1.8-4
Темновой ток, ē/мин	0.1	0.03

¹ До сентября 2003 года применялась оптика, дающая эквивалентную светосилу $F/2.9$, при этом на TK1024 масштаб составлял $0.28''/\text{px}$, а поле зрения $4.8'$.

Таблица 4: Характеристики стекол, составляющих широкополосные фильтры

Фильтр	Марка и толщина стекол
U	УФС-6 (1.0 мм) + СЗС-21 (3.0 мм)
B	СС-5 (1.5 мм) + СЗС-22 (2.5 мм)
V	СЗС-22 (1.0 мм) + ЖС-18 (3.0 мм)
R _c	СЗС-27 (2 мм) + ОС-13 (3 мм)
I _c	ФС-6 (2.0 мм) + КС-15 (2.0 мм)

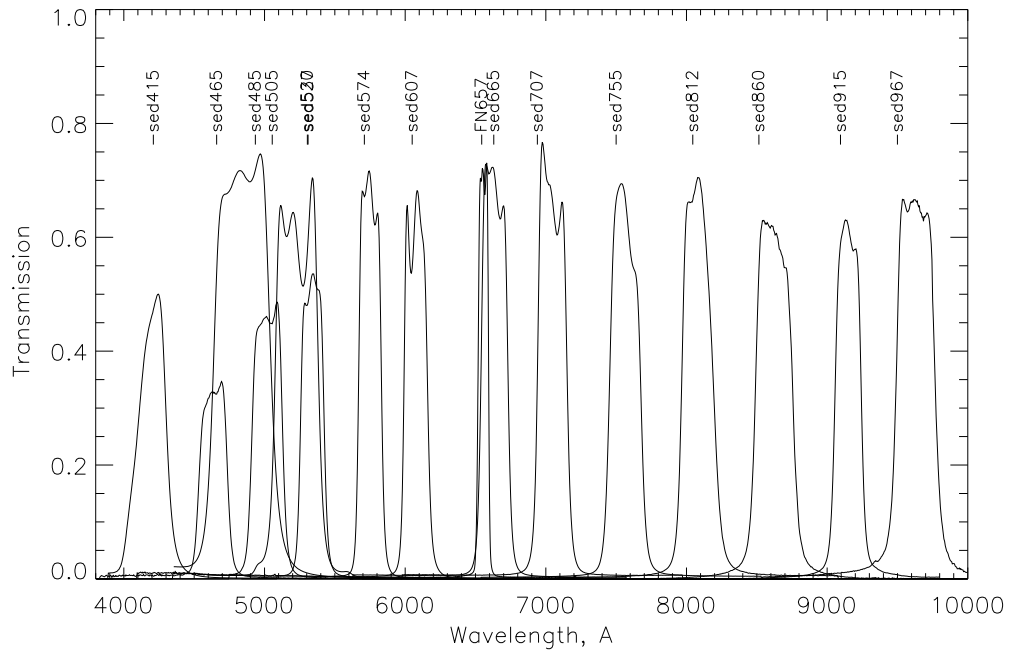


Рис. 10: Кривые спектрального пропускания среднеполосных фильтров.

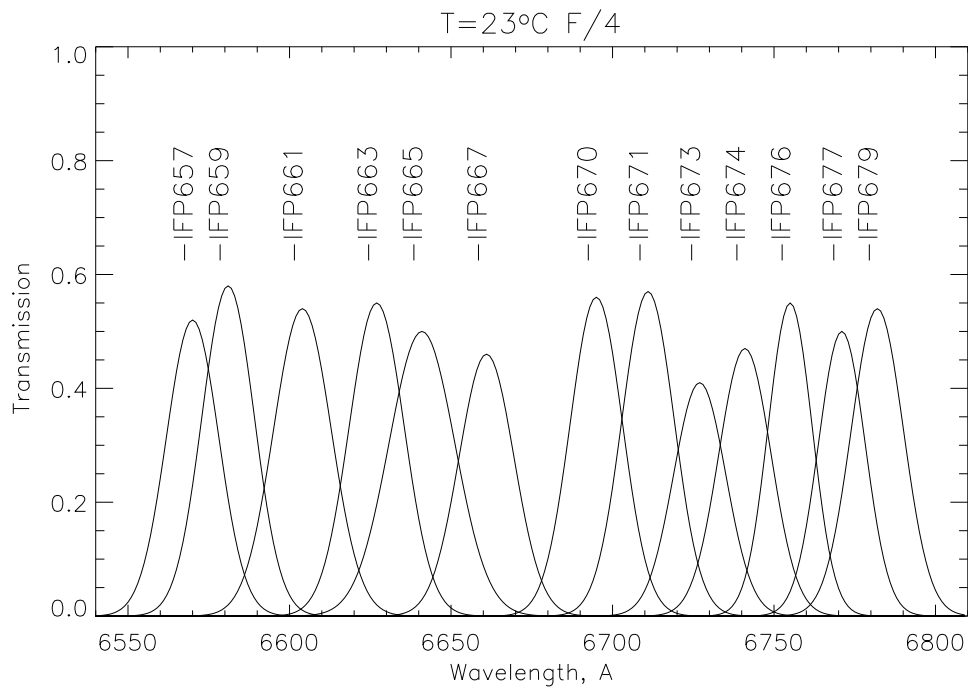


Рис. 11: Кривые спектрального пропускания "красных" фильтров для наблюдений с ИФП.

3.2.2. Среднеполосные фильтры

Набор среднеполосных интерференционных фильтров диаметром 72 мм с полушириной полосы пропускания $FWHM = 160 - 400\text{Å}$ изготовлен в

НИИППе (г. Москва). В режиме прямых снимков эти светофильтры могут применяться для различных задач, таких как построение спектрального распределения энергии (SED) для слабых объектов или получение изображений протяжен-

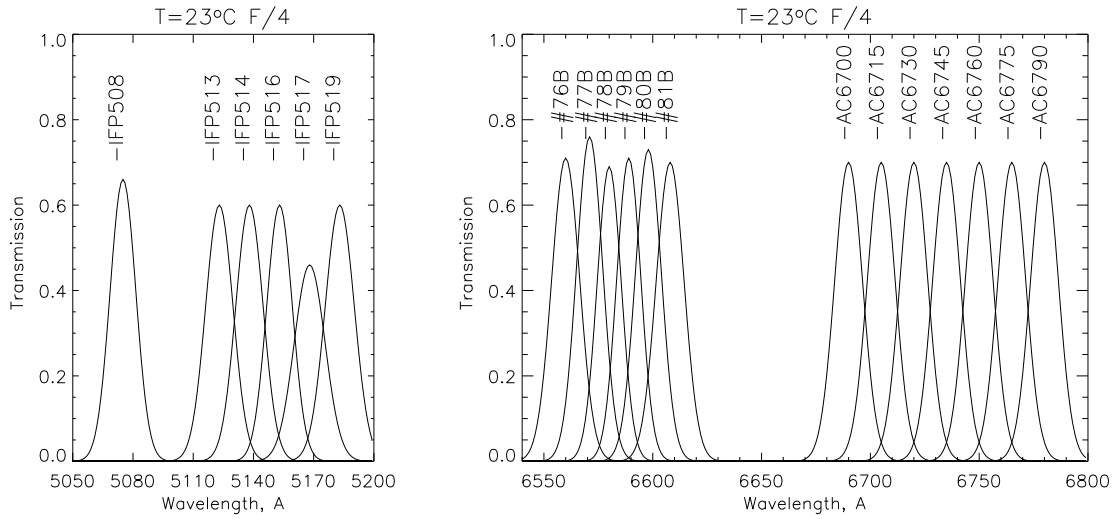


Рис. 12: Кривые спектрального пропускания “зеленых” фильтров для наблюдений с ИФП (слева) и “красных” фильтров, изготовленных Andover Corporation, а также фильтров из набора Бюраканской АО (справа).

ных объектов в различных эмиссионных линиях и в континууме. И.Д. Караченцевым предоставлен 50-мм фильтр с шириной полосы $FWHM = 75\text{\AA}$ (FN657), центрированный на длину волны линии H_{α} , который используется для построения карт распределения ионизованного водорода в туманностях и близких галактиках. Интерференционные фильтры необходимо устанавливать только на турели 1 (в фокальной плоскости телескопа), чтобы

избавиться от вариаций центральной длины волны по полю, связанных с изменением угла падения лучей на фильтры в турели 2.

Кривые спектрального пропускания фильтров, измеренные с помощью спектрографа MPFS в прямом фокусе БТА (т.е. в сходящемся пучке $F/4$), приведены на рис.10, их основные характеристики — в табл. 5. К сожалению, с MPFS не удается измерить кривые для двух самых синих фильтров (SED345 и SED375), поэтому для них в табл. 5 приведены только паспортные характеристики, измеренные изготовителем для случая нормального падения лучей на поверхность фильтра.

Таблица 5: Параметры среднеполосных фильтров

Название	T_{max} , %	λ_c , \AA	$FWHM$, \AA
SED345	60	3450	420
SED375	75	3760	300
SED415	50	4200	212
SED465	35	4620	205
SED485	75	4850	409
SED505	49	4990	221
SED520	70	5230	310
SED537	54	5310	168
SED574	72	5730	161
SED607	68	6060	167
SED665	73	6620	190
FN657	73	6555	75
SED707	77	7040	207
SED755	69	7560	220
SED812	71	8090	222
SED860	63	8620	269
SED915	63	9150	188
SED967	67	9616	280

3.2.3. Узкополосные фильтры

При наблюдениях с интерферометром Фабри-Перо для выделения требуемого участка спектра используются узкополосные фильтры с шириной полосы пропускания $FWHM = 10 - 20\text{\AA}$. Для наблюдений галактик необходим набор фильтров, центрированных на длину волны изучаемой эмиссионной линии, смещенной из-за эффекта Доплера. В настоящий момент SCORPIO укомплектован несколькими наборами таких фильтров.

В НИИППе (Москва) были изготовлены фильтры диаметром 55 мм, которые могут использоваться для наблюдений в области линии [OII] $\lambda 5007$ (“зеленые”) и вблизи линий H_{α} , [NII] $\lambda 6548/6583$, [SII] $\lambda 6716/6731$ (“красные”). Кривые спектрального пропускания этих фильтров, измеренные с помощью спектрографа MPFS в прямом фокусе БТА (в сходящемся пучке $F/4$), приве-

Таблица 6: Параметры узкополосных фильтров ($T=23^\circ\text{C}$, $F/4$)

Название	T_{max} , %	λ_c , Å	FWHM, Å
IFP508	66	5075	15
IFP513	60	5123	16
IFP514	60	5138	16
IFP516	60	5153	15
IFP517	46	5168	18
IFP519	60	5183	17
IFP657	52	6570	19
IFP659	58	6581	19
IFP661	54	6604	21
IFP663	55	6627	20
IFP665	50	6641	24
IFP667	46	6661	20
IFP670	56	6695	19
IFP671	57	6711	19
IFP673	41	6727	19
IFP674	47	6741	19
IFP676	55	6755	16
IFP677	50	6771	17
IFP679	54	6782	19
#76B	71	6560	15
#77B	76	6571	14
#78B	69	6580	13
#79B	71	6589	13
#80B	73	6598	14
#81B	70	6608	15
AC6700	60	6690	15
AC6715	60	6705	15
AC6730	60	6720	15
AC6745	60	6735	15
AC6760	60	6750	15
AC6775	60	6765	15
AC6790	60	6780	15

дены на рис. 11 и 12, их основные характеристики — в табл. 6. Спецификация фильтров начинается с “IFP”.

50-мм фильтры (#76B, #77B, #78B, #79B, #80B и #81B) для наблюдения вблизи линии H_α предоставлены нашими коллегами из Бюраканской АО (Армения). Фильтры были изготовлены фирмой Barr Associates Inc. (USA) по заказу Марсельской обсерватории. Кривые спектрального пропускания и характеристики фильтров, измеренные заказчиком и пересчитанные нами для случая наблюдений в пучке $F/4$, приводятся на рис. 12 и в табл. 6.

7 фильтров диаметром 50 мм (обозначенные как AC6700...AC6790) для наблюдений вблизи линии H_α , изготовленные фирмой Andover Corpora-

tion (USA), предоставлены Дж. Барбиери из обсерватории г. Падуя (Италия). Паспортные кривые спектрального пропускания и характеристики фильтров, пересчитанные нами для случая наблюдений в пучке $F/4$, приводятся на рис. 12 и в табл. 6.

Для наблюдений с вышеописанными фильтрами доступны объекты со скоростями от -200 до $+10\,000\text{ км с}^{-1}$ в линии H_α и от $+3\,500$ до $+11\,000\text{ км с}^{-1}$ в линии [OIII] $\lambda 5007$.

Необходимо отметить, что центральная длина волны пропускания интерференционных фильтров (λ_c) изменяется линейно с температурой (T):

$$\Delta\lambda_c \approx 0.15 \cdot \Delta T.$$

3.3. Гризмы

SCORPIO укомплектован набором прозрачных призм (комбинация прозрачной дифракционной решетки и 2-х призм). Гризмы устанавливаются на каретке диспергирующих элементов в позиции 0 на клиновидных направляющих. Опора призм позволяет вращать их вокруг оптической оси, так как при наблюдениях в режиме “длинная щель” направление дисперсии должно совпадать с направлением оси X на ПЗС, а в режиме многощелевой спектроскопии — с направлением оси Y (из-за конструктивной особенности прибора длинная щель в турели 1 перпендикулярна щелям на многощелевом блоке).

Основные параметры призм приводятся в табл. 7. Здесь спецификация “GR” обозначает прозрачные решетки с поверхностным рельефом, представляющие собой реплики с нарезных решеток, изготовленные в ГОИ им. С.И. Вавилова (Санкт-Петербург). Спецификация “VRHG” обозначает объемные фазовые голографические решетки, которые отличаются высоким процентом пропускания и малым уровнем рассеянного света (Барден и др., 2000). Основной набор таких решеток был изготовлен фирмой Wasatch Photonics (USA, <http://wasatchphotonics.com>) по заказу Института астрономии РАН (Москва) и предоставлен CAO в рамках совместных исследований. Решетки VRHG1720 и VRHG2310 любезно предоставлены университетом г. Падуя (Италия). Кривые квантовой эффективности SCORPIO в спектральном режиме показаны на рис. 13.

3.4. Сканирующие ИФП

Сканирующий пьезоэлектрический интерферометр Фабри-Перо ET-50 устанавливается на каретке диспергирующих элементов в позиции 1. В CAO имеются два ИФП, предоставленные

Таблица 7: Параметры стеклянных призм

Название	Штрих/мм	Спектр. диапазон ¹ $\lambda_1 - \lambda_c - \lambda_2$, Å	Дисперсия ² Å/px	Спектр. разрешение $\delta\lambda$, Å
GR300	300	3500-6500-9500	3.5	20
GR300G	300	3500-6500-9500	3.5	20
GR300R	300	5500-8000-10000	3.5	20
GR600G	600	3700-5400-7200	1.7	10
GR600R	600	6600-8300-10000	1.7	10
GR1200G	1200	4200-5050-5900	0.85	5.0
VPHG550G	550	3100-5100-7300	2.1	10
VPHG550R	550	5900-8000-10100	2.1	10
VPHG1200G	1200	3900-4800-5700	0.88	5
VPHG1200R	1200	5700-6500-7400	0.86	5
VPHG1720	1720	6250-6750-7250	0.50	2.5
VPHG1800R	1800	6100-6580-7100	0.52	2.5
VPHG2300G	2300	4800-5150-5600	0.38	2.2
VPHG2310	2310	4800-5200-5600	0.35	2.2
VPHG3000B	3000	3500-3800-4100	0.20	1.5

¹ λ_c – центральная длина волны² В центре, для ПЗС EEV-42-40

Таблица 8: Параметры интерферометров Фабри-Перо

	Интерферометр	
	FP260	FP500
Порядок интерференции ¹	235	501
Спектральное разрешение, $\delta\lambda^1$	2.5 Å	0.7 Å
Спектральный интервал, $\Delta\lambda^1$	29Å	13Å
Добротность $F^1 = \Delta\lambda/\delta\lambda$	11	17
Количество спектральных каналов n_z	24 ÷ 32	32 ÷ 40

¹ на длине волны 6563 Å

Марсельской (Франция) и Бюраканской (Армения) обсерваториями. Параметры используемых интерферометров приведены в табл. 8. Согласно нашим оценкам, общая квантовая эффективность SCORPIO при наблюдениях с ИФП (телескоп+фильтр+ИФП+ПЗС) составляет около 20% в области H_α .

Наблюдения с ИФП состоят из последовательного получения нескольких десятков изображений интерференционных колец от изучаемого объекта (или калибровочной лампы) при изменении оптического пути между плоскопараллельными пластинками ИФП. Радиус колец является функцией длины волны и расстояния между пластинами интерферометра. Полный набор таких изображений, заполняющий свободный спектральный диапазон интерферометра, называют циклом сканирования, одно накопление — каналом. Управление сканированием (изменением расстояния между плоскопараллельными зеркальными пластинами) осуще-

ствляется посредством специального контроллера Queensgate CS-100, управляемого от персонального компьютера. Количество спектральных каналов (n_z) жестко не регламентируется и может выбираться пользователем по своему усмотрению. Обычно используют 32 канала при работе с FP260 и 36 каналов при наблюдениях с FP500, так как количество каналов должно в 2–3 раза превышать величину добротности (finesse) ИФП.

4. Система управления

4.1. Общее описание

Система управления SCORPIO включает в себя дистанционное управление следующими независимыми блоками:

1. Собственно редуктором светосилы. Здесь управление осуществляется следующими устройствами:

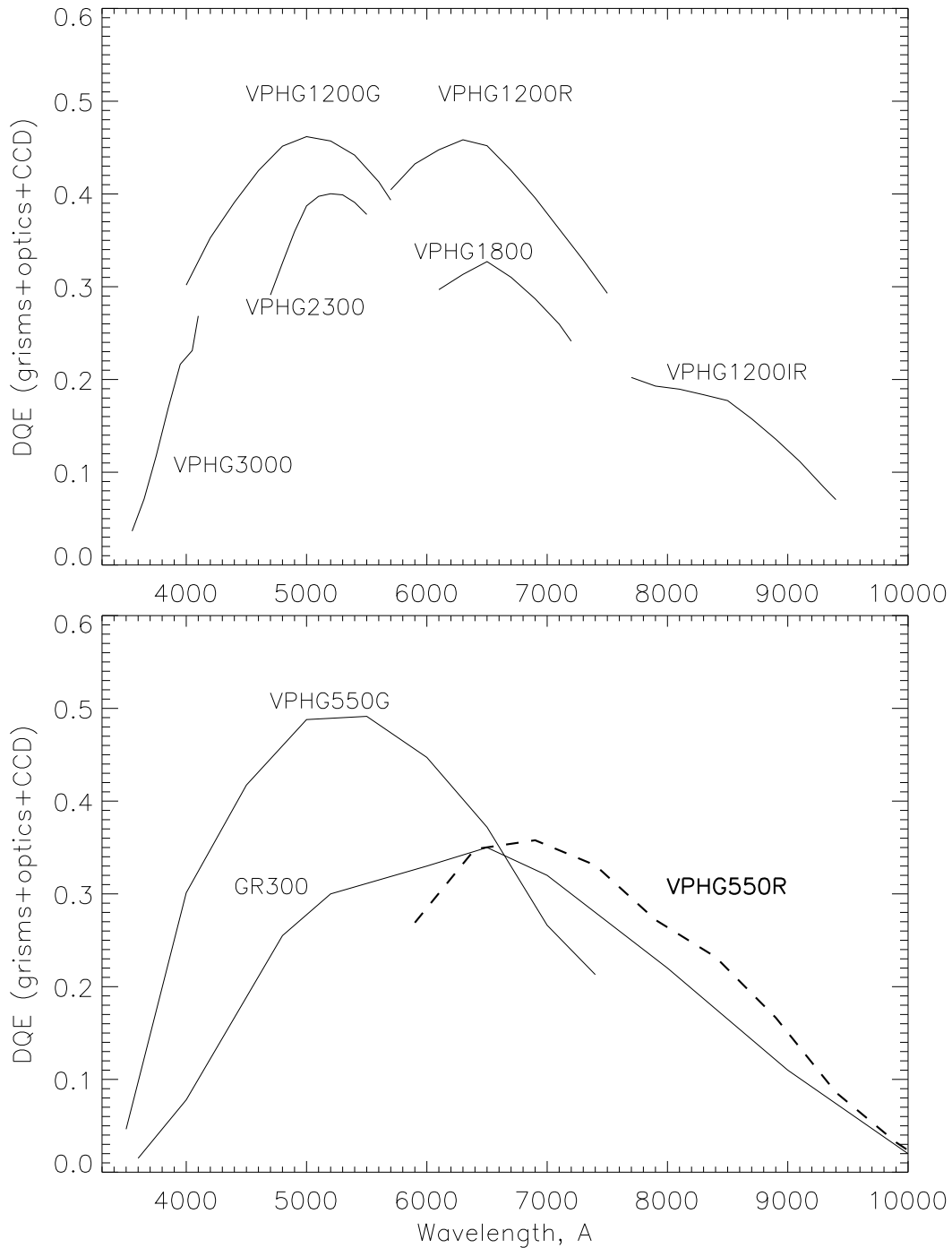


Рис. 13: Расчетные кривые квантовой эффективности при спектральных наблюдениях с различными гризмами, с учетом пропускания оптики SCORPIO и кривой чувствительности ПЗС EEV-42-40.

- двумя турелями светофильтров. Поворот осуществляется шаговым двигателем, на каждой турели установлено два конечных микровыключателя. Первый срабатывает при установке данной турели в положение 0, второй — при установке в любую из 6-ти фиксированных позиций (фиксация позиций — механиче-

ская);

- механизмом фокусировки коллиматора, который состоит из шагового двигателя и двух конечных микровыключателей на пределах фокусировки. Установка требуемого отсчета фокуса в мм проводится по числу шагов, пройденных от конечных выключателей;

- механизмом ввода/вывода диспергирующих элементов. Он включает в себя аналоговый электродвигатель и два концевых микровыключателя на каждой из позиций;

- механизмом ввода/вывода анализатора поляризации, включающим в себя шаговый двигатель и два концевых микровыключателя;

- включением/выключением электромагнитного затвора;

- считыванием температуры с термодатчика, установленного на плате управления.

2. Универсальной платформой первичного фокуса. Здесь дистанционное управление осуществляется следующими устройствами:

- шаговым двигателем установки диагонального зеркала в два положения. В положении FIELD зеркало введено в пучок и перебрасывает в подсмотр изображение поля зрения, а по направлению к редуктору — свет от калибровочных ламп. В положении FIBERS зеркало из пучка выведено и перебрасывает в подсмотр изображения гидрирующих звезд. Пределы перемещений зеркала ограничены концевыми микровыключателями;

- двигателями гидрирующих микроскопов 1 и 2, каждый из которых перемещается двумя шаговыми двигателями по координатам X и Y. Пределы перемещений двигателей ограничены концевыми микровыключателями;

- шаговым двигателем фокусировки изображения в световоде 2, пределы перемещений которого ограничены микровыключателями. За 0 принимается отсчет фокуса посередине между концевыми положениями;

- тремя светодиодами подсветки крестов (два микроскопа и поле). Яркость подсветки меняется дискретно (256 уровней яркости);

- включением/выключением электромагнитного затвора;

- включением/выключением калибровочных ламп NEON и FLAT.

3. Многоцелевым блоком. Здесь дистанционное управление осуществляется следующими устройствами:

- двигателем ввода/вывода многоцелевого блока из светового пучка. Пределы перемещений двигателя ограничены концевыми микровыключателями;

- двигателем перемещения рамы с захватывающими магнитами. Пределы перемещений двигателя ограничены концевыми микровыключателями;

- включением/выключением 16-ти захватывающих, 16-ти удерживающих магнитов, а

также одного (сдвоенного) электромагнита для удержания всех щелей. Малые (отдельные для каждой щели) захватывающие и удерживающие магниты применяются только при расстановке щелей в требуемое положение. Затем они отключаются и включается большой магнит, удерживающий все щели. Такая схема применяется с целью сбережения малых магнитов от преждевременного перегорания.

4. Контроллером управления режимами ПЗС-матрицы.

5. Контроллером управления сканированием ИФП.

4.2. Управление микропроцессорами SCORPIO

Первые три вышеперечисленные устройства (редуктор светосилы, платформа и многоцелевой блок) содержат в себе электронные платы, на каждой из которых установлен микропроцессор. Эти платы (называемые в дальнейшем SCORPIO-1, SCORPIO-2, и SCORPIO-3 соответственно) управляют следующими электромеханическими устройствами:

- SCORPIO-1: 4 шаговых и один аналоговый двигатель, 10 микровыключателей, термодатчик;

- SCORPIO-2: 6 шаговых двигателей и 12 микровыключателей, затвор, 2 лампы, 3 светодиода с 256-ю градациями яркости;

- SCORPIO-3: 2 шаговых двигателя и 4 микровыключателя, 33 электромагнита.

Принятая схема, в которой каждый модуль SCORPIO имеет независимую плату управления, обладает тем преимуществом, что эти модули могут работать в составе других приборов БТА. Такая реализация дистанционного управления прибором позволяет достичь требуемой стабильности при работе с существующими длинными линиями связи 6-м телескопа. Не требуется постоянное управление двигателями и опрос их состояния от управляющего компьютера — эти функции берет на себя микропроцессор. В то же время любые возможные изменения методики наблюдений и программного обеспечения на управляющем компьютере не требуют перепрограммирования микропроцессоров. Оба затвора и лампы могут управляться непосредственно от контроллера ПЗС, а также от тумблеров, размещенных на корпусе редуктора и адаптера.

Все три платы подключаются последовательно на один последовательный порт управляющего компьютера (протокол обмена RS232) через небольшую плату-коммутатор, установленную внутри платформы-адаптера.

Таблица 9: Таблица режимов наблюдений со SCORPIO

Название режима	MODE ¹	Положение подвижных элементов SCORPIO				
		Турель 1	Турель 2	Каретка	Multislit	Анализатор
Прямые снимки	Images	("0"..."5")	("0"..."4")	Hole ("0", "1")	–	–
Интерферометр Ф-П	IFP	("1"..."5")	("0")	IFP ("1")	–	–
Длинная щель	Spectra	slit ("3")	("0")	grism ("0")	–	–
Бесщелевая спектроскопия	Spectra	"0"	mask ("5")	grism ("0")	–	–
Многощелевая спектроскопия	SpectraMUL	"0"	"0"	grism ("0")	введен	–
Спектрополяриметрия	SpectraPOL	dash ("5")	"0"	grism ("0")	–	введен
Поляриметрия в фильтрах	ImagesPOL	("0"..."5")	("0"..."5")	Hole ("0", "1")	–	введен

¹ дескриптор в заголовке FITS-файла

4.3. Управление ПЗС

Контроллер ПЗС установлен в стакане первичного фокуса. Кроме самой ПЗС-матрицы, контроллер управляет затвором редуктора светосилы. Для управления самим контроллером ПЗС-матрицы EEV 42-40 используется система сбора изображений DINA, разработанная в Лаборатории перспективных разработок САО РАН. Программа позволяет производить установку режимов работы контроллера, выполнять накопление изображений с ПЗС-матрицы, осуществлять просмотр изображений и запись их в стандартном FITS-формате.

4.4. Управление ИФП

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо ET-50 фирмы Queensgate управляется с помощью контроллера CS100. Пьезоэлектрические приводы, подключенные к контроллеру, изменяют величину зазора между двумя отражающими поверхностями интерферометра. Параллелизм пластин поддерживается за счет конденсаторного микрометра, посылающего в контроллер сигналы обратной связи. Интерферометр обеспечивает нормальную работу в диапазоне температур от 0 до 50 °С.

Контроллер во время наблюдений находится в непосредственной близости от места установки ИФП и соединяется с последним посредством гибкого многожильного кабеля длиной до 3-х метров. Последовательный интерфейс позволяет располагать вне телескопа, на расстоянии нескольких сотен метров, управляющий компьютер и рабочее место наблюдателя. Контроллер эффективно стабилизирует параметры ИФП и обеспечивает управление сканированием через последовательный порт персонального компьютера по стандартному интерфейсу типа RS232.

5. Особенности наблюдений в различных режимах

5.1. Режимы наблюдений

В табл. 9 расписаны положения подвижных элементов SCORPIO в различных режимах наблюдений, в скобках указаны номера позиций. Так как при смене режимов в пучок вводятся различные оптические элементы, то положение фокальной плоскости на выходе системы может меняться. Компенсация этих смещений осуществляется с помощью изменения положения фокуса коллиматора. В SCORPIO опорным является такое положение фокуса, при котором фокальная плоскость коллиматора совпадает с положением щели спектрографа при условии, что, за исключением щели в турели 1, остальные подвижные элементы (анализатор, фильтры и т.п.) выведены из пучка. Перед началом наблюдений необходимо сфокусировать коллиматор по изображению щели, подсвеченной калибровочной лампой NEON или FLAT. Измеренный таким образом отсчет опорного фокуса коллиматора (F_{slit}) заносится в параметры программы управления спектрографом. При смене режимов наблюдений программа управления автоматически изменяет величину текущего фокуса коллиматора. Требуемое значение фокуса (F_{col}) в общем виде может быть вычислено по формуле:

$$F_{col} = F_{slit} - \Delta F_1 - \Delta F_2 - \Delta F_{polar} + \Delta F_{disp},$$

где ΔF_1 , ΔF_2 — поправки отсчета фокуса для светофильтров, находящихся в турелях 1 и 2, в общем виде определяемые соотношением $\Delta F = h(n - 1)/n$, где h — толщина, а n — средний показатель преломления материала фильтра.

ΔF_{disp} — коррекция за введенный диспергиру-

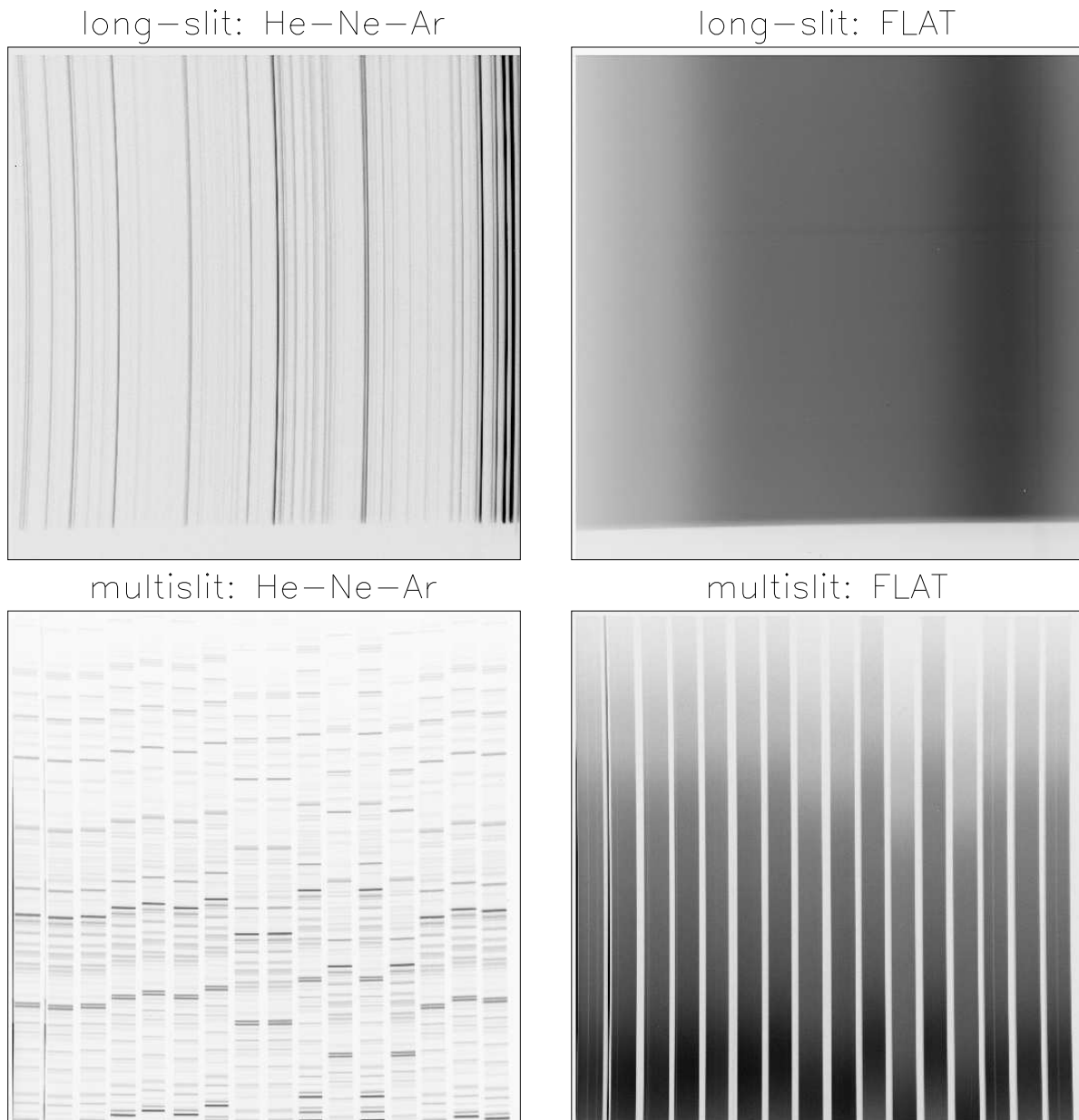


Рис. 14: Калибровочные накопления спектра лампы He-Ne-Ar (слева) и лампы “плоского поля” (справа). Вверху — режим наблюдений с длинной щелью, внизу — спектроскопия с многощелевым блоком. Направление дисперсии в этих режимах различно (слева направо и сверху вниз соответственно), так как из-за конструктивных особенностей прибора длинная щель перпендикулярна щелям многощелевого блока.

ющий элемент, поправка равна 0.3 мм для гризм³, -0.1 мм для ИФП 260 и +0.2 мм для ИФП 501.

$\Delta F_{polar} = 5$ мм — поправка за ввод анализатора поляризации.

При наблюдениях с многощелевым блоком за

опорный фокус принимается величина F_{multi} , соответствующая положению лучшего фокуса при фокусировке по изображению самого многощелевого блока (при выведенных из пучка прочих оптических элементах). Из-за конструктивных особенностей спектрографа $F_{multi} \approx F_{slit} + 3$ мм.

³ Поправка вызвана различием положений лучшего фокуса при фокусировке по изображению щели и непосредственно по наблюдаемым спектрам

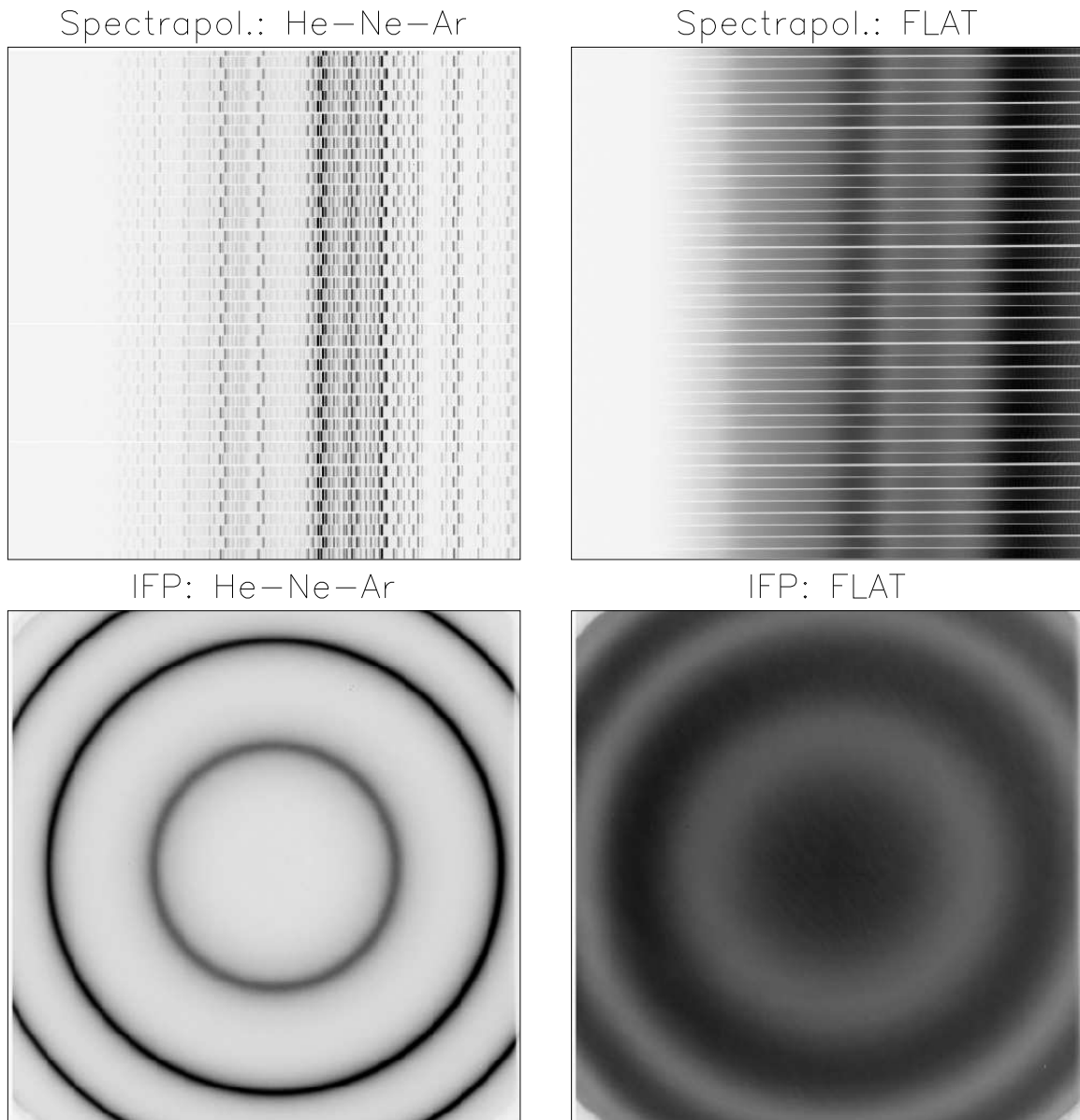


Рис. 15: Калибровочные накопления спектра He-Ne-Ar лампы (слева) и лампы “плоского поля” (справа). Вверху — режим спектрополяризметрических наблюдений с “пунктирной” целью, заметен сдвиг шкалы длин волн между пучками с разной поляризацией, направление дисперсии — слева направо. Внизу — режим ИФП, здесь дисперсия направлена по радиусу к центру колец.

5.2. Калибровочные накопления

При наблюдениях со SCORPIO используются следующие калибровочные накопления:

- BIAS — “кадр смещения” (считывание ПЗС с нулевой экспозицией). Обычно запускается серия из 10–20-ти таких экспозиций в начале и в конце наблюдательной ночи для того, чтобы их потом усреднить.

- DARK — кадр “темнового тока”. Обычно эта калибровка не используется при наблюдениях

с ПЗС EEV-42-40, у которой нет горячих столбцов и мал уровень темнового тока. Однако кадры DARK необходимы, если по техническим причинам наблюдения приходится проводить с детектором, имеющим худшие характеристики. Тогда необходимо до (или после) наблюдений накопить серию темновых кадров той же продолжительности, что и экспозиции объекта, и построить средний кадр.

- NEON — калибровка шкалы длин волн. Необходима во всех спектральных режимах и при

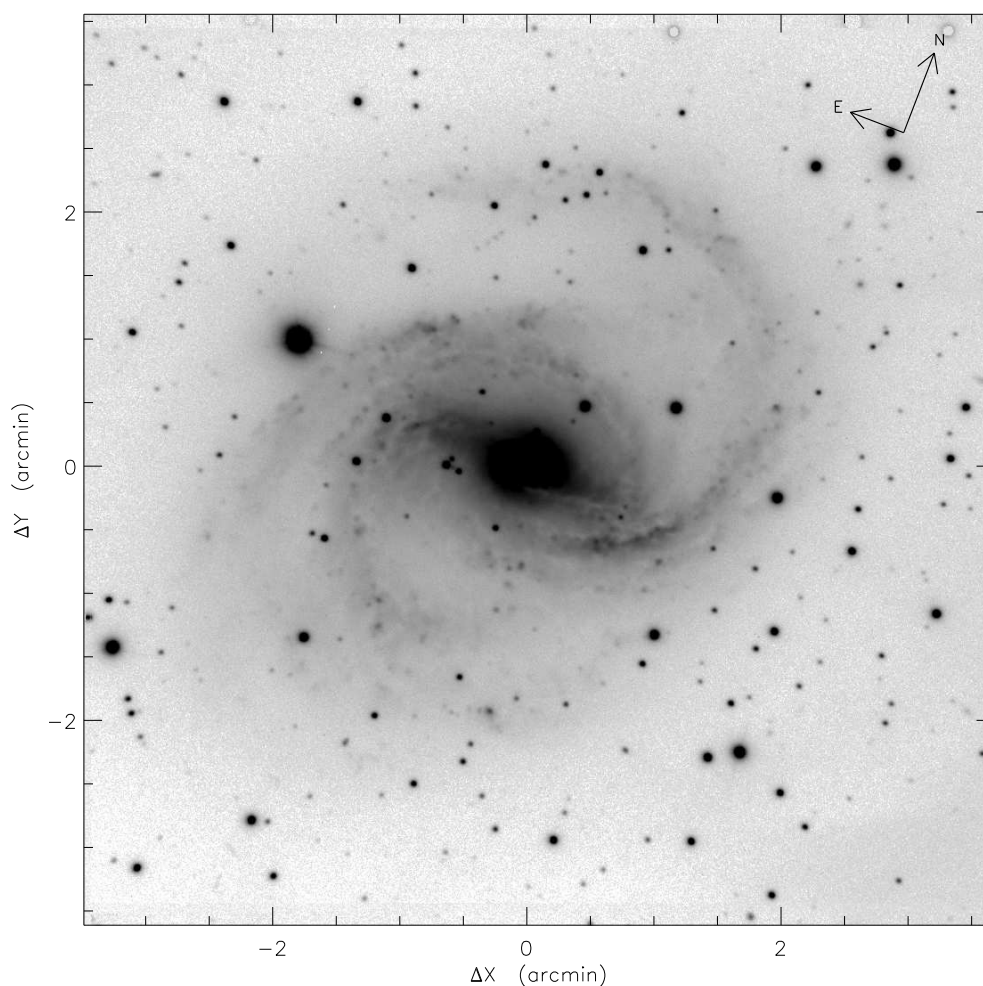


Рис. 16: Изображение галактики *NGC 6951* в фильтре R_C , полученное со *SCORPIO*. Качество изображений $1.4''$, $T_{exp} = 90$ сек.

наблюдениях с ИФП. Проводится с помощью лампы с He-Ne-Ar наполнением, установленной на универсальной платформе. С целью учета внутренних гнутостей прибора необходимо для каждого наблюдаемого объекта, если изменение зенитного расстояния превышает $10 - 20^\circ$, накапливать отдельный кадр NEON.

При наблюдениях с ИФП необходимо накапливать полный куб данных (все каналы интерферометра) с изображениями интерференционных колец от линии калибровочного спектра, вырезанной узким фильтром. Калибровочный куб необходимо снимать хотя бы два раза за ночь (до и после наблюдений). Во время сканирования объекта необходимо делать не менее 4–6 экспозиций NEON в разных каналах интерферометра. Эти накопления используются при обработке данных наблюдений

для контроля положения центра колец и точности сканирования ИФП.

- FLAT — калибровка равномерной засветки “плоского поля” от лампы непрерывного спектра. Необходима во всех режимах, проводится в начале и в конце наблюдений в случае прямых снимков и наблюдений с ИФП, и несколько раз в течение ночи при спектральных наблюдениях на разных зенитных расстояниях. В случае ИФП — это накопления равномерной засветки узкого фильтра во всех каналах интерферометра, в случае спектральных наблюдений — накопления непрерывного спектра, в случае прямых снимков — накопления непрерывной засветки для данного фильтра.

На рис. 14 и 15 показаны примеры накоплений спектра обеих калибровочных ламп для различных режимов наблюдений.

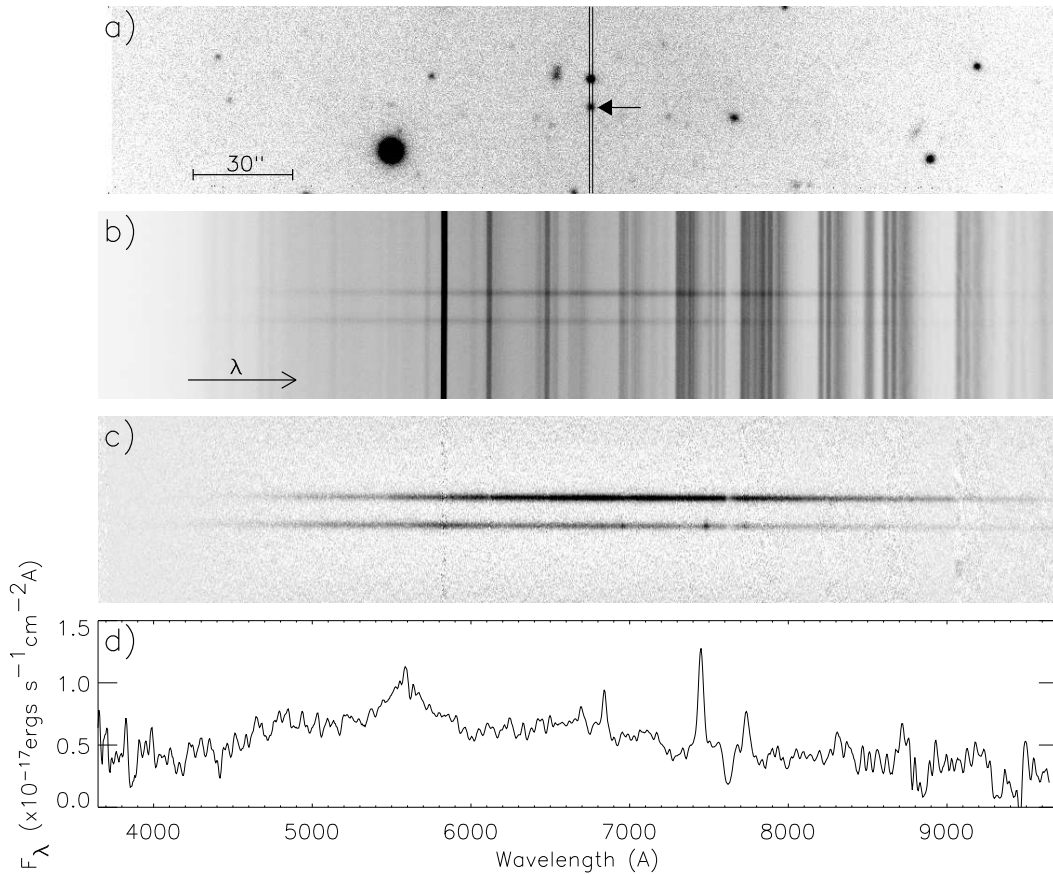


Рис. 17: Спектроскопия радиогалактики *RCJ1154+0431* со *SCORPIO*: а) — фрагмент изображения в фильтре *R_C* ($T_{exp} = 60$ с), показано положение щели спектрографа, радиогалактика отмечена стрелочкой; б) — спектр низкого разрешения (сумма двух экспозиций по 600 с); в) — то же после вычитания спектра ночного неба; д) — интегральный спектр в шкале длин волн.

5.3. Прямые снимки

Как уже отмечалось в главе 3.2, *SCORPIO* укомплектован несколькими наборами светофильтров, которые могут использоваться для фотометрических наблюдений. Стеклопленочные широкополосные светофильтры позволяют реализовать в режиме прямых снимков фотометрическую систему *UBVR_cI_c* Джонсона-Казинса (см. Бессель, 1990). В табл. 10 приводятся предельные звездные величины обнаружения слабых объектов на уровне отношения сигнал/шум=3 при качестве изображений 1.3''. Таблица составлена на основании данных из статьи Фатхуллина (2002), в которой исследовались возможности *SCORPIO* (с ПЗС *TK1024*) по фотометрии слабых звездобразных и протяженных объектов.

Среднеполосные интерференционные фильтры могут применяться для построения спектрального распределения энергии слабых объектов поля, или получения изображений протяженных объектов в различных эмиссионных линиях (H_{α} , [OIII] и т.д.)

Таблица 10: Предельные звездные величины в широких фильтрах (Фатхуллин, 2002)

Фильтр	T_{exp} , сек	Зв. величина
B	2500	27.0 ^m
V	1500	26.3 ^m
R _C	1260	26.4 ^m
I _C	1800	25.1 ^m

и в континууме.

Относительно высокая эквивалентная светосила прибора делает *SCORPIO* эффективным инструментом для фотометрии протяженных объектов. На рис. 16 приведено изображение близкой галактики *NGC 6951*. Уровень поверхностной яркости внешних изофот 23.4^m/□'' в фильтре *R_C* достигается здесь всего за полторы минуты экспозиции.

Основной проблемой фотометрических наблюдений является интерференционный узор ("муар")

при наблюдениях в “красных” фотометрических полосах (см. главу 6). Так, при наблюдениях в фильтре I_c с ПЗС ЕЕV-42-40 уровень муара достигает 8% от уровня фона неба.

5.4. Спектроскопия с длинной щелью и бесщелевая

Возможность предварительного получения прямых изображений оказывается чрезвычайно полезной при щелевой спектроскопии как протяженных (поскольку точно известно положение щели), так и звездобразных объектов, если последние столь слабы, что не заметны на телевизионном просмотре. Так, 1–2-минутной пробной экспозиции в фильтре R_c достаточно для уверенного наведения на объекты 22–23 зв. величины при умеренном качестве изображений. В процессе наведения изображение изучаемого объекта устанавливается в то место на детекторе, куда проецируется изображение щели. Затем вместо светофильтра устанавливается щель, а в коллимированный пучок вводится гризма прямого зрения, что превращает редуктор в светосильный спектрограф, причем смена конфигураций “прямые изображения” — “длинная щель” занимает около 1 минуты. На рис. 17 последовательно показан процесс получения наблюдательного материала на примере спектроскопии радиогалактики RCJ1154+0431 (наблюдения по заявке Ю.Н. Парийского). Интегральная звездная величина объекта в фильтре V составляет 19.8^m , измеренное красное смещение $z=1.0$ (см. Афанасьев и др., 2003а).

SCORPIO укомплектован набором призм, обеспечивающих наблюдения с различным спектральным разрешением (от 1.5 до 20\AA при ширине щели $1''$) в различных областях оптического спектра. До 2003 г. наблюдения проводились с помощью прозрачных решеток с профилированным штрихом при плотности штрихов от 300 до 1200 на мм (см. табл. 7). При работе с такими решетками максимальная квантовая эффективность всей системы (телескоп+SCORPIO+ПЗС) составляла 30% для спектров низкого ($\delta\lambda = 15 - 20\text{\AA}$) и всего около 3–5% для спектров более высокого ($\delta\lambda = 5 - 6\text{\AA}$) разрешения. В 2003–2004 гг. начаты наблюдения с призмами, использующими объемные фазовые голографические решетки (VPHG), которые отличаются более высоким пропусканием и меньшим уровнем рассеянного света. Здесь достигается квантовая эффективность 20–50% как с низким, так и с высоким разрешением (см. рис. 13).

Достигнутая высокая квантовая эффективность прибора позволила “поставить на поток” определение красных смещений и спектральной классификации внегалактических радиоисточни-

ков, поскольку необходимые для этого спектры низкого разрешения объектов 19–21 зв. величины удается получать даже при не очень хорошей прозрачности атмосферы и качестве изображений $3 - 5''$. При этом суммарная экспозиция составляет всего 10–20 мин (см. результаты на примерах работ Афанасьева и др., 2003б, Амирханяна и др., 2004). В то же время при качестве изображений $1.5''$ в спектроскопии низкого разрешения звездобразных объектов за 2 часа экспозиции достигается предельная звездная величина $R_c = 24^m$, при этом отношение сигнал/шум в континууме получаемых спектров достигает 10 (Додонов, частное сообщение). При получении спектров столь слабых объектов решающую роль играет стабильность аппаратного контура спектрографа, влияющая как на точность вычитания линий ночного неба, так и на возможность учета интерференционного узора в материале детектора (см. главу 6). Большую помощь при таких наблюдениях оказывает методика сдвига объекта вдоль щели между экспозициям. При последующей обработке из спектра объекта вычитается “чистый” спектр, т.е. спектр неба, взятый с этого же места на смещенном кадре.

Хорошим тестом возможностей спектрографа является задача по изучению кинематики звездных дисков галактик, поскольку здесь для областей с поверхностной яркостью $21-23^m/\square''$ требуется получать абсорбционные спектры с относительно высоким отношением сигнал/шум и со спектральным разрешением не хуже $\delta\lambda = 2 - 4\text{\AA}$. На рис. 18 приведен пример измерения параметров звездной кинематики вдоль большой оси линзовидной галактики с перемычкой NGC 3412. За 1.5 часа суммарной экспозиции на SCORPIO (с применением голографической решетки VPHG2310) удается измерить лучевые скорости и дисперсию лучевых скоростей звезд для областей с поверхностной яркостью $23^m/\square''$ в фильтре V .

При наблюдениях звезд-спектрофотометрических стандартов используется режим бесщелевой спектроскопии, когда щель заменяется круглой маской диаметром около $30''$ (см. п. 3.1). Такая методика позволяет полностью уйти от проблем потерь света на щели и искажения наблюдаемого спектрального распределения энергии звезды из-за эффекта дифференциальной атмосферной рефракции.

5.5. Многощелевая спектроскопия

Имеющийся набор призм может применяться и при наблюдениях с многощелевым блоком, хотя из-за перемещения щелей в поле общий спектральный диапазон несколько уменьшается по сравнению с вариантом длинной щели. Для предвари-

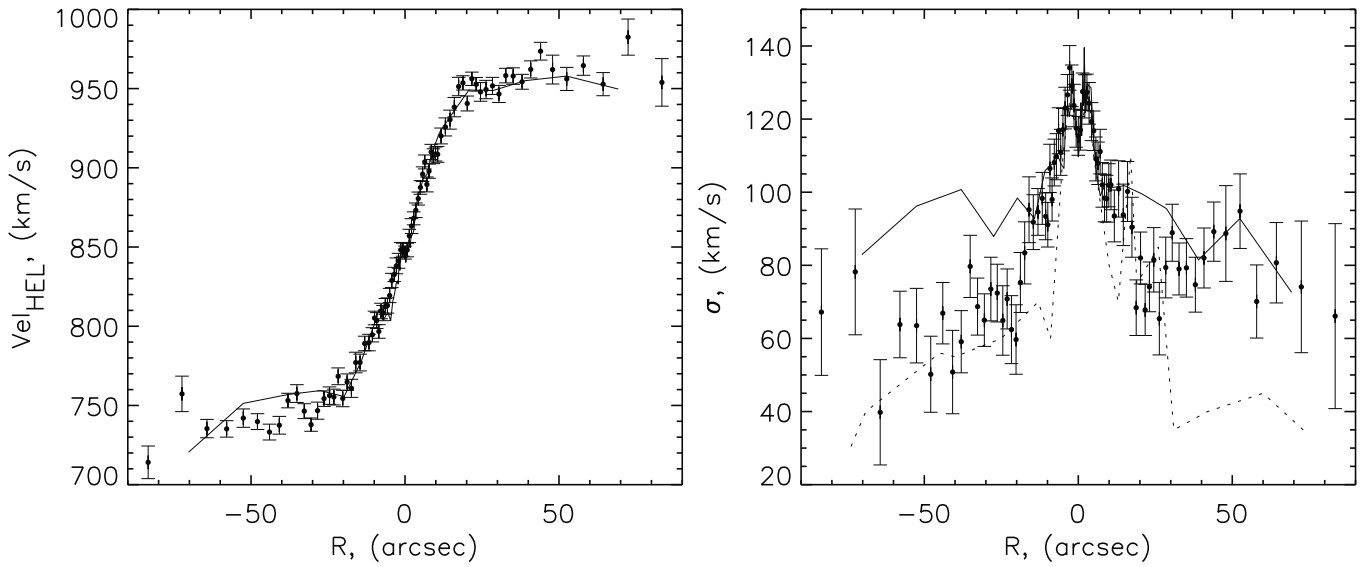


Рис. 18: Кинематика звездного компонента в галактике NGC 3412: распределение вдоль большой оси лучевых скоростей (слева) и дисперсии лучевых скоростей (справа). Сплошной линией показаны опубликованные измерения Агюери и др. (2003), пунктиром – Нойштейна и др. (1999).

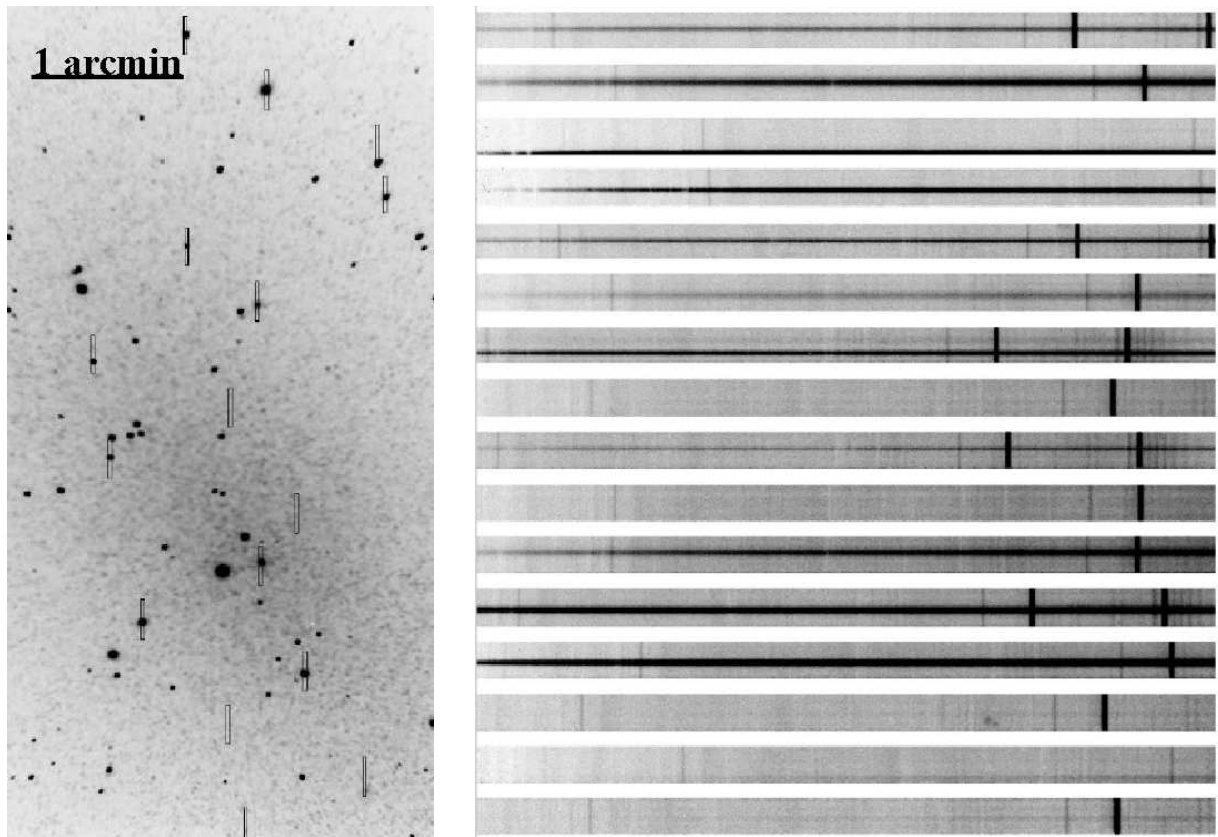


Рис. 19: Спектроскопия шаровых скоплений в близкой галактике NGC 147 (наблюдения по заявке М.Е. Шариной). Слева – изображение галактики в фильтре V с отмеченными положениями щелей. Справа – полученные с многощелевым блоком спектры указанных слева объектов.

тельного определения оптимального позиционного угла ориентации многоцелевого блока относительно наблюдаемых в поле зрения объектов написан пакет программ, работающих в среде IDL. При наблюдениях получают прямое изображение изучаемой площадки, вводят в фокальную плоскость телескопа многоцелевой блок и устанавливают щели согласно измеренным на ПЗС координатам выбранных объектов. Пример получаемых спектров приводится на рис. 14 и 19.

5.6. Панорамная спектроскопия

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо является высокоэффективным прибором для исследования кинематики протяженных объектов. После специальной обработки полученные интерферограммы могут быть представлены как “куб данных”, у которого две координатные оси расположены в картинной плоскости, а длины волн (или доплеровские скорости, измеренные по смещению спектральных линий) являются третьей координатой. Иными словами, каждому элементу изображения соответствует индивидуальный спектр.

В САО имеются два сканирующих ИФП, описанные в п. 3.4. Они успешно применяются для изучения объектов, расположенных как в нашей Галактике (туманности, звездные скопления), так и внегалактических. Подробнее о наблюдениях с ИФП на SCORPIO можно прочитать в работе Моисеева (2002). Для выделения требуемого участка спектра используются узкополосные фильтры с шириной полосы пропускания 10–20Å (см. п. 3.2).

На рис.20 показан результат наблюдений с ИФП близкой спиральной галактики NGC 6951. Построенное поле скоростей хорошо согласуется с аналогичными наблюдениями Розас и др. (2002). Внутренняя точность измерения лучевых скоростей здесь составляет около 5 км с⁻¹.

5.7. Поляризационные наблюдения

В режиме спектрополяриметрических наблюдений перед щелью SCORPIO устанавливается маска, которая формирует пунктирную щель (см. п. 3.1). После ввода в пучок анализатора поляризации на выходе спектрографа получается серия пар спектров, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 15). Вместо использования $\lambda/2$ -пластины мы сравниваем спектры, полученные при повороте анализатора на 0 и 45°. Обозначим $I_o(\lambda)$ и $I_e(\lambda)$ измеренную интенсивность в спектрах на длине волны λ . В идеальном приборе для объекта с нулевой линейной поляризацией отношение $R = I_o(\lambda)/I_e(\lambda)$ по определению равно единице. В реальном приборе отношение R

не равно единице и зависит от длины волны. Это связано с различной реакцией гризмы на излучение, поляризованное в разных плоскостях. При этом следует отметить, что, как следует из теории ВРН-решеток, выполняется соотношение $R(0^\circ) = 1/R(45^\circ)$. На рис. 21 показан пример такой калибровочной зависимости, в которой соотношение $R(0^\circ) = 1/R(45^\circ)$ выполняется с точностью 0.2–0.3%. После проведения всех необходимых калибровок (приведение к шкале длин волн, исправление плоского поля, определение отношения $R(\lambda)$ по спектрам стандарта нулевой поляризации) для линейно поляризованного объекта можно определить три параметра Стокса P, U, Q из простых соотношений:

$$U = \frac{I_o(\lambda)R(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda)R(\lambda) + I_e(\lambda)} = P \sin(\varphi - \varphi_0),$$

$$Q = \frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)R(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)R(\lambda)} = P \cos(\varphi - \varphi_0),$$

$$P = \sqrt{U^2 + Q^2}.$$

Для измерения циркулярной поляризации (или четвертого параметра Стокса V) перед анализатором вводится пластина $\lambda/4$. Реальная точность измерения степени поляризации в спектре, помимо статистики отсчетов, зависит от величины рассеянного света в спектрографе, точности исправления спектров за плоское поле, наличия “духов” в анализаторе (их величина около 0.2%) и точности процедуры экстракции спектров из изображения.

Как показывают наши измерения, порог обнаружения степени линейной поляризации в SCORPIO составляет 0.2–0.3%, а точность измерения 0.1–0.3% (в зависимости от экспозиции). В табл. 11 сравниваются результаты наших измерений стандартов поляризации с данными, взятыми из литературы. Значения наблюдаемой степени поляризации являются результатом интегрирования в полосе фильтра V спектров, полученных с решеткой VPHG550G.

На рис. 22 показан пример суммарного спектра центральной области сейфертовской галактики 2-го типа Mrk 573, полученный во время тестирования поляризационного режима SCORPIO в августе 2004 г. Показана зависимость степени линейной поляризации от длины волны. Спектры были получены при качестве изображения 2'' с решеткой VPHG550G. Была проведена серия экспозиций по 10 минут в последовательных положениях угла поворота анализатора (0 и 45°). Полная экспозиция составила 2 часа, а интегральная яркость

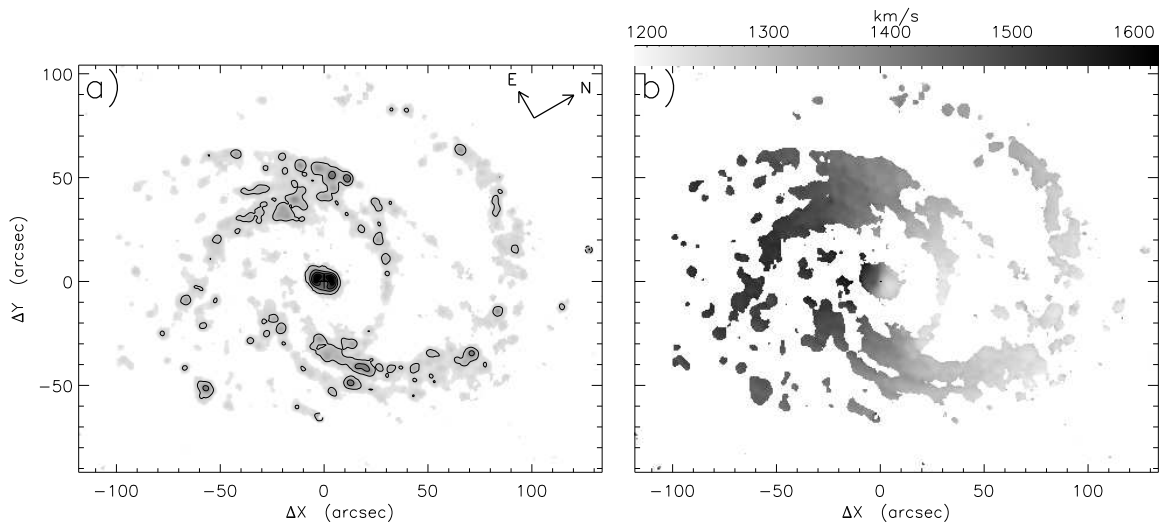


Рис. 20: Наблюдения галактики NGC 6951 в линии H_α с ИФП на SCORPIO: а) — изображение в эмиссионной линии, б) — поле лучевых скоростей.

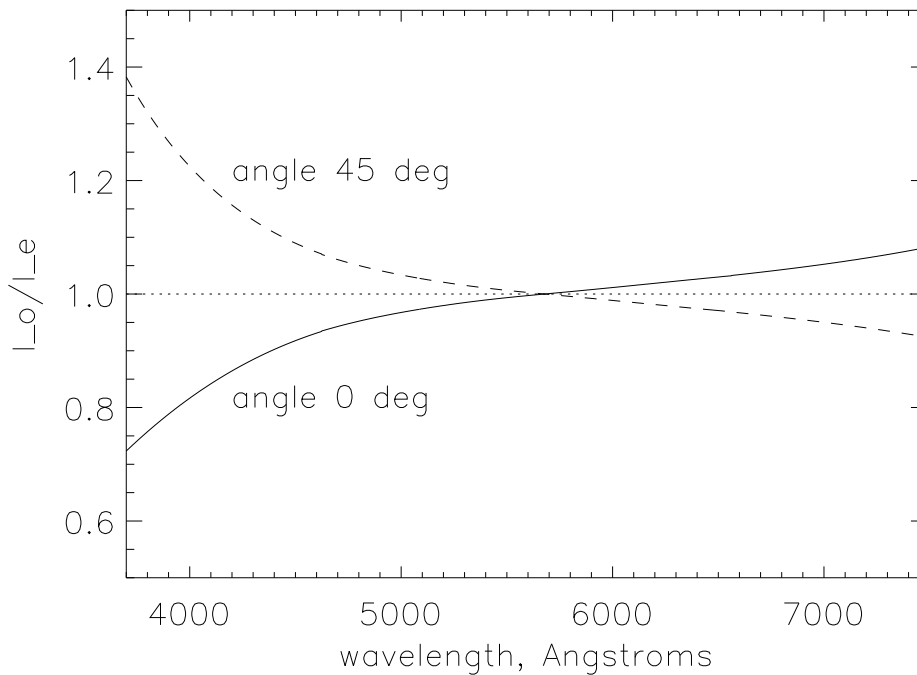


Рис. 21: Калибровочные кривые отношения $R = I_o(\lambda)/I_e(\lambda)$, определенные для SCORPIO в режиме спектрополяриметра для разных ориентаций анализатора по наблюдениям стандарта нулевой поляризации с решеткой VPHG550.

ядра галактики в щели составила около 16^m в полосе V. На рисунке в степени поляризации выделяется широкая компонента водородных линий. Полученный результат находится в удовлетворительном согласии с результатами наблюдений других авторов (Нагао и др., 2004).

6. Обработка данных

Наблюдательные данные записываются в формате FITS. Для их обработки могут использоваться различные стандартные системы редукции астрономических изображений, такие как MIDAS или IRAF. Процесс первичной редукции достаточно

Таблица 11: Поляризационные наблюдения со SCORPIO

Объект	Измерения SCORPIO		Шмидт и др.(1992)	
	P, %	θ , °	P, %	θ , °
BD+59d389	6.61 ± 0.11	97 ± 1	6.701 ± 0.015	98.09
VICyg#12	8.80 ± 0.16	117 ± 2	8.947 ± 0.088	115.03
BD+64d106	5.35 ± 0.41	86 ± 5	5.627 ± 0.037	96.63
BD+28d4211	0.33 ± 0.3	–	0.054 ± 0.030	–

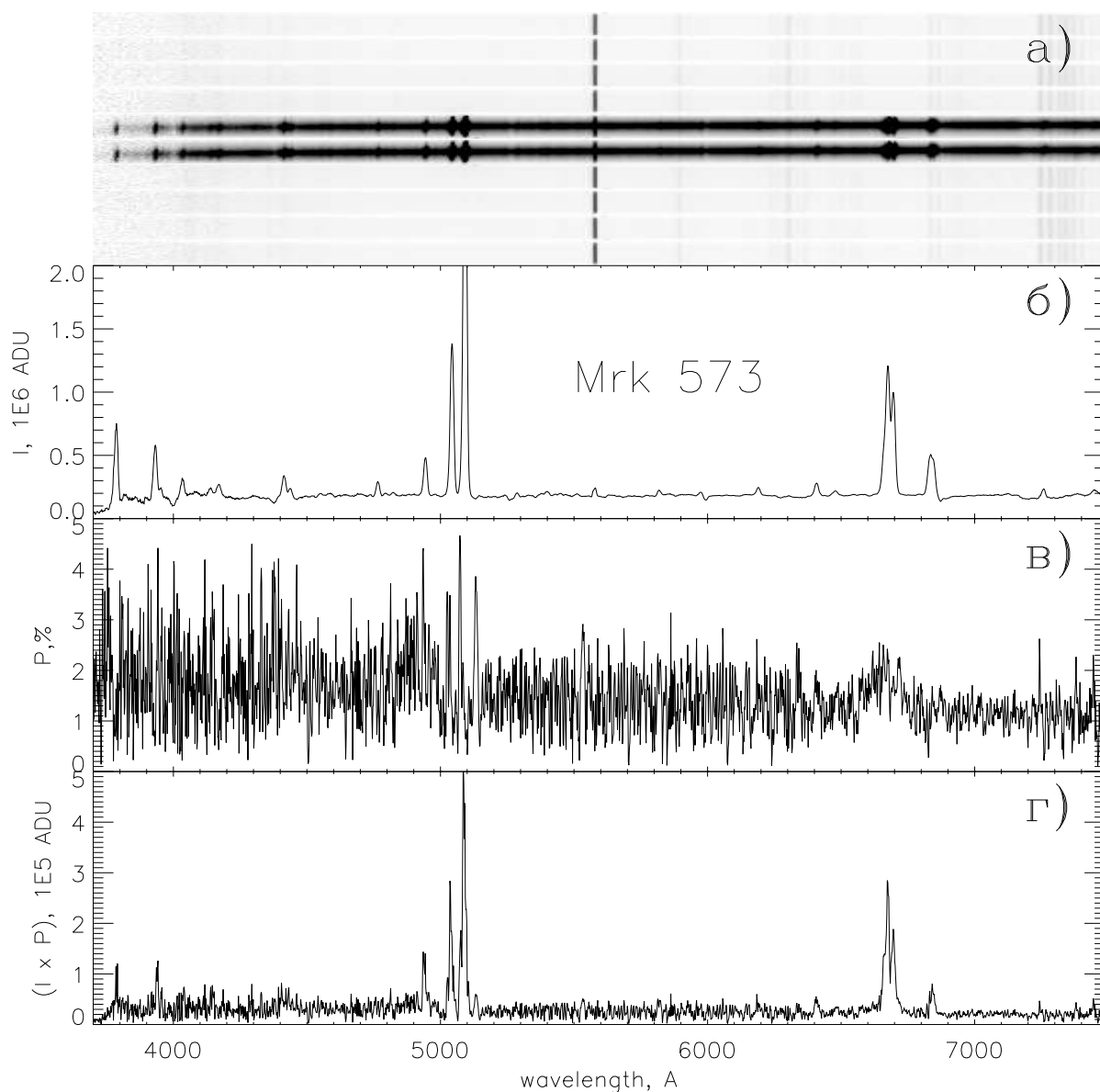


Рис. 22: Спектрополяриметрия сейфертовского ядра в галактике Mrk 573 (тип Sy2). Гризма VPHG550G, экспозиция 120 мин, щель $1 \times 7.5''$: а) — исходный спектр, с анализатором в позиции 0° ; б) — интегральный спектр ядра ($V=16^m$) за вычетом спектра окружающей галактики (I); в) — степень поляризации ядра (P); г) — спектр поляризованного излучения ($I \times P$). Единица ADU = $0.5\bar{e}$.

легко автоматизировать, поскольку все необходимые сведения о конфигурации спектрографа записываются в заголовок FITS-файлов. В среде IDL нами написаны пакеты программ для обработки и анализа данных, получаемых со SCORPIO. Программы для обработки наблюдений в режимах “ИФП”, “длинная щель” и “многообъектная спектроскопия” снабжены дружественным интерфейсом и могут применяться пользователями, не знакомыми с самим языком IDL. Последовательность обработки ИФП-наблюдений со SCORPIO описывается в работе Моисеева (2002).

Важным моментом в обработке наблюдений является учет интерференционного узора в чувствительном слое ПЗС в “красной” области спектра (п. 2.5). В случае спектральных наблюдений для исправления этого эффекта используется деление кадров со спектрами объекта на кадры, содержащие накопления спектра встроенной лампы (“спектральное плоское поле”). Таким образом удается уменьшить влияние муара более чем на порядок, что достаточно в большинстве случаев. Делением на “плоское поле” удается избавиться от интерференционного узора и в случае прямых изображений, хотя использование в качестве “плоского поля” кадров, засвеченных встроенной лампой или рассветным небом, часто оказывается недостаточным, особенно в случае широкополосных фильтров, из-за того, что спектральное распределение энергии фонового излучения ночного неба заметно отличается от калибровочных засветок. В этом случае оптимальной методикой обработки прямых снимков является построение изображения усредненного интерференционного узора по серии всех накоплений в соответствующем фильтре в течение наблюдательной ночи.

7. Дальнейшая модернизация прибора

При наблюдениях на 6-м телескопе используется штатная система автогидирования по изображению на телевизионном подсмотре (Шергин и Максимова, 2001), позволяющая компенсировать смещения звезд в поле соответствующими движениями всего телескопа. Это “медленное” гидирование, поскольку подавляются колебания центров звездных изображений на частотах 0.1 Гц и ниже. В 2005 г. планируется завершить работы по “быстро-му” гидированию, основанному на использовании качающейся пластины из плавленого кварца, закрепляемой в карданном подвесе (tip-tilt). Такая система позволит компенсировать колебания с частотами до 10 Гц, что даст возможность существенно уменьшить влияние собственных колеба-

ний телескопа и этим улучшить качество звездных изображений. Например, использование локального tip-tilt корректора в фокусе Несмит-2 телескопа БТА позволило увеличить проникающую способность находящихся там спектрографов на 0.5–1 зв. величину (Иванов и др., 2001).

Достаточно перспективным нам представляется оснащение спектрографа “полутонким” ПЗС-детектором. Такой приемник совмещает в себе преимущества как “толстых” (с прямой засветкой) приборов, не дающих заметного интерференционного узора, так и “тонких” детекторов (с обратной засветкой), обладающих высокой квантовой эффективностью. Подобный приемник имеет значительно меньшую амплитуду муара и более высокую (до 80% на 9000Å) чувствительность в красной области спектра, что позволит увеличить эффективность SCORPIO при наблюдениях в ближнем ИК-диапазоне.

8. Заключение

Высокая эффективность нового прибора подтверждается в процессе его постоянного практического использования. За период с сентября 2000 г. по ноябрь 2004 г. в CAO РАН со SCORPIO проведено более 230-ти ночей наблюдений, полученные результаты использовались в 26-ти статьях, трех кандидатских и двух докторских диссертациях. Более подробное описание спектрографа и методики наблюдений с ним доступно в Интернете по адресу: w.sao.ru/hq/moisav/scorpio/scorpio.html. Аналогичный прибор (только без платформы-адаптера и многоцелевого блока), созданный в CAO РАН, успешно используется в наблюдениях на 2.6-м телескопе Бюраканской астрофизической обсерватории (Армения).

Благодарности. Авторы благодарны администрации CAO РАН за постоянную поддержку и внимание при разработке и изготовлении прибора. Додонову С.Н. и Амирханяну В.Р. — за плодотворные дискуссии при создании прибора, Перепелицину Е.И., Фатееву В.И. и Веретенову В.В. — за помощь в изготовлении прибора, администрации Института астрономии РАН — за предоставление объемных голографических решеток. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФНТЦП “АСТРОНОМИЯ” (контракт 40.022.1.1.1101 от 01.02.2002), гранта INTAS (96-0315) и программы ОФН РАН. А.В. Моисеев также благодарит “Фонд содействия отечественной науке” и РФФИ (грант 04-02-16042) за частичное финансирование проводимых работ.

Список литературы

Agueri и др. (Agueri J. A.L., Debattista V. P., Corsini E.M.), 2003, MNRAS, **338**, 465

- Амирханян В.Р., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Моисеев А.В., Михайлов В.П., 2004, Письма в Астрон. журн., **30**, 915
- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Моисеев А.В., Верховданов О.В., Копылов А.И., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Желенкова О.П., Госс М., 2003а, Астрон. журн., **80**, 409
- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Моисеев А.В., Чавушян В.О., Муиса Р., Юуарес Дж., Горшков А.Г., Конникова В.К., Мингалиев М.Г., 2003б, Письма в Астрон. журн., **29**, 656
- Барден и др. (Barden S.C, Arns J.A., Colburn W.S., and Williams J.B.), 2000, PASP, **112**, 809
- Бессель (Bessell M.S.), 1990, PASP, **102**, 1181
- Бузони и др. (Buzzoni V., Delabre V., Dekker H. et al.), 1984, ESO Messenger (ISSN 0722-6691), Dec. 1984, 9
- Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С., 2001, Препринт САО РАН, N 155
- Куртес (Courtés G.), 1960, Ann. d'Astrophysics, **23**, 115
- Куртес (Courtés G.), 1964, AJ, **69**, 325
- Моисеев (Moiseev A.V.), 2002, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв., **54**, 74 (astro-ph/0211104)
- Нагао и др. (Nagao T., Kawabata K.S., Murayama T. et al.), 2004, AJ, **128**, 109
- Нойштейн и др. (Neistein E., Maoz D., Rix H.-W., Tonry J.L.), 1999, AJ, **117**, 2666
- Никлас и др. (Nicklas H., Seifert W., Boehnhardt H., Kiesewetter-Koebinger S., Rupprecht G.), 1997, Proc. SPIE, v. 2871, in "Optical Telescopes of Today and Tomorrow" (Eds. Arne L. Ardeberg), Nordic Optical Telescope SA (Sweden), 1222
- Розас и др. (Rozas M., Relano M., Zurita A., Beckman J.E.), 2002, A&A, **386**, 42
- Фатхуллин (Fatkhullin T.A.), 2002, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв., **53**, 5
- Шергин В.С., Максимова В.М., 2001, Программа автоматизации TVguide, Руководство пользователя, САО (http://www.sao.ru/hq/vsher/vsher_ru.html)
- Шмидт и др. (Schmidt G.D., Elston R., Lupie O.L.), 1992, AJ, **104**, 1563