

УДК 520.3

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РЕДУКТОР СВЕТОСИЛЫ 6-М ТЕЛЕСКОПА SCORPIO

© 2005 г. В. Л. Афанасьев, А. В. Моисеев*

Специальная Астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз

Поступила в редакцию 10.09.2004 г.

Описывается редуктор светосилы SCORPIO, с осени 2000 г. применяющийся для наблюдений на 6-м телескопе САО РАН. Приводятся характеристики прибора в различных режимах наблюдений (фотометрия, спектроскопия с длинной щелью и многощелевая, спектрополяриметрия, панорамная спектроскопия с интерферометром Фабри–Перо). Возможности SCORPIO демонстрируются на примерах наблюдений различных астрономических объектов.

Ключевые слова: методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты.

THE SCORPIO UNIVERSAL FOCAL REDUCER OF THE 6-M TELESCOPE, *by V. L. Afanas'ev and A. V. Moiseev.* We describe the SCORPIO focal reducer that has been used since the fall of 2000 for observations on the 6-m Special Astrophysical Observatory telescope. We give parameters of the instrument in various observing modes (photometry, long-slit and multislit spectroscopy, spectropolarimetry, Fabry–Perot field spectroscopy). Observations of various astronomical objects are used as examples to demonstrate the SCORPIO capabilities.

Key words: astronomical observing techniques, devices and instruments.

ВВЕДЕНИЕ

Идея применения на телескопе укорачивающей фокус оптической системы (фокального редуктора) была предложена и реализована Куртесом (1960, 1964) еще в 50–60 гг. прошлого века. Фокальный редуктор позволяет одновременно решить несколько задач. Во-первых, увеличиваются эквивалентная светосила системы и поле зрения, что важно для исследования слабых 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 (ИФП) 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 многом 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 г. 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 какой-либо 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) позволил реализовать в первичном фокусе 6-м телескопа следующие виды наблюдений протяженных и звездобразных объектов:

- ПЗС-фотометрия в широко-, средне- и узкополосных фильтрах;
- панорамная спектроскопия с ИФП;
- спектроскопия с длинной щелью и бесщелевая;

*Электронный адрес: moisav@sao.ru

Таблица 1. Основные характеристики SCORPIO

Поле зрения:	
полное	6'1 × 6'1
в многощелевом режиме	2'9 × 5'9
Масштаб изображения на ПЗС	0''18/пиксель
Спектральный диапазон	3600–10 000 Å
Спектральное разрешение	
с гризмиами (для ширины щели 1'')	1.5–20 Å
с ИФП	0.8–2.5 Å
Максимальная квантовая эффективность (телескоп+SCORPIO+ПЗС)	
прямые снимки	70%
спектроскопия	40–50%
наблюдения с ИФП	20%

– многообъектная спектроскопия с 16 дистанционно перемещаемыми щелями;

– спектрополяриметрия.

Механические и оптические части SCORPIO были изготовлены в макетных мастерских САО РАН. Первые наблюдения на БТА состоялись в сентябре 2000 г. со старым вариантом адаптера первичного фокуса. Новая платформа-адаптер стала применяться начиная с мая 2001 г. Первые успешные наблюдения с режиме многощелевой спектроскопии были проведены в сентябре 2003 г., летом 2004 г. завершены работы по внедрению спектрополяриметрического режима и проведены первые наблюдения.

В данной статье вначале описаны оптико-механическая схема SCORPIO и его основные характеристики. Далее рассматриваются особенности наблюдений в различных режимах, они проиллюстрированы на примерах конкретных результатов, полученных на 6-м телескопе во время пробной эксплуатации прибора. Рассматриваются перспективы дальнейшей модернизации SCORPIO.

ОПИСАНИЕ SCORPIO

Конструктивно SCORPIO состоит из трех частей, каждая из которых допускает независимое применение: редуктора светосилы, платформы-адаптера первичного фокуса и ПЗС-детектора. Основные характеристики прибора представлены в табл. 1.

Оптико-механическая схема редуктора светосилы

Оптическая схема редуктора светосилы (рис. 1) включает в себя линзу поля и коллиматор — 4-линзовый апохромат ($F/2.2$), формирующие выходной зрачок системы, камерный объектив — 6-линзовый апохромат ($F/1.8$) 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 $F/2.6$. На оптические поверхности нанесены 7-слойные просветляющие покрытия¹, работающие в диапазоне длин волн 3500–10000 Å. Результаты лабораторных измерений спектральной кривой пропускания оптики SCORPIO приводятся на рис. 2.

Оптика коллиматора компенсирует кому и кривизну поля главного зеркала телескопа, что позволяет отказаться от использования в наблюдениях штатного непросветленного линзового корректора. Диаметр коллимированного пучка 40 мм. Рабочий отрезок камеры равен 14 мм. Эквивалентное фокусное расстояние редуктора, установленного на БТА, равно 15.6 м, что соответствует масштабу изображения 75 мкм/". Линейный размер невиньетированного поля зрения составляет 28 × 28 мм в плоскости приемника.

Конструктивно редуктор выполнен в виде отдельных дистанционно управляемых блоков, смонтированных в общем корпусе:

– вводимый перед фокальной плоскостью многощелевой блок;

¹Просветляющие покрытия нанесены в институте прикладной физики (г. Нижний Новгород).

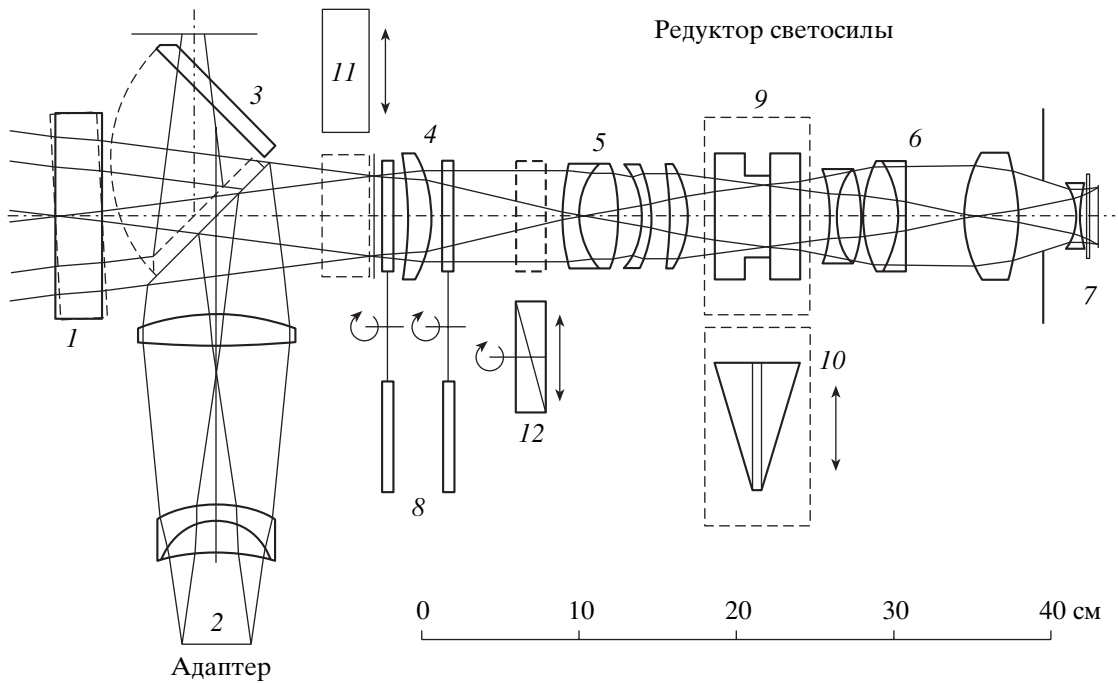


Рис. 1. Оптическая схема SCORPIO: 1 — наклоняемая пластина, 2 — оптика калибровки, 3 — плоское зеркало, 4 — полевая линза, 5 — коллиматор, 6 — камера, 7 — ПЗС, 8 — турели светофильтров, 9 — ИФП, 10 — гризма прямого зрения, 11 — многощелевой блок, 12 — анализатор поляризации.

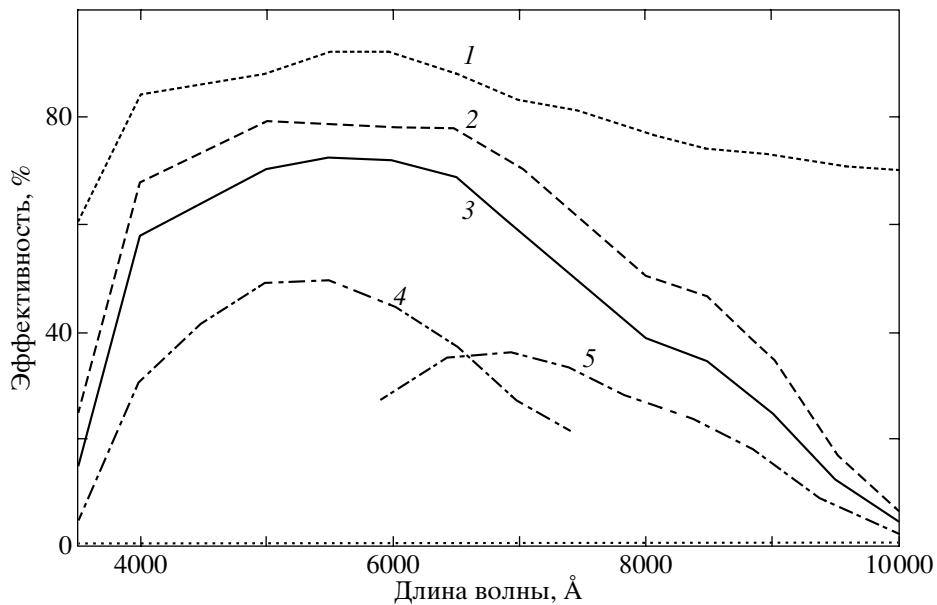


Рис. 2. Кривая пропускания оптики SCORPIO (1); кривая квантовой эффективности ПЗС EEV 42–40, согласно данным фирмы-изготовителя (2); общая кривая квантовой эффективности SCORPIO+ПЗС (3); кривая квантовой эффективности в спектральном режиме при наблюдениях с гризмами низкого разрешения VPHG550G (4) и VPHG550R (5).

— две вращающиеся турели на шесть позиций каждая;

— вводимый перед коллиматором блок анализатора поляризации;

— механизм фокусировки коллиматора;

— механизм ввода/вывода в коллимированный пучок диспергирующего элемента.

Многощелевой блок, предназначенный для мно-

гообъектной спектроскопии, представляет собой устройство, состоящее из 16 металлических полосок со щелями, расположенными в фокальной плоскости и перемещаемыми в поле размером 2.9×5.9 . Высота щелей около $18''$. Положение каждой щели фиксируется с помощью двух электромагнитов — удерживающего и захватывающего. Удерживающие магниты закреплены неподвижно, захватывающие укреплены на раме, перемещающейся по одной координате шаговым двигателем. Отдельный электромагнит фиксирует положение одновременно всех щелей в фокальной плоскости. Устройство вводится в пучок с помощью шагового двигателя.

Турели, установленные в спектрографе, предназначены для ввода в пучок различных сменных элементов — светофильтров, щелей, масок и пр. Все устанавливаемые в турель элементы смонтированы в оправках типа байонет со световым диаметром 72 мм, что позволяет оперативно производить их замену. В турели, расположенной в фокальной плоскости телескопа, обычно установлены средние и узкополосные интерференционные фильтры, а также щель для спектральных наблюдений. Во второй турели (за полевой линзой, перед коллиматором) — широкополосные стеклянные светофильтры, фазовая пластина и маска для бесщелевой спектроскопии. Одна из позиций в каждой из турелей всегда остается свободной, для того чтобы при наблюдениях могли использоваться все установленные светофильтры.

В качестве анализатора поляризации используется пластина Савара толщиной 14 мм, дающая разведение пучков в двух взаимно перпендикулярных плоскостях поляризации на $9''$ в фокальной плоскости. Анализатор может быть повернут вокруг оптической оси на 45° . Ввод и вывод анализатора в световой пучок и его поворот осуществляются с помощью шагового двигателя.

Механизм фокусировки коллиматора обеспечивает его линейное перемещение в пределах 12 мм с точностью отсчета 0.01 мм.

Между коллиматором и камерой расположена каретка с двумя переключаемыми позициями для ввода в параллельный пучок диспергирующих элементов — ИФП или гризм прямого зрения. Для визуальной настройки ИФП предусмотрена встроенная неоновая лампа. На ближайшем к главному зеркалу фланце прибора перед многощелевым блоком располагается центральный электромагнитный затвор со временем срабатывания 0.1 с.

Платформа-адаптер

Платформа-адаптер закрепляется на поворотном столе в кабине первичного фокуса БТА и

применяется для гидирования по внеосевым звездам и для засветки спектрографа калибровочными лампами. На ней может быть установлен как фокальный редуктор, так и другие устройства. Адаптер снабжен электромагнитным затвором, работающим независимо от центрального затвора редуктора светосилы.

Адаптер содержит 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. Внеосевой линзовый корректор, установленный перед каждым гидировочным полем, компенсирует кому главного зеркала телескопа. Пределы перемещения световодов 8.5×4.5 , диаметр поля зрения каждого световода около $40''$.

Плоское диагональное зеркало, (обозначенное цифрой 3 на рис. 1) имеет два фиксированных положения. В одном из них зеркало перебрасывает изображения со жгутов световодов на TV-подсмотр. Этот режим используется при экспозиции объектов. В другом положении зеркало перекрывает центральный пучок света от телескопа и перебрасывает на подсмотр изображение центра поля зрения прибора, что нужно для грубого наведения телескопа на требуемый объект. Кроме того, при этом положении зеркала в спектрограф перебрасывается свет от калибровочных ламп.

Адаптер содержит оптику осветителя калибровки, формирующую на входе редуктора сходящийся пучок со светосилой $F/4$, телецентрически эквивалентный пучку, формируемому главным зеркалом телескопа. Такая схема тракта калибровки формирует зрачок системы в том же положении, 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-Ag наполнением для калибровки шкалы длин волн, и галогенной лампой непрерывного спектра для создания "плоского поля".

Система управления

SCORPIO содержит относительно большое количество различных электромеханических

²Поскольку монтировка 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.

Таблица 2. Параметры используемых ПЗС

Параметры	Детектор	
	TK1024	EEV 42–40
Тип	тонкий, обратная засветка	
Формат	1024 × 1024	2048 × 2048
Размер пикселя	24 × 24	13.5 × 13.5
Масштаб	0.32"/пиксель	0.18"/пиксель
Поле зрения	5.4	6.1
Максимальная квантовая эффективность	80%	83%
Шум считывания	3ē	1.8–4ē
Темновой ток	0.1ē/мин	0.03ē/мин

Таблица 3. Предельные звездные величины в широких фильтрах

Фильтр	T_{exp} , с	Звездная величина
<i>B</i>	2500	27 ^m 0
<i>V</i>	1500	26.3
<i>R_c</i>	1260	26.4
<i>I_c</i>	1800	25.1

устройств (13 двигателей, два затвора, две калибровочные лампы, три светодиода подсветки крестов, 33 электромагнита на многоцелевом блоке), управление которыми реализовано следующим образом. Каждый из перечисленных блоков — редуктор светосилы, платформа, многоцелевой блок — включает в себя электронные платы с микропроцессором, управляющим механизмами соответствующего блока. Команды на микропроцессоры подаются с удаленного персонального компьютера по стандартному протоколу обмена RS232. Такая реализация дистанционного управления прибором позволяет достичь требуемой стабильности при работе по существующим длинным линиям связи 6-м телескопа. Не требуются 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.

ПЗС-приемник

С 2000 г. по 2003 г. в качестве детектора использовалась ПЗС-матрица TK1024, размером 1024 × 1024 элемента. Начиная с апреля 2003 г.

на SCORPIO в основном применяется ПЗС-матрица EEV 42–40 размером 2048 × 2048 элементов. Основные параметры обоих детекторов приводятся в табл. 2. Следует отметить, что для EEV 42–40 возможен программный выбор режимов, характеризующихся различными значениями кванта преобразования, а также скорости и шума считывания. На рис. 2 показан график квантовой эффективности для EEV 42–40. Охлаждение детектора осуществляется жидким азотом. Весь комплект для наблюдений с ПЗС-матрицей (криостат, электроника и программы управления) разработан и изготовлен в лаборатории перспективных разработок САО РАН (<http://www.sao.ru/hq/adlab/>).

Как видно из табл. 2, используемые приемники обладают высокой квантовой эффективностью (см. рис. 2), низкими шумами и малым темновым током. Кроме того, оба детектора имеют почти идеальную поверхность: мало число “плохих столбцов” и “горячих пикселей”. Пожалуй, единственным недостатком является интерференция проходящего света (муар), которая наблюдается для длин волн более 7500 Å у ПЗС TK1024, и более 6600 Å у EEV 42–40. Для правильного вычитания интерференционного узора необходима соответствующая методика проведения наблюдений (см. п. “Обработка данных”).

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Прямые снимки

SCORPIO укомплектован несколькими наборами светофильтров, которые могут использоваться для фотометрических наблюдений. Стекланные широкополосные светофильтры позволяют реализовать в режиме прямых снимков фотометрическую систему $UBVR_cI_c$ Джонсона–Касина (см. Бессель, 1990). В табл. 3 приводятся предельные звездные величины для обнаружения слабых объектов на уровне отношения сигнал/шум, равном 3, при качестве изображений 1".3. Таблица составлена на основании работы Фатхуллина (2002), в которой исследовались возможности SCORPIO (с ПЗС TK1024) по фотометрии слабых звездообразных и протяженных объектов.

Набор среднеполосных интерференционных фильтров с шириной полосы 160–400 Å и с центральными длинами волн 3700–9700 Å изготовлен в НИИПП (г. Москва). В режиме прямых снимков эти светофильтры могут применяться для различных задач, таких как построение спектрального распределения энергии для слабых объектов в поле или получение изображений протяженных объектов в различных эмиссионных линиях (H α ,

[ОIII] и т.д.) и в континууме. В работе Лозинской и др. (2002) приведены примеры таких изображений, полученных со SCORPIO. И.Д. Караченцевым (САО) предоставлен фильтр с шириной полосы 75 \AA , центрированный на длину волны линии $H\alpha$, который используется для построения карт распределения ионизованного водорода в туманностях и близких галактиках.

Основной проблемой фотометрических наблюдений является интерференционный узор (“муар”) при наблюдениях в “красных” фотометрических полосах (см. п. “Обработка данных”). Так, при наблюдениях в фильтре I_c с ПЗС EEV 42–40 уровень муара достигает 8% от уровня фона неба.

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 звездообразных объектов, если последние столь слабы, что не заметны на TV-подсмотре. Так, 1–2-минутной пробной экспозиции в фильтре R достаточно для уверенного наведения на объекты $22\text{--}23^m$ при умеренном качестве изображений. В процессе наведения изучаемый объект устанавливается в то место на детекторе, куда проецируется изображение щели. Затем вместо светофильтра устанавливается щель, а в коллимированный пучок вводится призма прямого зрения (комбинация прозрачной решетки и двух призм), что превращает редуктор в светосильный спектрограф, причем смена конфигураций “прямые изображения” — “длинная щель” занимает около минуты. На рис. 3 последовательно показан процесс получения наблюдательного материала на примере спектроскопии радиогалактики RCJ 1154+0431 (наблюдения по заявке Ю.Н. Парийского). Интегральная звездная величина объекта в фильтре V составляет 19^m8 , измеренное красное смещение $z = 1.0$ (см. Афанасьев и др., 2003а).

SCORPIO укомплектован набором гризм, 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 с числом штрихов от 300 до 1200 на миллиметр. Решетки представляют собой реплики с нарезных решеток и были изготовлены в ГОИ им. С.И. Вавилова (Санкт-Петербург). При работе с такими решетками максимальная квантовая эффективность всей системы (телескоп+SCORPIO+ПЗС) составляла 30% для спектров низкого ($\delta\lambda = 15\text{--}20 \text{ \AA}$) и всего около 3–5%

для спектров более высокого ($\delta\lambda = 5\text{--}6 \text{ \AA}$) разрешения. В 2003–2004 гг. начаты наблюдения с гризмами, использующими объемные фазовые голографические решетки (VPHG), которые отличаются высоким пропусканием и малым уровнем рассеянного света (Барден и др., 2000; Хабракен и др., 2001). Число штрихов для имеющихся VPH-решеток составляет от 550 до 3000 на мм, при этом достигается квантовая эффективность 20–50% как с низким (см. рис. 2), так и с высоким разрешением. Основной набор решеток был изготовлен фирмой Wasath Photonics (USA, <http://wasatchphotonics.com>), две решетки были любезно предоставлены университетом г. Падуи (Италия).

Достигнутая высокая квантовая эффективность прибора позволила “поставить на поток” выполнение задачи по определению красных смещений и спектральной классификации внегалактических радиоисточников, поскольку требуемые спектры низкого разрешения объектов $19\text{--}21^m$ удается получать даже при не очень хорошей прозрачности атмосферы и качестве изображений $3\text{--}5''$, при этом суммарная экспозиция составляет всего 10–20 мин (см., например, Афанасьев и др., 2003б; Амирханян и др., 2004). В то же время, при качестве изображений $1''.5$ в спектроскопии низкого разрешения звездообразных объектов, за два часа экспозиции достигается предельная звездная величина $R_c = 24^m$ (при этом в континууме получаемых спектров отношение сигнал/шум достигает 10). 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. п. “Обработка данных”). 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, но на смещенном кадре.

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

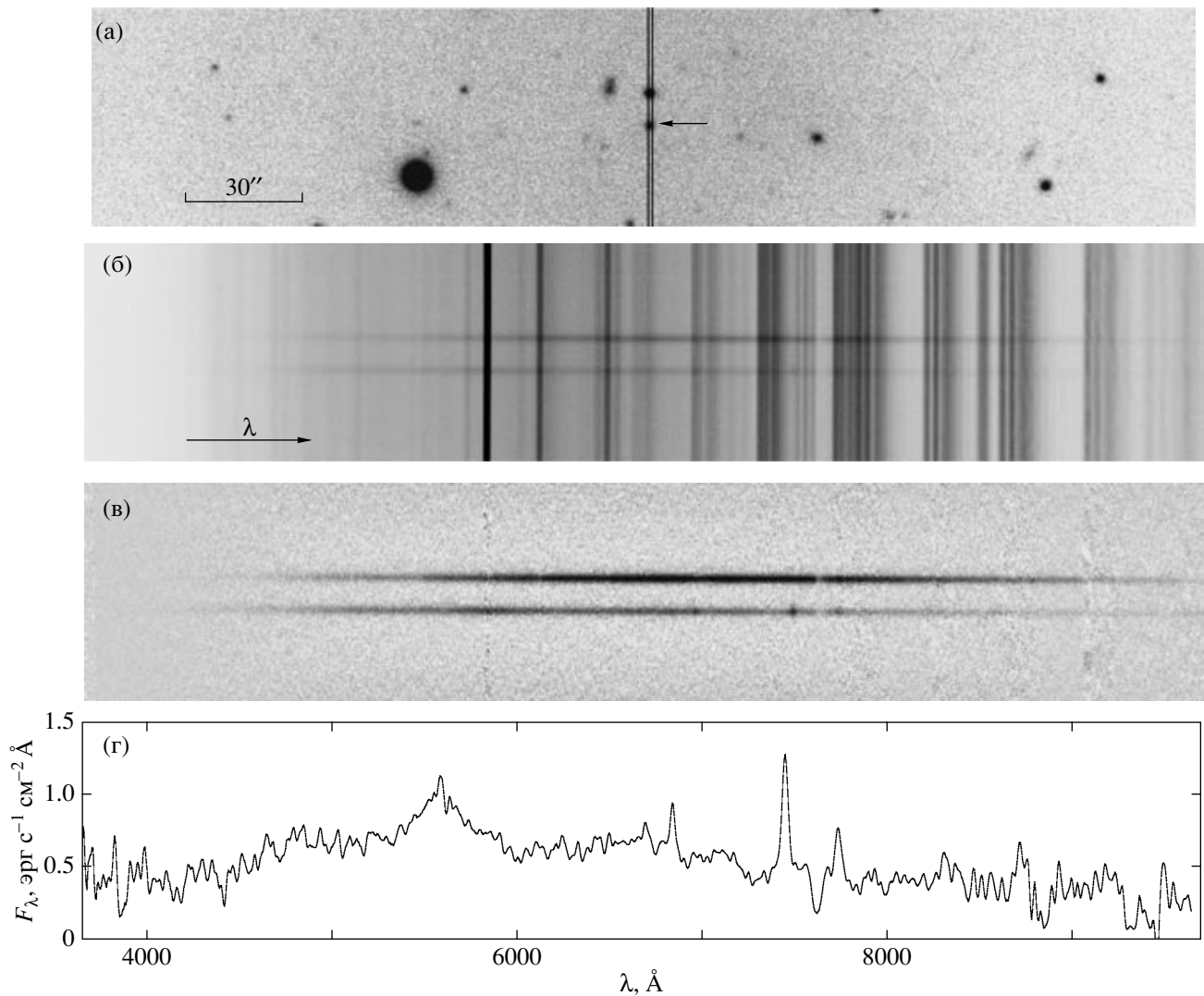


Рис. 3. Спектроскопия радиогалактики RCJ1154+0431 со SCORPIO: (а) — фрагмент изображения в фильтре R_C ($T_{\text{exp}} = 60$ с), показано положение щели спектрографа, радиогалактика отмечена стрелкой; (б) — спектр низкого разрешения (сумма двух экспозиций по 600 с); (в) — то же после вычитания спектра ночного неба; (г) — интегральный спектр в шкале длин волн.

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 $30''$. Такая методика позволяет полностью уйти от проблем потерь света на щели и искажения спектрального распределения энергии из-за эффекта дифференциальной атмосферной рефракции.

Многощелевая спектроскопия

Имеющийся набор призм может применяться и при наблюдениях с многощелевым блоком, хотя

из-за перемещения щелей в поле общий спектральный диапазон уменьшается по сравнению с вариантом длинной щели. При наблюдениях получают прямое изображение изучаемой площадки, вводят в фокальную плоскость телескопа многощелевой блок и устанавливают щели согласно измеренным на ПЗС-матрице координатам выбранных объектов. Время полной расстановки всех щелей (при требуемой точности $0.2-0.3''$) составляет около 10 мин. Пример получаемых спектров приводится на рис. 5.

Панорамная спектроскопия

Сканирующий ИФП является высокоэффективным прибором для исследования кинематики

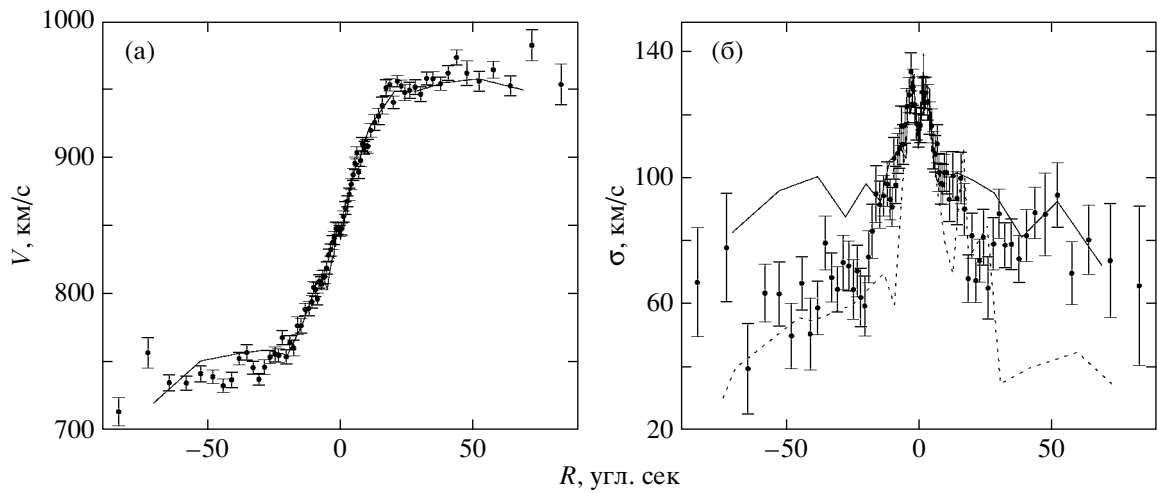


Рис. 4. Кинематика звездного компонента в галактике NGC 3412: распределение вдоль большой оси лучевых скоростей (а) и дисперсии лучевых скоростей (б). Сплошной линией показаны опубликованные измерения Агуэри и др. (2003), штриховой — Нестейн и др. (1999).

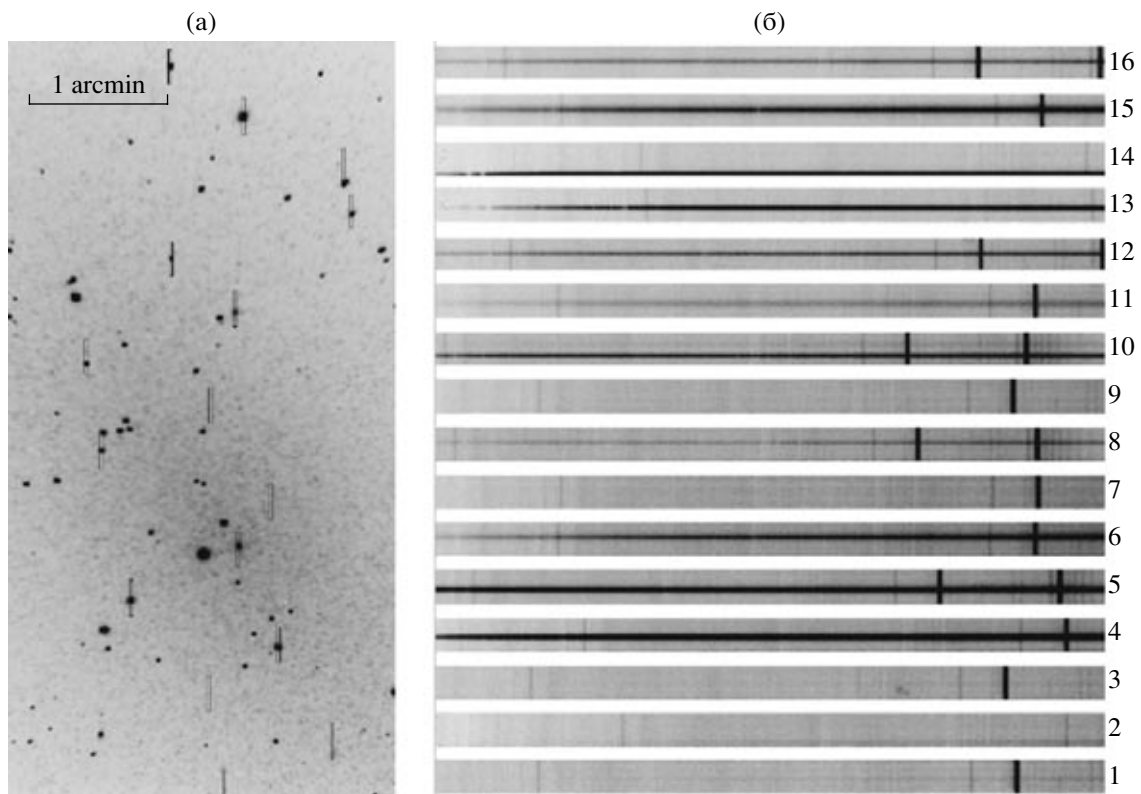


Рис. 5. Спектроскопия шаровых скоплений в близкой галактике NGC 147 (наблюдения по заявке М.Е. Шаринной): (а) — изображение галактики в фильтре V с отмеченными положениями щелей; (б) — полученные с многощелевым блоком спектры указанных объектов.

протяженных объектов. Наблюдения состоят в последовательном получении нескольких десятков изображений интерференционных колец от изучаемого объекта (или калибровочной лампы) при различных значениях оптического пути между плос-

скопараллельными пластинами. Радиус колец является функцией длины волны и расстояния между пластинами интерферометра. После специальной обработки эти интерферограммы могут быть представлены как “куб данных”, у которого две координаты

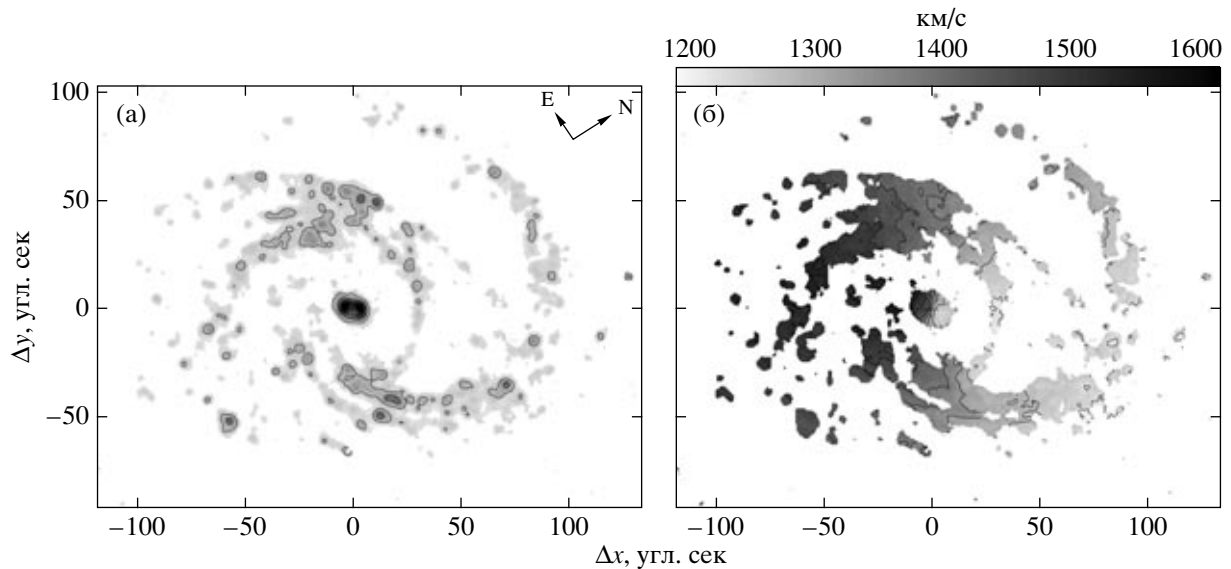


Рис. 6. Наблюдения галактики NGC 6951 в линии $H\alpha$ с ИФП на SCORPIO: (а) — изображение в эмиссионной линии, (б) — поле лучевых скоростей.

натные оси расположены в картинной плоскости, а длины волн (или доплеровские скорости, измеренные по смещению спектральных линий) являются третьей координатой. Иными словами, каждому элементу изображения сопоставлен индивидуальный спектр.

Сканирующий пьезоэлектрический интерферометр Queensgate ET-50 устанавливается между коллиматором и камерой, там где располагается выходной зрачок оптической системы. В САО имеются два сканирующих ИФП, предоставленных Марсельской (Франция) и Бюраканской (Армения) обсерваториями. Эти ИФП работают в 235 и 501 порядках интерференции (вблизи линии $H\alpha$) и обеспечивают спектральное разрешение в этой линии 2.5 и 0.7 Å при свободном от перекрытия порядков спектральных диапазонах 28 и 13 Å соответственно. Они успешно применяются для изучения объектов как расположенных 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 10–20 Å. При наблюдениях различных галактик необходим набор фильтров, центрированных на длину волны изучаемой эмиссионной линии, смещенной из-за эффекта Доплера. С имеющимися в САО РАН фильтрами в настоящий момент для наблюдений в линии $H\alpha$ доступны объекты с лучевыми скоростями от –200 до +10000 км/с и со скоростями от

+3500 до +11000 км/с для наблюдений в линии [OIII] $\lambda 5007$. Большинство узкополосных фильтров изготовлено в НИИПП (г. Москва), несколько фильтров предоставлены нашими коллегами из Бюраканской обсерватории (Т. Мовсесян) и университета г. Падуи (Дж. Барбиэри).

На рис. 6 показан результат наблюдений с ИФП близкой спиральной галактики NGC 6951. Построенное поле скоростей хорошо согласуется с аналогичными наблюдениями Розас и др. (2002). Точность измерения лучевых скоростей здесь составляет около 5 км/с. Подробное обсуждение полученных данных приводится в работе Моисеева и др. (2004).

Поляризационные наблюдения

В режиме спектрополяриметрических наблюдений перед щелью SCORPIO устанавливается маска, которая формирует пунктирную щель. Высота каждой щели при этом составляет 7".5, а расстояние между центрами щелей — 9".8. После ввода в пучок анализатора поляризации на выходе спектрографа получается серия пар спектров во взаимно перпендикулярных плоскостях поляризации. Сравнивая спектры полученные при ориентации анализатора 0 и 45°, мы однозначно определяем степень линейной поляризации и позиционный угол плоскости поляризации объекта в зависимости от длины волны. Реальная точность измерения степени поляризации в спектре, помимо статистики отсчетов, определяемой экспозицией, зависит от величины рассеянного света в спектрографе,

Таблица 4. Поляризационные наблюдения со SCORPIO

Объект	Измерения SCORPIO		Шмидт и др. (1992)	
	$P, \%$	θ	$P, \%$	θ
BD+59d389	6.61 ± 0.11	$97^\circ \pm 1^\circ$	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	—

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 измерения степени линейной поляризации в SCORPIO составляет 0.2–0.3%, а точность измерения 0.1–0.3% (в зависимости от экспозиции). В табл. 4 приводятся результаты измерений стандартов поляризации с решеткой VPHG550G (дисперсия 2 Å/пиксель) в фильтре V. Значения степени поляризации, которые сравниваются с литературой, получены в результате интегрирования спектров в полосе V.

На рис. 7 показан пример суммарного спектра центральной области сейфертовской галактики 2-го типа Mrk 573, полученный во время тестирования поляризационного режима SCORPIO в августе 2004 г. Показаны зависимость степени линейной поляризации от длины волны. Спектры были получены при качестве изображения 2" с решеткой VPHG550G. Была проведена серия экспозиций по 10 мин в последовательных положениях угла поворота анализатора (0 и 45°). Полная экспозиция составила 2 ч, а интегральная яркость ядра галактики в щели составила около 16^m в полосе V. На рис. 7в выделяется широкая компонента водородных линий. Полученный результат находится в удовлетворительном согласии с результатами наблюдений других авторов (Нагао и др., 2004)

Обработка данных

Наблюдательные данные записываются в формате FITS, для их обработки могут использоваться различные стандартные системы редукирования астрономических изображений, такие как MIDAS или IRAF. Процесс первичной редукирования достаточно 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-матрицы в “красной” области спектра (см. выше). 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 снимков является построение изображения усредненного интерференционного узора по серии всех накоплений в соответствующем фильтре в течение наблюдательной ночи.

Дальнейшая модернизация прибора

При наблюдениях на 6-м телескопе используется штатная система автогидирования по изображению на TV-подсмотре (Шергин, Маскимова, 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. В 2005 г. планируется ввести в действие систему “быстрого” гидирования, основанную на использовании наклоняемой пластины из плавленого кварца, закрепляемой в

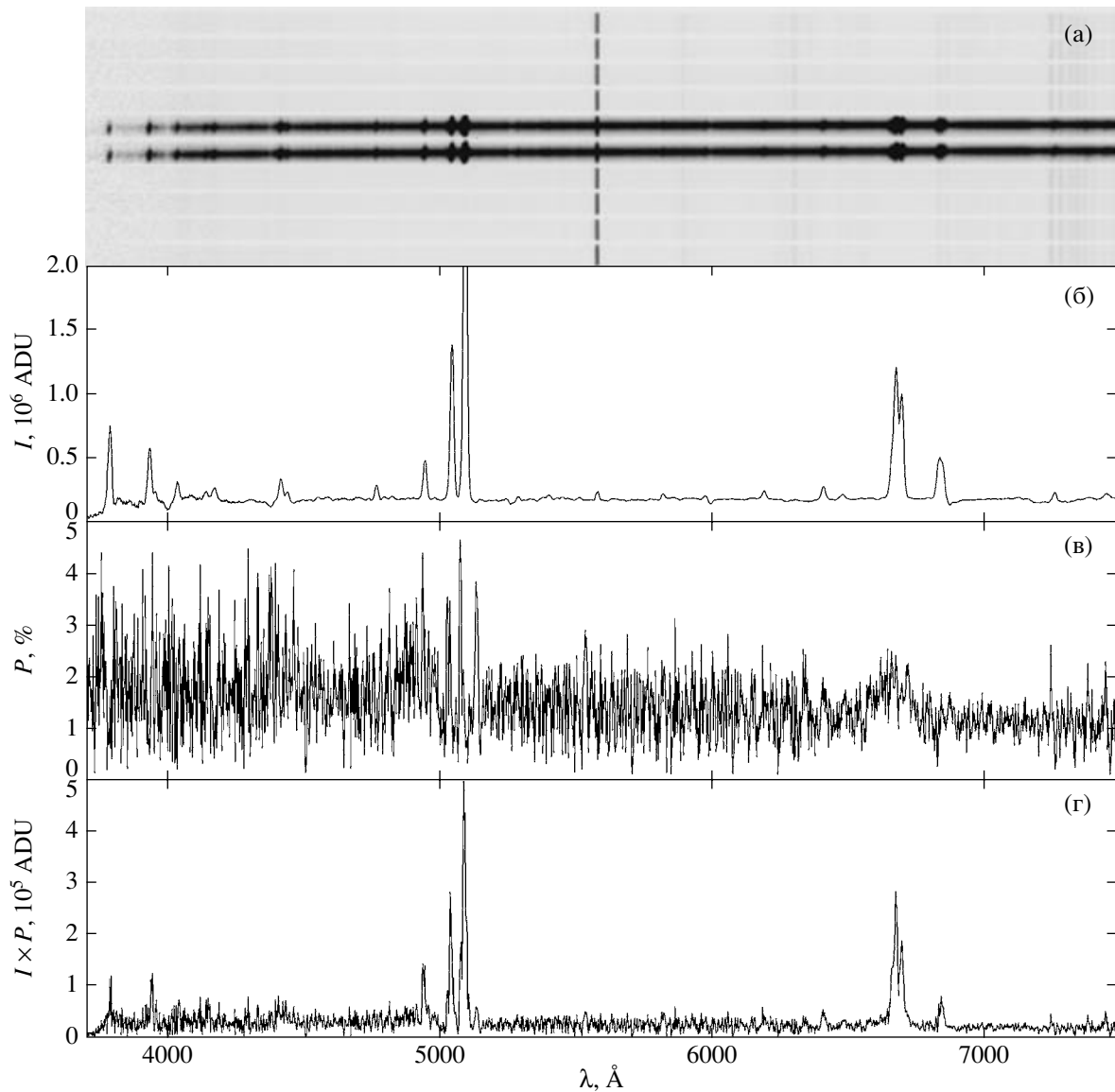


Рис. 7. Спектрополяриметрия сейфертовского ядра в галактике Mrk 573 (тип Sy2). Гризма VPHG550G, экспозиция 120 мин, щель $1 \times 7''.5$: (а) — исходный спектр, с анализатором в позиции 0° ; (б) — интегральный спектр ядра ($V = 16^m$), за вычетом спектра окружающей галактики (I); (в) — степень поляризации ядра (P); (г) — спектр ионизованного излучения ($I \times P$). Единица ADU = 0.5ϵ .

карданном подвесе (tip-tilt). Такая система позволит компенсировать колебания с частотами до 10 Гц, что даст возможность существенно уменьшить влияние собственных колебаний телескопа и этим улучшить качество звездных изображений. Например, использование локального tip-tilt корректора в фокусе Несмит-2 БГА позволило увеличить проникающую способность находящихся там спектрографов на $0.5-1^m$ (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 — отсутствие 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 9000 \AA) чувствительность в красной области спектра, что позволит увеличить эффективность SCORPIO при наблюдениях в ближнем ИК-диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая эффективность нового прибора подтверждается в процессе его постоянного прак-

тического использования. За период с сентября 2000 г. по сентябрь 2004 г. в САО РАН со SCORPIO проведено более 200 ночей наблюдений, полученные результаты использовались в 26 статьях, трех кандидатских и двух докторских диссертациях. Более подробное описание спектрографа и методики наблюдений с ним можно найти в работе Афанасьева и др. (2004), а текущее описание спектрографа доступно в Интернете по адресу: <http://www.sao.ru/hq/moisav/scorpio/scorpio.html>, там же находится постоянно обновляемая галерея наблюдавшихся объектов. Аналогичный прибор (только без платформы-адаптера и многоцелевого блока), созданный в САО РАН, успешно используется в наблюдениях на 2.6-м телескопе Бюраканской астрофизической обсерватории (Армения).

Авторы благодарны администрации САО РАН за постоянную поддержку и внимание при разработке и изготовлении прибора, администрации Института астрономии РАН за предоставление объемных голографических решеток, С.Н. Додонову и В.Р. Амирханяну за плодотворные обсуждения, Э.Б. Гажуру, С.Р. Желенкову, Е.И. Перепелицыну, В.И. Фатееву за изготовление и настройку отдельных узлов спектрографа. 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 благодарит "Фонд содействия отечественной науке" и Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 04-02-16042) за частичное финансирование проводимых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агуэри и др. (J.A.L. Aguerri, V.P. Debattista, and E.M. Corsini), *MNRAS* **338**, 465 (2003).
2. Амирханян В.Р., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н. и др., *Письма в Астрон. журн.* **30**, 915 (2004).
3. Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Моисеев А.В. и др., *Астрон. журн.* **80**, 409 (2003а).
4. Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Моисеев А.В. и др., *Письма в Астрон. журн.* **29**, 656 (2003б).
5. Афанасьев В.Л., Гажур Э.Б., Желенков С.Р., Моисеев А.В., *Бюлл. САО РАН* **5** (2004).
6. Барден и др. (S.C. Barden, J.A. Arns, W.S. Colburn, and J.B. Williams), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 809 (2000).
7. Бессель (M.S. Bessell), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 1181 (1990).
8. Бузони и др. (B. Buzzoni, B. Delabre, H. Dekker, *et al.*), *ESO Messenger* № 38 (1984).
9. Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С., *Препринт САО РАН* №155 (2001).
10. Куртес (G. Courtés), *Ann. d'Astrophys.* **23**, 115 (1960).
11. Куртес (G. Courtés), *Astron. J.* **69**, 325 (1964).
12. Лозинская Т.А., Архипова В.П., Моисеев А.В., Афанасьев В.Л., *Астрон. журн.* **79**, 19 (2002).
13. Моисеев (A.V. Moiseev), *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 74 (2002); *astro-ph/0211104*.
14. Моисеев и др. (A.V. Moiseev, J.R. Valdés, and V.O. Chavushyan), *Astron. Astrophys.* **421**, 433 (2004).
15. Нагао и др. (T. Nagao, K.S. Kawabata, T. Murayama, *et al.*), *Astron. J.* **128**, 109 (2004).
16. Нестейн и др. (E. Neistein, D. Maoz, H.-W. Rix, and J.L. Tonry), *Astron. J.* **117**, 2666 (1999).
17. Никлас и др. (H. Nicklas, W. Seifert, H. Boehnhardt, *et al.*), *Optical Telescopes of Today and Tomorrow, Proc. SPIE 2871* (Ed. A.L. Ardeberg, Sweden: SPIT, 1997), p. 1222.
18. Розас и др. (M. Rozas, M. Relano, A. Zurita, and J.E. Beckman), *Astron. Astrophys.* **386**, 42 (2002).
19. Фатхуллин (T.A. Fatkhullin), *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 5 (2002).
20. Хабракен и др. (S. Habraken, P.-A. Blanche, P. Lemaire, *et al.*), *ESO Messenger* №106, 6 (2001).
21. Шергин В.С., Максимова В.М., Программа автогидирования TV guide, *Руководство пользователя, САО* (2001); http://www.sao.ru/hq/vsher/vsher_ru.html.
22. Шмидт и др. (G.D. Schmidt, R. Elston, and O.L. Lupie), *Astron. J.* **104**, 1563 (1992).