

Блок IFU в фокальном редукторе SCORPIO-2: описание режима интегральной полевой спектроскопии на 6-м телескопе БТА

В. Л. Афанасьев,^{1,*} О. В. Егоров,^{2,1} А. Е. Перепелицын¹

¹ *Специальная Астрофизическая Обсерватория Российской Академии Наук, Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия 357147, Россия*

² *Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Университетский проспект, 13, Москва, 119234, Россия*

Мы описываем схему и особенности конструкции нового блока IFU, предназначенного для интегральной полевой спектроскопии в составе фокального редуктора SCORPIO-2, который устанавливается в первичном фокусе на 6-м телескопе БТА САО РАН. Конструкция блока основана на принципе формирования панорамных спектров с помощью линзового раstra в сочетании с оптическими волокнами. В блоке используется прямоугольный растр из 22×22 квадратных линз, каждая размером 2 мм. Изображение объекта перестраивается оптикой с увеличением $23\times$ из фокальной плоскости телескопа в плоскость линзового раstra. Масштаб изображения $0.75''/\text{линзу}$, а поле зрения прибора $16.5'' \times 16.5''$. Растр содержит также два дополнительных массива 2×7 линз для получения спектров ночного неба, изображения которых отстоят от центра на $\pm 3'$. Изображения микроразрешенных объектов при помощи оптических волокон реформируются в две псевдощели, расположенные на входе коллиматора IFU. Набор объемных фазовых голографических решеток (VPHG) обеспечивает в режиме IFU спектральный диапазон $4600 \div 7300 \text{ \AA}$ и разрешение $\lambda/\delta\lambda$ от 1040 до 2800. Квантовая эффективность панорамной спектроскопии со SCORPIO-2 составила 6-13% в зависимости от применяемой решетки. В статье также описана методика получения и редукции данных с блоком IFU и приводятся результаты тестовых наблюдений сейфертовской галактики Mrk 78 на 6-м телескопе.

Keywords: instrumentation: spectrographs—techniques: spectroscopic—techniques: imaging spectroscopy—methods: data analysis

1. ВВЕДЕНИЕ

Интегральными полевыми спектрографами (IFS), предназначенными для панорамной спектроскопии, в настоящее время оснащены большинство крупных телескопов. Концепция IFS была предложена в 1981 г. Куртесом [1] и опубликована в [2]. различные варианты спектрографов были впервые реализованы в работах [3–5]. В прошлом веке панорамная спектроскопия представлялась многим астрономам методически сложной и применимой только для узкого класса задач, ограниченных малым полем зрения таких спектрографов. Появление за последние десятилетия новых технологических возможностей привело к созданию эффективных IFS, предназначенных для широкого круга задач, перечисление которых не предмет данной работы. Отметим лишь специализированные спектрографы, которые активно используются астрономами последние десятилетия - GMOS [8] и MUSE [9] для 8-ми метровых телескопов, а также SAURON [10] и PMAS [11] для 3-4 метровых телескопов.

На 6-м телескопе первая версия IFS, ко-

торый был назван MPFS (Multi Pupil Field Spectrograph), была создана в 1989 г. [5]. В различных модификациях этот спектрограф успешно проработал на телескопе до 2009 г. и по результатам наблюдений на нем было опубликовано более 100 статей по исследованию галактик разных типов и газовых туманностей Галактики. Описание последней версии спектрографа можно найти в [6, 7]. Основным недостатком этого прибора явилось низкое пропускание ($DQE < 5\%$) из-за использования в спектрографе зеркально-линзовой камеры. В настоящее время прибор находится на реконструкции - мы намерены установить в нем линзовую камеру и повысить пропускание в 5-6 раз.

С 2000 на БТА работает новый многорежимный спектрограф SCORPIO [12]. В спектрографе реализованы режимы получения изображений, спектроскопия с длинной щелью, мультиобъектная спектроскопия, спектрополяриметрия и панорамная спектроскопия при помощи сканирующего интерферометра Фабри-Перо (IFP). Желание расширить возможности этого спектрографа и переход на светоприемник большего формата, побудило нас начать в 2010 г. проект создания нового многорежимного спектрографа SCORPIO-2 [13]. Описание уже реализованных возможностей этого спектрографа можно найти на WEB-странице проекта [14]. В новом приборе предусмотрен режим панорамной спектроскопии и на-

* Electronic address: vafan@sao.ru

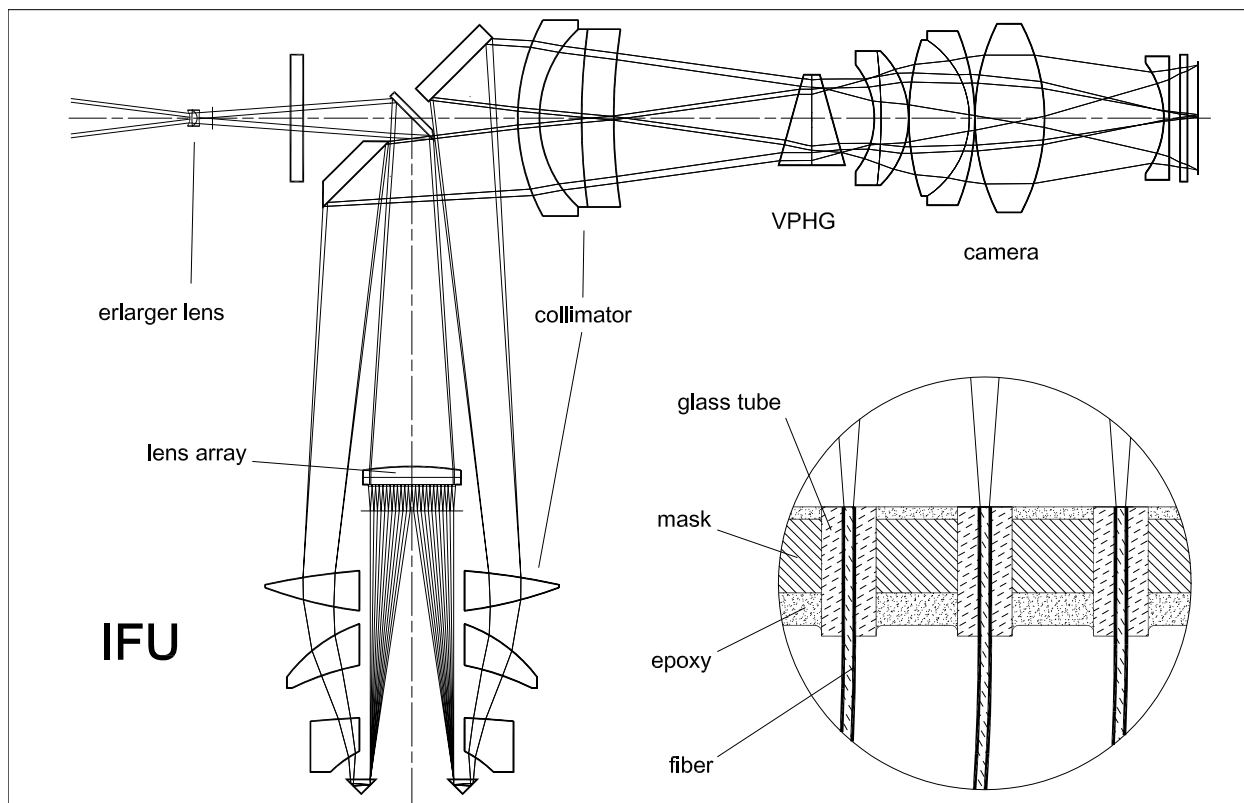


Рис. 1. Оптическая схема режима IFU в спектрографе SCORPIO-2

стоящая статья посвящена описанию режима IFU спектрографа SCORPIO-2: конструкции, методике обработки данных и первым результатам, полученным на БТА.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Фокальный редуктор SCORPIO-2 устанавливается в первичном фокусе 6-м телескопа БТА. В отличие от большинства панорамных спектрографов больших телескопов, которые устанавливаются во вторичных фокусах и имеют входную светосилу $< F/8$, SCORPIO-2 имеет входную светосилу $F/4$. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на конструктивные особенности интегрального полевого блока IFU (Integral Field Unit) при небольших габаритах спектрографа, которые ограничивались объемом кабины первичного фокуса. Передний отрезок SCORPIO-2 (расстояние от посадочной плоскости поворотного стола до щели) равен 38 мм, что не позволяет реализовать технические решения, аналогичные GMOS[8] и PMAS[11]. Нами найдено решение, которое позволяет разместить блок IFU в корпусе спектрографа, сохранив возможность быстрого переключения режимов работы. В основе нашего решения лежит принцип

использование линзового раstra в сочетании оптическими волокнами, предложенный Куртесом [1] и впервые реализованный нами на БТА [5]. В отличие от [11] мы используем короткие световоды длиной 140-150 мм, что позволило расположить блок IFU внутри спектрографа. Это уменьшило световые потери и минимизировало вариации пропускания волокон из-за переменного изгиба. В режиме IFU мы используем другой коллиматор, вводимый в оптический пучок вместо коллиматора, предназначенного для фокального редуктора. Оптическая схема спектрографа в режиме IFU показана на рис.1. Камера спектрографа (6-ти линзовый апохромат, $F=109$ мм, $F/2.6$, $2\omega = 36^\circ$), используется в спектрографе во всех режимах и формирует изображение на входе ПЗС матрицы EEV42-90 с форматом 4600×2048 px ($1\text{px}=13.5\text{mkm}$). Коллиматор блока IFU (5-ти линзовый ахромат, $F=240$ мм, $F/6$, $2\omega = 22^\circ$) по светосиле согласован с входной апертурой оптических волокон. Для уменьшения габаритов мы используем решение, при котором узел световодов расположен внутри коллиматора, имеющем в последних трех линзах прямоугольные отверстия размером 60×80 мм. Две псевдощели длиной 56 мм проектируются коллиматором и камерой в плоскость светоприемника. Расстояние между центрами щелей равно 66 мм. Объемная фазо-

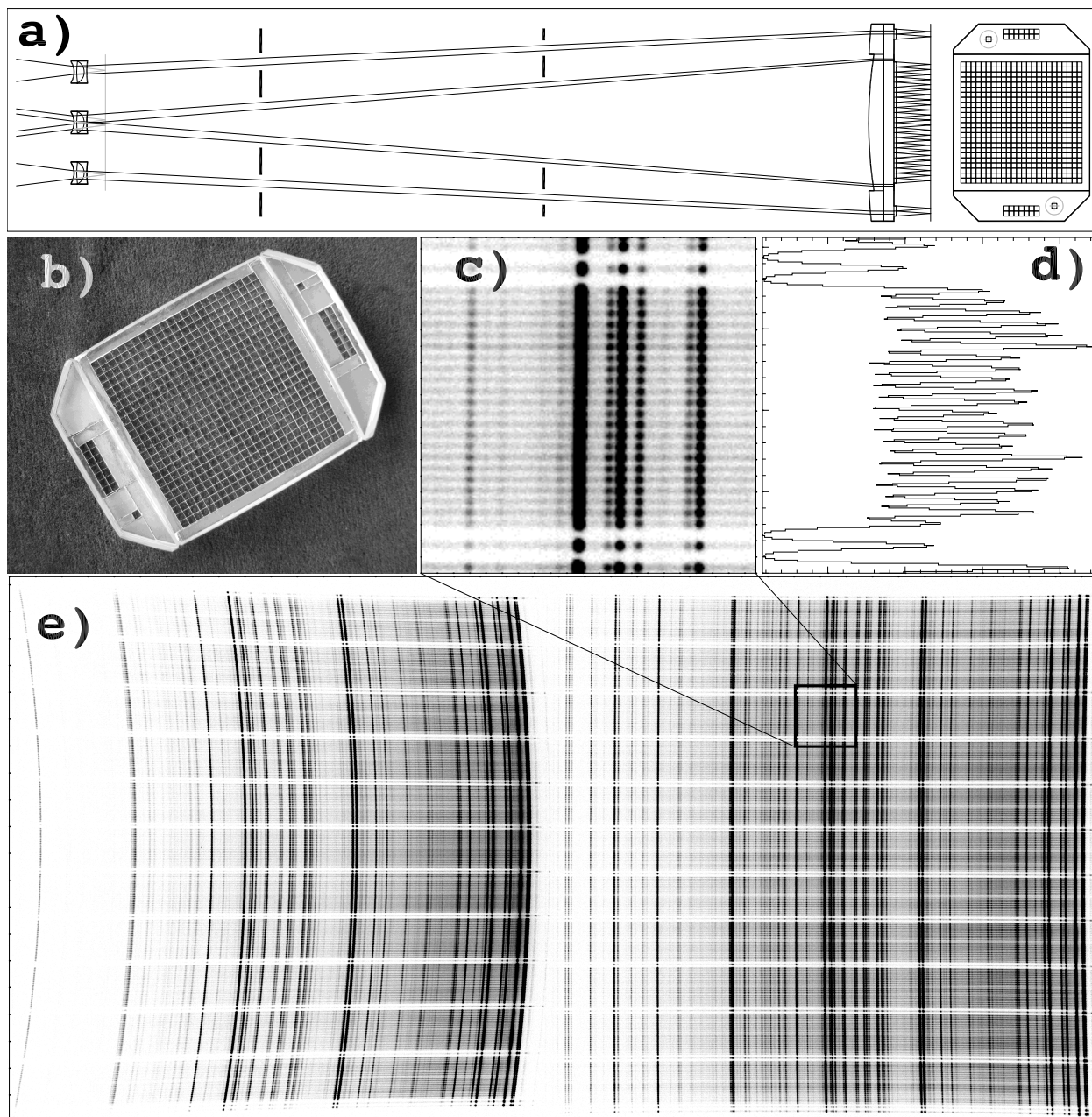


Рис. 2. Принцип работы режима IFU спектрографа SCORPIO: а)- оптическая схема формирования изображения на линзовом растре, б) - фотография линзового растра, в) изображение выделенной области спектров, полученных в режиме IFU, д) - разрез поперек направления дисперсии, е) изображения спектров калибровочного источника, полученных в режиме IFU

вая голографическая решетка (VPHG) формирует на формате светоприемника два массива спектров. Рабочий участок спектра для каждой решетки выделяется полосовым интерференционным фильтром, вводимым в пучок после линзы увеличителя.

Принцип работы режима IFU в спектрографе показан на рис.2. На верхней панели (а) рисунка приведена оптическая схема формирования изображения на линзовом растре. Централь-

ная отрицательная линза проектирует увеличенное изображение исследуемого поля из фокальной плоскости главного зеркала БТА в плоскость линзового растра. Используемый нами линзовый растр состоит из массива 22×22 прямоугольных линз размером 2×2 мм с фокусным расстоянием 13.5 мм. Увеличение изображения в нашем случае составляет $23\times$, что дает масштаб изображения $0.75''$ на линзу и размер поля зрения $16.5'' \times 16.5''$. Две другие линзы, установленные на

расстояниях ± 20 мм от центра ($\pm 3'$), проектируют изображения участков ночного неба на растры 2×7 линз. Для выполнения условия телецентризма, перед каждым линзовым растром установлены полевые линзы. Фотография линзового раstra показана на панели (b). Каждая линза формирует изображение зеркала телескопа (микрзрачок) диаметром 150 мкм.

Полученная матрица микрзрачков реформируется при помощи оптических волокон в две псевдощели. На панели (e) рис.2 показаны спектры калибровочного источника (непрерывный спектр - кварцевая лампа, а линейчатый - лампа с наполнением Ar-Ne-He) от двух псевдощелей. Реформирование псевдощели осуществляется таким образом, что столбцы одной половины матрицы микрзрачков последовательно располагаются вдоль щели, разделяясь на группы по 22 микрзрачка, между которыми находятся изображения микрзрачков от ночного неба. Это демонстрируется на увеличенном участке спектров IFU - панели (c) и (d).

2.1. Линзовый растр с оптическими волокнами

Остановимся более подробно на конструкции узла линзового раstra и световодов. Для реформирования матрицы микрзрачков мы используем оптическое волокно, изготовленное по нашему заказу фирмой "НЦВО-Фотоника"¹, которые имеют следующие параметры:

- числовая апертура 0.10 ± 0.01 ;
- материал сердцевины - кварцевое стекло с высокой концентрацией ОН, световой диаметр 150 мкм;
- материал оболочки - легированное кварцевое стекло, диаметр 165 мкм;
- защитное покрытие - алюминий, диаметр $195 \div 200$ мкм.

Как уже отмечалось выше, размер микрзрачка в нашем случае составляет величину 150 мкм, а максимальная апертура сходящегося пучка после каждой линзы соответствует светосиле F/4 и она согласована с входной апертурой световода. Ясно, что неточная установка световодов в позиции микрзрачков приведет к потере пропускания. Проблема точной расстановки световодов известна [11] и имеет несколько решений. В нашем случае мы предварительно установили блок IFU на телескопе и получили фотографический снимок матрицы микрзрачков. Положения микрзрачков были измерены на фотопластинке и далее была изготовлена маска с отверстиями диа-

метром $805 \div 810$ мкм, в которые вставлялись капиллярные стеклянные трубки с внутренним диаметром $205 \div 215$ мкм и внешним $780 \div 790$ мкм. Волокна вставлялись в эти трубки и закреплялись оптическим клеем (см. рис.1). Другие концы волокон вставлялись в щель шириной 205 мкм между двумя стеклянными пластинами и тоже закреплялись оптическим клеем. Волокна вместе с трубками заливались эпоксидным клеем, после чего производилась полировка торцов световодов с двух сторон. Следует отметить, что такая технология обеспечивает высокое качество обработки торцов световодов и как следствие - малые френелевские потери на входе и выходе волокон. После оптической обработки и установки блока в оправу были измерены положения световодов. Результаты измерения показаны на рис.3.

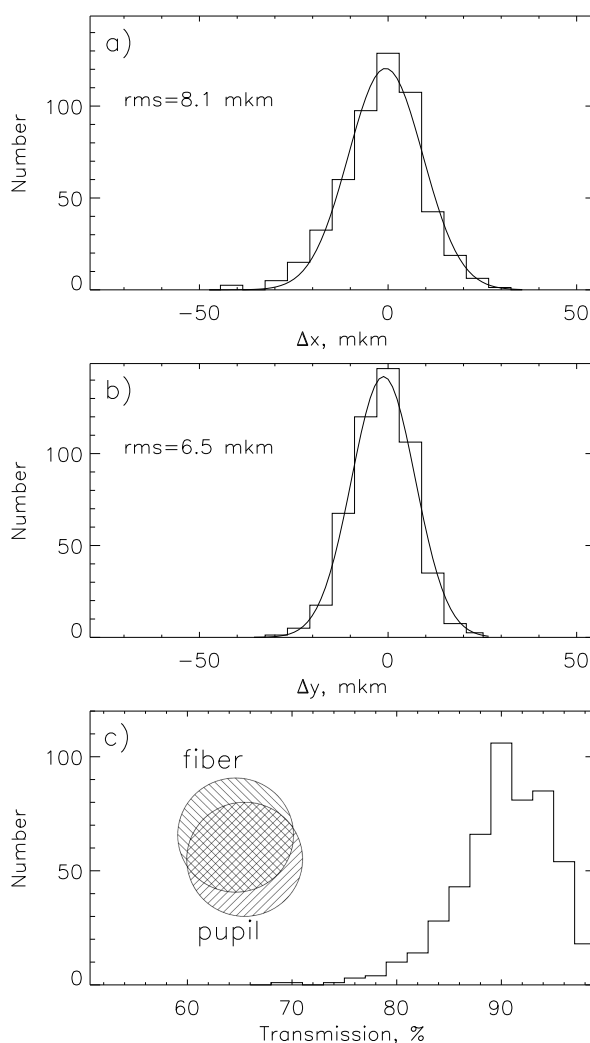


Рис. 3. Дegrаdация пропускания волоконно-линзового узла IFU из-за ошибок установки оптических волокон: а) и б) - распределение ошибок по осям X и Y, в) - распределение величины пропускания волокон, среднее значение $91.5 \pm 3.3\%$.

¹ <http://www.forc-photonics.ru/>

Как следует из рисунка, пропускание, которое определяется ошибкой расстановки волокон, составляет около 90%. На реальное пропускание влияют также френелевские потери на оптических поверхностях (в нашем случае они меньше 15%) и хроматические aberrации линз раstra. Расчеты показывают, что в кружке диаметром 150 мкм концентрируется не менее 85% энергии от полихроматического изображения микрозрачка. Таким образом можно заключить, что пропускание узла линзового раstra составляет величину не менее 65%. Механическая конструкция узла позволяет юстировать положение линзового раstra относительно массива волокон при помощи микрометрических винтов. Предусмотрена возможность контроля юстировки на телескопе.

2.2. Особенности работы VPHG в режиме IFU

В фокальном редукторе SCORPIO-2 используются в качестве диспергирующего элемента объемные фазовые голографические решетки (VPHG) с призмами прямого зрения. Применяемые в астрономической практике VPHG имеют высокое пропускание и малый рассеянный свет [15]. Если φ - угол вершины призмы, а θ - угол между оптической осью и осью коллимированного пучка, то угол падения на решетку α можно найти из соотношения $\sin(\varphi - \theta) = n_p \sin(\varphi - \alpha)$, где n_p - показатель преломления материала призмы. При работе в режиме обычной спектроскопии $\theta = 0$ (пучок параллелен оптической оси), а при работе в режиме IFU $\theta \neq 0$. Это приводит к тому, что эффективность VPHG для разных щелей будет неодинаковой.

В приближении Когельника [16] эффективность решетки для заданного угла падения α и длины волны λ дается следующим соотношением:

$$\eta(\lambda) = \frac{1}{2} \sin^2 \Psi + \frac{1}{2} \sin^2(\Psi \cos(\alpha + \beta(\lambda))), \quad (1)$$

$$\text{где } \Psi = \frac{\pi \Delta n_g d_g}{\lambda \cos \alpha}.$$

Здесь: d_g - толщина желатинового слоя решетки; Δn_g - амплитуда модуляции показателя преломления n_g слоя, $\beta(\lambda)$ - угол рассеяния света с длиной волны λ на плоскость решетки. Эффективность решетки максимальна на длине волны λ_{max} , если $\alpha = \beta(\lambda_{max})$. Тогда угол α называется углом Брэгга, и выполняется условие:

$$\lambda_{max} \nu_g m = n_g \sin(\alpha), \quad (2)$$

где ν_g - частота модуляции показателя преломления решетки, а m - порядок рассеяния, эквива-

лентный порядку дифракции у обычных дифракционных решеток. Отметим, что в этом случае величина $1/\nu_g$ эквивалентна числу штрихов нарезных решеток, α - углу блеска, а $\beta(\lambda)$ углу дифракции. Углы между коллимированными пучками в IFU и оптической осью (см.рис.1) равны $\pm 8^\circ$. На рис.4а показаны вычисленные согласно соотношению (1) кривые эффективности для решетки VPHG1200@540, имеющей максимум концентрации на $\lambda = 5400 \text{ \AA}$ и $1/\nu_g = 1200 \text{ мм}^{-1}$. Вычисления проводились при следующих значениях параметров решетки: $n_g = 1.582$, $\Delta n_g = 0.0286$, $d_g = 10.15 \text{ мкм}$ и значении угла Брэгга 19.2° в воздухе. При этом использовалась призма из стекла ЛК-8 ($n_p = 1.473$) с углом $\varphi = 36^\circ$. Как видно из рисунка, теоретические кривые эффективности для разных щелей существенно отличаются - в среднем, что соответствует середине диапазона, эффективность VPHG в режиме IFU падает в ~ 1.5 раза по сравнению с режимом LS. При этом, для "левой" щели ($\theta = +8^\circ$) эффективность падает с длиной волны, а для "правой" ($\theta = -8^\circ$) - растет.

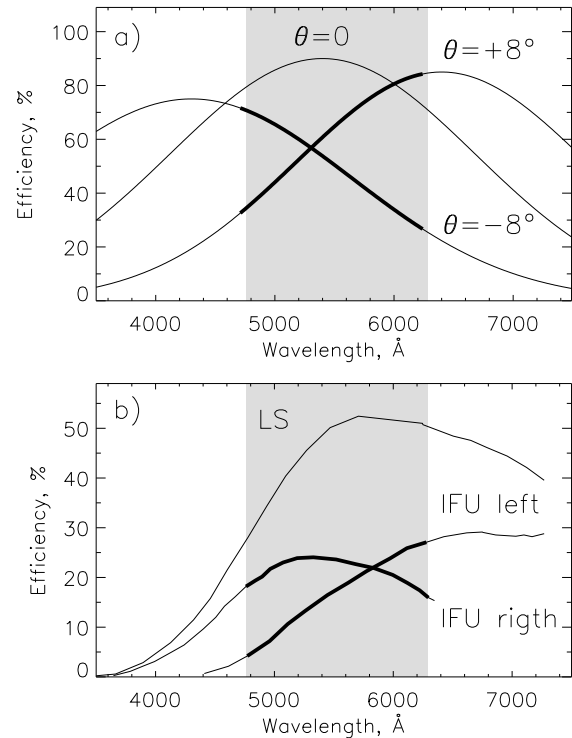


Рис. 4. Расчетная (а) и измеренные (б) эффективности решетки VPHG1200@540 в режиме IFU.

Для проверки этого мы сравнили величину спектральных потоков от кварцевой лампы в режиме IFU с режимом длинной щели (LS) для решетки VPHG1200@540, имеющейся в SCORPIO-2. При этом использовались данные об эффективности спектрографа в режиме длинной щели

с учетом спектральной чувствительности матрицы и пропускания оптики SCORPIO-2 [13]. Мы определяли не только разницу между эффективностью VPHG в разных режимах, но и разницу между пропусканием оптики, которая включала в себя пропускание линзового раstra со световодами. Результат сравнения реального спектрального пропускания для каждой щели в режимах IFU и LS показан рис.4б. На рисунке серым цветом заштрихован выделяемый интерференционным фильтром спектральный интервал для этой решетки $4900 \div 6150 \text{ \AA}$. Как видно из рисунка, эффективность режима IFU в центре спектрального диапазона уменьшается в среднем в 2.5 раза по сравнению с режимом LS. Эта оценка, с учетом пропускания линзового раstra со световодами порядка 60-65%, согласуется с нашими расчетами.

Параметры используемых в режиме IFU решеток приведены в таблице 1, где указаны: имя решетки (цифра перед символом @ указывает число штрихов, а после - длину волны максимальной концентрации в нм), спектральный диапазон, выделяемый фильтром, интервал дисперсий в $\text{\AA}/\text{px}$ и пределы разрешения $\lambda/\delta\lambda$, которое вычисляется по измеренным ширинам линий.

Таблица 1. Параметры решеток в режиме IFU.

Grating Name	Spectral Coverage, \AA	Dispersion $\text{\AA}/\text{px}$	Resolution $\lambda/\delta\lambda$
VPHG940@600	4700 \div 7300	0.90 \div 1.15	1044 \div 1269
VPHG1200@540	4800 \div 6150	0.81 \div 0.90	1186 \div 1351
VPHG1800@510	4600 \div 5400	0.40 \div 0.50	1957 \div 2118
VPHG1800@590	5700 \div 6500	0.41 \div 0.51	2375 \div 2453
VPHG1800@660	6300 \div 7100	0.42 \div 0.52	2571 \div 2582
VPHG2300@520	4930 \div 5630	0.30 \div 0.40	2739 \div 2815

2.3. Вариации разрешения и гнуття спектрографа в режиме IFU

Стабильность разрешения (PSF) по всему регистрируемому полю в режиме IFU являются одной из важнейших характеристик прибора. Величины вариаций полуширин линий в спектрах, формируемых отдельными световодами, должны быть малы и плавно меняться по полю зрения. Это, в первую очередь, определяет успех вычитания спектра ночного неба. Вариация ширин поперек дисперсии влияет на качество экстракции спектров и, как следствие на фотометрическую воспроизводимость прибора. На рис.5 показаны измеренные FWHM по монохроматическим изображениям отдельных световодов в спектре неона. Спектр был получен с решеткой VPHG1800@660 в диапазоне $6300 \div 7100 \text{ \AA}$, где регистрируется много ярких линий. На рис.5а показано изменения

полуширины линий вдоль дисперсии. Отметим, что разброс точек определяется ошибками измерений. Увеличение величины FWHM на краю формата обусловлено плавным изменением углового увеличения решетки (magnification) и деградацией разрешения камеры на краю поля. Первое обстоятельство приводит к заметному изменению величины дисперсии на левой щели от $0.52 \text{ \AA}/\text{px}$ до $0.40 \text{ \AA}/\text{px}$, что дает изменение профиля линии в шкале скоростей с 110 км/с до 120 км/с. Такие изменения приемлимы для большинства задач, где требуется анализ профилей линий исследуемых объектов. На рис.5б приводятся вариации ширины профиля вдоль псевдощели, которые с точностью до ошибок измерений отсутствуют. Этот результат важен для выбора алгоритмов экстракции спектров, и позволяет надеяться на реализацию хорошей фотометрической стабильности режима IFU.

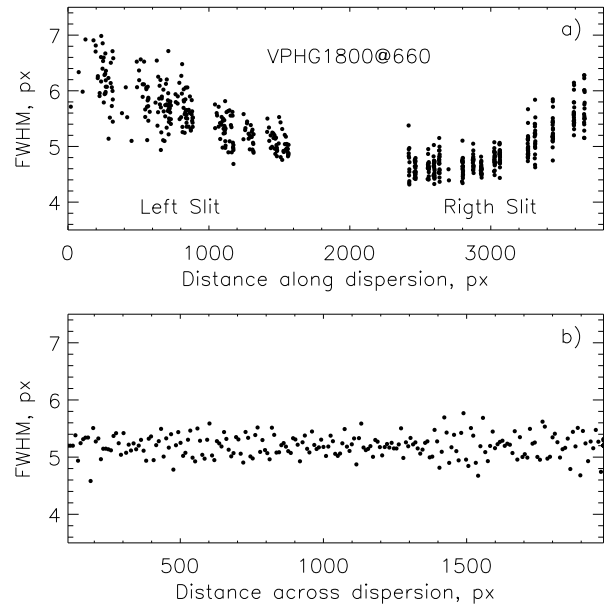


Рис. 5. Вариации ширины линий спектра сравнения в режиме IFU для решетки VPHG1800@660: а) вдоль направления дисперсии и б) - поперек дисперсии.

Гнуття присущи любому прибору, установленному в подвижном фокусе телескопе. Измерения гнуттий SCORPIO-2 в режиме LS показывают высокую позиционную стабильность прибора - в диапазоне зенитных расстояний $z = 5^\circ \div 60^\circ$ они не превышают 0.8 px ($\sim 10 \text{ мкм}$). Особенность режима IFU состоит в том, что в пучок вводится только часть коллиматора - трехлинзовый коллектив и диагональное зеркало. Три последних линзы коллиматора, находящиеся в одном корпусе с волоконно-линзовым блоком - неподвижны. Это приводит к достаточно заметным смещениям положения линий при изменении зенитного расстояния и вращения прибора, что показано

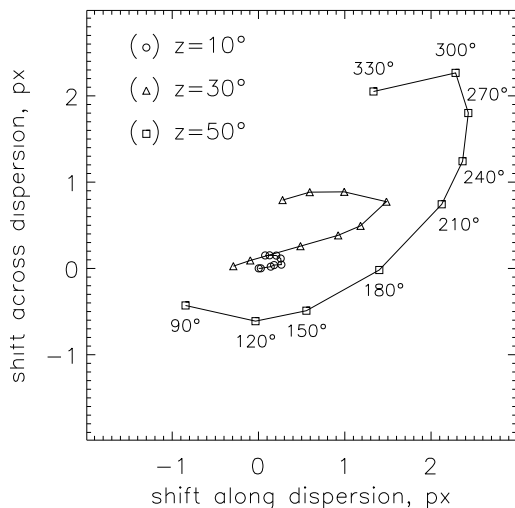


Рис. 6. Гнутия в режиме IFU.

на рис.6. На рисунке разными значками показаны измерения смещений изображения при вращении прибора на трех зенитных расстояниях. Возле каждого измерения на зенитном расстоянии 50 градусов приводится значение угла поворотного стола. Как показывает рисунок, изображение практически не смещается более чем на 0.3 px за время экспозиции 15-20 мин, что не приводит к ухудшению разрешения. Учитывая структуру каждого изображения ("модуляция" интенсивности как в направлении дисперсии, так и вдоль псевдощели), эффекты гнутия легко учесть - при редукции наших данных каждое изображение приводится к единой системе координат с точностью не хуже 0.1 px.

3. ОБРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Полный набор данных, получаемый во время наблюдений с IFU на SCORPIO-2, состоит из:

- Кадры тока смещения ("электрического нуля") (bias); обычно снимается в начале и конце ночи .
- Спектр равномерной засветки плоского поля (flat); снимается непосредственно перед и после наблюдений объекта.
- Эталонный спектр (eta), полученный путем засветки лампой плоского поля маски 12dots и отражающий расположение спектров от "небесных" световодов на кадре; снимается один раз до или после съемки объекта.

- Спектр сравнения He-Ne-Ar калибровочной лампы (neon); как и flat, снимается перед и после наблюдений объекта.
- Спектры наблюдаемого объекта (obj); для удаления следов космических частиц следует получать не менее трех экспозиций.
- Спектры спектрофотометрического стандарта (star), снятые незадолго перед или после наблюдений объекта на близком зенитном расстоянии.
- Спектры сумеречного неба (sunsky); снимаются вечером перед закатом и утром перед рассветом.

Для обработки наблюдательных данных мы используем стандартные процедуры, применяемые в 3D-спектроскопии. Для этой цели можно использовать любые программы для анализа данных с IFU спектрографов (например, r3D [17]). Однако мы предпочитаем применять разработанный нами пакет программ IFURED, работающий в среде IDL. Все этапы обработки в IFURED учитывают особенности данных, получаемых с помощью блока IFU на SCORPIO-2.

На Рис. 7 показаны необработанные кадры разных типов: (a) obj, (b) neon, (c) eta и (d) flat. **В процессе проведенных тестовых наблюдений ни разу не был снят sunsky, поэтому мы не приводим его пример и не рассматриваем его в описании процедуры обработки данных.**

Как видно из Рис. 7, спектры от левой и правой щелей перекрываются примерно в центре снимка. Помимо этого, при наблюдениях с решеткой VPHG940@600 второй порядок от левой щели дает вклад в красную часть спектра, полученного от правой щели (эффект хорошо заметен на снимках eta, Рис. 7c). В связи с этим, при обработке данных мы фиксируем границы спектров от правой и левой щелей на полученных кадрах, обрезаем области перекрытия.

Далее в этой главе описаны основные этапы обработки с помощью пакета IFURED². На Рис. 8 приведена блок-схема процедуры обработки данных IFU, на которой можно ознакомиться с последовательностью выполняемых действий. В качестве примера мы рассмотрим данные, полученные с решеткой VPHG940@600 для галактики Mrk78.

² Так как возможны существенные изменения в алгоритме работы программы после публикации данной статьи, рекомендуем также ознакомиться с ее описанием на сайте проекта [14]

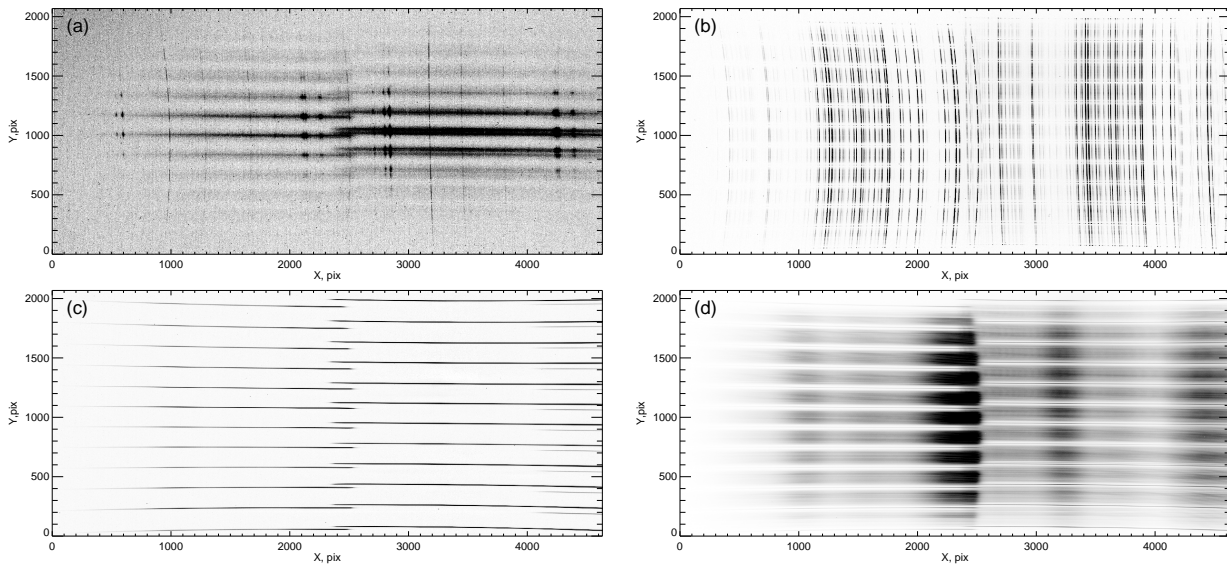


Рис. 7. Пример необработанных кадров из набора данных, полученных с решеткой VRHG940@600: (a) OBJ – спектр объекта Mrk78; (b) NEON – калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы; (c) ETA – эталонный спектр, снятый с маской 12dots; (d) FLAT – спектр плоского поля.

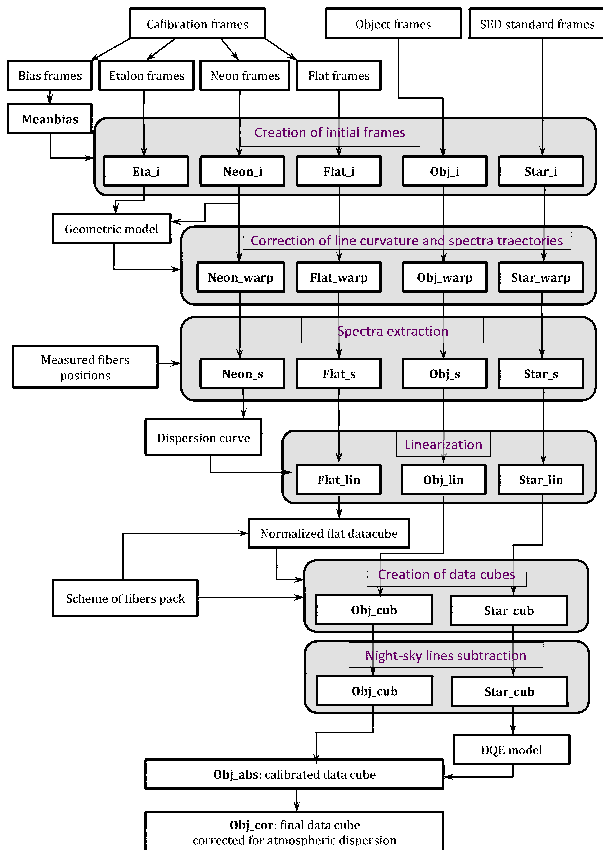


Рис. 8. Блок-схема процедуры обработки данных с помощью пакета IFURED. Жирным шрифтом показаны имена файлов, создающихся на каждом этапе обработки.

3.1. Сборка начальных 2D-спектров

На этом начальном этапе мы усредняем все имеющиеся кадры BIAS. Полученный таким образом файл MEANBIAS мы вычитаем из всех индивидуальных экспозиций.

Далее мы производим коррекцию возможных смещений (которые могут быть вызваны гнутями внутри прибора) между различными экспозициями как внутри одного набора, так и между разными типами данных. Сперва методом кросс-корреляции определяется смещение в направлении перпендикулярном дисперсии между отдельными экспозициями объекта – все кадры смещаются к первой экспозиции. Далее, аналогичным образом определяется смещение между спектрами плоского поля и объектом. После этого все оставшиеся кадры подстраиваются под спектры плоского поля. Для отдельных экспозиций OBJ, NEON и STAR определяются также смещения вдоль дисперсии и производится их коррекция. На практике, смещения обычно не превышают 1 пикселя, но могут быть больше между STAR и остальным набором данных, так как спектрофотометрический стандарт снимается при другом, хоть и близком, положении телескопа.

Отдельные экспозиции каждого типа данных складываются друг с другом попарно. При этом происходит чистка следов космических частиц. На каждом кадре из пары ищутся пиксели, сигнал в которых значимо превышает число отсчетов в том же пикселе на другом кадре. Значения интенсивностей в этих пикселях заменяются на величины из другого кадра пары.

На этом этапе происходит разделение спектров от правой и левой щелей. Создается куб данных с двумя каналами вдоль спектральной оси. Каждый из каналов содержит спектр от правой или левой щели, соответственно. В дальнейшем, спектры от каждой щели обрабатываются по-отдельности одинаковым образом.

3.2. Исправление геометрических искажений

Следующий этап заключается в построении геометрической модели траекторий спектров от отдельных световодов на кадре. Анализируются эталонный спектр ЕТА и калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы NEON.

Сперва происходит поиск траекторий от каждого “небесного” световода на кадре ЕТА. Изображения от каждой щели разбиваются на несколько десятков интервалов вдоль дисперсии, и на каждом участке ищутся положения пиков распределения интенсивности в направлении перпендикулярном дисперсии. Те участки, где число найденных пиков не равно 12, отбрасываются. Координаты оставшихся точек описываются полиномом второй степени. Результирующая погрешность определения положения траекторий световодов не превышает 0.2 пикселя (см. Рис. 9а).

Поиск линий на кадрах NEON происходит путем отождествления пиков на распределении интенсивности в спектре, проинтегрированном вдоль траектории центрального “небесного” световода. При этом поиск пиков может проходить как автоматически, так и при помощи кросс-корреляции с модельным спектром He-Ne-Ag лампы, построенным для каждой используемой решетки. Далее производится итеративный поиск центров линий в спектрах, полученных путем интегрирования вдоль остальных “небесных” световодов – координаты, определенные по предыдущему спектру, используются в качестве начального приближения. Найденные таким образом координаты каждой линии аппроксимируются полиномом второй степени.

В качестве узлов сетки геометрической модели 2D-спектров (сиреневые точки на Рис. 9б) используются точки пересечения отождествленных траекторий “небесных” световодов (красные линии на Рис. 9б) и линий He-Ne-Ag лампы (оранжевые линии на Рис. 9б). Также к ним добавляется еще ряд граничных точек с каждой стороны кадра, полученных путем экстраполяции построенной сетки за пределы спектра. Далее, коррекция геометрических искажений происходит с помощью WARP_TRI – стандартной процедуры в IDL. Результат коррекции показан на Рис. 9с для NEON.

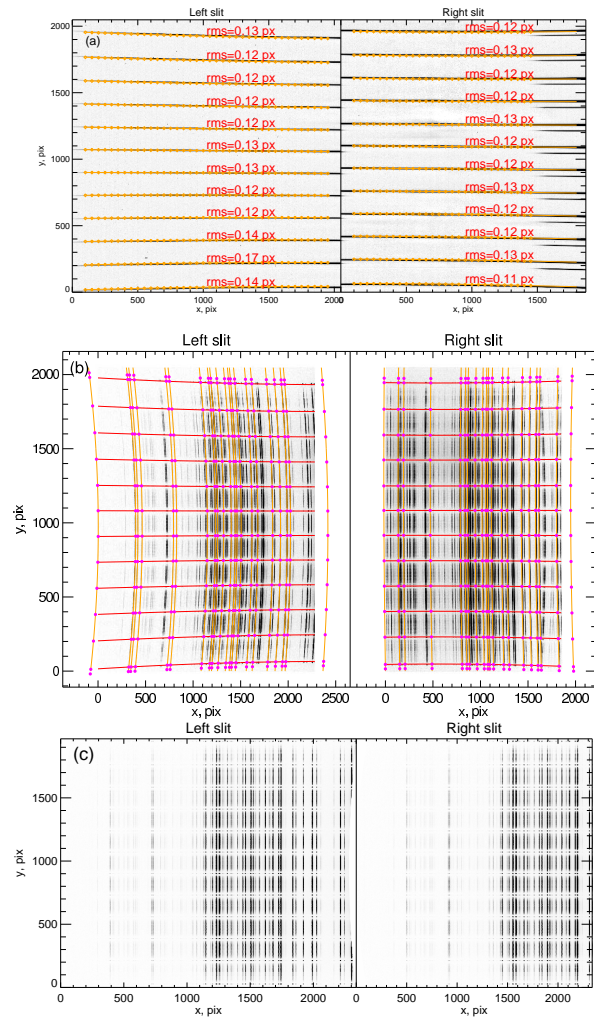


Рис. 9. Иллюстрация процедуры исправления геометрических искажений. Справа и слева приведены результаты для правой и левой щелей, соответственно. (а) – отождествление траекторий “небесных” световодов на спектре ЕТА; указана точность процедуры для каждого световода. (б) – спектр NEON, отождествленные линии (оранжевый) и траектории “небесных” световодов (красный), точки их пересечения (сиреневый). Сделана экстраполяция за пределы наблюдаемого спектра. (с) – NEON после коррекции геометрических искажений.

3.3. Экстракция спектров

На полученных кадрах поток от каждого волоконного световода попадает не в один единственный пиксель вдоль щели, а рассеивается на несколько соседних. Цель процедуры экстракции спектров – получить интегральный спектр от каждого световода.

Для выполнения данного этапа мы используем файл, содержащий лабораторные измерения положений всех световодов вдоль каждой щели.

Зная координаты на кадре ЕТА отождествленных на предыдущем этапе “небесных” световодов, методом интерполяции вычисляются координаты центров траекторий от всех световодов на кадре FLAT.

Экстракция спектров в IFURED может проводиться двумя способами. Простая экстракция заключается в интегрировании потока в прямоугольной апертуре вокруг найденных центров траекторий световодов на 2D-спектре. При этом полуширина апертуры берется равной половине расстояния между соседними пиками. На Рис. 10a,b показан пример использования такого метода на спектрах FLAT и OBJ. Площадь прямоугольников на нем соответствует интегральному потоку в апертуре.

Недостаток метода простой экстракции заключается в том, что он не учитывает рассеяние света от каждого световода: функции рассеяния точки (PSF) отдельных световодов перекрываются. Часть рассеянного света вносится за счет рассеяния в оптике прибора. В отличие от MPFS, где рассеяние из-за использования зеркально-линзовой камеры достигает 10-15%, в SCORPIO-2 рассеяние света в приборе не превышает 2%, что достигается за счет нанесения AR-покрытий на оптические поверхности и использования объемных фазовых голографических решеток. Для учета эффекта рассеяния мы используем метод оптимальной экстракции. Для этого в начале строится модель распределения потока от световодов вдоль щели. Функция рассеяния на выходе световода хорошо описывается функцией Фойгта, которая имеет протяженные и мало контрастные крылья в контуре. Ширина PSF каждого световода определяется путем подгонки распределения интенсивности вдоль щели на кадрах FLAT. Для учета вариации ширины PSF подобная процедура применяется для нескольких десятков срезов вдоль щели на разных длинах волн. Полученные значения ширины PSF каждого световода интерполируются на весь спектральный диапазон и фиксируются для всех типов данных. Итоговая экстракция спектров для всех типов данных происходит путем вписывания 254 профилей Фойгта с фиксированным положением центра и ширины в распределение интенсивности вдоль щели для каждого пикселя вдоль дисперсии – свободными параметрами являются только интенсивности каждого профиля. Иллюстрация применения процедуры оптимальной экстракции к данным FLAT и OBJ показана на Рис. 10c,d.

3.4. Линеаризация

Для привязки полученных данных к шкале длин волн (линеаризации спектра) используются

калибровочный спектр He-Ne-Ar лампы (NEON). Положения линий на кадре NEON ищутся методом кросс-корреляции с модельным эмиссионным спектром, заранее построенным для каждой используемой решетки. Положения отождествленных линий используются для построения дисперсионной кривой – зависимости длины волны спектра от координаты на кадре. При этом IFURED позволяет задать степень полинома кривой как вдоль оси дисперсии, так и вдоль щели для коррекции возможных остаточных геометрических искажений. Построенная дисперсионная кривая используется для линеаризации всего набора данных.

На Рис. 11 показаны отклонения положений отождествленных линий He-Ne-Ar лампы от лабораторных длин волн после процедуры линеаризации с использованием дисперсионной кривой в виде полинома 3-й степени вдоль дисперсии и 2-й степени вдоль щели. Отметим, что большой разброс в синей части спектра левой щели связан с низким отношением сигнал/шум для линий в этой части спектра из-за короткой экспозиции кадра NEON в используемом для демонстрации наборе данных.

3.5. Нормировка на плоское поле и создание кубов данных

Необходимым этапом обработки данных является коррекция наблюдаемых спектров за неравномерность пропускания для каждого спектра, которая обусловлена оптическим виньетированием по полю зрения матрицы и вариацией пропускания световодов. По умолчанию в IFURED для этой цели используется кадр “плоского поля” FLAT, представляющий собой спектр лампы плоского поля (кварцевой или светодиодной), который снимается при помощи системы калибровки SCORPIO-2 [18]. Неравномерность пропускания исправляется после сборки кубов данных.

Куб данных представляет собой трехмерный массив, в котором две координаты являются пространственными, а третья – спектральной. Их сборка происходит в соответствии с заданной схемой упаковки световодов в блоке IFU. При этом линеаризованные спектры от левой и правой щелей формируют верхнюю и нижнюю половины куба данных, размером 22×24 пикселя. Верхний и нижний ряды образуют спектры ночного неба (NS). Так как число световодов для формирования этих рядов меньше, чем число пикселей, то для равномерного их заполнения спектры от NS выводятся в каждый второй пиксель в ряду, а распределение интенсивностей в остальных пикселях заменяется усредненными спектрами соседей.

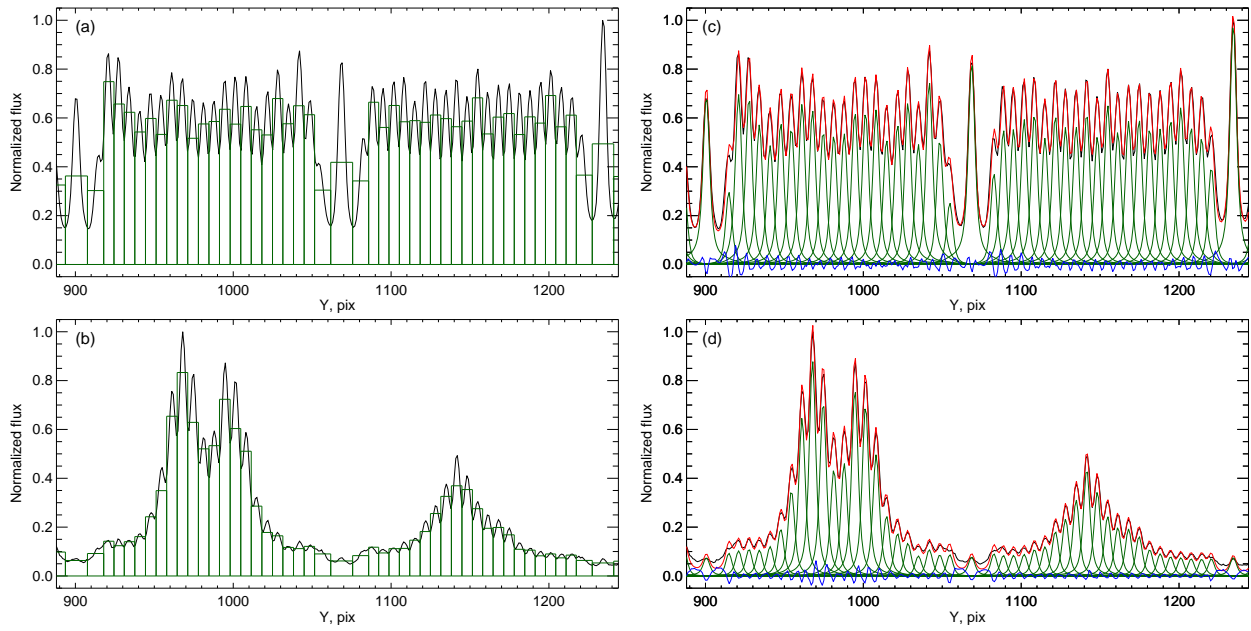


Рис. 10. Распределение нормированной интенсивности поперек дисперсии в спектрах FLAT (a, c) и OVJ (b, d) от правой щели. Ширина и площадь прямоугольников на панелях (a, b) соответствуют размеру области интегрирования и потоку от каждого световода при простой экстракции спектров. На панелях (c, d) зеленым цветом показаны модели распределения интенсивности от каждого световода, красным – интегральный модельный спектр, а синим – разница между наблюдаемым и экстрагированным распределением интенсивностей при оптимальной экстракции.

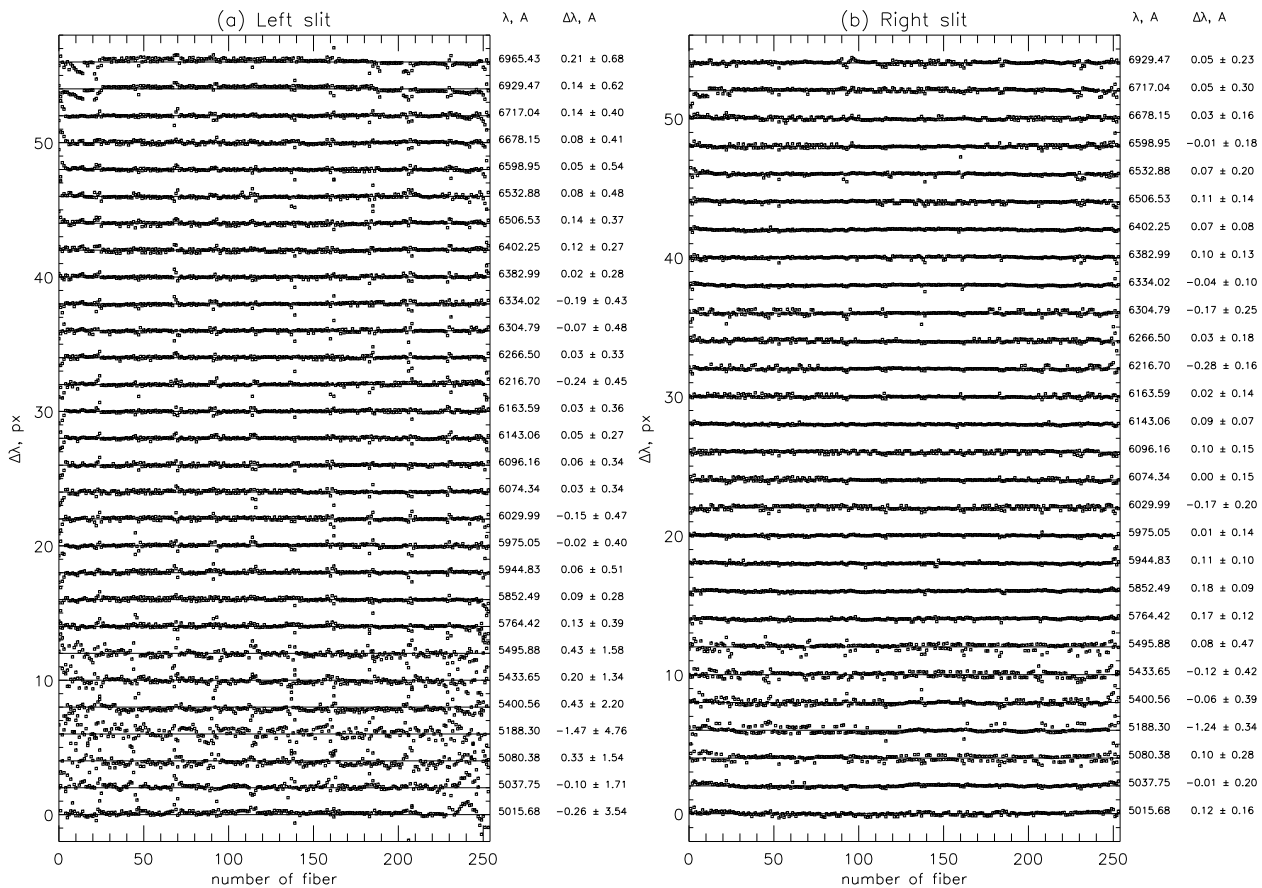


Рис. 11. Распределение отклонения положений отождествленных линий He-Ne-Ag лампы от лабораторных длин волн после процедуры линейаризации вдоль (a) левой и (b) правой щелей.

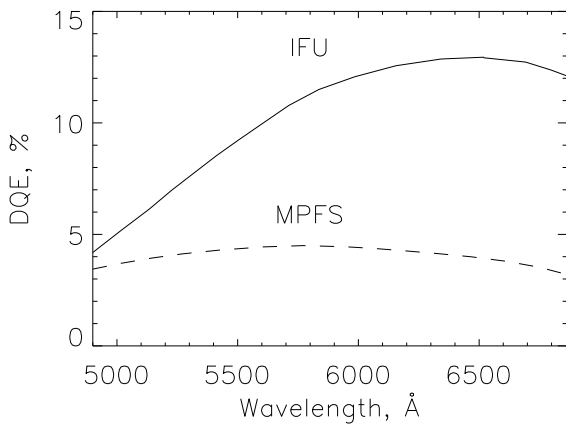


Рис. 12. Измеренная квантовая эффективность IFU SCORPIO-2 с решеткой VPHG940@600. Для сравнения пунктиром показана квантовая эффективность спектрографа MPFS с отражательной дифракционной решеткой с числом штрихов 600мм^{-1}

Далее формируется сглаженный по длине волны куб данных FLAT. Поскольку спектр FLAT не плоский, необходима нормировка FLAT на спектральное распределение яркости плоского поля. Его мы определяем как среднее по всем спектрам в кубе. После этого каждый сглаженный спектр в кубе FLAT нормируется на спектральное распределение яркости плоского поля. Все остальные кубы данных корректируются за неоднородность засветки путем деления на полученный таким образом нормированный 3D-спектр плоского поля.

В тех случаях когда нами получены спектры сумеречного неба SUNSKY, мы можем по ним определить насколько хорошо произведено исправление неоднородностей в кубах данных при помощи нормированного FLAT - возможные ошибки связаны с нарушением условия телецентризма в тракте калибровки. В этом случае по исправленному кубу SUNSKY формируется вторичное нормированное плоское поле (согласно алгоритму описанному выше), на которое делятся кубы OBJ и STAR.

3.6. Вычитание линий ночного неба

Для вычитания спектра ночного неба из кадров OBJ и STAR используются спектры от “небесных” световодов, соответствующие пустым площадкам в стороне от наблюдаемого объекта. В собранных кубах данных они формируют верхний и нижний ряды для левой и правой щелей, соответственно. Для каждой колонки в кубе данных используется спектр от “небесного” световода из той же колонки; для верхней и нижней половин используется соответственно верхний и нижний ряд.

3.7. Калибровка потока, коррекция атмосферной экстинкции и дисперсии

Привязка потоков к энергетическим величинам производится стандартным образом - наблюдаемый интегральный спектр STAR одного из спектрофотометрических стандартов (например, из списка [19]) сравнивается с известным для него спектральным распределением энергии. Используя измеренные коэффициенты атмосферной экстинкции для CAO [20, 21], можно рассчитать величину поглощения на зенитном расстоянии, соответствующем наблюдаемому стандарту. После этого легко непосредственно оценить ожидаемое число фотонов от спектрофотометрического стандарта, попадающих на зеркало телескопа, и сравнить с наблюдаемым значением на разных длинах волны. Полученная в результате кривая квантовой эффективности (DQE) (см. Рис. 12) используется для учета спектральной чувствительности прибора. После этого потоки в наблюдаемом кубе данных OBJ умножаются на вычисленный по кубу STAR коэффициент перехода от отсчетов к энергетическим единицам, а также на нормировочный коэффициент, учитывающий разницу между зенитными расстояниями объекта и спектрофотометрического стандарта и времени их экспозиции. Как видно из рисунка, в режиме IFU с решеткой VPHG940@600 на 6000Å $DQE \sim 13\%$. Для этой же решетки наши измерения в режиме длины щели дают оценку $DQE \sim 42\%$ [13]. Результат сравнения режима LS и IFU показывает, что в последнем эффективность прибора падает приблизительно в 3 раза, что согласуется с нашими оценками, сделанными в разделе 2.2, в котором делается вывод о падении эффективности в 2.5 раза. Для сравнения на этом же рисунке пунктирной линией показана кривая DQE спектрографа MPFS, полученная с решеткой 600 штр./мм. Отметим, что использовались данные, полученные со сходной дисперсией: $1.2\text{Å}/\text{мм}$ для IFU и $1.42\text{Å}/\text{мм}$ для MPFS. Максимальное значение DQE у MPFS около 4.5%, что почти в три раза меньше полученной нами эффективности в режиме IFU. Эффективность режима IFU при работе с более высокой дисперсией (VPHG с модуляцией 1800 и 2300мм^{-1}) падает до величины $\sim 6\%$.

Последним этапом обработки данных является коррекция за атмосферную дисперсию. Для этого строится зависимость положения барицентра объекта OBJ в поле зрения от длины волны, используемая для коррекции файла OBJ. При этом смещения во всем диапазоне спектра не более пикселя для зенитных расстояний $< 50^\circ$.

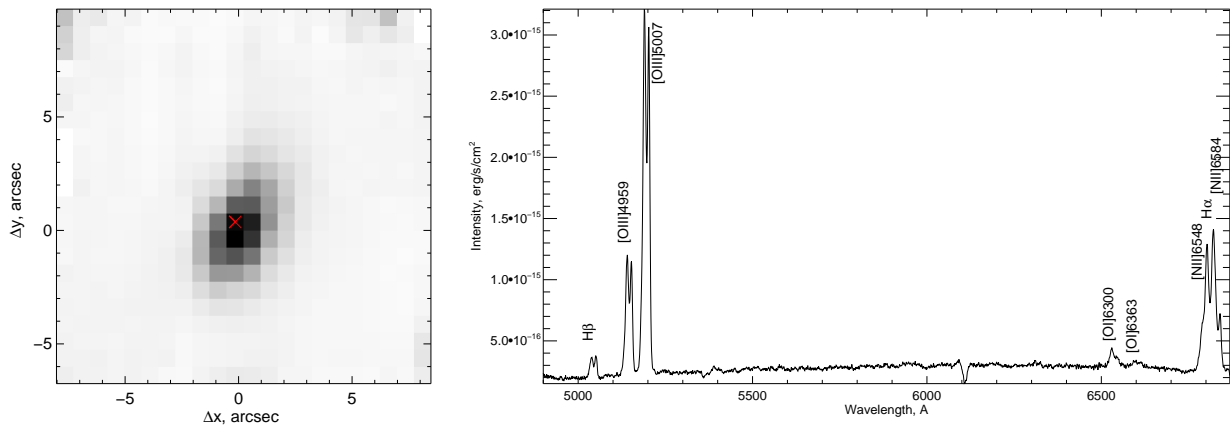


Рис. 13. Интегральное изображение Mrk78 в континууме. Справа в качестве примера показан спектр, соответствующий отмеченному красным крестиком пикселю, а также идентификация наблюдаемых ярких эмиссионных линий.

3.8. Анализ обработанных данных

Помимо описанных процедур обработки, пакет IFURED содержит средства для визуализации данных и их базового анализа. На Рис. 13 приведено изображение галактики Mrk78 в континууме, полученное из собранного куба данных, а также пример спектра, соответствующего пикселю вблизи центра галактики. Как видно из рисунка, использование решетки VPHG940@600 с IFU позволяет исследовать эмиссионные линии в спектральном диапазоне от $H\beta$ до $[NII] 6584 \text{ \AA}$ (а в случае более близких объектов – до $[SII] 6731 \text{ \AA}$).

В качестве примера использования IFURED для базового анализа данных на Рис. 14 показаны карты потоков и лучевых скоростей галактики Mrk78 в линиях $H\alpha$, $[NII] 6584 \text{ \AA}$ и $[OIII] 5007 \text{ \AA}$ и $H\beta$. Данные изображения получены путем аппроксимации каждой эмиссионной линии однокомпонентным профилем Гаусса и подстилающим полиномом 2-й степени с использованием процедуры MRFIT [22], который описывает континуум. Дублеты линий ($[OIII] 4959/5007$ и $[NII] 6548/6584$) при этом аппроксимируются двумя компонентами с фиксированным расстоянием между ними и одинаковой полушириной. Изофоты на рисунке показывают распределение яркости в континууме.

На приведенных картах во всех эмиссионных линиях видны две яркие области в Mrk78, в то время как в континууме галактика проявляется в основном между этими областями. Поле скоростей в линии $H\alpha$ показывает регулярное вращение, а искажение его в запрещенной линии $[OIII]$ указывает на наличие некруговых движений.

Заметим, однако, что в случае Mrk78 аппроксимация профилей линий однокомпонентной гауссианой дает лишь грубое представление о кинематике и морфологии газа в галактике. Пред-

шествующие наблюдения Mrk78 выявили сложную кинематику ионизованного газа, выражающуюся в наблюдаемых многокомпонентных профилях эмиссионных линий [23]. Раздвоение профилей линий также отчетливо видно и на нашем Рис. 13. Подробный анализ кинематики и механизмов ионизации газа в галактике Mrk78 выходит за рамки данной работы; мы приведем его в отдельной статье.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многорежимном спектрографе SCORPIO-2, разрабатываемом для 6-м телескопа, реализован узел IFU с линзовым растром, предназначенный для панорамной спектроскопии. Суммируем параметры узла IFU в составе спектрографа:

1. Принцип работы IFU - квадратный растр микролинз с увеличивающей в $23\times$ масштаб изображения телескопа оптикой.
2. Линзовый растр содержит 22×22 квадратных микролинз размером 2 мм, масштаб изображения равен $0.75''/\text{линзу}$, поле зрения $16.5'' \times 16.5''$.
3. Изображения микрозрачков при помощи оптических волокон реформируются в две псевдощели, расположенные на входе коллиматора IFU. Каждая щель содержит 254 волокна (242 от объекта + 12 от фона неба). На выходе спектрографа формируются два массива по 254 спектра каждый.
4. Набор объемных фазовых голографических решеток VPHG обеспечивает в режиме IFU спектральный диапазон $4600 \div 7300 \text{ \AA}$ и разрешение $\lambda/\delta\lambda$ от 1040 до 2800.

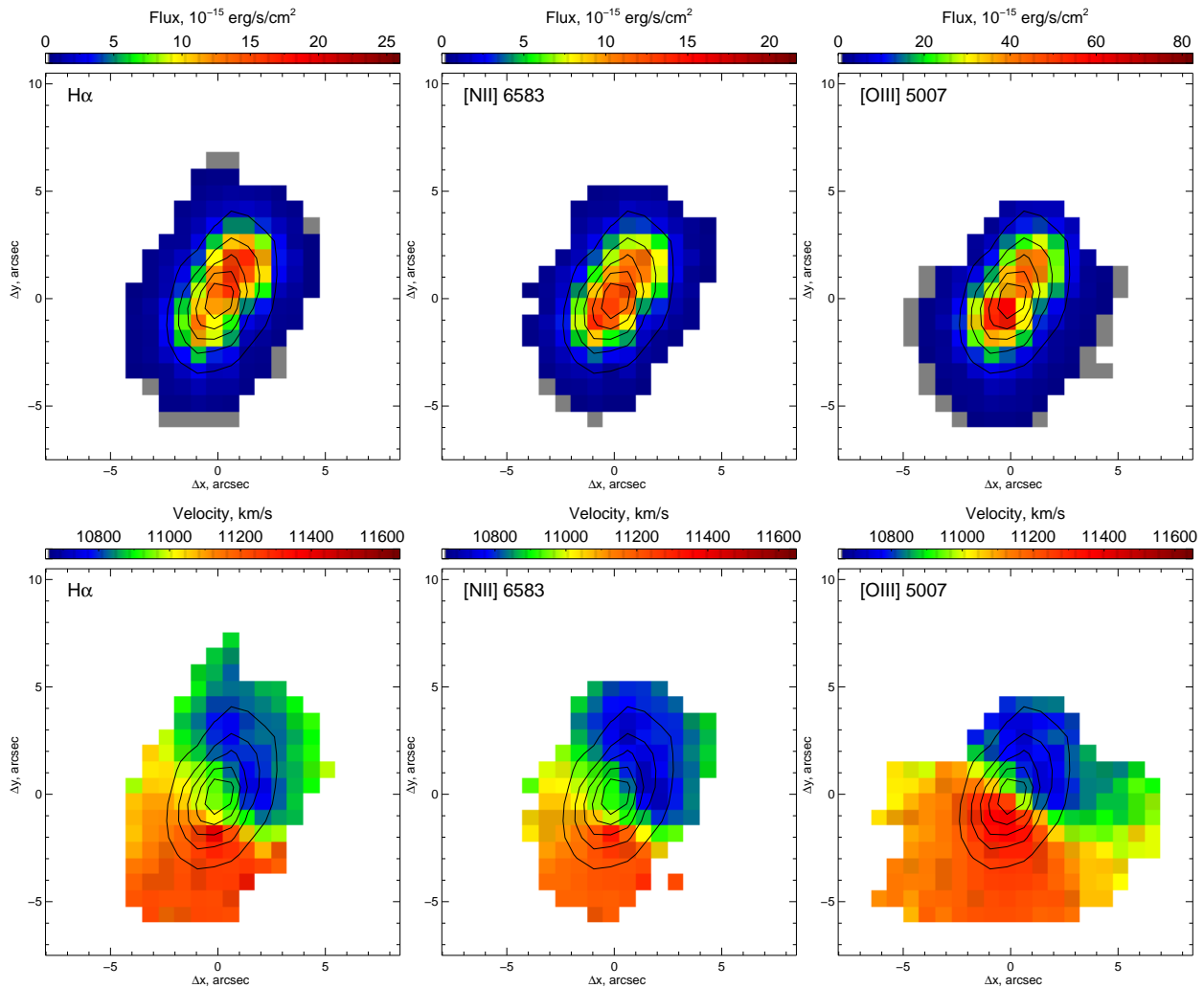


Рис. 14. Результат анализа линий $H\alpha$, [NII] 6584 Å и [OIII] 5007 Å (слева направо) однокомпонентной гауссианой и континуумом. Сверху вниз: распределение потока в линии и поля лучевых скоростей. Изофоты показывают распределение яркости в континууме.

5. Квантовая эффективность режима IFU составляет 6-13% в зависимости от применяемой решетки, что при прочих равных условиях превышает эффективность спектрографа MPFS приблизительно в три раза.
6. Разработан пакет программ IFURED, предназначенный для первичной редукции данных.

Режим IFU в спектрографе SCORPIO-2 предназначен для панорамной спектроскопии центральных частей галактик в области линий $H\beta$ и $H\alpha$, для диагностики состояния ионизации газа и изучения его кинематики. Также планируется исследование звездной составляющей цен-

тральных частей галактик в линиях поглощения - химсостав, дисперсия и поле скоростей звезд. Мы рассматриваем этот режим как дополнение к фотометрии, спектроскопии с длинной щелью и панорамной спектроскопии с интерферометром Фабри-Перо при наблюдениях протяженных объектов со SCORPIO-2.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Р.И. Уклеина за измерение гнутий на БТА и администрацию CAO РАН за выделение наблюдательного времени для технических испытаний. Работа поддержана грантом РНФ, проект 17-12-01335.

1. G. Courtés, Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes, Proceedings of IAU Colloq. 67, held in Zelenchukskaya, USSR, September 8-10, 1981. Edited by Colin M. Humphries. Dordrecht: Reidel, Astrophysics and Space Science Library, **92**, 123 (1982)
2. C. Vanderriest,; G. Courtés and J. Donas, Journal of Optics, **15**, 237 (1984)
3. R. Bacon et al., A&AS, **113**, 347 (1995)
4. S. Arribas et al., Astrophysics and Space Science, **171**, 293 (1990)
5. В.Л. Афанасьев и др., Препринт САО №54, 1-12 (1990)
6. В.Л. Афанасьев, В.В. Власюк, С.Н. Додонов и С.В. Драбек, Мультизлучковый спектрограф МРФС. Руководство пользователя (1995) www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/mpfs/
7. V.L. Afanasiev, S.N. Dodonov and A.V. Moiseev, in *Stellar Dynamics: From Classic to Modern, Proceedings of the International Conference held in Saint Petersburg*, August 21-27, 2000, in honour of the 100th birthday of Professor K.F. Ogorodnikov (1900-1985). Edited by L.P. Ossipkov and I.I. Nikiforov. Saint Petersburg: Sobolev Astronomical Institute, 2001., p.103
8. G.J. Murray et al., Proc.SPIE, **4841**, 1750 (2003)
9. F. Laurent et al., PASP, **118**, 1564 (2006)
10. R. Bacon et al., MNRAS, **326**, 194, (2011)
11. M.M. Roth et al., PASP, **117**, 620 (2005).
12. V.L. Afanasiev and A. V. Moiseev, Astronomy Letters, **31**, 194, (2005)
13. V.L. Afanasiev and A. V. Moiseev, Baltic Astronomy, **20**, 363 (2011).
14. www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index.html
15. S.C. Barden, J.A. Arns, W.S. Colburn and J.B. Williams, PASP, **112**, 809 (2000)
16. H. Kogelnik, Bell System Tech. J., **48**, 2909 (1969)
17. C. Sandin, T. Becker, M. M. Roth, et al., Astron. and Astrophys., **515**, A35 (2010).
18. V. L. Afanasiev, V. R. Amirkhanyan, A. V. Moiseev, et al., Astrophysical Bulletin **72**, 458 (2017).
19. J. B. Oke, Astron. J. **99**, 1621 (1990).
20. T.A. Kartasheva, N.M. Chunakova, Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii, **10**, 44 (1978)
21. S.I. Neizvestny, Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii, **17**, 26 (1983)
22. C. B. Markwardt, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII*, Edited by D. A. Bohlender, D. Durand, and P. Dowler, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, **411**, 251 (2009)
23. M. Whittle and A. S. Wilson, Astron. J. **127**, 606 (2004).