

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 520.353:520.84

ПЕРЕПЕЛИЦЫН АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ

**АППАРАТУРА ДЛЯ ПАНОРАМНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
ДЛЯ РОССИЙСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

Специальность 01.03.02 —

«Астрофизика и звёздная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н. Моисеев А.В.

Нижний Архыз – 2021

# Содержание

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                                                         | <b>4</b>  |
| <b>I. Система управления навесной аппаратурой телескопа:<br/>SCORPIO-2+адаптер .....</b>      | <b>16</b> |
| 1. Распределённый наблюдательный комплекс на основе фокального ре-<br>дуктора SCORPIO-2 ..... | 17        |
| 1.1. Особенности конструкции SCORPIO-2 .....                                                  | 20        |
| 1.2. Управление комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП на аппа-<br>ратном уровне .....          | 21        |
| 1.3. Пакет программ управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер +<br>ИФП + ПЗС .....            | 28        |
| 1.4. Организация дистанционных наблюдений .....                                               | 30        |
| 2. Адаптер первичного фокуса БТА .....                                                        | 32        |
| 2.1. Внеосевое гидирование .....                                                              | 32        |
| 2.2. Калибровочный модуль адаптера .....                                                      | 36        |
| 3. Выводы и результаты .....                                                                  | 43        |
| <b>II. Блок интегрально-полевой спектроскопии SCORPIO-2 .....</b>                             | <b>45</b> |
| 1. Оптическая схема и принцип работы IFU .....                                                | 46        |
| 2. Узел линзового раstra с оптическими волокнами .....                                        | 49        |
| 3. Особенности работы решёток VPHG в режиме IFU .....                                         | 54        |
| 4. Первые результаты наблюдений .....                                                         | 57        |
| 5. Выводы и результаты .....                                                                  | 60        |
| <b>III. Фотометр MaNGaL с перестраиваемым узкополосным фильтром</b>                           | <b>61</b> |
| 1. Теория и методика работы с интерферометром Фабри-Перо .....                                | 63        |
| 1.1. Теория интерферометра Фабри-Перо .....                                                   | 64        |

---

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.2. Преимущества и недостатки интерферометрического метода .....                  | 67         |
| 1.3. Перестраиваемый фильтр на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо ..... | 69         |
| 1.4. Особенности обработки наблюдательных данных .....                             | 70         |
| 2. Процесс создания и исследование характеристик прибора MaNGaL ...                | 71         |
| 2.1. Оптическая схема .....                                                        | 71         |
| 2.2. Основные узлы и характеристики MaNGaL .....                                   | 77         |
| 3. Наблюдения с MaNGaL .....                                                       | 85         |
| 4. Выводы и результаты .....                                                       | 88         |
| <b>Заключение .....</b>                                                            | <b>90</b>  |
| <b>Литература .....</b>                                                            | <b>94</b>  |
| <b>Приложение А .....</b>                                                          | <b>101</b> |

# Введение

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Исследования слабых протяжённых объектов, таких как внешние области галактик, газовые туманности различных типов, гравитационные линзы и т.д. проводятся на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) уже несколько десятилетий и входят в число основных наблюдательных программ. Яркость таких объектов сопоставима с яркостью ночного неба, а морфология в картинной плоскости лишена центральной симметрии. Поэтому панорамная (называемая также 3D) спектроскопия, подразумевающая получение спектров во всём поле зрения прибора, здесь значительно информативнее, чем классическая длиннощелевая. На 6-метровом Большом телескопе азимутальном (БТА) САО РАН применяются и активно развиваются два направления панорамной спектроскопии: интегрально-полевая спектроскопия [1] и интерферометрия с эталоном Фабри-Перо [2]. Оба метода сейчас реализованы в многорежимном фокальном редукторе первичного фокуса БТА SCORPIO-2 (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) [3]. Кроме того, для работы с новым классом интерферометров Фабри-Перо, так называемым перестраиваемым узкополосным фильтром [4], создан редуктор светосилы — MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines, “Картировщик узких галактических линий”). Этот прибор работает на телескопах умеренного диаметра и получает данные о распределении излучения в выбранных эмиссионных линиях ионизованного газа, сопоставимые по качеству с данными БТА, с поправкой на более низкое спектральное разрешение.

Исследования на БТА ведутся в достаточно плотном графике различными методами, для каждого из которых выделяется определённое количество ночей. Учи-



тывая не самый лучший астроклимат, любые сбои аппаратуры и лишние действия наблюдателей приводят к потере времени и срыву сроков работ. Гибкость в выборе наблюдательных программ под текущее состояние атмосферы обеспечивают многорежимные спектрографы. Благодаря возможности быстрой перестройки оптической схемы, они позволяют наиболее эффективно использовать наблюдательное время. Поэтому сейчас активно развивается направление, связанное с разработкой редукторов светосилы, обладающих набором самых разных режимов, таких как фотометрия, поляриметрия, безщелевая / длиннощелевая / многощелевая спектроскопия низкого и умеренного разрешения и, разумеется, панорамная спектроскопия. Одним из первых приборов такого класса являлся EFOSC [5] 3.6-м телескопа ESO. Эта концепция успешно развивается на больших телескопах, что можно проследить на примере приборов FORS и FORS2 [6] на 8.2-м VLT, OSIRIS [7] на 10.4-м GTC и др. По этим же принципам были изготовлены фокальные редукторы SCORPIO-1 [8] и SCORPIO-2 для БТА CAO РАН, второй из которых рассматривается в данной диссертационной работе.

Навесная аппаратура телескопа должна быть надёжна и автоматизирована. В единый комплекс важно объединить все инструменты: спектрограф, систему гидирования и калибровки, систему регистрации изображений, архив наблюдательных данных и телескоп. Хорошо отлаженный наблюдательный комплекс начинает привлекать всё больше новых исследователей-заявителей наблюдательного времени. Не приносящие результатов и не имеющие перспектив программы постепенно вытесняются, вследствие чего повышается качество проводимых исследований и возрастает эффективность телескопа в целом. Названные выше методы панорамной спектроскопии и специально разработанная под них аппаратура не уступают своим аналогам на крупных зарубежных телескопах и позволяют получать наблюдательные данные высокого качества в отечественных обсерваториях.

### **Цели и задачи исследования**

Целью данной работы является создание и методическое исследование следующих приборов и их модулей:

- фотометра MaNGaL с перестраиваемым фильтром, используемого в наблюдениях на 1-м телескопе “Цейсс-1000” CAO РАН и 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института

имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (КГО ГАИШ МГУ);

- блока интегрально-полевой спектроскопии в составе многорежимного редуктора светосилы первичного фокуса 6-м телескопа SCORPIO-2;

а также модернизация:

- системы внеосевого гидирования и системы светодиодной засветки калибровочного модуля адаптера, используемого в наблюдениях на 6-м телескопе CAO РАН совместно с приборами SCORPIO-1 и SCORPIO-2;
- системы дистанционного управления редуктором светосилы SCORPIO-2.

### **Научная новизна**

Новизна работы определяется следующим:

- Впервые в практике российских обсерваторий создан широкопольный фотометр с узким (ширина полосы около 1.5 нм) перестраиваемым фильтром для построения изображений протяжённых туманностей и галактик в линиях ионизованного газа.
- Впервые в практике российских обсерваторий реализована схема светодиодной засветки “плоского поля” в широком спектральном диапазоне.

### **Научная и практическая значимость**

- Испытаны и введены в эксплуатацию фотометр MaNGaL для телескопов среднего диаметра CAO РАН и КГО ГАИШ МГУ и модуль интегрально-полевой спектроскопии редуктора светосилы SCORPIO-2 на 6-м телескопе CAO РАН.
- Спектральные и фотометрические данные, получаемые на приборах MaNGaL и SCORPIO-2 в режиме интегрально-полевой спектроскопии уже активно используются как в российских (CAO РАН, ГАИШ МГУ, ИНАСАН, МФТИ) так и в зарубежных астрофизических институтах (University of Alabama, California Polytechnic State University).

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Создан редуктор светосилы MaNGaL с перестраиваемым фильтром на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо, используемый для наблюдений на 1-м телескопе “Цейсс-1000” CAO РАН и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ.
2. Реализован и испытан блок интегрально-полевой спектроскопии в составе фокального редуктора SCORPIO-2 на 6-м телескопе CAO РАН.
3. Введены в строй обновлённая система внеосевого гидирования и система светодиодной засветки калибровочного модуля адаптера, используемого в наблюдениях на 6-м телескопе CAO РАН совместно с приборами SCORPIO-1 и SCORPIO-2.
4. В редукторе светосилы SCORPIO-2 модернизирована система управления, что повысило надёжность его работы, а следовательно — процесса наблюдений, и позволило упростить и ускорить процедуру установки аппаратуры на телескоп.

### Апробация работы

Результаты работы представлялись на семинарах и конкурсах научных работ CAO РАН, докладывались на ряде российских и международных конференций:

1. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2017) “Астрономия: познание без границ”, Ялта, республика Крым, 17–22 сентября 2017 г.
2. Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра НЕА-2017”, ИКИ РАН, г. Москва, 18–21 декабря 2017 г.
3. XXXV Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, 24–27 апреля 2018 г.
4. VII Пулковская молодежная астрономическая конференция, Санкт-Петербург, ГАО РАН, 28–31 мая 2018 г.

5. 15th Potsdam Thinkshop: “The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows”, Потсдам, Германия, 3–7 сентября 2018 г.

## Публикации по теме диссертации

1. *Afanasiev V. L., Amirkhanyan V. R., Moiseev A. V., Uklein R. I., **Perepelitsyn A. E.*** — SCORPIO-2 Guiding and Calibration System in the Prime Focus of the 6-m Telescope. *Astrophysical Bulletin*, Vol. **72**, Is. 4, P. 458–468 (2017).
2. *Afanasiev V. L., Egorov O. V., **Perepelitsyn A. E.*** — IFU Unit in SCORPIO-2 Focal Reducer for Integral-Field Spectroscopy on the 6-m Telescope of the SAO RAS. *Astrophysical Bulletin*, Vol. **73**, Is. 3, P. 373–386 (2018).
3. ***Перепелицын А. Е.**, Моисеев А. В., Опарин Д. В.* — Редуктор светосилы MaNGaL с перестраиваемым фильтром для малых и средних телескопов. Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. Труды VII Пулковской молодежной астрономической конференции, №226, С. 65–70 (2018).
4. *Moiseev, A., **Perepelitsyn, A.**, Oparin, D.* — Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes. *Experimental Astronomy*, **50**, 199–214 (2020).
5. ***А. Е. Перепелицын**, В. Р. Амирханян, А. В. Моисеев* — Система управления редуктора светосилы SCORPIO-2. Труды ИПА РАН, вып. **53**, 44–53 (2020).

## Личный вклад автора

- Автор принимал ведущее участие в создании и конструировании прибора MaNGaL в работах [3–4].
- В работе [2] принимал равноправное участие в разработке и реализации волоконно-оптической части интегрально-полевого блока SCORPIO-2.
- В работе [1] автор наравне с соавторами участвовал в оптимизации системы внеосевого гидирования и светодиодной засветки калибровочного модуля адаптера.

- Принимал определяющее участие в процессе модернизации системы управления SCORPIO-2, им выполнена основная техническая работа, описанная в статье [5].

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения; содержит 48 рисунков, 2 таблицы. Список цитируемой литературы включает 64 наименования. Общий объем диссертации — 103 страницы.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, обоснуждаются её цели. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложены структура и содержание работы, дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов. Приводится список публикаций, в которых представлены результаты данной работы, с указанием личного вклада автора в совместных публикациях.

В **Главе I** представлена система управления навесной аппаратурой телескопа, позволяющая проводить дистанционные наблюдения. Особенности функционирования системы на различных уровнях показаны на примере наблюдательного комплекса, в который входят многорежимный редуктор светосилы SCORPIO-2 и специальный адаптер — система гидирования и калибровочной засветки.

В разделе 1 рассматривается устройство системы управления редуктора светосилы SCORPIO-2 и адаптера, показаны принципы функционирования как отдельных частей, так и наблюдательного комплекса в целом. Компактный компьютер MR3253S00F, установленный в корпусе фокального редуктора, осуществляет управление и контроль состояния редуктора и адаптера, взаимодействие с ПЗС, сбор и хранение получаемой информации. Для дистанционной работы с этим компьютером используется программа управления удалённым рабочим столом. SCORPIO-2 содержит 42 сменных оптических элемента и 19 перестраиваемых элементов. В комплексе работает 21 электромотор, текущее состояние контролирует 81 датчик. Чтобы обеспечить управление и контроль столь обширным набором устройств используется распределенная система, включающая 7 микропроцессоров AVR ATmega (5 в SCORPIO-2 и 2 в адаптере).

Раздел 2 посвящён адаптеру — системе внеосевого гидирования и фотометрической калибровки широкоугольных спектрографов первичного фокуса БТА.

Адаптер постоянно используется для наблюдений со SCORPIO-2. Для компенсации комы в изображении внеосевых звезд применяется ахроматический линзовый корректор. Прибор имеет два подвижных поля гидирования диаметром 54", которые перемещаются в прямоугольных полях размером  $10' \times 4'.5$ . Реализован автоматический поиск звезд гидирования, контроль по их яркости вариаций прозрачности атмосферы, фокусировка телескопа во время экспозиции.

Отдельное внимание уделяется системе калибровочной засветки адаптера, включающей источник линейчатого спектра — газоразрядный стабилитрон СГЗС с гелий-неон-аргоновым наполнением и источник непрерывного спектра. Галогеновая лампа, в качестве традиционного источника непрерывного спектра, обладает некоторыми известными недостатками, а именно, падением яркости в синей области спектра (длины волн короче 5000 Å), так что здесь существенным оказывается вклад рассеянного света от более длинноволновой части спектра. Для решения проблемы была создана система светодиодной калибровочной засветки. “Плоское поле”, формируемое светодиодами, настраивается для каждой решётки и даёт более равномерную засветку по длинам волн в сравнении с галогеновой лампой. Сейчас аналогичная схема калибровки применена в спектрографе TDS на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ [9].

Для оценки реальной стабильности светодиодной засветки в лаборатории были получены два ряда спектральных “плоских полей” с прибором SCORPIO-2 с использованием объемной фазовой голографической решётки VPHG 940@600 в течение 10 часов с шагом в 1 час и в течение 1 часа с шагом в 1 минуту. Вариации в течение часа оказались меньше пуассоновского шума. За 10 часов имеет место постепенное увеличение амплитуды вариаций от 1% до 2% с ростом длины волны, несмотря на небольшие колебания температуры внешней среды (в пределах 5°C).

В **Главе II** рассматриваются особенности метода интегрально-полевой спектроскопии и описан процесс разработки, создания и методического исследования интегрально-полевого блока (IFU) в составе многорежимного редуктора SCORPIO-2. Интегрально-полевой блок предназначен для панорамной спектроскопии центральных частей галактик в эмиссионных линиях, для определения состояния ионизации газа, изучения его кинематики и т.д.

Спектроскопия интегрального поля, как метод астрономических наблюдений,

за одну экспозицию получает спектры многих пространственных элементов — “спакселей” одновременно для всего двумерного поля зрения. Каждому спакселю выборки можно сопоставить его индивидуальный спектр, и в процессе обработки данных — реконструировать карты на произвольных длинах волн. Для инструментов с ортонормированной геометрией пространственной выборки спектры могут быть упорядочены для формирования трехмерного массива, который чаще всего называют “кубом данных”. В результате куб данных содержит и спектральную, и пространственную информацию. Появление за последние десятилетия новых технологических возможностей привело к созданию эффективных спектрографов с относительно большим полем зрения. Крупные телескопы по всему миру теперь оснащены модулями интегрально-полевой спектроскопии: MUSE [10] и GMOS [11] для 8-метровых телескопов, а также SAURON [12] и PMAS [13] для телескопов диаметром 3–4 метра. Постепенно, этот метод становится стандартным инструментом исследования протяжённых астрономических объектов среди астрофизиков-наблюдателей в оптическом и ИК диапазонах.

Большинство интегрально-полевых спектрографов крупных телескопов располагаются во вторичных фокусах, имеющих входную светосилу менее  $F/8$ . Входная светосила первичного фокуса БТА, где размещается многорежимный редуктор светосилы SCORPIO-2, равна  $F/4$ , что накладывает существенные ограничения на конструкцию интегрального-полевого блока. Кроме того, габариты самого спектрографа ограничены небольшим пространством кабины первичного фокуса. Идея, позволяющая разместить блок в корпусе SCORPIO-2, сохранив возможность быстрого переключения режимов работы, основана на принципе использования линзового раstra в сочетании с оптическими волокнами. Решение предложено Г. Куртесом [14] и впервые в мире, в 1989 г. было реализовано на 6-м телескопе CAO РАН в спектрографе MPFS (Multi Pupil Fiber Spectrograph) [1]. С тех пор в Лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов CAO РАН было разработано и создано несколько поколений таких приборов [15], последним из которых и является IFU / SCORPIO-2. В режиме IFU используется отдельный коллиматор, который вводится в световой пучок вместо основного. Оптическая схема интегрально-полевого блока представлена на рисунке 1. Узел линзового раstra со световодами расположен внутри коллиматора, имеющего в

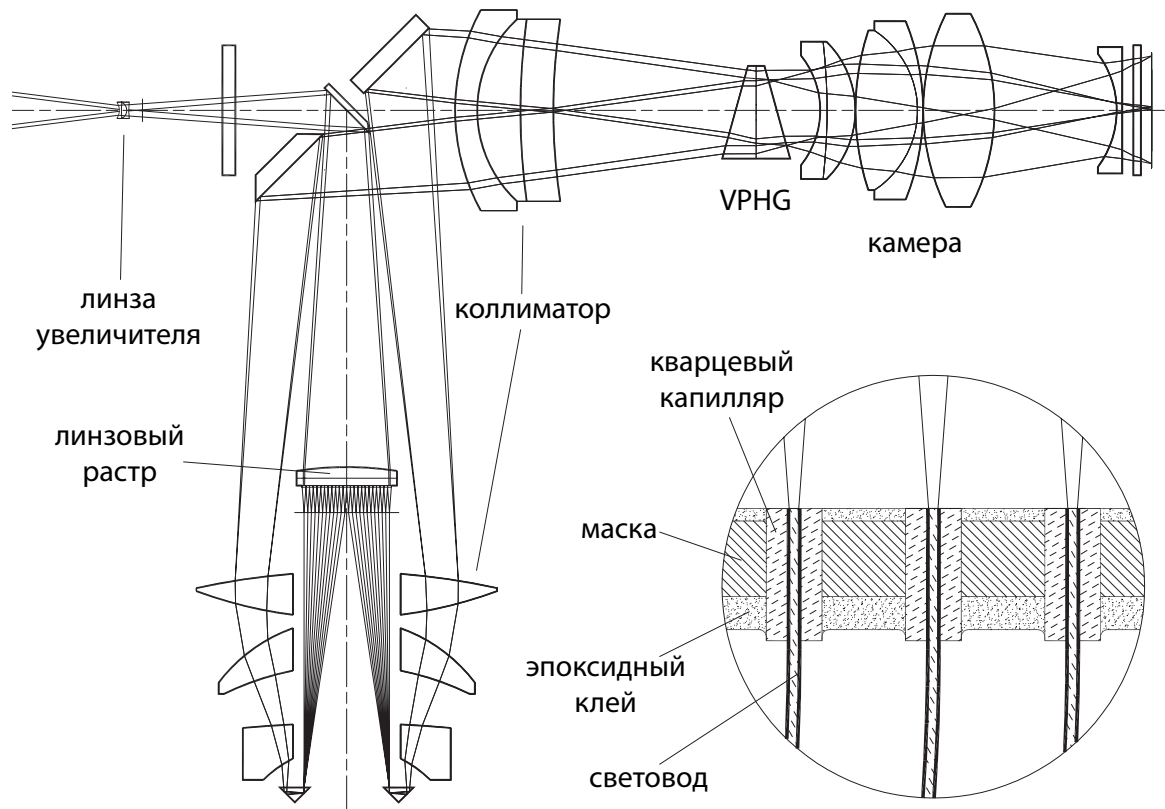


Рис. 1. Оптическая схема SCORPIO-2 в режиме IFU [16]

последних трех линзах прямоугольные отверстия размером  $60 \times 80$  мм, что позволяет значительно уменьшить габариты. Линзовый растр состоит из массива  $22 \times 22$  прямоугольных линз размером  $2 \times 2$  мм, масштаб изображения составляет  $0''.75$  на линзу, а размер поля зрения  $16''.5 \times 16''.5$ . Каждая линза формирует изображение зеркала телескопа (микрозрачок) диаметром 150 мкм. Полученная матрица микрозрачков реформируется при помощи оптических волокон в две псевдощели, которые проектируются коллиматором и камерой в плоскость ПЗС. Объемная фазовая голографическая решётка формирует на формате светоприёмника два массива спектров.

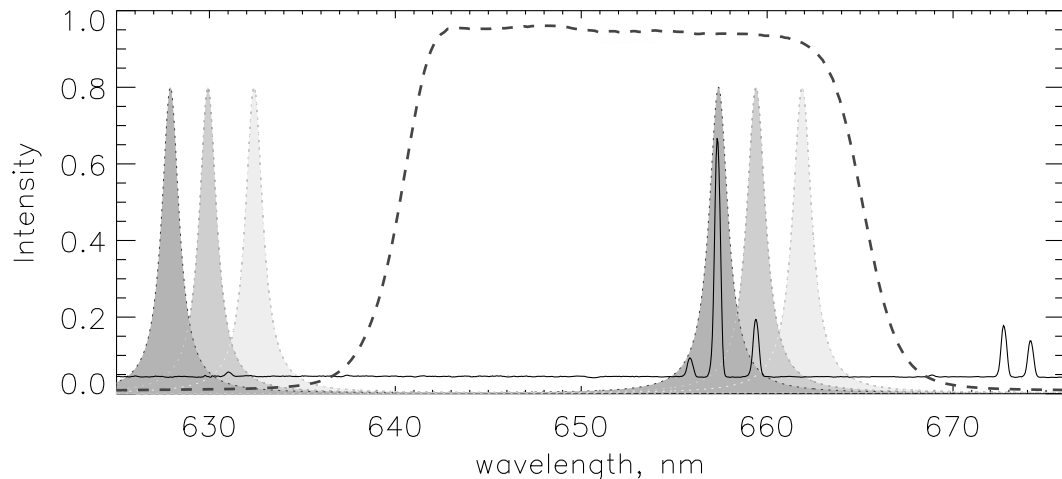
В нижней правой части рисунка 1 показана увеличенная область маски со световодами под линзовым растром. Точное изготовление маски, расстановка световодов и обработка узла оказались не простыми и трудоёмкими задачами. Пришлось изготовить около десяти версий волоконного блока, прежде чем удалось добиться приемлемой точности, при которой плоскость массива световодов была согласована с матрицей выходных микро-зрачков, обеспечивая пропускание не ниже 90%. Процесс осложнялся миниатюрными размерами блока IFU, когда на точ-



ность изготовления и последующего контроля начинали влиять такие факторы, как окружающая температура, деформации при высыхании клея, биение ходового винта станка при изготовлении маски и пр. Учитывая потери на оптических поверхностях и абберации микролинз, реальное пропускание узла линзового раstra сейчас составляет не менее 65%. Суммарная квантовая эффективность прибора на телескопе в режиме IFU в зависимости от решётки находится в пределах от 6 до 13%, что при прочих равных условиях превышает эффективность спектрографа MPFS приблизительно в три раза [16].

**Глава III** посвящена панорамной спектроскопии со сканирующим интерферометром Фабри-Перо и прибору MaNGaL с перестраиваемым узкополосным фильтром, используемым в наблюдениях на 1-м телескопе САО РАН и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ.

Системы формирования изображений, основанные на сканирующих интерферометрах Фабри-Перо (ИФП), имеют долгую историю астрономических приложений, связанных с изучением протяжённых объектов: галактических и внегалактических туманностей, объектов солнечной системы. Перестраиваемые узкополосные фильтры (tunable filters) являются частным случаем таких инструментов для низких порядков интерференции, и начали применяться на оптических телескопах в конце 90-х [4, 17]. Основная идея наблюдений поясняется на рисунке 2. При достаточно малом зазоре между пластинами ИФП, соответствующем порядкам интерференции  $n = 10 \div 30$ , легко получить значение полуширины инструментального профиля (FWHM)  $\delta\lambda = 1 \div 2$  нм. Поскольку расстояние между соседними порядками интерференции  $\Delta\lambda = \lambda/n$ , то можно выделить один требуемый пик пропускания с помощью среднеполосного фильтра с шириной полосы около 15–30 нм. Пиковая центральная длина волны пропускания может переключаться между желаемой линией излучения и соседним континуумом с помощью пьезоэлектрически настроенного и сервостабилизированного ИФП. Этот метод позволяет производить точное вычитание континуума для получения “чистых” эмиссионных изображений и точно разделять соседние эмиссионные линии ( $H\alpha$  и  $[N\ II]\lambda 6548, 6583$  или  $[S\ II]\lambda 6717, 6731$ ). Последнее важно для исследования различных механизмов возбуждения эмиссионного спектра и для измерения электронной плотности ионизованного газа, но обычно невозможно при “традиционной” фотометрии в средне-



**Рис. 2.** Принцип работы перестраиваемого фильтра. Спектр галактики (континуум + эмиссии) показан сплошной чёрной линией, а чёрным пунктиром — кривая пропускания среднеполосного фильтра, вырезающего требуемые пики пропускания. Серыми градациями обозначены положения инструментального профиля интерферометра Фабри-Перо, который в данном случае настраивается для наблюдения в эмиссионных линиях  $H\alpha$ ,  $[N II]$  и в соседнем континууме [18]

и узкополосных фильтрах. При этом наблюдения с перестраиваемым фильтром дают значительно большее поле зрения по сравнению с интегрально-полевыми спектрографами, рассмотренными в предыдущей главе (от нескольких угловых минут до десятков угловых минут на больших телескопах, тогда как один из наиболее востребованных и эффективных на сегодняшний день панорамных спектрографов MUSE / VLT имеет поле зрения только  $1'$  [10]).

Главным отличием “картировщика узких галактических линий” — MaNGaL от аналогичных систем является установка ИФП в сходящемся от телескопа пучке лучей. Ещё в 1951-1955 гг. Г. Куртес показал [19], что наилучшее расположение эталона Фабри-Перо — вблизи фокальной плоскости телескопа, без каких-либо других оптических средств. За счёт наклона в сходящемся пучке лучей, длина волны полосы пропускания мало меняется по полю зрения, и минимизируется эффект паразитных отражений. Кроме того, схема Куртеса позволяет значительно расширить диаметр монохроматического пятна ЖАкино [20]. Несмотря на перечисленные преимущества, неклассическая схема установки эталона используется крайне редко.

Система управления MaNGaL построена на тех же принципах, что и система SCORPIO-2. Аналогичный, встроенный в корпус компактный компьютер управляет всеми узлами прибора и подключаемыми модулями. Узел калибровки со-

стоит из интегрирующей сферы и двух источников излучающих линейчатый и непрерывный спектр. В оптико-механической части используется ряд готовых решений, поэтому для управления прибором достаточно одного микропроцессора AVR Attiny2313. Использование готовых узлов, таких как турель светофильтров и объектив, в совокупности с практически готовой методикой, позволили за пол года разработать, собрать, отъюстировать прибор и начать выполнять на нём наблюдения. Основные технические детали и некоторые результаты работы прибора MaNGaL на телескопах “Цейсс-1000” САО РАН и 2.5-м КГО ГАИШ МГУ подробно рассматриваются в тексте главы.

Работа со сканирующим интерферометром Фабри-Перо представляется многим астрономам методически сложной. Отчасти поэтому на телескопах среднего диаметра в САО РАН и ГАИШ МГУ оказалась свободна тематическая ниша, которую достаточно удачно занял наш “картировщик”.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

# **I. Система управления навесной аппаратурой телескопа: SCORPIO-2+адаптер**

Качество получаемых астрофизических наблюдательных данных напрямую зависит от точности и повторяемости установки подвижных частей аппаратуры на телескопе, уровня автоматизации и надёжности его системы управления. Реализация современных методов панорамной спектроскопии, требующих множества калибровок и сложных вычислений, подразумевает создание распределённой системы управления. Оперативное изменение оптической схемы навесного оборудования позволяет с минимальными временными потерями вести наблюдения объекта различными методами. Быстрой смены оборудования требует не только расписание наблюдений, но и текущее состояние атмосферы. Поэтому направление, связанное с разработкой многорежимных редукторов светосилы, активно развивается, что можно проследить на примере навесной аппаратуры как для телескопов среднего диаметра — EFOSC2 [24] на 3.6-м NTT в Чили, DOLORES [25] на 3.6-м TNG на Канарских островах, так и для больших телескопов — FORS [26] и FORS2 [6] на 8.2-м VLT в Чили, OSIRIS [7] на 10.4-м Большом Канарском телескопе (GTC), PFIS на Большом южноафриканском телескопе (SALT) [27] с шестиугольным главным зеркалом  $11 \times 9.8$  м и др. Для первичного фокуса 6-м Большого Телескопа Азимутального (БТА) Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) такой многорежимный фокальный редуктор был разработан и изготовлен в 2000 г. и получил название SCORPIO<sup>1</sup> (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) [8, 28]. Вместо отражательных решёток в SCORPIO использованы прозрачные объёмные фазовые голографические (VPHG), что позволило соединить в сравнительно простой конструкции весьма противоречивые наблюдательные методы, такие как пря-

---

<sup>1</sup>в настоящее время прибор называется SCORPIO-1

мые снимки, длиннощелевая и многощелевая спектроскопия. Следующая версия редуктора светосилы 6-м телескопа — SCORPIO-2 — разрабатывалась с учётом опыта 10-летней эксплуатации предшествующего прибора, вобрав в себя достоинства и преодолев некоторые недостатки первой версии. Были улучшены технические параметры и наблюдательные возможности нового прибора, значительно увеличено число подвижных элементов; кроме того, SCORPIO-2 ориентирован на работу с ПЗС-приемниками большего формата [3].

SCORPIO-2 позволяет проводить дистанционные наблюдения протяжённых и точечных объектов в 6-ти режимах (см. следующий параграф) и может в течение одной ночи переключаться между несколькими наблюдательными программами. SCORPIO-2 является частью специального комплекса, конструктивно состоящего из четырёх независимых подсистем: сам редуктор светосилы, система гидирования и калибровки (адаптер), интерферометр Фабри-Перо и система регистрации изображений. В этой Главе на примере указанного комплекса рассматривается типовая архитектура системы, позволяющая проводить дистанционные наблюдения. Подробно разбираются принципы функционирования фокального редуктора и адаптера на аппаратном уровне. Отдельное внимание уделяется системам внеосевого гидирования и светодиодной засветки калибровочного модуля адаптера.

## 1. Распределённый наблюдательный комплекс на основе фокального редуктора SCORPIO-2

Оптическая схема и механическая конструкция SCORPIO-2 разработаны В. Л. Афанасьевым (САО РАН). Прибор изготовлен в Макетных мастерских САО РАН под его руководством. В основе схемы лежат 2 сменных коллиматора и камерный объектив, а также различные сменные элементы: светофильтры, анализаторы поляризации, фазовые пластинки, дифракционные решётки и сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП). SCORPIO-2 позволяет проводить наблюдения протяжённых и точечных объектов в следующих режимах:

- Длиннощелевая спектроскопия.
- Прямые снимки в фотометрических системах Джонсона-Казинса (UBVRI), SDSS (ugriz) и в узкополосных фильтрах.

- Поляриметрия в широких фильтрах.
- Спектрополяриметрия с длинной щелью.
- Панорамная спектроскопия со сканирующим ИФП.
- Панорамная спектроскопия с интегрально-полевым блоком (IFU).

В режиме IFU используется отдельный коллиматор, который вводится вместо основного. Панорамной спектроскопии с интегрально-полевым блоком посвящена **Глава II** данной работы. Текущая оптическая схема для каждого режима собирается системой управления и представлена на рисунке 3. Оптика прибора рассчитана так, чтобы компенсировать кому и кривизну поля главного зеркала телескопа, что позволяет отказаться от использования в наблюдениях штатного непросветленного линзового корректора. Эквивалентная светосила редуктора в первичном фокусе БТА составляет  $F/2.6$ . Все оптические поверхности просветлены в диапазоне 360-1000 нм. Просветляющие покрытия нанесены в ООО «Опто-Технологическая Лаборатория» (г. С-Петербург)<sup>2</sup>. Прибор периодически модернизируется, комплект сменных оптических элементов дополняется. Описание редуктора светосилы можно найти на сайте CAO РАН на странице Лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов (ЛСФВО)<sup>3</sup>.

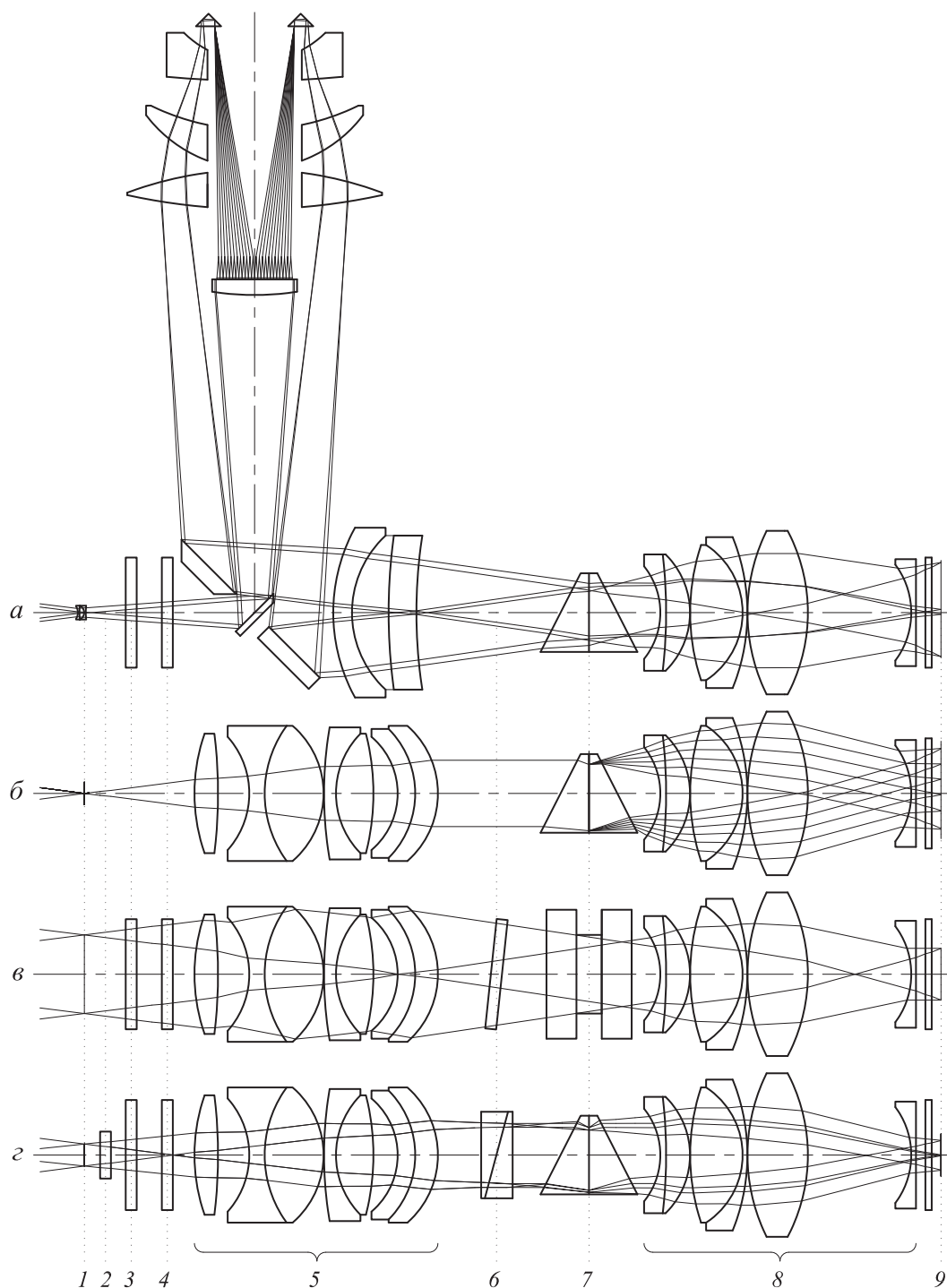
Как упоминалось ранее, кроме SCORPIO-2 в первичном фокусе БТА устанавливаются другие системы, которые работают в комплексе с редуктором светосилы:

- *Адаптер* — система гидирования и фотометрической калибровки широкоугольных спектрографов первичного фокуса. Система применяется как для внеосевого гидирования, так и для телецентрической засветки входного зрачка устанавливаемого на нем прибора различными калибровочными источниками света. Адаптер постоянно используется для наблюдений со SCORPIO-1 и БС==SCORPIO-2 и подробно рассматривается в **разделе 2** настоящей главы. Его описание также можно найти на странице ЛСФВО CAO РАН<sup>4</sup> и в работе [29].

<sup>2</sup>ООО «Опто-Технологическая Лаборатория»: [сайт]. URL: <https://optotl.ru/>

<sup>3</sup>Описание SCORPIO-2: [сайт]. URL: [https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index\\_rus.html](https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index_rus.html)

<sup>4</sup>Описание адаптера: [сайт]. URL: <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/adap/>



**Рис. 3.** Оптическая схема SCORPIO-2 в различных режимах: *a* — IFU; *б* — длиннощелевая спектроскопия; *в* — прямые снимки (при этом *поз.7* в схеме не используется) и сканирующий ИФП (при этом *поз.6* в схеме не используется); *г* — поляриметрия в широких фильтрах и спектрополяриметрия с “длинной щелью” (при этом щель вводится в *поз.1*). Основные узлы: 1 — каретка, вводящая в фокальную плоскость блок увеличителей IFU, длинную щель, либо свободное отверстие для получения изображений; 2 — каретка вращающихся поляризационных элементов; 3 и 4 — две турели светофильтров; 5 — каретка смены коллиматоров, фокусировка; 6 — турель с фотометрическими фильтрами и призмами Волластона; 7 — турель с гризмами и подвижка для ввода ИФП; 8 — камера с механизмом фокусировки; 9 — плоскость ПЗС-детектора

- *Интерферометр Фабри-Перо*, наблюдения с которым проводятся в одном из режимов SCORPIO-2. Эталон ИФП вводится в коллимированный пучок SCORPIO-2 при помощи специальной подвижки. Управление положением плоскопараллельных пластин эталона осуществляется при помощи внешнего, достаточно массивного контроллера. Перестраиваемый фильтр прибора MaNGaL, который рассматривается в **Главе III**, по сути дела, является частным случаем интерферометрического метода наблюдений для низких порядков интерференции  $n = 10 \div 30$ . Поэтому общее теоретическое описание метода в **разделе 1 Главы III** будет справедливо и для режима ИФП SCORPIO-2. Более подробно методика работы с ИФП в первичном фокусе БТА изложена в цикле работ [2, 30, 31].
- *Система регистрации изображений*, состоящая из нескольких модулей: криостата, поддерживающего рабочую температуру ПЗС-матрицы, контроллера, закреплённого на корпусе криостата и блока питания. В настоящее время совместно со SCORPIO-2 может использоваться одна из двух ПЗС-систем E2V CCD42-90 с форматом детектора  $2K \times 4K$  и E2V CCD261-84 с форматом  $2K \times 4.5K$ . Полный комплект для наблюдений с ПЗС (криостат, электроника и программы управления) разработан и изготовлен в Лаборатории перспективных разработок (ЛПР) CAO РАН<sup>5</sup> и описан в [32].

### 1.1. Особенности конструкции SCORPIO-2

Редуктор светосилы выполнен в виде отдельных блоков (“этажей”), где размещаются оптические элементы, из которых собирается схема прибора, необходимая для текущих наблюдений. На рисунке 3 показаны основные узлы, скомпонованные в четырёх этажах. Этажи смонтированы в общем корпусе и расположены в следующем порядке (по направлению от посадочного фланца прибора):

- Этаж 1 — *узел 1* — каретка вводящая в фокальную плоскость следующие элементы: блок увеличителей IFU, длинную щель переменной ширины, свободное отверстие для получения изображений; ширина щели меняется в пределах  $0.5 - 22''$ , предусмотрено введение различных масок на щель.

---

<sup>5</sup>ЛПР CAO РАН: [сайт]. URL: <https://www.sao.ru/hq/adlab/>



- Этаж 2 — узлы 2-4 — каретка вращающихся поляризационных элементов: ( $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ , поляроид); две турели светофильтров.
- Этаж 3 — узлы 5-6 — каретка смены коллиматоров; механизм фокусировки коллиматоров; турель с наклонёнными в оправках фильтрами фотометрической системы Джонсона-Казинса и призмами Волластона.
- Этаж 4 — узлы 7-8 — турель с гризмами VPHG; механизм ввода интерферометра Фабри-Перо; механизм фокусировки камеры.

На рисунке 4 фокальный редуктор SCORPIO-2 показан с демонтированным блоком IFU и со снятой верхней крышкой, когда открыт доступ ко второму, третьему и четвёртому этажам, закреплённым в направляющих пазах. Первый этаж смонтирован на посадочном фланце прибора и демонтируется вместе с ним. Для реализации распределенной схемы управления редуктором каждый этаж оснащен локальным “мозгом” в виде микропроцессора (МП) AVR ATmega8535L (на рисунке 4 видны платы управления 2-м и 4-м этажами). Общая линия питания и связи может быть отсоединена (в правой части рисунка 4 видны подключенные к этажам разъёмы). Благодаря такой модульной конструкции есть возможность извлечь любой этаж из общего корпуса и работать с ним на “столе”, если требуется юстировка или ремонт [33].

## 1.2. Управление комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП на аппаратном уровне

### Модуль управления SCORPIO-2

Модуль управления SCORPIO-2 (рисунок 5) легко извлекается из корпуса редуктора и может работать с каждой подсистемой комплекса (адаптер / ИФП / ПЗС) в отдельности, а также с любым из этажей “на столе”. Внутри этого модуля смонтированы компактные преобразователи напряжения марки Arch на 5 и 12 вольт, которые обеспечивают питание всех элементов редуктора. Здесь же установлен компактный компьютер MR3253S00F, заменивший собой два внешних промышленных компьютера, работавших в составе комплекса до 2019 г. Его задачи: управление и контроль состояния редуктора, взаимодействие с ПЗС, сбор и хранение получаемой информации. Используемые ПЗС-системы подключаются по



**Рис. 4.** Модульная конструкция SCORPIO-2: 1-й этаж смонтирован на фланце и снимается вместе с ним; этажи 2-4 извлекаются из направляющих пазов при демонтированном блоке IFU и снятой верхней крышке. На фотографии видны платы управления 2-м и 4-м этажами, а в правой части — разъёмы подключения общей линии питания и связи к этажам 1-3 [33]



**Рис. 5.** Модуль управления SCORPIO-2. Предусмотрена возможность быстрого извлечения

волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), поэтому для согласования оптического сигнала с ethernet-портом компьютера в корпусе модуля управления размещены медиаконвертеры (рисунок 6). Связь между компьютером и силовыми элементами модуля управления выполняет МП ATmega168, который отслеживает состояние всех элементов модуля, включая панель ручного управления, и может самостоятельно либо по команде от внешней программы регулировать работу модуля. Панель ручного управления и коммутации SCORPIO-2 расположена на наружной панели модуля управления, куда выведено большинство тумблеров, индикаторов и разъёмов прибора (рисунок 5). Кроме того, в панели предусмотрено окно, которое обеспечивает доступ ко всем разъёмам компактного компьютера и тумблерам ручного выключения каждого из преобразователей напряжения. Окно используется для отладки и настройки, а в рабочем режиме закрыто крышкой.

### **SCORPIO-2 + адаптер**

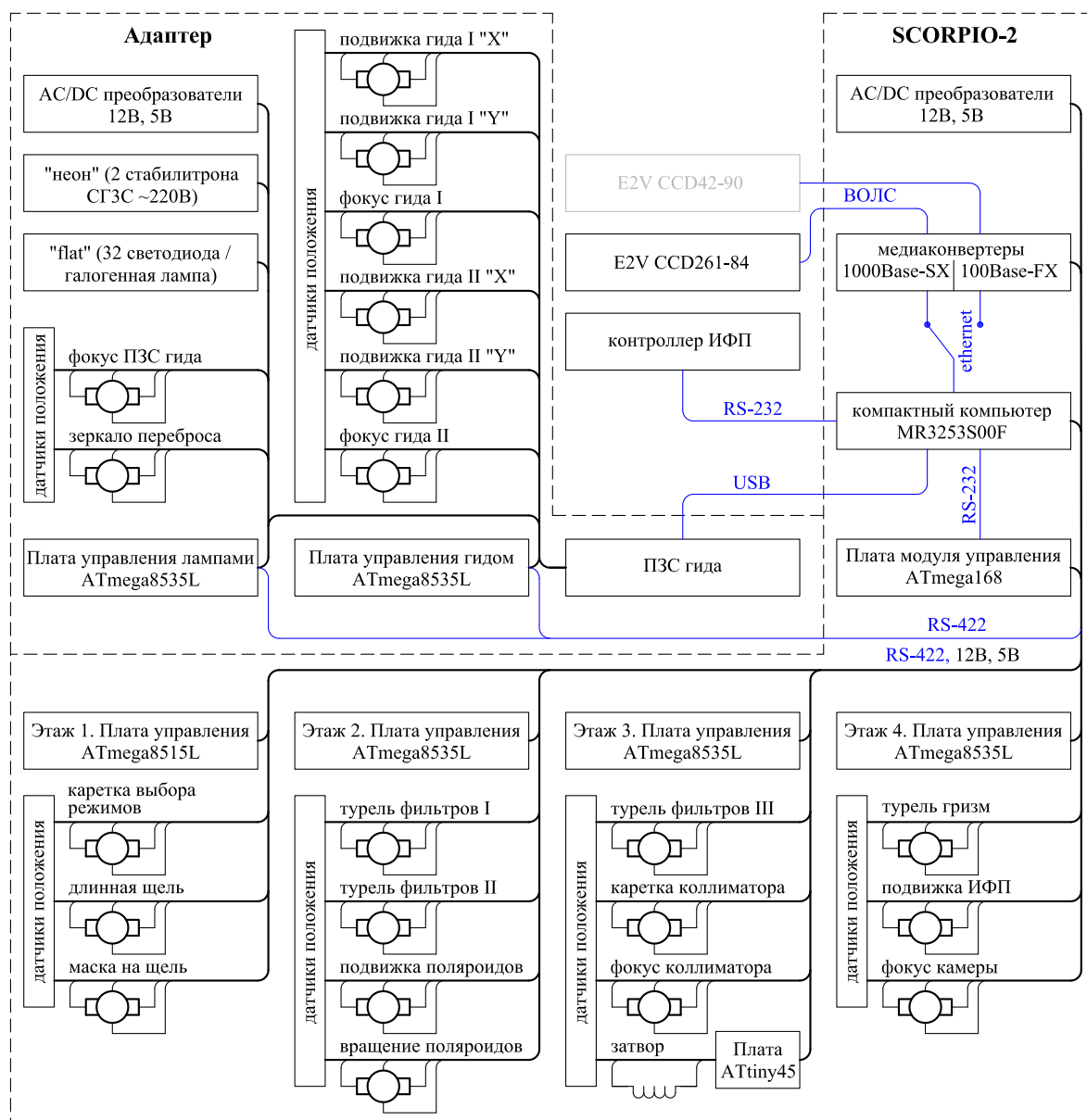
SCORPIO-2 содержит 42 сменных оптических элемента и 19 перестраиваемых элементов. Фокальный редуктор крепится к фланцу телескопа через адаптер. В комплексе работает 21 электромотор, текущее состояние контролирует 81 датчик. Энергоснабжение комплекса обеспечивают встроенные в редуктор и адаптер преобразователи напряжения, состояние которых также контролируется. Блок-схема электронной части и линий связи описываемой аппаратуры приводится на рисунке 6. Чтобы обеспечить удаленное управление и контроль столь обширным набором устройств используется распределенная система, включающая 7 МП ATmega (5 — в SCORPIO-2 и 2 — в адаптере). В каждый микропроцессор загружена программа управления набором логически связанных устройств. Еще один МП

ATtiny45 установлен на плате управления затвором. Он формирует импульсы, необходимые для работы затвора и позволяет получать экспозиции в десятые доли секунды. Команды на ATtiny45 поступают от МП 3-го этажа по шине TWI (I<sup>2</sup>C).

Используемые микропроцессоры подобраны в соответствии с локальными задачами: МП ATmega обладают большим количеством портов ввода-вывода и необходимым набором дополнительных функций, ATtiny имеют ограниченный функционал, но меньшие габариты и требуют минимум элементов обвязки. Получив команду от внешней программы, которая не противоречит текущему состоянию исполнительных элементов, программа микропроцессора приступает к ее выполнению, непрерывно контролируя при этом состояние соответствующих исполнительных устройств. Такое “разделение труда” позволило освободить внешнюю программу от лишней нагрузки, уменьшить обмен информацией и, тем самым, повысить надёжность управления. Программы микропроцессоров построены так, что исполнение любой команды можно прервать из внешней программы.

Формат всех команд от внешней программы одинаков и состоит из четырёх байт. Первый байт — это константа  $0 \times 23$  (в шестнадцатеричном виде), которая является признаком начала передачи команды от управляющей программы к МП. В четырёх старших разрядах второго байта содержится номер устройства, которому посылается команда; 4 младших разряда — номер исполнительного элемента в адресуемом устройстве. Третий и четвёртый байты определяют конкретные действия, которые должен совершить указанный элемент. Ответ любого микропроцессора также содержит 4 байта. Первый байт —  $0 \times 21$  — признак начала ответа МП управляющей программе. Второй байт ответа повторяет второй байт запроса внешней программы, чтобы можно было понять от какого устройства пришёл ответ (на линии может находиться до 16 устройств). Третий и четвёртый байты содержат информацию о состоянии концевиков, датчиков положения, температуре, а также токах и напряжениях источников питания [34].

Схема управления этажом (микропроцессором и электронными компонентами, необходимыми для управления соответствующим набором исполнительных устройств) собрана на многослойной печатной плате, которая монтируется на данном этаже рядом с исполнительными устройствами. Такая архитектура позволяет



**Рис. 6.** Блок-схема управления электроникой SCORPIO-2 + адаптер и линий связи наблюдательного комплекса SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС. Синим показаны интерфейсы связи между узлами комплекса, чёрным — линии питания и прочие соединения электронных компонентов [33]

существенно сократить длину и количество коммуникаций, а также упрощает настройку и ремонт как схем управления, так и комплекса редуктор + адаптер в целом.

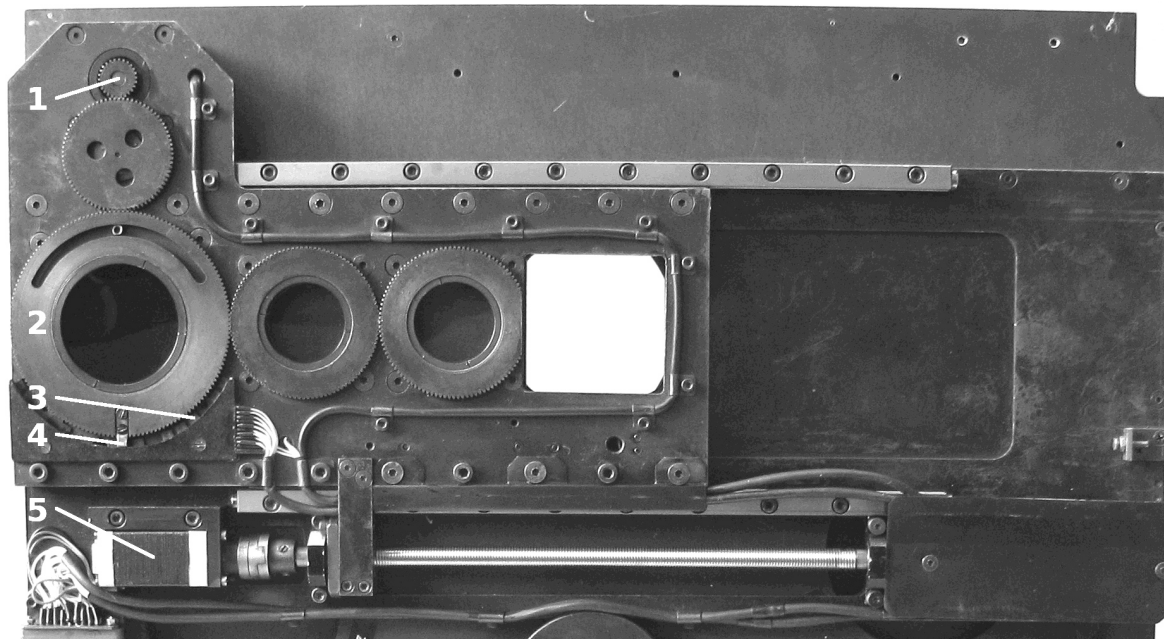
В качестве приводов использованы шаговые электродвигатели с вращающим моментом от 0.15 до 12 кг/см. Это надёжные, бесколлекторные моторы, которые работают в широком диапазоне скоростей (до 1000 шагов в секунду) и позволяют грубо контролировать позицию исполнительного механизма по всей траектории движения. Они просты в управлении и компактны. В узлах, где требуется осуществлять контроль позиции с высокой точностью, установлены потенциометрические датчики положения.

Связь МП адаптера и “этажей” редуктора с компактным компьютером реализована по четырёхпроводной полнодуплексной линии RS-422. На плате модуля управления SCORPIO-2 интерфейс RS-422 преобразуется в RS-232, который соединен с одним из последовательных портов компьютера (рисунок 6). Обмен информацией между микропроцессорами и внешней программой ведется с помощью стандартного протокола RS-232 и возможен только по инициативе внешней программы [33].

### **Особенности функционирования отдельного узла на примере прецизионного блока с фазовыми поляризационными элементами**

Режимы поляриметрии и спектрополяриметрии строятся по схеме с поворачиваемыми фазовыми пластинами — рисунок 3 (2, 2) и неподвижным анализатором поляризации — рисунок 3 (2, 6), что позволяет проводить измерения и линейной, и круговой поляризации. В качестве анализаторов поляризации используются две призмы Волластона, которые вводятся в оптический тракт с помощью турели третьего этажа, с погрешностью установки не хуже 0.1'.

Прецизионный блок установлен на втором этаже и содержит три фазовых поляризационных элемента: ахроматические  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$  пластинки диаметром 30 мм и дихроичный анализатор (поляроид) диаметром 70 мм, пропускающий излучение только в одной плоскости поляризации. Все три элемента установлены во вращающихся оправках с зубчатыми венцами и поворачиваются одновременно шаговым двигателем через редуктор (рисунок 7). Каждый фазовый элемент устанавлива-



**Рис. 7.** Поляриметрический узел: 1 — вал двигателя, вращающего поляризационные элементы; 2 — оправа поляроида с зубчатым венцом, передающая вращение на оправы фазовых пластин  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ ; 3 — датчики Холла, по которым осуществляется индикация угловых значений текущего элемента; 4 — магнит; 5 — привод каретки [33]

ется в фиксированные позиции по углу поворота ( $\lambda/2$ :  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ;  $\lambda/4$ :  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ; поляроид:  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) с механической фиксацией. Такая конструкция обеспечивает воспроизводимость установки угла поворота не хуже  $0.02^\circ$ . Индикация каждой позиции осуществляется датчиками Холла. Требуемый элемент вводится в пучок перемещением всей каретки с помощью шагового двигателя. Механизм имеет четыре фиксированные позиции, одна из которых пустая, с воспроизводимостью установки позиции не хуже 10 мкм. С методикой поляриметрических наблюдений на SCORPIO-2 можно ознакомиться в работе [35].

### Интерферометр Фабри-Перо

Для работы со сканирующим пьезоэлектрическим ИФП в кабину первичного фокуса 6-м телескопа устанавливается дополнительный модуль — контроллер интерферометра CS100, который также связывается с компактным компьютером через интерфейс RS-232. Эталон ИФП помещается на своё посадочное место в подвижке редуктора и соединяется кабелем непосредственно с контроллером. Вводом эталона в световой пучок и выводом из него управляет микропроцессор четвёртого

этажа (рисунок 6). После ручной настройки плоскопараллельности пластин интерферометра при помощи контроллера, управление переключается на последовательный порт и далее осуществляется удалённо. В режиме наблюдений используется всего две команды: смещение по “z” — изменение величины зазора между плоскопараллельными пластинами эталона, и инициализация контроллера.

### 1.3. Пакет программ управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС

Понятие “внешняя программа”, применяемое выше, относится к приложениям операционной системы компактного компьютера, управляющим микропроцессорами редуктора и адаптера. Эти приложения являются частью пакета программ управления комплексом, написанных на языке программирования IDL (Interactive Data Language).

Все функции управления и контроля состояния комплекса собраны в удобную оболочку, также реализованную в среде IDL. Интерфейс управления комплексом и окно управления отдельными узлами SCORPIO-2 показаны на рисунках 8 и 9 соответственно. После запуска программа каждую секунду опрашивает состояние всех семи микропроцессоров редуктора и адаптера.

Кратко коснёмся основных возможностей программы. В верхнем блоке главного окна (рисунок 8) располагается меню управления экспозициями и архивацией получаемых данных. В средней части — меню переключения режимов наблюдений. При нажатии на любую из вкладок сразу начинается перемещение узлов редуктора, которые устанавливаются в положение, соответствующее последним наблюдениям в данной моде. На вкладке “Test” задаётся текущая конфигурация сменных элементов SCORPIO-2. Справа от меню переключения режимов отображается состояние узлов на всех четырёх этажах, а также текущее значение фокуса коллиматора и положение затвора. В нижнем блоке сгруппированы функции, управляющие узлами адаптера: калибровочными источниками линейчатого либо непрерывного спектра и зеркалом переброса, подвижками и фокусировкой световодов гида, а также фокусировкой ПЗС детектора гида. В главном окне программы предусмотрено множество различных сервисных функций, к примеру, кнопка “PA rotation”, открывающая меню управления поворотным столом первичного фокуса.



The screenshot displays the SCORPIO-2 control software interface. It features a top section with 'observing program' settings (Supernovae and stellar win, object: neon, seeing: 2.4, clouds: 0, comment, path, file, and a 'New cube' button) and 'frame properties' (neon, 15.0, GAIN: low, RATE: norm, all/region selection, and coordinates X1, X2, Y1, Y2). The 'EXPOSURE CONTROL' section includes START, STOP, and initialisation CCD buttons, along with a log of events. A bottom menu bar contains buttons for 'Create LOG / Save ZIP', 'focussing', 'edit header', 'Tools', 'Scanning IFP', 'HELP', and 'EXIT'. Below this is a 'MODE: Test' section with 'SET CONFIGURATION' and 'Slit position' buttons. The 'REMOTE CONTROL OF ADAPTER-2' section includes controls for MIRROR, FIELD, SHIFT, and fiber movement, as well as a 'FIND GUIDING STARS' section.

Рис. 8. Главное окно программы управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС

Управление отдельными узлами SCORPIO-2 осуществляется из окна, представленного на рисунке 9. Для простоты отождествления, элементы в этом окне разбиты на группы по этажам, которые соответствуют реальному расположению узлов внутри прибора. Нажатием на различные пункты меню, большинство из которых пояснения не требуют, выбирается нужная конфигурация элементов. Кнопка “Stop” посылает команду на остановку всех моторов прибора. Флажок “AutoCol” (третий этаж, коллиматор) подразумевает, что фокус коллиматора будет автоматически подстраиваться, в зависимости от того, какие оптические элементы присутствуют в пучке. Фокус камеры редуктора также автоматически изменяется при смене коллиматоров (работа с IFU и во всех других режимах). Углы разворота анализаторов поляризации (блок “Spectropolarimetry”) показаны только те, кото-

**1st FLOOR**

**SET MODES:**

IFU  
LONG SLIT  
**IMAGE**  
MASK

**SLIT MASKS**

Zero point  
13 dots  
5 dots  
3 dots  
1 dot  
H max  
H mean  
H min

**SLIT WIDTH (arcsec)**

Current: 1.01  
New: 1.0

**MULTISLIT**

**Power and State**

**2nd FLOOR**

**WHEEL #1**

|   |        |
|---|--------|
| 0 |        |
| 1 | AC6605 |
| 2 | #77B   |
| 3 | SED875 |
| 4 | SED608 |
| 5 | SED656 |
| 6 | SED710 |
| 7 | #81B   |
| 8 | GS-11  |
| 9 | SED900 |

**WHEEL #2**

|   |        |
|---|--------|
| 0 |        |
| 1 | u-SDSS |
| 2 | g-SDSS |
| 3 | r-SDSS |
| 4 | i-SDSS |
| 5 | z-SDSS |
| 6 | SED775 |
| 7 | SED800 |
| 8 | empty  |
| 9 | GS-17  |

**SPECTROPOLARIMETRY**

**SET MODES**

hole  
LAMBDA/2  
LAMBDA/4  
POLAROID

**ANGLES**

**SHUTTER:** OFF

**STOP**

**3rd FLOOR**

**WHEEL #3**

|   |        |
|---|--------|
| 0 |        |
| 1 | WOLL_1 |
| 2 | WOLL_2 |
| 3 | empty  |
| 4 | empty  |
| 5 | empty  |
| 6 | B      |
| 7 | V      |
| 8 | R      |
| 9 | I      |

**COLLIMATOR**

**REDUCER**

IFU

**COLLIM. FOCUS**

Current: 5.09  
Set New: 000

☐ AutoCol

**4th FLOOR**

**WHEEL #4**

|   |              |
|---|--------------|
| 0 |              |
| 1 | VPHG940@600  |
| 2 | VPHG1200@540 |
| 3 | VPHG1200@860 |
| 4 | VPHG1800@590 |
| 5 | VPHG1800@500 |
| 6 | VPHG1026@735 |
| 7 | VPHG1800@660 |
| 8 | VPHG2400@415 |
| 9 | VPHG2300@510 |

**IFP751 in beam**

**OUT**

IN

**CAMERA FOCUS**

Current: 1.54  
Set New: 0.00

☐ AutoCam

Рис. 9. Окно управления отдельными узлами SCORPIO-2

рые используются для работы с введенным анализатором. Соответственно, если каретка стоит в положении “hole”, то углы не отображаются. Посмотреть текущие углы разворота всех анализаторов можно в меню “Power and State”, где также отображаются напряжения и токи источников питания прибора, температура в нескольких критичных точках и скорости моторов. Рядом с текущими значениями, которые обновляются каждую секунду, указаны значения по умолчанию, поэтому с помощью меню “Power and State” можно быстро оценить правильность работы электроники редуктора.

#### 1.4. Организация дистанционных наблюдений

Комплекс SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС управляется, как уже было сказано, через компактный компьютер, установленный в корпусе модуля управления фокального редуктора. Для дистанционной работы с этим компьютером используется программа управления удалённым рабочим столом Netop Remote Control. Архитектура системы в упрощённом виде показана на рисунке 10. Вся навесная аппаратура в кабине первичного фокуса БТА (SCORPIO-2, адаптер, контроллер ИФП, ПЗС-система) включена в сеть электропитания через дистанционно управляемую розетку AP7920 фирмы APC, доступ к интерфейсу которой осуществляется по локальной сети. Каждый из приборов, входящих в комплекс,



**Рис. 10.** Блок-схема организации удалённых наблюдений со SCORPIO-2 [33]

может быть включен и выключен при помощи управляемой розетки независимо от других. Такая конфигурация более выгодна и надёжна, чем управление общим питанием или автозапуск системы без управления питанием вовсе. В первом случае будет потеря времени на перезагрузку и выход на режим всего комплекса, во втором — при неблагоприятном стечении обстоятельств систему вообще не удастся удалённо перезагрузить.

Для выполнения наблюдений разработано интегрирующее программное обеспечение, которое объединяет пакет программ управления SCORPIO-2 + адаптер + ИФП + ПЗС, систему регистрации и архивации и систему управления телескопом в единый наблюдательный комплекс и само является элементом этого комплекса. Программная часть комплекса включает в себя:

- Пакет программ управления комплексом SCORPIO-2 + адаптер + ПЗС + ИФП.
- Пакет программ “Identstar” для поиска опорных звёзд.
- Программы захвата опорных звёзд и автоматического гидирования.
- ПЗС-сервер.
- Сервер управления телескопом.
- Система управления архивом наблюдательных данных.

Программы установлены в операционной системе встроенного в SCORPIO-2 компьютера, и связь с ними поддерживается по локальной сети, при этом пользователь работает только с IDL-оболочкой пакета программ управления комплексом и программой гидирования, также написанной на IDL. Первая оболочка, по мере необходимости обращается как к редуктору, адаптеру и контроллеру ИФП, так и через вызов соответствующих внешних программ к ПЗС-контроллеру и телескопу.

Для организации взаимодействия программ управления наблюдательного комплекса специальная директория сервера телескопа подключается в качестве сетевого диска компактного компьютера редуктора светосилы. Через эту директорию ведется обмен командами и информацией между телескопом и редуктором. Непосредственное управление телескопом и контроль погоды осуществляются при помощи программного обеспечения, разработанного В. С. Шергиным<sup>6</sup> (САО РАН), на отдельном компьютере в комнате удалённых наблюдений [36].

Стоит упомянуть систему архивирования наблюдательных данных ASPID (Archive of Spectral, Photometric and Interferometric Data)<sup>7</sup>, разработанную для работы с данными, получаемыми на БТА методами низкого и умеренного спектрального разрешения, в частности, на приборах SCORPIO (SCORPIO-1, после модернизации в 2019 г.) и SCORPIO-2. В течение ночи наблюдений получаемые изображения записываются в стандартном FITS-формате (Flexible Image Transport System) в управляющий компьютер прибора. По окончании наблюдений в рабочей директории формируется журнал наблюдений и данные автоматически архивируются и копируются в рабочий архив на удаленном сервере, а также в общий архив САО РАН. Далее, в течение месяца, формируется постоянный архив, данные которого доступны для пользовательского поиска и просмотра через веб-интерфейс.

## 2. Адаптер первичного фокуса БТА

### 2.1. Внеосевое гидирование

Внеосевое гидирование подразумевает стабилизацию телескопа по изображению опорной звезды в одном поле зрения с объектом наблюдения. Опорная звез-

---

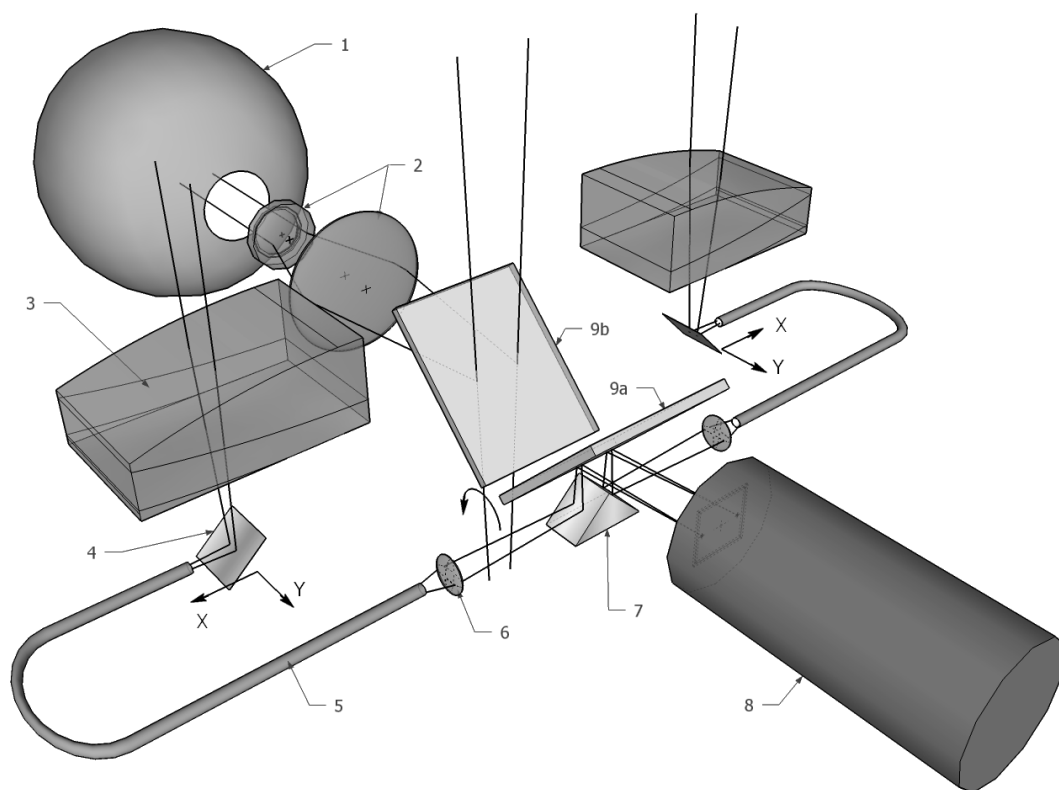
<sup>6</sup>Описание программ управления телескопами САО РАН / В. С. Шергин [сайт]. URL: <https://www.sao.ru/hq/vsher/#manuals>

<sup>7</sup>Архив наблюдений ASPID: [сайт]. URL: <http://alcor.sao.ru/>

да обычно выбирается по краям основного поля, поэтому в подобных приборах часто используется корректор аберраций. Необходимость автоматического гидирования по двум опорным звёздам обусловлена конструкцией 6-м телескопа на альт-азимутальной монтировке. В отличие от параллактической монтировки, поле зрения в таком телескопе вращается. В результате для точного сопровождения наблюдаемого объекта, помимо надлежащей работы механических узлов и приводов телескопа, требуется учитывать изменения атмосферных условий. По одной звезде корректируется ведение монтировки телескопа, использование второй — позволяет учесть ошибку компенсатора вращения поля.

Качественное гидирование необходимо для многих методов, в т.ч. для панорамной спектроскопии слабых протяжённых объектов, когда наблюдения ведутся длинными экспозициями в большом поле зрения. Требуемую точность ведения объекта обеспечивает устройство для внеосевого гидирования и калибровки — адаптер, на котором могут быть установлены спектрографы весом до 150 кг и рабочим отрезком до 40 мм. В настоящее время адаптер регулярно используется совместно с многорежимными фокальными редукторами SCORPIO-1 и -2. Прототип этой системы появился значительно раньше SCORPIO, и впервые был применен на БТА в 1979 г. для оптического отождествления радиоисточников. Высокое качество гидирования, которое тогда выполнялось вручную, позволило получить очень глубокие снимки слабых галактик до 25 звёздной величины [37]. На настоящий момент в первичном фокусе 6-м телескопа работает четвёртая версия адаптера, за прошедшие годы претерпевшая значительные изменения. В современном адаптере реализованы:

- линзовые корректоры гидировочных полей, исправляющие кому главного зеркала телескопа;
- дистанционное управление подвижными узлами;
- внеосевое гидирование по двум звёздам;
- автоматический поиск звёзд гидирования;
- фокусировка телескопа во время экспозиции;
- контроль вариаций прозрачности атмосферы по яркости опорных звёзд.



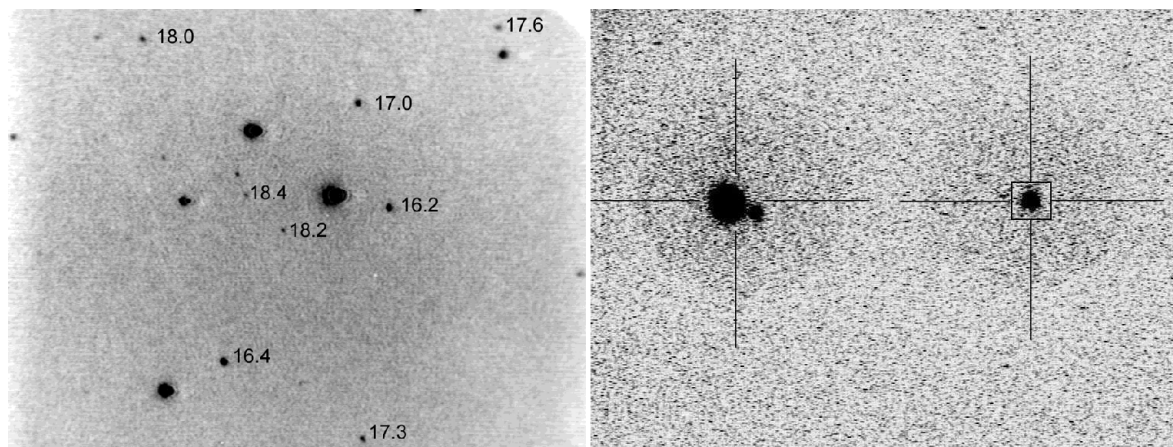
**Рис. 11.** Оптическая схема адаптера: 1 — интегрирующая сфера, 2 — оптика калибровки, 3 — внеосевой линзовый корректор, 4 — зеркало, 5 — световод, 6 — линза световода, 7 — отражающая призма, 8 — подсмотр, 9a — диагональное зеркало в положении FIBERS и 9b — в положении FIELD [29]

Кроме того, в адаптере имеется встроенная калибровочная система, которая подробно рассмотрена в следующей части раздела.

Схема адаптера приводится на рисунке 11. В адаптере имеются два подвижных поля для поиска опорных звёзд. Свет от гидирующей звезды сначала попадает на внеосевой линзовый корректор (3), который, компенсируя кому главного зеркала телескопа, обеспечивает качество изображения около  $1''$  на расстоянии  $15'$  от оптической оси. Затем, через диагональное зеркало (4), происходит засветка входного торца жгута световодов (5), который вместе с зеркалом перемещается по полю в радиальном и тангенциальном направлениях. Диаметр подвижного поля гидирования при этом составляет  $54''$ . Пределы перемещения полей гидирования определяются используемыми линейными подвижками Standa. На небесной сфере они составляют  $10' \times 4'5$ . Линза (6), призма (7) и диагональное зеркало (9) проецируют изображения обоих полей гидирования в фокальную плоскость светоприёмника подсмotra. Диагональное зеркало (9) имеет два рабочих положения

— FIBERS (9a) и FIELD (9b). В положении FIBERS зеркало выведено из пучка, свет от основного объекта наблюдения беспрепятственно проходит адаптер и попадает в спектрограф, а детектор подсмotra принимает изображения гидирующих звёзд. В положении FIELD диагональное зеркало введено и передаёт изображение основного поля зрения на подсмотр, что позволяет делать отождествление поля, в том числе устанавливая на цель яркие объекты. Одновременно, при таком положении диагонального зеркала, возможно проведение калибровки основного приёмника с помощью интегрирующей сферы (1) и соответствующей оптики осветителя калибровки (2).

В качестве приёмника изображений поля и гидировочных звёзд (подсмotra) в настоящее время используется камера Atik Titan с ПЗС-детектором Sony ICX424 форматом  $659 \times 494$  элементов размером  $7.4 \times 7.4$  мкм. Передача изображений в управляющий компактный компьютер осуществляется по интерфейсу USB. В левой части рисунка 12 изображено основное поле подсмotra — FIELD. Для некоторых звёзд приведены значения звёздных величин в полосе R по данным каталога USNO 2.0. Размер поля FIELD составляет  $3' \times 2'$ . В правой части рисунка приведен пример изображения от световодов — FIBERS, на которые проецируются изображения крестов с регулируемой подсветкой. Кроме звёзд, в кадре можно видеть фон неба, принимаемый от обоих световодов. Пропускание в режиме FIBERS примерно в два раза ниже, чем в режиме FIELD из-за дополнительной оптики и поглощения в световодах. Однако чувствительности приёмника достаточно для уверенной регистрации безлунного фона неба.



**Рис. 12.** Пример изображений ПЗС гида Atik Titan в режиме FIELD (слева) и FIBERS (справа). Указаны звёздные величины слабых звёзд в полосе R [29]

Программная часть системы гидирования осуществляет автоматическую корректировку ошибок сопровождения телескопом объекта, атмосферной рефракции и т.п. Прежде всего, с помощью программного пакета “Identstar”, описанного в [29], в поле зрения телескопа выбираются яркие опорные звезды из каталога USNO 2.0 и определяются их координаты относительно оптической оси. Координаты передаются схеме управления адаптера, которая с помощью подвижек выводит микроскопы гида в заданную позицию. Далее, после включения гидирования, ведётся захват изображения опорной звезды на ПЗС гида, непрерывное определение её координат и передача коррекции серверу телескопа. Оцифровка изображения от гидирующей ПЗС с кадровой частотой 25 Гц производится при помощи программы работы с телевизионным тюнером типа AverMedia, написанной на языке C++ Е. А. Ивановым (филиал «СОН «Архыз» АО «НПК «СПП»<sup>8</sup>). Более подробное описание системы внеосевого гидирования можно найти в работе, посвящённой адаптеру [29].

## 2.2. Калибровочный модуль адаптера

Калибровочный модуль адаптера состоит из интегрирующей сферы (шар Ульбрихта), оптики осветителя и системы управления. Система калибровки имеет источник линейчатого спектра и два источника непрерывного спектра. В качестве осветителя линейчатого спектра используется 2 газоразрядных стабилитрона СГЗС с наполнением гелий-неон-аргон. Одна галогеновая лампа и серия из 32-х светодиодов (light-emitting diode, LED), расположенных на одной параллели интегрирующей сферы, формируют непрерывные спектры. Оптика осветителя формирует на входе устанавливаемого на адаптер прибора сходящийся пучок со светосилой, эквивалентной светосиле телескопа  $F/4$ . Следует отметить, что в этом случае схема тракта калибровки дает выходной зрачок системы там же, где находится изображение зеркала телескопа, и, следовательно, выполняется условие телецентризма. Проецируемый диаметр площадки осветителя совпадает с диаметром зрачка с точностью не хуже 0.2%. Это позволяет проводить не только корректную калибровку шкалы длин волн лампой линейчатого спектра, но и калибровку пропускания системы по полю (“плоское поле”) в различных режимах

---

<sup>8</sup>Филиал «СОН «Архыз» АО «НПК «СПП»: [сайт]. URL: <http://www.npk-spp.ru/about/branches-of-the-corporation/103-arxiz.html>



работы.

Работа с калибровочным модулем осуществляется из основной оболочки управления наблюдательным комплексом, которая рассматривалась в предыдущем разделе. При выборе источника калибровочной засветки в меню выбора типа экспозиции (область frame properties, рисунок 8), программа автоматически вводит зеркало и включает требуемую засветку: стабилитрон линейчатого спектра — “NEON” или источник непрерывного спектра — “FLAT”. Последний источник должен быть выбран в левом нижнем углу окна программы перед началом экспозиции: либо галогеновая кварцевая лампа — “QUARTZ”, либо светодиоды — “LEDs”, либо оба режима. Кроме того, калибровочную засветку можно включать вручную: либо тумблерами на корпусе адаптера, либо нажатием соответствующих кнопок в интерфейсе программы.

### Светодиодная калибровочная система

Галогеновая лампа в качестве источника непрерывного спектра обладает некоторыми известными недостатками: падением яркости в синей области спектра (длины волн короче  $5000 \text{ \AA}$ ), и вытекающей отсюда проблемой вклада в синюю часть рассеянного света из более длинноволновой, красной части. Проблема усугублялась ухудшением кривой квантовой эффективности в синей части единственного на тот момент детектора SCORPIO-2 E2V CCD42-90<sup>9,10</sup>. Поэтому было решено создать систему светодиодной калибровочной засветки, позволяющую формировать непрерывный спектр для “плоского поля” с приблизительно равномерной по спектру яркостью в широком диапазоне длин волн. Подобное решение было впервые предложено для фотометрической калибровки на малых телескопах [38] и, к моменту создания нашей системы и публикации ее описания, еще не применялось для работы со спектрографами средних и больших телескопов. Сейчас аналогичные схемы калибровки применены в спектрографах TDS на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ [9] и EXPRES на 4.3-м телескопе обсерватории Лоуэлла [39].

Современное производство предоставляет широкий ассортимент различных светодиодов, перекрывающих весь оптический диапазон длин волн. Каждый све-

<sup>9</sup>ЛПР САО РАН. Описание CCD42-90: [сайт]. URL: <https://www.sao.ru/hq/adlab/cam4290-1.html>

<sup>10</sup>Описание SCORPIO-2. Основные параметры: [сайт]. URL: [https://www.sao.ru/hq/lsvfvo/devices/scorpio-2/params\\_eng.html](https://www.sao.ru/hq/lsvfvo/devices/scorpio-2/params_eng.html)

одиод определенного цвета имеет непрерывный, но относительно узкий спектр с полушириной около 100–200 Å. Это позволяет конструировать спектральное плоское поле для различных решёток, учитывая также спектральную чувствительность ПЗС.

Система управления светодиодной засветкой калибровочного модуля адаптера реализована на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). На каждый светодиод подается периодический сигнал прямоугольной формы с различной скважностью, изменяемой дискретно в диапазоне 0–253. Такая реализация довольно проста в исполнении и обеспечивает высокую яркостную стабильность светодиодов. В оболочке, при нажатии на кнопку “LEDs menu” (рисунок 8), открывается окно, где, меняя скважность, можно регулировать интенсивность каждого из 32 светодиодов. Обычно в ручной регулировке не возникает необходимости, т.к. для каждой решётки уже подобрана оптимальная конфигурация (**Приложении А**, рисунки А1-А6). На рисунке 13 приведен пример сконструированного “плоского поля” LEDs для решётки VPNG 940@600, имеющей рабочий диапазон 3500–8500 Å. Для сравнения здесь же показано спектральное “плоское поле” галогеновой кварцевой лампы QUARTZ с выравнивающим светофильтром. Оба спектра нормированы на экспозицию в 1 секунду.

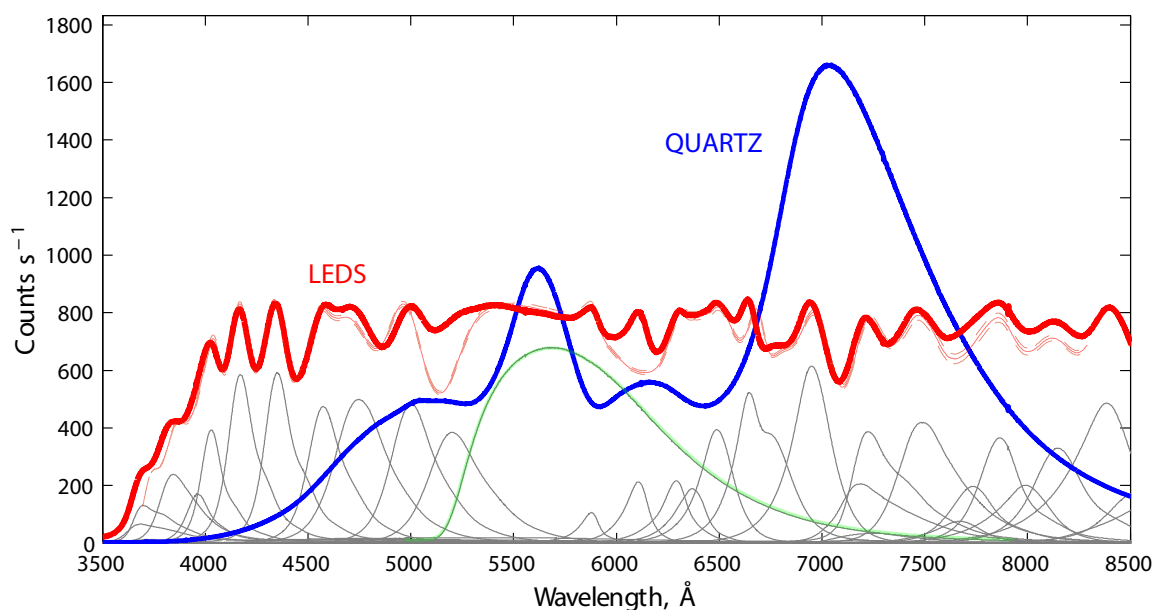
### Настройка и оптимизация светодиодов

“Плоское поле”, показанное на рисунке 13, имеет некоторые недостатки (провалы интенсивности в районе 4000–4500 и 7000 Å) и будет в дальнейшем улучшено. Тем не менее, такая конфигурация LEDs уже несколько лет успешно используется для калибровки приборов SCORPIO-1, -2. Приемлемый результат удалось получить не сразу, во время настройки системы возникали определённые проблемы, на которых стоит остановиться подробнее.

После первичной сборки светодиодной системы было выявлено, что не все заказанные светодиоды соответствуют заявленным характеристикам, и в таком виде режим LEDs использовать нельзя. Для решения проблемы была сформулирована следующая последовательность действий:

- подобрать светодиоды по длине волны, основываясь на собственных измерениях, проводимых на SCORPIO-2;

- подобрать сопротивления на плате управления светодиодами, чтобы их интенсивность была в рабочем диапазоне для различных решёток;
- оценить стабильность нормализованных спектральных плоских полей в течение нескольких часов (имитация наблюдений на телескопе).



**Рис. 13.** Пример спектральных “плоских полей” для решётки VPHG 940@600, полученных при помощи галогеновой лампы QUARTZ с выравнивающим светофильтром и системы светодиодов LEDs. Текущий вариант “плоского поля” LEDs обозначен жирной красной кривой. В качестве примера, тонкой светло-красной кривой показан суммарный спектр светодиодов на одном из финальных этапов работы. Две пунктирные линии около спектра иллюстрируют, на сколько изменится картина плоского поля при изменении скважности на  $1/253$ . Серым цветом показаны спектральные кривые отдельных светодиодов, зелёным — выделен белый светодиод. Спектры нормированы на экспозицию в 1 секунду [29]

В первоначальном варианте системы, после предварительной настройки сопротивлений, были обнаружены завалы в суммарных спектрах плоских полей из-за отличия заявленных производителями длин волн максимальной интенсивности от реальных, которые были измерены на SCORPIO-2. Это послужило толчком к поиску вариантов “залатывания дыр” всеми возможными светодиодами, которые только удалось найти в лаборатории. Крайне удачным оказался белый светодиод из китайского налобного фонарика в сочетании с жёлтым светофильтром, который заполнил наиболее проблемный диапазон 5250–6250 Å. На рисунке 13 спектр

этого светодиода выделен зеленым, а получившееся “плоское поле” для решётки VPNG 940@600 — тонкой красной кривой. Далее было заменено большинство неэффективных светодиодов, что выровняло провалы в интенсивности по бокам от белого светодиода.

После подбора светодиодов по цвету продолжительное время заняла подгонка сопротивлений на плате управления светодиодами. Необходимость в этом вызвана, во-первых, тем, что при использовании различных решёток светодиоды должны иметь яркости одного порядка, а, во-вторых, — дискретность изменения яркости приводит к тому, что яркость слабых светодиодов изменяется с бóльшим шагом (т.е. при малых значениях скважности периодического сигнала). Технически подгонка сопротивлений выполнялась просто: в нужную позицию на плате впаивалось переменное сопротивление, и с помощью него подбиралась необходимая яркость, после чего впаивалось постоянное сопротивление подходящего номинала. Текущие параметры светодиодов сведены в таблицу A1 в Приложении А. Некоторые светодиоды проявляют себя дважды на решетке VPNG 940@600 из-за наличия второго порядка дифракции. На самом деле, в голубой и красной части этой решётки проявляются все голубые светодиоды вплоть до 7-го номера (**Приложение А**, таблица A1). Это накладывает ограничения, и, по сути, уровни яркости светодиодов после 7-го номера приводились к значениям яркости голубых светодиодов во втором порядке решётки VPNG 940@600. “Плоские поля” для комплекта решёток SCORPIO-2 с нумерацией используемых светодиодов также приводятся в **Приложении А** на рисунках A1-A6.

### Стабильность светодиодной засветки

Калибровочная система, состоящая из набора светодиодов, должна обеспечивать стабильную повторяемость формы спектра в диапазоне температур  $\delta T = -20... + 40^\circ$ . При оценке температурной стабильности светового потока диода, будем руководствоваться эмпирическим выражением из [40]:

$$F = F_{300} \exp\left(-\frac{T - 300}{T_1}\right), \quad (1)$$

где  $F_{300}$  — поток светодиода при температуре, близкой к комнатной,  $T_1$  — характеристическая температура для данного класса диодов, экспериментальные значения которой также взяты из работы [40]: 1600 К — для синих, 295 К — для зелёных

**Таблица 1.** Температурные коэффициенты красных светодиодов

|              |        |        |         |         |
|--------------|--------|--------|---------|---------|
| T, °C        | -20    | 0      | 27      | 40      |
| $dF/F_{300}$ | -0.017 | -0.014 | -0.0105 | -0.0009 |

и 95 К — для красных светодиодов. Из (1) видно, что поток излучения “красных” светодиодов наиболее чувствителен к изменениям температуры и, следовательно, этот диапазон спектра будет подвержен наиболее сильным колебаниям при изменении температуры внешней среды. Оценим чувствительность спектра в красной области, как худший вариант. Чтобы рассчитать относительную температурную чувствительность потока излучающих в красной области светодиодов при изменении температуры на 1 градус, продифференцируем выражение (1):

$$dF/F_{300} = -\exp\left(-\frac{T-300}{T_1}\right) \frac{dT}{T_1}.$$

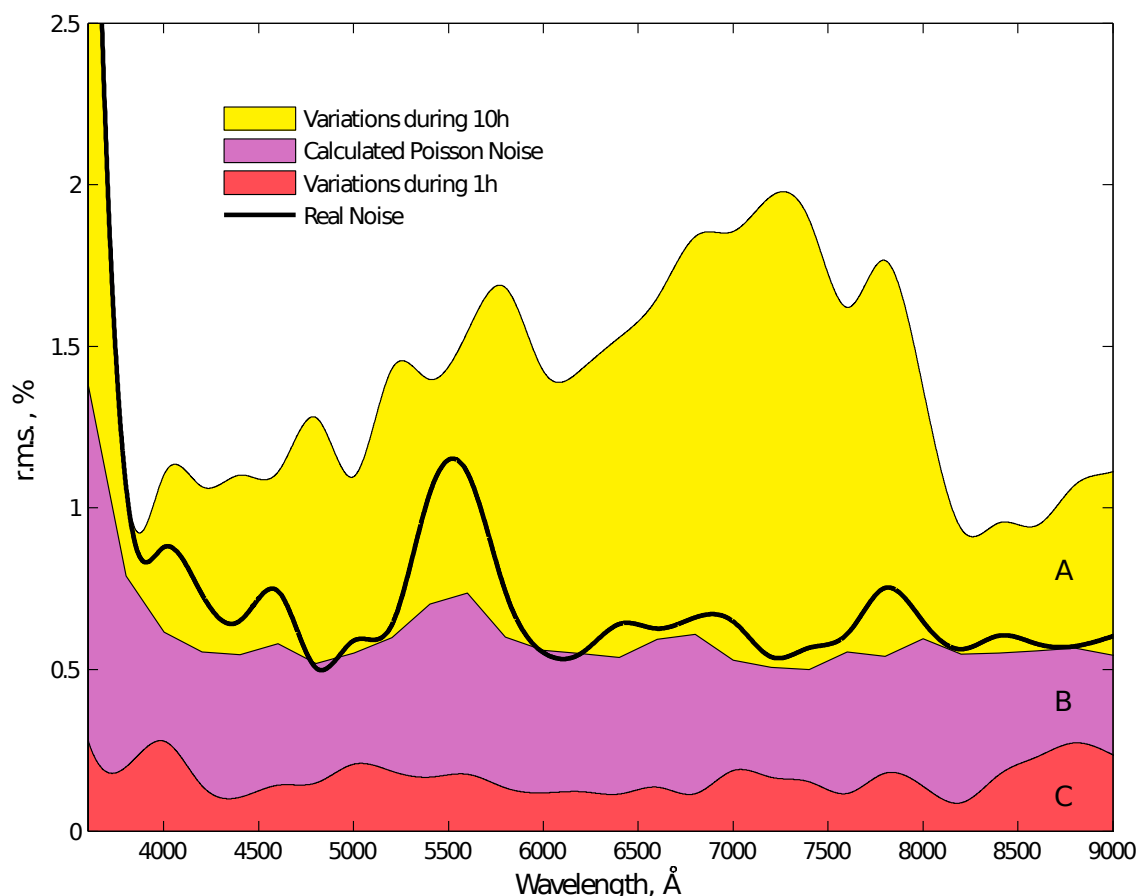
Для иллюстрации эффекта характерные значения полученных производных в рабочем диапазоне температур для красных светодиодов приводятся в таблице 1.

При оценке возможных колебаний спектра необходимо учесть, что за время экспозиции (от 5 до 60 минут) температура в кабине первичного фокуса БТА меняется не более чем на 1–2 °C. Для оценки реальной стабильности светодиодной засветки в лаборатории были получены два ряда спектральных “плоских полей” с прибором SCORPIO-2 с использованием решётки VPHG 940@600 в течение 10 часов с шагом в 1 час и в течение 1 часа с шагом в 1 минуту. На рисунке 14 показаны относительные вариации “плоского поля” в зависимости от длины волны. Область (А) на рисунке показывает разброс для 10-часового эксперимента, что примерно имитирует ситуацию одной наблюдательной ночи. Для сравнения приводится область (В), соответствующая пуассоновскому шуму рассчитанному по формуле:

$$1/\sqrt{N_s \times gain},$$

где  $N_s$  — число отсчетов на данной длине волны,  $gain$  — коэффициент усиления ПЗС-системы. Реальный шум в спектре показан чёрной жирной линией и хорошо согласуется с теоретическим. Область (С) показывает разброс для 1-часового эксперимента, что примерно имитирует ситуацию наблюдений одного объекта. Видно,

что вариации в течение часа (С) меньше пуассоновского шума (В). Определение вариаций обоих рядов данных и величины пуассоновского шума проводилось в интервалах шириной 200 Å.



**Рис. 14.** Относительные вариации спектрального “плоского поля” светодиодов с решёткой VPHG 940@600, в зависимости от длины волны [29]

Следует отметить, что, несмотря на небольшие колебания температуры внешней среды за 10 часов (в пределах 5°C), имеет место постепенное увеличение амплитуды вариаций от 1% до 2% с ростом длины волн. На длинах волн, превышающих 7500 Å, вариации падают до 1%, что отражает вклад второго порядка решётки VPHG 940@600, а засветка в этом диапазоне также формируется голубыми светодиодами.

В результате получено светодиодное “плоское поле”, которое даёт более равномерную засветку по длинам волн в сравнении с галогеновой лампой (рисунок 13). Логично предположить гибридную систему, в которой светодиоды исправляют недостатки галогеновой лампы в синем спектральном диапазоне. Однако в нашем

случае, светодиоды расположены слишком близко к галогеновой кварцевой лампе, которая сильно нагревается во время работы. Даже маломощная (5 Вт, 12 В) кварцевая лампа будет влиять на свойства светодиодов, стабильность которых зависит от температуры. Поэтому для совместного использования обеих засветок требуется изменение конструкции интегрирующей сферы, что, возможно, будет предпринято в будущем. Это стоит учитывать в наблюдениях и при проектировании аналогичных систем.

### **3. Выводы и результаты**

Во время астрофизических наблюдений нередко возникает потребность оперативной смены техники наблюдений на телескопе, например, переход от фотометрии к спектроскопии. Многорежимные приборы, изменяя оптическую схему, позволяют с минимальными временными потерями переключаться между различными методами исследований. Правильно построенная и автоматизированная система управления позволяет не только рационально использовать время на телескопе, но и является необходимым условием для возможности работы сторонних наблюдателей.

Создана распределённая система управления экспериментом, позволяющая удалённо управлять самыми разными инструментами: многорежимным редуктором светосилы SCORPIO-2, системой калибровки и внеосевого гидирования — адаптером, системой регистрации изображений, системой архивации наблюдательных данных и телескопом. Система управления редуктора светосилы позволяет собрать в одном блоке все элементы прибора, сократив до минимума количество внутренних и внешних связей. Возможность быстрого переключения между различными режимами обеспечивает гибкость в выборе наблюдательных программ под текущее состояние атмосферы, тем самым экономится наблюдательное время.

В системе калибровочной засветки адаптера решена проблема стандартного источника непрерывного спектра — галогеновой лампы, из-за падения яркости в синей части спектра которой имеет место вклад рассеянного света в синюю область спектра из красной. Создана система светодиодной калибровочной засветки, позволяющая относительно равномерно по спектру засвечивать ПЗС-приёмник с

учетом его кривой чувствительности и кривых пропускания гризм. На крупном телескопе (БТА) подобная система реализована впервые.

Основные результаты этой главы изложены в публикациях:

- ***А. Е. Перепелицын, В. Р. Амирханян, А. В. Моисеев*** — Труды ИПА РАН, вып. **53**, 44–53 (2020).
- *Afanasiev V. L., Amirkhanyan V. R., Moiseev A. V., Uklein R. I., **Perepelitsyn A. E.*** — Astrophysical Bulletin, Vol. **72**, Is. 4, P. 458–468 (2017).



## II. Блок интегрально-полевой спектроскопии SCORPIO-2

Одним из способов исследования протяжённых объектов является интегрально-полевая спектроскопия (IFS). Концепция IFS была предложена Куртесом в 1981 г. [14, 41], и большинство современных инструментов строятся по принципам, разработанным в 1980-х и начале 1990-х годов. Желание одновременно получить пространственную информацию для протяжённых объектов за одну экспозицию побудило несколько исследовательских групп с начала 80-х годов заняться разработкой подходящих инструментов для астрономических телескопов. Различные варианты таких спектрографов были впервые реализованы в работах [1, 42, 43]. Над этой темой тогда действительно работало всего несколько групп из разных стран, и связь между ними была не очень хорошей, что объясняет, почему практически все группы решили называть эту технику по-своему. В итоге имеются “спектральная визуализация”, “двумерная спектроскопия”, “трехмерная спектроскопия”, “интегрально-полевая спектроскопия”, и т. д. Все названия достаточно хорошо характеризуют метод, но, во избежание путаницы, в рамках данной работы остановимся на последнем.

В прошлом веке интегрально-полевая спектроскопия представлялась многим астрономам методически сложной и применимой только для узкого класса задач, ограниченных малым полем зрения спектрографов того времени. Появление за последние десятилетия новых технологических возможностей привело к созданию эффективных IFS с большим полем зрения, что способствовало развитию и популяризации метода. Телескопы по всему миру сейчас оснащены встроенными интегрально-полевыми модулями, к примеру, GMOS [11] и MUSE [44] на 8-метровых телескопах, SAURON [12] и PMAS [13] на телескопах диаметром 3–4 метра. Два инструмента космического телескопа Джеймса Уэбба будут иметь

возможность работать в интегрально-полевом режиме [45].

На 6-м телескопе САО РАН первый интегрально-полевой спектрограф был создан в 1989 г. и назван MPFS (Multi Pupil Field Spectrograph) [1]. Этот прибор в различных модификациях проработал на телескопе до 2009 г., по результатам наблюдений на нем опубликовано более 100 работ. Основным недостатком MPFS было низкое пропускание, порядка 5%, из-за использования в спектрографе зеркально-линзовой камеры с центральным экранированием. В настоящее время прибор находится на реконструкции, и после установки в нем линзовой камеры с оптикой, снабженной широкополосными просветляющими покрытиями, пропускание должно повыситься в 5–6 раз. В данной главе представлен новый интегрально-полевой блок (IFU, Integral Field Unit) в составе многорежимного редуктора SCORPIO-2, предназначенный для панорамной спектроскопии центральных частей галактик в эмиссионных линиях, для определения состояния ионизации газа, изучения его кинематики и т.д. Рассматриваются особенности метода интегрально-полевой спектроскопии и описан процесс разработки, создания и методического исследования интегрально-полевого блока SCORPIO-2, а также приводятся первые результаты наблюдений SCORPIO-2/IFU, полученные на БТА.

## 1. Оптическая схема и принцип работы IFU

В классической спектроскопии с длинной щелью наблюдатель наводит щель на выбранный объект исследования в фокальной плоскости телескопа, например — галактику. Распределение вдоль щели интенсивности эмиссионных линий, лучевых скоростей и других параметров, определяемых по спектру, будет получено после обработки и калибровки данных. Чтобы исследовать спектральные характеристики в других областях протяжённого объекта, щель должна быть установлена в несколько различных положений по галактике. Основная идея интегрально-полевой спектроскопии состоит в получении спектров протяжённых объектов одновременно для каждого пространственного элемента — “спакселя”<sup>1</sup> в двумерном поле зрения. Каждому спакселю выборки можно сопоставить его индивидуальный спектр и в процессе обработки данных реконструировать карты на произвольных длинах волн. Для инструментов с ортонормированной геометрией пространствен-

<sup>1</sup>от англ. “spaxel” (spatial + pixel) - пространственный элемент

ной выборки спектры могут быть упорядочены для формирования трёхмерного массива, который чаще всего называют “кубом данных”. В результате, куб данных содержит и спектральную, и пространственную информацию.

Интегрально-полевые спектрографы строятся на основе различных способов разделения поля зрения на спаксели: применяются жгуты оптических волокон, массивы линз, оптические волокна с линзовыми решётками и всевозможные комбинации перечисленного. Сами спаксели могут иметь разные формы и размеры, а приборы IFS, в зависимости от задач, параметров телескопа и бюджета, могут иметь внушительные габариты, как MUSE [44], либо встраиваться в многорежимный прибор, как модуль IFU в комплексе SCORPIO-2.

Большинство интегрально-полевых спектрографов крупных телескопов располагаются во вторичных фокусах, имеющих входную светосилу менее  $F/8$ . Входная светосила первичного фокуса БТА, где размещается многорежимный редуктор светосилы SCORPIO-2, равна  $F/4$ , что накладывает существенные ограничения на конструкцию интегрального-полевого блока. Кроме того, габариты самого спектрографа ограничены небольшим пространством кабины первичного фокуса. Афанасьевым В. Л. было найдено решение, позволяющее разместить IFU в корпусе SCORPIO-2, сохранив возможность быстрого переключения режимов работы. Оптическая схема интегрально-полевого блока представлена на рисунке 15. В основу прибора была положена идея сочетания линзового растра с оптическими волокнами, предложенная Г. Куртесом [14] и уже реализованная в приборе MPFS [1]. Для того, чтобы значительно уменьшить габариты IFU / SCORPIO-2, потребовался дополнительный коллиматор, вводимый в световой пучок вместо основного. Узел линзового растра со световодами расположен внутри коллиматора, имеющего в последних трех линзах прямоугольные отверстия  $60 \times 80$  мм. С целью максимального сокращения линейных размеров блока были использованы короткие световоды длиной 140-150 мм, что также минимизировало вариации пропускания из-за переменного изгиба волокон и уменьшило световые потери.

На рисунке 16 узел линзового растра показан в горизонтальной проекции. С помощью центральной отрицательной линзы (слева) увеличенное изображение исследуемого поля проецируется из фокальной плоскости телескопа в плоскость регулярного массива микролинз. Массив  $22 \times 22$  прямоугольных линз имеет размер

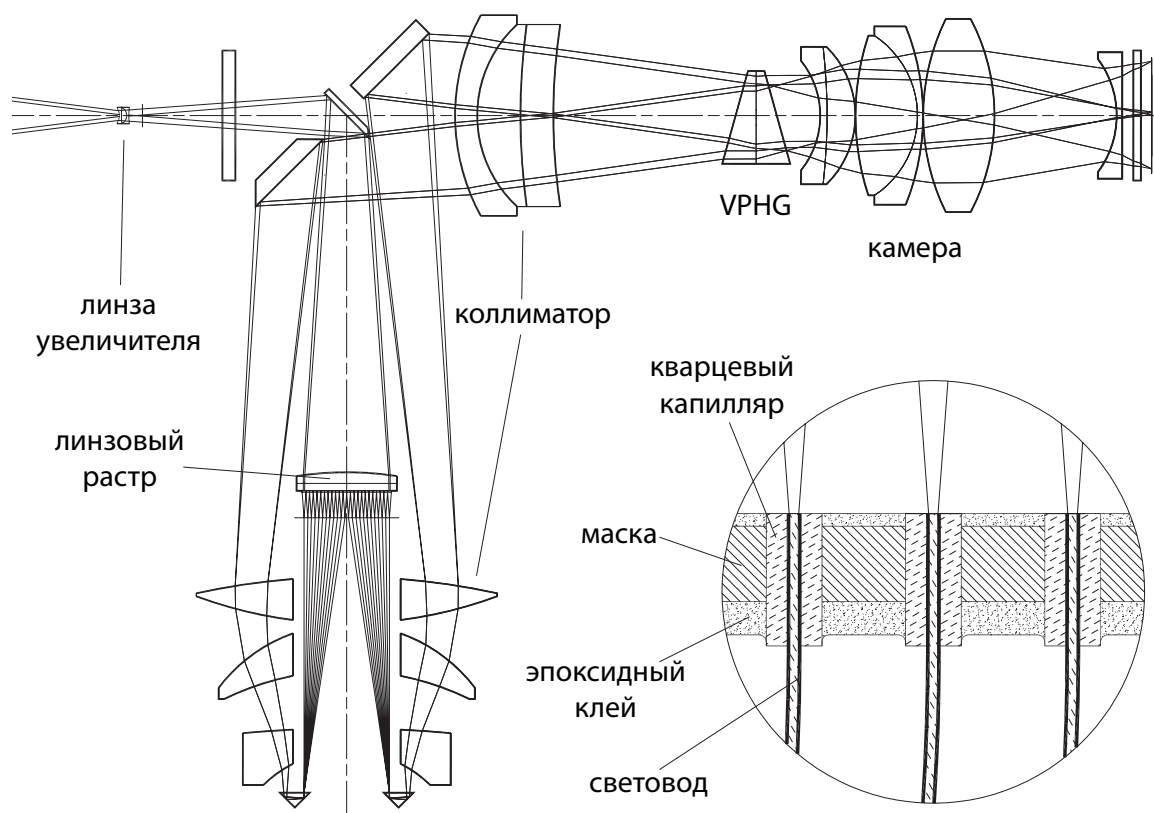


Рис. 15. Оптическая схема SCORPIO-2 в режиме IFU [16]

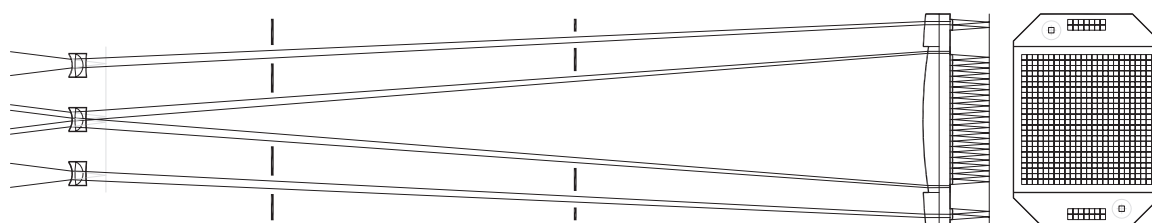


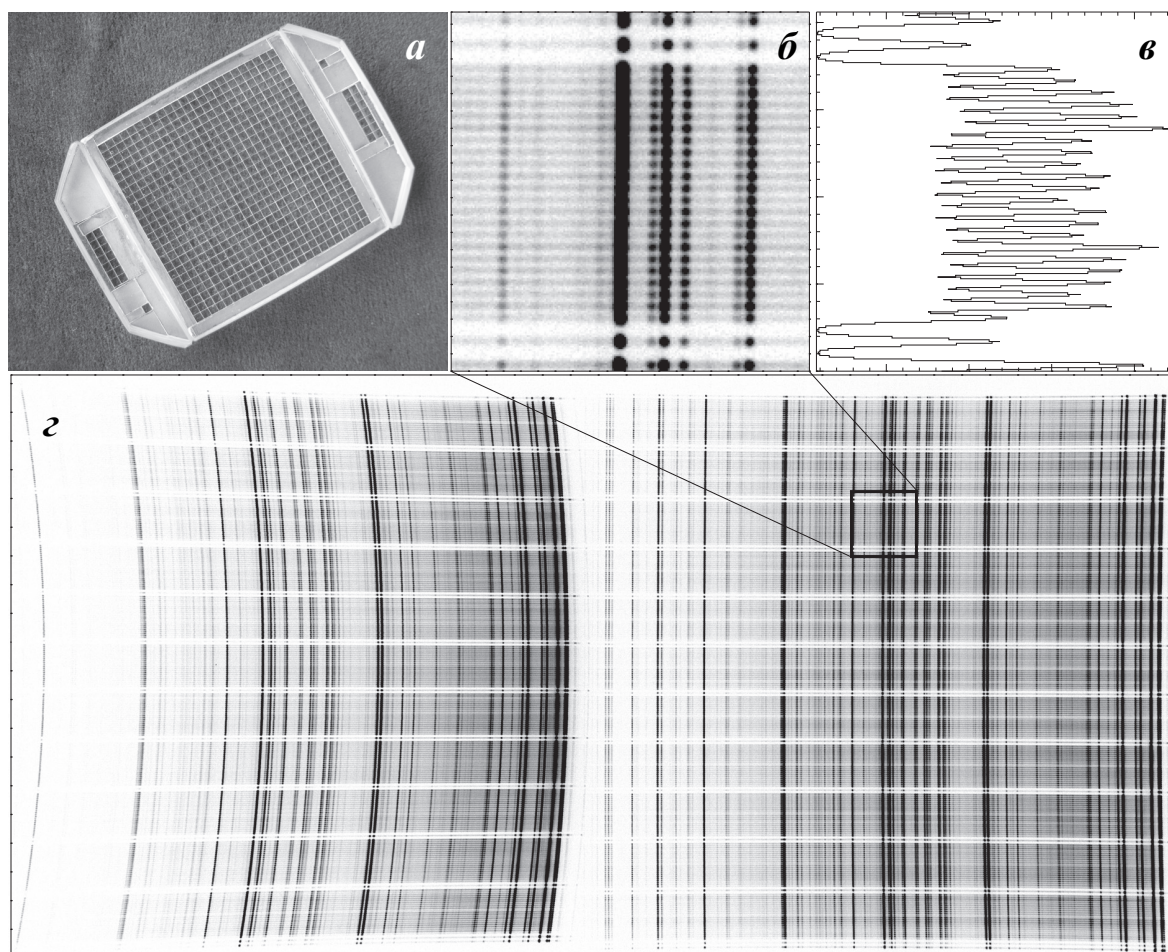
Рис. 16. Оптическая схема формирования изображения на линзовом растре. Горизонтальная проекция [16]

$2 \times 2$  мм, масштаб изображения составляет  $0''.75$  на линзу, а размер поля зрения  $16''.5 \times 16''.5$ . Две другие линзы, установленные на расстояниях  $\pm 20$  мм от центра ( $\pm 3'$ ), проектируют изображения участков ночного неба на растры  $2 \times 7$  линз. Каждая микролинза формирует изображение зеркала телескопа (микрозрачок) диаметром 150 мкм. Вернувшись к рисунку 15, можно увидеть, как полученная матрица микрозрачков реформируется при помощи оптических волокон в две псевдощели, которые проектируются коллиматором и камерой в плоскость ПЗС-детектора. Объемная фазовая голографическая решётка (VRHG) формирует на формате светоприёмника два массива спектров. Чтобы избежать наложения изображений спектров от обеих псевдощелей, рабочий диапазон спектра для каждой решётки выделяется с помощью полосового интерференционного фильтра, вводимого в пучок после линзы увеличителя.

Фотография линзового растра показана на панели (а) рисунка 17. На панели (г) показаны спектры от двух псевдощелей, полученные с помощью калибровочного источника адаптера (непрерывный спектр — от кварцевой лампы и линейчатый — от He-Ne-Ar стабилитрона СГЗС). Световоды заполняют псевдощель таким образом, чтобы столбцы одной половины массива микрозрачков располагались последовательно вдоль щели, разделяясь на группы по 22 микрозрачка, между которыми находятся изображения микрозрачков от ночного неба. Это проиллюстрировано на увеличенном участке спектров IFU — панелях (б) и (в).

## 2. Узел линзового растра с оптическими волокнами

Рассмотрим конструкцию узла линзового растра со световодами более подробно. Изображение телескопа фокусируется на передней части регулярной матрицы микролинз, которая обеспечивает пространственную выборку. Каждый элемент выборки (спаксель) создаёт изображение зрачка телескопа. Размер микрозрачка, как уже упоминалось выше, составляет 150 мкм и должен быть согласован с входной апертурой световода. Сопряжение плоскости массива световодов с матрицей выходных микро-зрачков требует высокой точности, а любые ошибки при установке световодов приводят к потере пропускания. Существует несколько известных способов расставить световоды точно [13]. В нашем случае был получен фотографический снимок матрицы микрозрачков во время тестовой установки блока IFU



**Рис. 17.** Принцип формирования изображения в режиме IFU спектрографа SCORPIO-2: *а* — фотография линзового раstra; *б* — изображение выделенной области спектров, полученных в режиме IFU; *в* — разрез поперек направления дисперсии; *г* — изображение, получаемое при засветке IFU калибровочными источниками непрерывного и линейчатого спектра с решёткой VPHG 940@600 [16]

в составе SCORPIO-2 на телескоп БТА. Далее были измерены положения микрозрачков на фотопластинке, и по их координатам изготовлена маска с отверстиями. В отверстия вставлялись капиллярные стеклянные трубки с предварительно закреплёнными в них с помощью оптического клея световодами. Увеличенная область маски со световодами под линзовым растром показана в правой нижней части рисунка 15. 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 обеих сторон. Такая технология обеспечивает высокое качество обработки торцов световодов и, как следствие, — малые световые потери на входе и выходе волокон. Использовалось оптическое волокно со следующими характеристиками:

- числовая апертура  $0.10 \pm 0.01$ ;
- 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.

Размеры сопрягаемых отверстий капиллярных стеклянных трубок и маски:

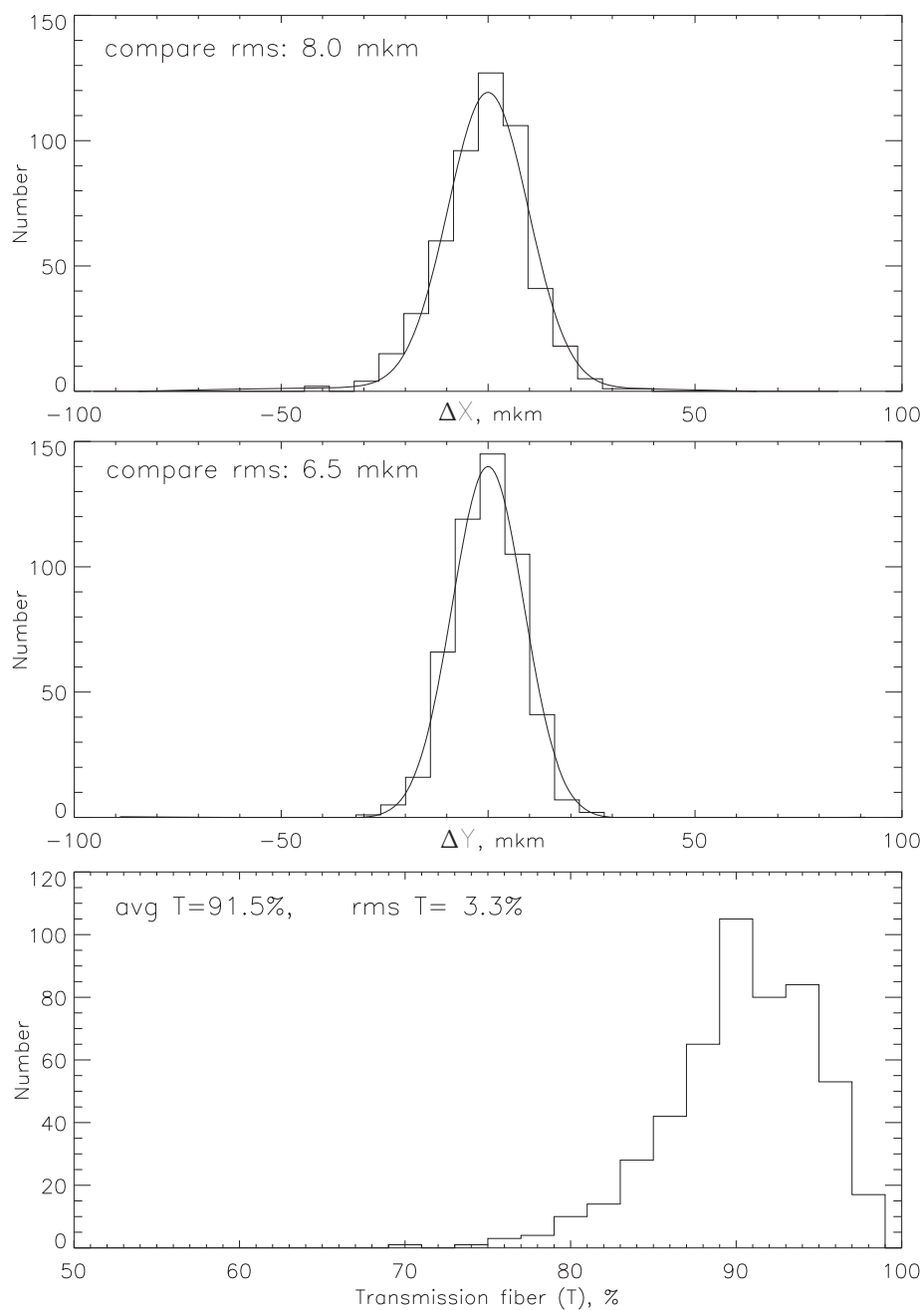
- внутренний диаметр капилляров  $205 \div 215$  мкм;
- внешний диаметр капилляров  $780 \div 790$  мкм;
- диаметр отверстий маски  $805 \div 810$  мкм.

Световоды и стеклянные трубки были изготовлены по нашему заказу в ООО «Инновационное предприятие «НЦВО - Фотоника»<sup>2</sup>.

После оптической обработки и установки блока в оправу были измерены положения световодов. Результаты измерения показаны на рисунке 18. Пропускание, определяемое ошибкой расстановки световодов, составляет около 90%. Реальное

---

<sup>2</sup>ООО ИП «НЦВО – Фотоника»: [сайт]. URL: <http://www.forc-photonics.ru/>



**Рис. 18.** Деградация пропускания волоконно-линзового узла IFU из-за ошибок установки оптических волокон: верхняя и средняя гистограммы отображают распределение ошибок по осям X и Y, нижняя — распределение пропускания при согласовании линзового растра и массива световодов

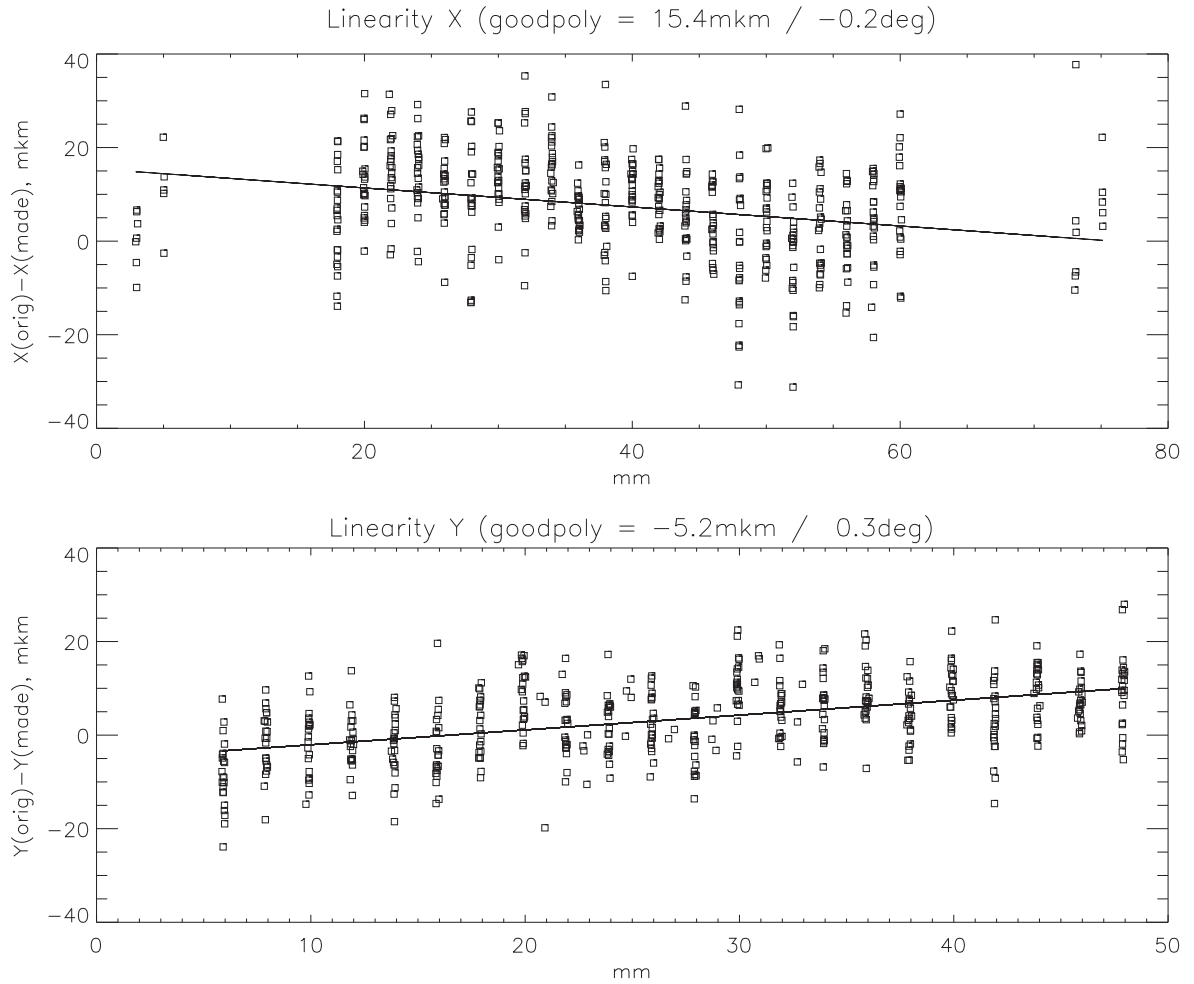


пропускание ухудшается за счёт френелевских потерь на оптических поверхностях (менее 15%) и хроматических аберраций линз растра. В кружке диаметром 150 мкм (размер микрозрачка) концентрируется не менее 85% энергии от полихроматического изображения микрозрачка. Учитывая потери на оптических поверхностях и аберрации микролинз, реальное пропускание узла линзового растра составляет не менее 65%.

Точное изготовление маски, расстановка световодов и обработка узла оказались непростыми и трудоёмкими задачами. Пришлось изготовить около десяти версий волоконного блока, прежде чем удалось добиться приемлемой точности, при которой плоскость массива световодов была согласована с матрицей выходных микрозрачков, обеспечивая пропускание не ниже 90%. Процесс осложнялся миниатюрными размерами блока IFU, когда на точность изготовления и последующего контроля начинали влиять такие факторы, как окружающая температура, деформации при высыхании клея, биение ходового винта станка при изготовлении маски и пр.

Контроль каждого этапа работы производится на микроскопе (измерительном двухкоординатном приборе) ДИП-1 с ошибкой наведения 1–2 мкм. Обработка и сопоставление массивов данных, а также их последующий анализ выполняются в среде IDL. Если мы хотим более детально разобраться, откуда берётся ошибка в 7–8 мкм, показанная на верхних гистограммах рисунка 18, достаточно проанализировать дисперсию по каждой координате (рисунок 19). На гистограммах виден наклон в несколько десятых градуса, который вызван искажениями масштаба. Такие искажения, вероятнее всего, вызваны общей деформацией массива световодов при высыхании эпоксидного клея. Кроме того, есть закономерности в разбросе точек, вызванные незначительным биением ходового винта станка при изготовлении маски, а также накапливаемыми ошибками измерений, обусловленными колебаниями температуры в помещении. Дело в том, что измерения проводятся в ручном режиме и обычно продолжаются 2–3 дня. За это время координаты могут “уплывать” на 5–10 мкм, а в конечный массив вносятся поправки по опорным координатам, что как раз может создавать такие волновые закономерности в разбросе точек на рисунке 19. Отсюда можно заключить, что точность изготовления текущей версии волоконного блока приблизилась к ограничениям, накладываемым

инструментальной базой. Текущая версия волоконного блока выполнена с хорошей точностью, которую видится реальным повысить не более чем, на 3-5% без внесения принципиальных изменений в рабочий процесс.



**Рис. 19.** Анализ отклонений от линейности для каждой из координат. Наклон вызван незначительными искажениями масштаба, а характерный узор в распределении точек — биением ходового винта станка и накапливаемыми ошибками измерений

### 3. Особенности работы решёток VPHG в режиме IFU

В качестве диспергирующего элемента в редукторе светосилы SCORPIO-2 используются объёмные фазовые голографические решётки (VPHG) с приклеенными с обеих сторон призмами прямого зрения. Если  $\varphi$  — угол вершины призмы, а  $\theta$  — угол между оптической осью и осью коллимированного пучка, то угол падения

на решётку  $\alpha$  можно найти из соотношения:

$$\sin(\varphi - \theta) = n_p \sin(\varphi - \alpha),$$

где  $n_p$  — показатель преломления материала призмы. На рисунке 15 видно, что в режиме обычной спектроскопии пучок параллелен оптической оси и  $\theta = 0$ , но в режиме IFU  $\theta \neq 0$ , вследствие чего эффективность VRHG для разных щелей будет неодинаковой.

В приближении Когельника [46] эффективность решётки для заданного угла падения  $\alpha$  и длины волны  $\lambda$  дается следующим соотношением:

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

где

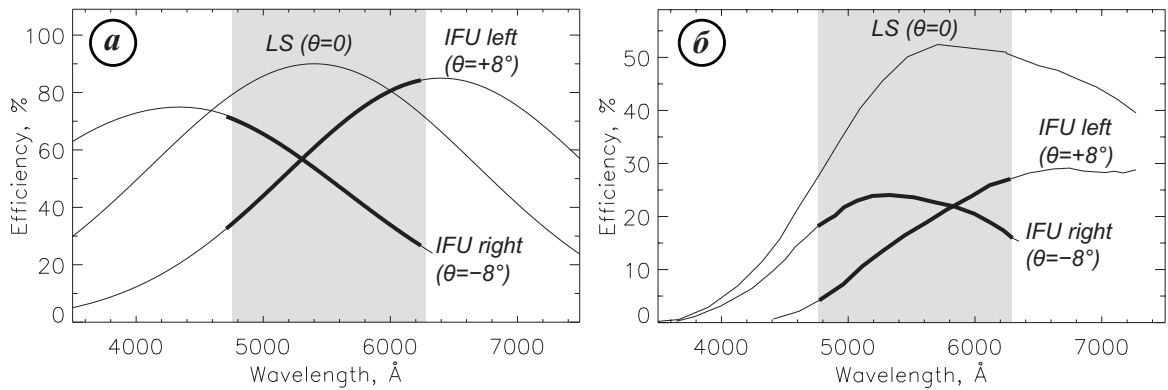
$$\Psi = \frac{\pi \Delta n_g d_g}{\lambda \cos \alpha}.$$

Здесь:  $\beta(\lambda)$  — угол рассеяния света с длиной волны  $\lambda$  на плоскость решётки,  $\Delta n_g$  — амплитуда модуляции показателя преломления желатинового слоя решётки,  $d_g$  — толщина слоя. На длине волны  $\lambda_{max}$  эффективность решётки максимальна, если  $\alpha = \beta(\lambda_{max})$ . Тогда угол  $\alpha$  называется углом Брэгга, и выполняется условие:

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

где  $\nu_g$  — частота модуляции показателя преломления решётки, а  $m$  — порядок рассеяния, эквивалентный порядку дифракции у обычных решёток. Сравнивая VRHG и обычные нарезные решётки, стоит также отметить, что величина  $1/\nu_g$  эквивалентна числу штрихов,  $\alpha$  — углу блеска, а  $\beta(\lambda)$  — углу дифракции последних.

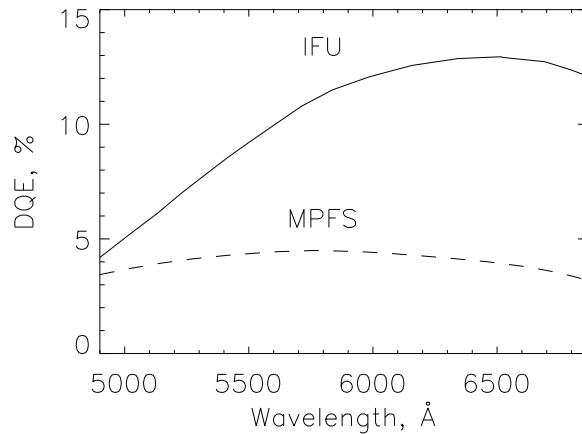
Углы между оптической осью и пучками на выходе коллиматора IFU равны  $\pm 8^\circ$ . На рисунке 20(a) показаны кривые эффективности для решётки VRHG 1200@540, имеющей максимум концентрации на  $\lambda = 5400 \text{ \AA}$  и  $1/\nu_g = 1200 \text{ мм}^{-1}$ , вычисленные согласно соотношению (2). Вычисления проводились при следующих параметрах решётки:  $n_g = 1.582$ ,  $\Delta n_g = 0.0286$ ,  $d_g = 10.15 \text{ мкм}$  и значении угла Брэгга  $19.2^\circ$  в воздухе. При этом использовалась призма из стекла ЛК-8 ( $n_p = 1.473$ ) с углом  $\varphi = 36^\circ$ . На рисунке 20(a) видно, что кривые эффективности



**Рис. 20.** *a* — теоретические и *б* — измеренные кривые эффективности решётки VPNG 1200@540 для правой и левой псевдощели IFU в сравнении с длинной щелью (LS). Серым цветом обозначен спектральный диапазон для данной решётки 4900–6150 Å, выделяемый с помощью интерференционного фильтра [16]

для разных щелей существенно отличаются: в диапазоне  $\sim 5200\text{--}5400$  Å эффективность VPNG в режиме IFU падает в  $\sim 1.5$  раза по сравнению с эффективностью длинной щели. При этом, для “левой” псевдощели (“IFU left”) интегрально-полевого блока эффективность падает с длиной волны, а для “правой” (“IFU right”) — растёт.

Для проверки приведённых выше теоретических оценок, на SCORPIO-2 с адаптером были произведены измерения спектральных потоков от кварцевой лампы в режимах IFU и длинной щели с решёткой VPNG 1200@540. Данные об эффективности спектрографа в режиме длинной щели с учётом пропускания оптики и спектральной чувствительности ПЗС были взяты из работы [3]. На рисунке 20(б) приводятся результаты сравнения реального спектрального пропускания в режиме длинной щели и режиме IFU для каждой псевдощели. Требуемый спектральный интервал для данной решётки выделяется интерференционным фильтром и показан на рисунке серым цветом. Видно, что эффективность режима IFU в центре спектрального диапазона уменьшается в среднем в 2.5 раза по сравнению с длиннощелевым режимом. Такая оценка, с учётом пропускания линзового раstra со световодами порядка 60–65%, согласуется с рассчитанной. Суммарная квантовая эффективность прибора на телескопе в режиме IFU в зависимости от решётки находится в пределах от 6 до 13%, что при прочих равных условиях превышает эффективность спектрографа MPFS приблизительно в три раза (рисунок 21) [16].



**Рис. 21.** Квантовая эффективность IFU / SCORPIO-2 с решёткой VPHG 940@600. Пунктиром показана квантовая эффективность спектрографа MPFS с отражательной дифракционной решёткой с числом штрихов  $600^{-1}$  [16]

#### 4. Первые результаты наблюдений

Для обработки наблюдательных данных используются стандартные процедуры, применяемые в панорамной спектроскопии. Полный набор данных, получаемый во время наблюдений с IFU / SCORPIO-2, включает:

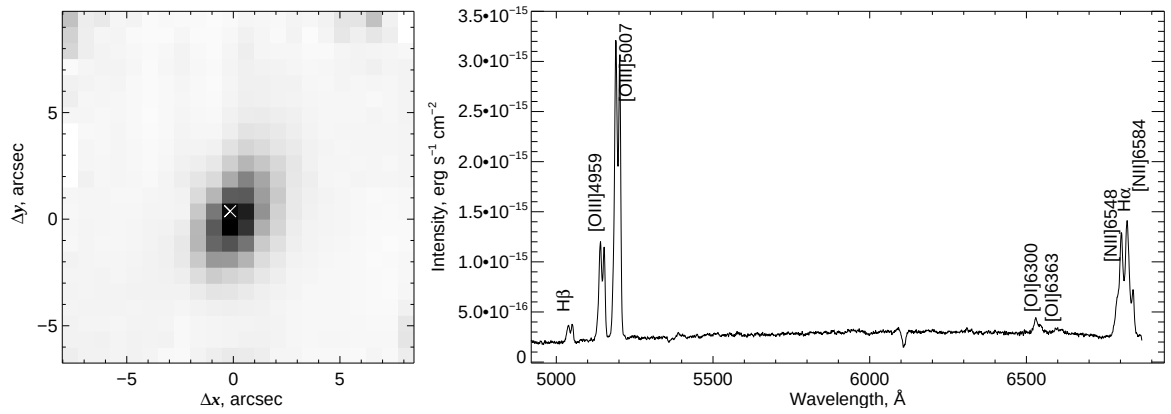
- Кадры “электронного нуля” (bias), обычно снимаемые в начале и конце ночи.
- Спектр “плоского поля” и линейчатый спектр от He-Ne-Ar стабилизатора СГЗС, которые снимаются непосредственно перед и после наблюдений объекта.
- Эталонный спектр, полученный путём засветки лампой “плоского поля” специальной маски и отражающий расположение спектров от “небесных” световодов в кадре; снимается один раз до или после съёмки объекта.
- Спектры наблюдаемого объекта — не менее трех экспозиций для удаления следов космических частиц.
- Спектры спектрофотометрического стандарта, снятые незадолго перед или после наблюдений объекта на близком зенитном расстоянии.
- Спектры сумеречного фона неба, которые снимаются вечером перед закатом и утром перед рассветом.

Для обработки можно использовать любые программы анализа данных с IFU спектрографов. Кроме того, Егоровым О. В. (ГАИШ МГУ) в среде IDL разработан специальный пакет программ IFURED, учитывающий все особенности работы с интегрально-полевым блоком SCORPIO-2. Подробное описание пакета приводится в работе [16]. Перечислим основные этапы обработки с помощью пакета IFURED:

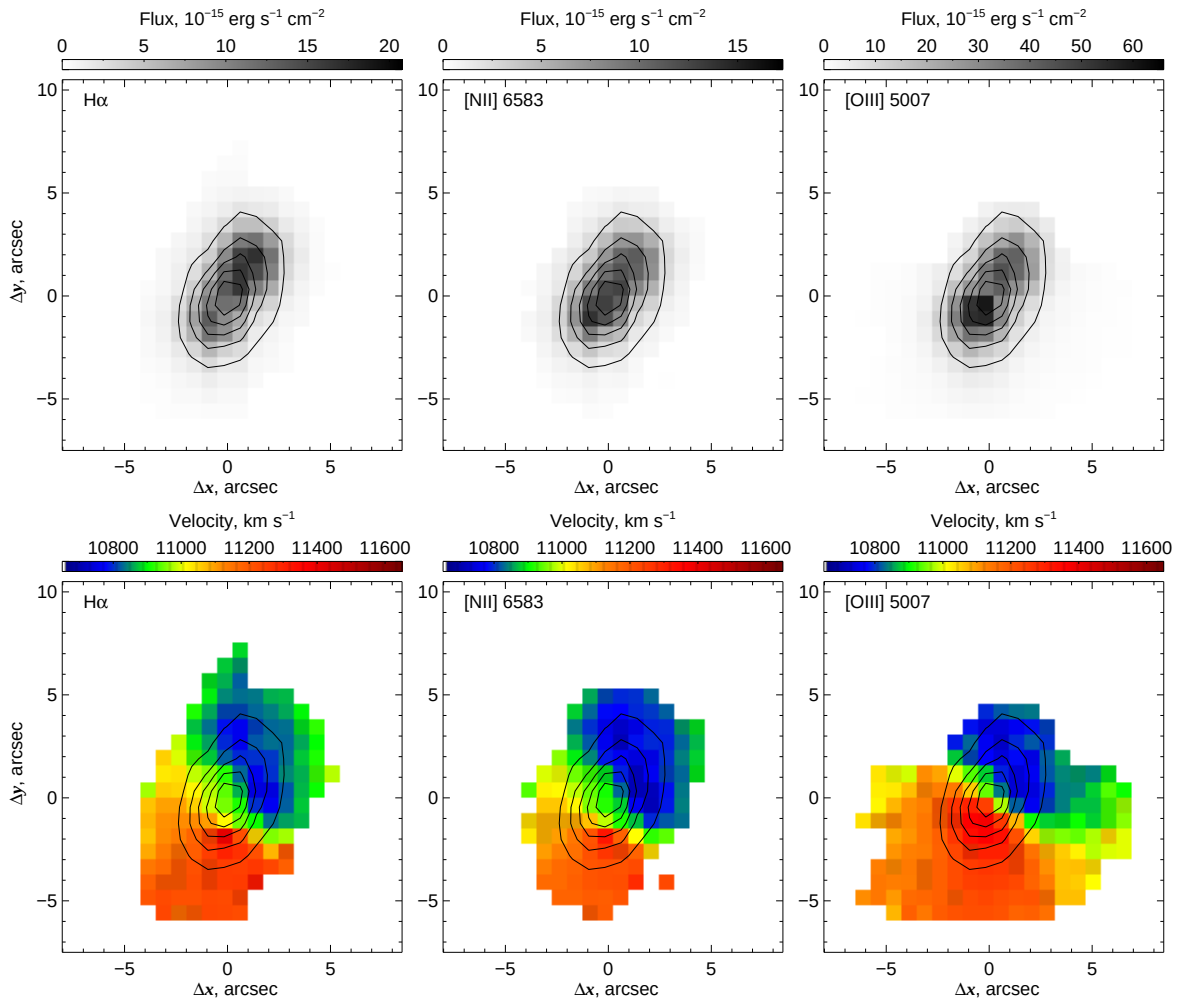
- Сборка начальных 2D-спектров.
- Исправление геометрических искажений.
- Экстракция спектров.
- Линеаризация.
- Нормировка на “плоское поле” и создание кубов данных.
- Вычитание линий ночного неба.
- Калибровка потока, коррекция атмосферной экстинкции и дисперсии.
- Анализ обработанных данных.

Помимо описанных процедур, пакет IFURED содержит средства для визуализации данных и их базового анализа. На рисунке 22 приведено изображение галактики Mrk78 в континууме, полученное из собранного куба данных, а также пример спектра, соответствующего спакселю вблизи центра галактики. Яркие полосы, видимые на краю изображения, являются следствием падения пропускания системы на краю поля. Использование решётки VPHG 940@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 рисунке 23 показаны карты потоков и лучевых скоростей галактики Mrk78 в линиях  $H\alpha$ ,  $[NII] 6584 \text{ \AA}$  и  $[OIII] 5007 \text{ \AA}$  и  $H\beta$  из работы [16]. Изофоты на рисунке показывают распределение яркости в континууме.



**Рис. 22.** Интегральное изображение галактики Mrk 78 в континууме. Справа в качестве примера показан спектр, соответствующий отмеченному крестом спакселю, а также идентификация наблюдаемых ярких эмиссионных линий [16]



**Рис. 23.** Результат базового анализа линий H $\alpha$ , [NII] 6584  $\text{\AA}$  и [OIII] 5007  $\text{\AA}$  (слева направо). Распределение потока в линии и поля лучевых скоростей (сверху вниз). Изофоты показывают распределение яркости в континууме [16]

## 5. Выводы и результаты

В составе редуктора светосилы SCORPIO-2 реализован интегрально-полевой блок (IFU), который предназначен для исследования центральных частей галактик в области линий  $H\beta$  и  $H\alpha$ , а также диагностики состояния ионизации газа и изучения его кинематики. Массив  $22 \times 22$  прямоугольных линз  $2 \times 2$  мм/каждая, масштаб изображения составляет  $0''.75$  на линзу, а размер поля зрения  $16''.5 \times 16''.5$ .

Удалось добиться не менее 65% пропускания узла линзового раstra с оптическими волокнами благодаря высокой точности расстановки световодов, составившей  $\sim 90\%$ . Квантовая эффективность в режиме IFU в зависимости от применяемой решётки, находится в пределах от 6 до 13%.

Основные результаты этой главы изложены в публикации:

- *Afanasiev V. L., Egorov O. V., Perepelitsyn A. E.* — Astrophysical Bulletin, Vol. **73**, Is. 3, P. 373–386 (2018).



### III. Фотометр MaNGaL с перестраиваемым узкополосным фильтром

Научные предпосылки для исследований эмиссионных объектов на фоне ночного неба с перестраиваемым узкополосным фильтром (tunable filter) весьма многочисленны. Такой фильтр изолирует слабый сигнал (например, эмиссионные линии туманностей) от яркого фона неба или самого источника. Конструктивно, перестраиваемый фильтр ничем не отличается от сканирующего интерферометра Фабри-Перо (ИФП), обладая всеми его преимуществами и некоторыми новыми особенностями. Эффективность инструментов на основе перестраиваемого фильтра достигается за счёт сочетания высокой пропускной способности, большого поля зрения и хорошего спектрального разрешения, с возможностью точной выборки требуемых свойств объекта по длинам волн. Идеальный перестраиваемый фильтр представляет собой устройство формирования изображения, которое может изолировать произвольную спектральную полосу на произвольной длине волны в непрерывном видимом или инфракрасном диапазоне спектра [48]. Подробному изложению принципов работы ИФП и перестраиваемых фильтров на их основе посвящён **раздел 1** настоящей главы.

В САО РАН на 6-м телескопе интерферометрические исследования протяжённых объектов проводятся уже несколько десятилетий и входят в число основных наблюдательных программ. За это время накоплен большой опыт и разработана подробная методическая база [2, 30, 31]. Важным источником информации для исследования физического состояния ионизованного газа в галактических и внегалактических туманностях являются изображения в оптических эмиссионных линиях. Задачу по картированию распределений физических параметров, таких как электронная плотность, температура или содержание тяжёлых элементов, можно свести к построению карт отношений потоков в выделенных эмиссионных лини-

ях. Одним из способов получения таких изображений в достаточно узком диапазоне, шириной  $10\text{--}20\text{ \AA}$ , является применение перестраиваемого фильтра на основе сканирующего ИФП. Если работать с достаточно малой величиной зазора между плоскопараллельными пластинами, т.е. на низких порядках интерференции ( $n = 10 \div 30$ ), то классическая картина интерференционных колец вырождается в практически монохроматическое пятно, так называемое “пятно Жакино” [47]. Следовательно, центральная длина волны полосы пропускания мало меняется по полю зрения.

На основе этого метода было решено изготовить редуктор светосилы — MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines, “Картировщик узких галактических линий”). Новый редуктор светосилы рассчитан для использования на телескопах средней апертуры: 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГА-ИШ МГУ и 1-м телескопе “Цейсс-1000” САО РАН. В связи с большой наблюдательной загруженностью БТА, как основного инструмента САО РАН, дополнительное использование малых телескопов позволяет получать значительно больше наблюдательных данных, а благодаря особенностям метода эти данные оказываются сопоставимыми по качеству с результатами 6-м телескопа, с поправкой на более низкое спектральное разрешение (конкретные сравнения проводятся в **разделе 3**).

Главным отличием от аналогичных систем, работающих на ряде телескопов и кратко представленных в **разделе 1**, является установка ИФП не в коллимированном, а в сходящемся от телескопа пучке лучей. Идея такого афокального редуктора не нова. Она предложена Г. Куртесом ещё в 50-х годах прошлого века [19]. В результате коллиматор из оптической схемы прибора устраняется, а вблизи фокальной плоскости телескопа вводится линза поля, что позволяет заметно расширить диаметр пятна Жакино. Такое решение не дает смещения полосы пропускания интерферометра по полю зрения, в отличие от фокального редуктора, где ИФП расположен в параллельном пучке. Стоит отметить, что использование неклассической схемы на низких порядках интерференции приводит к незначительной деградации спектрального разрешения, тогда как в более высоких порядках, с увеличением расстояния между пластинами, деградация становится существенной [49]. Процесс создания прибора и его характеристики рассматрива-

ются в **разделе 2**. В **разделе 3** приводятся некоторые результаты наблюдений с MaNGaL в касегреновском фокусе  $F/13$  1-м Цейсс-1000 и фокусе Несмита  $F/8$  2.5-м телескопа КГО.

## 1. Теория и методика работы с интерферометром Фабри-Перо

Прошло уже более ста лет, как Буассон, Фабри и Бурже впервые получили интерферограммы туманности Ориона в линии [OII]  $\lambda 3727 \text{ \AA}$  [50]. Методы цифровой обработки сигнала, позволяющие осуществить интегральные преобразования полученных с помощью интерферометра данных, появились значительно позднее. Почти полвека интегральные характеристики спектров можно было получить только на аппаратном уровне. Поэтому широкое распространение получили классические (призменные или дифракционные) спектрографы, сигнал на выходе которых пропорционален интенсивности излучения и может быть обработан аналоговым способом [51]. Начиная с 50-х годов, Г. Куртесом проводились интерферометрические исследования слабых протяжённых объектов с детектированием на фотопластинки и были найдены многие удачные технические решения [19, 20, 52]. Предложенная им схема легла в основу прибора, которому посвящена данная глава.

С появлением принципиально нового поколения детекторов — электроннолучевых трубок, счётчиков фотонов и, наконец, приборов с зарядовой связью (ПЗС) — было реализовано преимущество Жакино для интерферометров Фабри-Перо, предполагаемое ещё в 1954 г. [47]. ИФП получают выигрыш перед классическими спектрографами в пропускной способности и спектральном разрешении. Впервые подобную технику применил Р.Б. Талли, для наблюдения галактик в 1974 г. [53]. Им же разработаны основы методики, которая до сих пор широко используется для обработки получаемых интерференционных данных, в том числе и в CAO РАН.

Перестраиваемые фильтры на основе сканирующих ИФП появились на оптических телескопах в конце 90-х. Глубокая фотометрия в оптических эмиссионных линиях с помощью прототипа такого фильтра — TTF [4] на 3.9-м телескопе ААТ

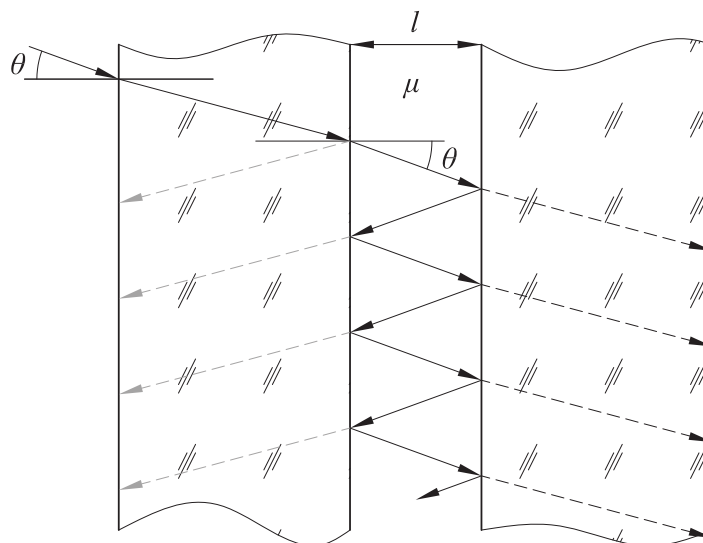
показала, что существует обширная область наблюдательной астрофизики, ожидающая исследований с этими фильтрами. В настоящее время такие инструменты используются по всему миру, к примеру: MMTF [48] на 6.5-м телескопе Магеллана Бааде (первый перестраиваемый фильтр на крупном телескопе), OSIRIS [7] на 10.4-м GTC, TFI [54] на космическом телескопе имени Джеймса Уэбба, запуск которого запланирован на последнюю четверть этого года.

В CAO РАН наблюдения протяжённых объектов со сканирующим ИФП на 6-м телескопе начались в 80-х годах с помощью системы CIGALE — редуктора фокуса с ИФП и счётчиком фотонов в качестве приёмника излучения. Наблюдения проводились французской группой в соавторстве с коллегами из CAO. В конце 90-х счётчик фотонов был заменён ПЗС-системой с низким шумом считывания, а начиная с 2000 г., когда в строй был введён многорежимный редуктор светосилы SCORPIO-1, работать с ИФП стали в выделенном режиме этого прибора. В 2010 г. многорежимный редуктор светосилы SCORPIO-2 “увидел” первый свет. В этом приборе также реализован режим ИФП, и, начиная с 2013 г., наблюдения с классическим интерферометром на БТА проводятся только со SCORPIO-2.

Перестраиваемый фильтр для изучения протяжённых объектов в CAO РАН применяется впервые. Прибор MaNGaL на его основе создан в 2017 г. Идея создания MaNGaL принадлежит Моисееву А. В., который является разработчиком наблюдательной методики и соавтором прибора. Расчёт оптики выполнен Афанасьевым В. Л. Специфика обработки данных, получаемых, как с обычным ИФП, так и с перестраиваемым фильтром во многом аналогична.

### 1.1. Теория интерферометра Фабри-Перо

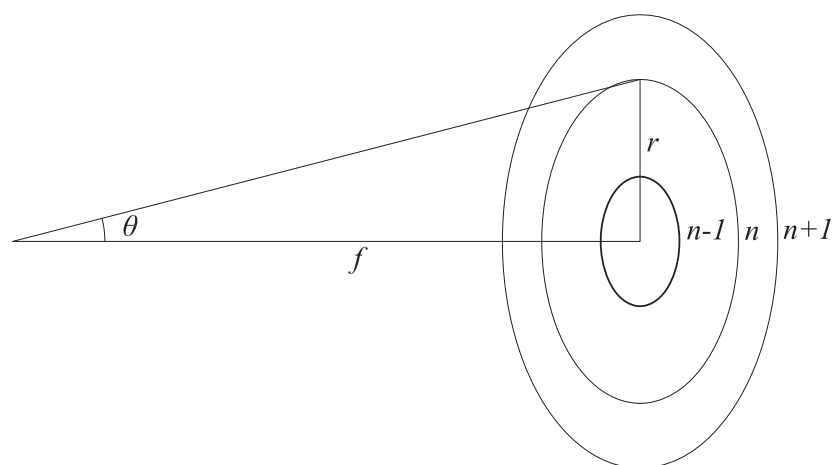
Основой ИФП является эталон, работающий по принципу многолучевой интерференции. Он состоит из двух плоскопараллельных стеклянных пластин, внутренние поверхности которых покрыты пленками с высокой отражающей способностью и низким поглощением. Между пластинами есть небольшой зазор  $l$ , попадая в который, свет подвергается многократным отражениям (рисунок 24), с амплитудой и фазой результирующих лучей в зависимости от длины волны  $\lambda$ . На резонансных длинах волн результирующий отражённый луч интерферирует со светом, отражённым от первой зеркальной поверхности, и вся падающая энергия, за исключением поглощённой в толще пластин, проходит через эталон. На других



**Рис. 24.** Схематическое изображение интерференции в эталоне Фабри-Перо. Наружные поверхности стеклянных пластин покрыты антиотражающим покрытием, а внутренние — покрытием с высокой отражающей способностью (обычно коэффициент отражения  $\mathcal{R}_r > 0.8$ ). Зазор между пластинами  $l$  показан не в масштабе, обычно он находится в пределах от 1 мкм до 1 мм, в то время как толщина каждой пластины может превышать 20 мм

длинах волн практически всё падающее излучение отражается [55]. За эталоном обычно располагается оптическая система, объектив которой строит изображение источника в плоскости приёмника излучения.

Когда на эталон падает параллельный монохроматический пучок света под углом  $\theta$  к оптической оси, на выходе системы образуются кольца равного наклона, каждое из которых соответствует своему порядку интерференции, выраженному целым числом  $n$  (рисунок 25).



**Рис. 25.** Интерференционная картина от монохроматического света на поверхности приёмника излучения; каждому кольцу соответствует свой порядок интерференции  $n$

Для каждой длины волны получается определённая интерференционная картина, поэтому, чтобы не допустить наложения колец от разных эмиссионных линий, излучение дополнительно пропускают через светофильтр, выделяющий только небольшую область спектра вокруг нужной линии. Радиус интерференционного кольца  $r$ , образуемого объективом, с фокусным расстоянием  $f$ , определяется из формулы:

$$r = f \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

Условие максимумов интерференционной картины можно записать в виде:

$$n\lambda = 2l\mu \cos \theta = 2l\mu \frac{1}{\sqrt{1 + (r/f)^2}}, \quad (3)$$

где  $n$  — порядок интерференции,  $\lambda$  — длина волны,  $l$  и  $\mu$  — расстояние и показатель преломления среды между пластинами интерферометра соответственно. Продифференцировав (3), получаем выражение для угловой дисперсии:

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = -\frac{2l\mu}{n} \sin \theta = -\frac{2l\mu}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (f/r)^2}},$$

из которого видно, что с приближением к центру колец длина волны  $\lambda$  растёт.

Интервал длин волн между полосами пропускания, известный как *свободный спектральный диапазон* ИФП  $\Delta\lambda$ , определяется расстоянием между соседними порядками интерференции:

$$\Delta\lambda = \lambda/n.$$

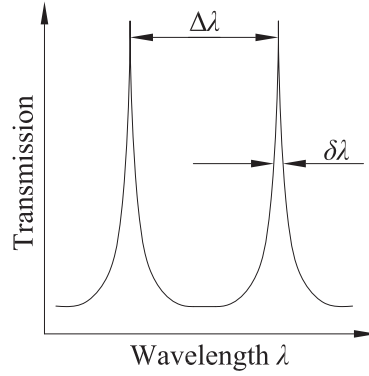
Ширина пика пропускания на уровне половинной амплитуды называется *полушириной аппаратного контура*  $\delta\lambda$ , или *шириной полосы пропускания* (FWHM). Величины  $\Delta\lambda$  и  $\delta\lambda$  для наглядности показаны на рисунке 26.

Отношение свободного спектрального диапазона к полуширине аппаратного контура называется *добротностью*  $F$  (finesse, контраст, эффективное число интерферирующих лучей) и является важной характеристикой ИФП:

$$F = \Delta\lambda/\delta\lambda. \quad (4)$$

В идеальной системе добротность равна теоретической добротности отражающих покрытий  $F_r$ , которая зависит только от характеристик отражающих покрытий плоскопараллельных пластин эталона:

$$F_r = \pi \mathcal{R}_r^{1/2} / (1 - \mathcal{R}_r), \quad (5)$$



**Рис. 26.** Свободный спектральный диапазон  $\Delta\lambda$  между пиками пропускания ИФП с полушириной аппаратного контура  $\delta\lambda$

где  $\mathcal{R}_r$  — коэффициент отражения. Однако отклонения от идеальной формы поверхности, параллельности и толщины покрытий ухудшают добротность и, следовательно, эффективность наблюдений. Реальная эффективная добротность приблизительно определяется как:

$$\frac{1}{F^2} = \frac{1}{F_r^2} + \frac{1}{F_d^2} + \frac{1}{F_a^2},$$

где  $F_d$  — это добротность дефектов пластин, а  $F_a$  — апертурная добротность, характеризующая оптические искажения пучка лучей. Видно, что добротность напрямую зависит от качества пластин и их покрытий. Чем выше коэффициент отражения  $\mathcal{R}_r$ , тем выше  $F$ .

Разрешающая сила  $R_\lambda$  эталона Фабри-Перо равна:

$$R_\lambda = \lambda/\delta\lambda = \frac{2l\mu \cos\theta}{\lambda} F = nF, \quad (6)$$

откуда следует, что чем выше добротность, тем лучше спектральное разрешение эталона [2, 48, 55, 56].

## 1.2. Преимущества и недостатки интерферометрического метода

Для выполнения тех или иных наблюдательных программ важным показателем может служить пропускная способность  $T$  прибора, пропорциональная угловому размеру входной апертуры  $\Omega$  и площади сечения  $S$  светового пучка. Для классических щелевых спектрографов величина  $R_\lambda T_s$  инвариантна — раскрытие щели приводит к увеличению пропускания  $T_s$ , но спектральное разрешение  $R_\lambda$  снижается:

$$R_\lambda T_s = \beta S, \quad (7)$$

где  $\beta$  — угловая высота щели.

Воспользовавшись уравнением (3) и допустив, что промежуток между пластинами интерферометра заполнен воздухом ( $\mu = 1$ ), получим важное соотношение для максимального телесного угла  $\Omega_{max}$ , который может быть представлен входной апертурой:

$$\Omega_{max} = \frac{\pi r^2}{f^2} \Rightarrow R_\lambda \Omega_{max} = 2\pi,$$

где  $r/f$  — светосила стоящей перед интерферометром оптической системы.

Тогда для пропускной способности ИФП  $T_i$  можно записать следующее уравнение:

$$R_\lambda T_i = 2\pi S. \quad (8)$$

Жакино показал [47], что при одинаковой площади  $S$  и заданном спектральном разрешении  $R_\lambda$  пропускная способность интерферометров  $T_i$  (8) на несколько порядков (в зависимости от высоты щели  $\beta$ ) превосходит пропускание  $T_s$  (7) дифракционных и призмных спектрометров. Этот выигрыш в пропускной способности при высоком спектральном разрешении получил название “преимущество Жакино” [57].

Другим значительным преимуществом ИФП является возможность регистрировать информацию сразу по всему полю зрения, которое у интерферометров достаточно большое. Даже активно применяемые сейчас инструменты интегрально-полевой спектроскопии, о которых шла речь в **Главе II**, в частности, один из самых крупных, востребованных и дорогостоящих таких приборов — MUSE / VLT, не позволяют получить поле больше угловой минуты [44], в то время как для ИФП эта величина может составлять от нескольких угловых минут на телескопах среднего диаметра, до десятков угловых минут на больших телескопах, с пространственной дискретизацией, сопоставимой с прямыми изображениями, то есть определяемой качеством изображений системы телескоп+атмосфера.

Названные выше преимущества в пропускной способности, спектральном разрешении и ширине поля зрения делают спектрометры на основе сканирующего ИФП непревзойденными на телескопах диаметром 2–10 м. Плата за это — узкий спектральный диапазон, обычно менее 50 Å, и необходимость достаточно продолжительной регистрации последовательности изображений. Учитывая, что ИФП регистрирует весь спектр за число экспозиций, в 2–3 раза превышающее величину



добротности  $F$ , то с точки зрения экономии наблюдательного времени интерферометрия проигрывает многим методам, в том числе классической спектроскопии [31].

Вследствие продолжительной регистрации, качество получаемых данных и сложность их последующей обработки сильно зависят от состояния атмосферы, колебаний её прозрачности и турбулентности. Методическая сложность с появлением цифровых способов обработки недостатком быть перестала, однако остался некий психологический барьер. Более простые и наглядные методы классической спектроскопии по-прежнему привлекают большинство исследователей.

### 1.3. Перестраиваемый фильтр на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо

Конструктивно перестраиваемый фильтр ничем не отличается от обычного интерферометра Фабри-Перо и работает по аналогичным принципам. Перестраиваемые фильтры работают на низких порядках интерференции ( $n = 10 \div 30$ ). Это соответствует малым расстояниям между пластинами ( $l = 1 \div 2$  мкм), благодаря чему имеют низкое спектральное разрешение  $R_\lambda$  (6) и получают увеличение пятна Жакино. Другими словами, они обеспечивают квазимонохроматическое изображение. Это изображение, или пятно Жакино, определяется как поле вокруг оптической оси, в пределах которого изменение длины волны не превышает  $\sqrt{2}$  от полуширины аппаратного контура эталона  $\delta\lambda$ . Из уравнения (3) относительное изменение длины волны  $\lambda$  для внеосевого угла  $\theta$  равно:

$$(\lambda_0 - \lambda_\theta)/\lambda_0 = 1 - \cos\theta \approx \theta^2/2,$$

откуда:

$$\frac{\theta_{mono}^2}{2} \approx \frac{\sqrt{2}\delta\lambda}{\lambda}.$$

Комбинируя это выражение с уравнением (6), находим, что угол, определяющий монохроматическое пятно  $\theta_{mono}$ , равен:

$$\theta_{mono}^2 \approx \frac{2\sqrt{2}}{nF}. \quad (9)$$

Для заданного порядка интерференции  $n$  (или интервала между пластинами  $l$ ), угловой размер монохроматического пятна зависит от длины волны только через добротность  $F$ . Уравнение (9) показывает, как с понижением  $n$  пятно Жакино охватывает всё большие области детектора.

Другим заметным преимуществом перестраиваемых фильтров перед классическими спектрографами является их способность обеспечивать регулируемое разрешение. Из (6) видно, что на больших порядках интерференции  $n$ , спектральная разрешающая способность  $R_\lambda$  медленно изменяется между порядками. Полезный диапазон разрешений можно получить только на малых порядках — именно там, где работают перестраиваемые фильтры [48, 58].

#### 1.4. Особенности обработки наблюдательных данных

Во время наблюдений с ИФП последовательно получают несколько десятков изображений интерференционных колец от исследуемого объекта, либо калибровочной лампы, меняя при этом расстояние между плоскопараллельными пластинами эталона  $l$ . Радиус колец  $r$  — это функция длины волны  $\lambda$  и расстояния между пластинами  $l$  (3). Одну такую интерферограмму называют *каналом*, а полный набор, заполняющий спектральный диапазон интерферометра — *циклом сканирования*. Количество спектральных каналов  $n_z$  жёстко не регламентировано, но должно в 2–3 раза превышать величину добротности  $F$  (4). Цикл сканирования после обработки может быть представлен как “куб данных”. В этом кубе пространственные координаты  $x$  и  $y$  соответствуют координатам в плоскости изображения / в картинной плоскости, а длины волн (или доплеровские скорости в определенной спектральной линии) являются третьей спектральной координатой  $z$ .

Данные обрабатываются в специальных программах, таких как ADHOC [59] и пакеты приложений в системе IRAF [60]. Эти программы оптимальны для обработки интерферометрических наблюдений со счётчиками фотонов, благодаря коротким экспозициям которых влияние атмосферы усредняется. В качестве детекторов SCORPIO-2 и MaNGaL используются ПЗС-системы, для которых, в отличие от счётчиков фотонов, требуются длительные экспозиции и более сложные алгоритмы обработки получаемых данных. В течение длительных, часто многочасовых циклов сканирования важно учитывать атмосферные модуляции, вносящие разный вклад от канала к каналу, что приводит к возникновению систематических ошибок. Используемая в CAO РАН методика обработки ПЗС-изображений учитывает проблемы поканальной фотометрической коррекции, вычитания спектра ночного неба и пр. и подробно изложена в цикле работ Моисеева А.В. и соавторов [2, 30, 31].

## 2. Процесс создания и исследование характеристик прибора MaNGaL

### 2.1. Оптическая схема

В настоящее время для астрономических наблюдений повсеместно применяется способ установки эталона Фабри-Перо в коллимированном пучке. Такая схема считается классической, поскольку позволяет легко встраивать ИФП в оптическую схему многорежимного редуктора светосилы. Эталон располагается в выходном зрачке коллиматора, преобразующего сходящийся от телескопа (либо полевой линзы) пучок в параллельный. Основная проблема данной схемы — паразитная засветка от внутренних отражений, в результате которой по полю зрения могут возникать дополнительные интерференционные картины слабой интенсивности различных порядков.

Вообще, внутренние отражения представляют проблему для всех оптических систем, но особенно от них страдают приборы с широким полем зрения и диспергирующим элементом, установленным в зрачке. Перестраиваемый ИФП в коллимированном свете как раз является таким случаем. Самая упрощенная оптическая схема такого типа будет иметь минимум восемь плоских оптических поверхностей: пластины интерферометра, интерференционный светофильтр, защитное стекло ПЗС. На некотором уровне эти поверхности взаимодействуют между собой, создавая паразитные отражения. И если светофильтр достаточно поставить перед коллиматором или после объектива, уменьшив тем самым его вклад в нежелательную засветку, то эталон иногда приходится наклонять относительно оптической оси, что ухудшает разрешение на краю поля и усложняет последующую обработку данных. Подробный анализ и возможные способы решения этой проблемы изложены в работах [58, 61].

Другой проблемой является фазовый эффект изменения длины волны по полю зрения. Центр интерференционной картины совпадает с оптической осью, а фазовое изменение по полю приводит к появлению широких колец от эмиссионных линий ночного неба (в основном, излучение [OI] и молекулы OH) в соответствующих каналах. Для изображений, в которых этот эффект присутствует, деление на плоское поле выполняется некорректно и требуется дополнительная обработ-

ка [58]. ИФП в SCORPIO-2 также устанавливается в параллельном пучке лучей. Такое решение продиктовано необходимостью обеспечить работу в различных режимах.

Ещё в 1951-1955 гг. Г. Куртес показал [19], что наилучшее расположение эталона Фабри-Перо — вблизи фокальной плоскости телескопа, без каких-либо других оптических средств. За счёт наклона в сходящемся пучке лучей, длина волны полосы пропускания мало меняется по полю зрения, и минимизируется эффект паразитных отражений. Кроме того, схема Куртеса позволяет значительно расширить диаметр пятна Жакино (как было показано с помощью выражения (14), центральное монохроматическое пятно в интерференционной картине образуется на низких порядках интерференции перестраиваемого фильтра).

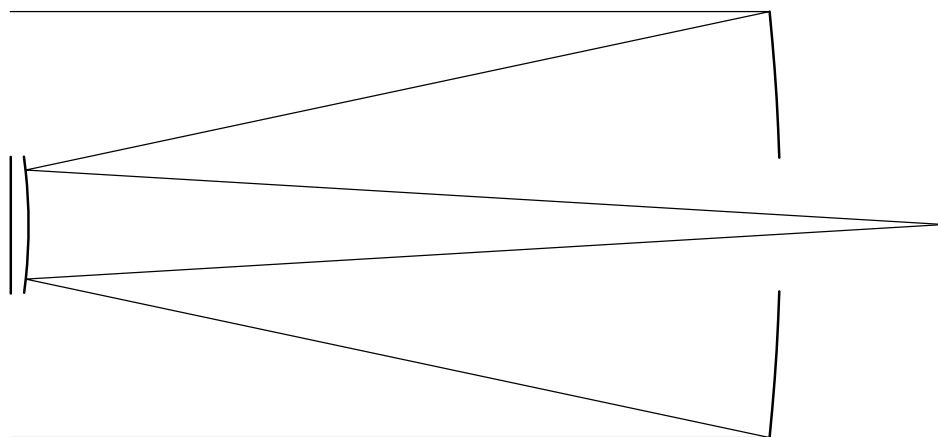
Определённые недостатки присутствуют и в этой схеме. При установке эталона в сходящемся пучке возникает эффект ухудшения радиального спектрального разрешения по полю зрения. Разница в наклоне лучей приводит к тому, что каждый телесный угол неба отображается диапазоном физических углов, проходящих через эталон, в результате чего и происходит деградация разрешающей способности. Эффект деградации по полю возрастает с увеличением порядка интерференции, что осложняет работу с ИФП высокого разрешения. На низких порядках интерференции ( $n < 30 \div 50$ ), где работают перестраиваемые фильтры, деградация незначительна, и ею можно пренебречь. Стоит отметить, что несоблюдение условия телецентризма (эквивалентности пучков лучей, которые строят телескоп и оптика прибора), либо чрезмерное увеличение поля зрения также могут привести к деградации разрешающей способности.

Несмотря на все преимущества, неклассическая схема установки эталона используется крайне редко. Такой прибор работает на 3.6-м телескопе Канада-Франция-Гавайи (CFHT) в фокальном редукторе АОВ [62].

### Расчёт оптической схемы

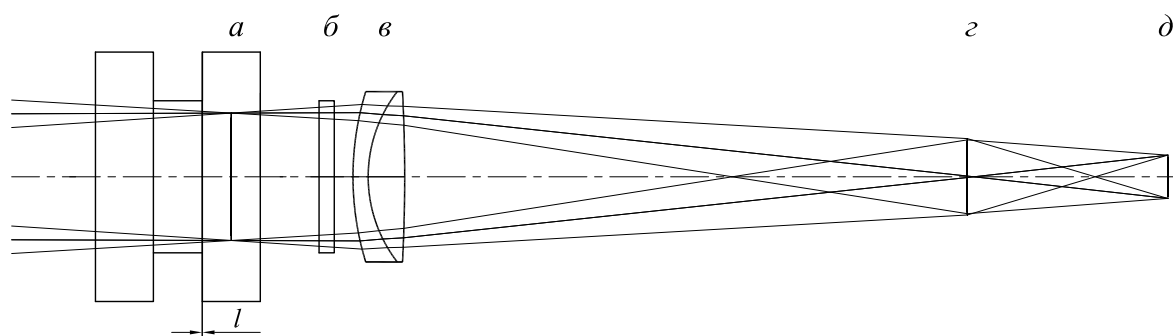
Редуктор светосилы MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines, “Картировщик узких галактических линий”) было решено сделать по схеме Г. Куртеса. Расчёт оптической схемы прибора выполнен в программе ZEMAX для 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ, собранного по схеме Кассегрена-Ричи-Кретьена с эквивалент-

ным фокусом  $F_{eq} = 20$  м (рисунок 27).



**Рис. 27.** Оптическая схема 2.5-м Кассегрена-Ричи-Кретьена КГО ГАИШ МГУ

В оптической схеме MaNGaL устранён коллиматор, и перестраиваемый фильтр установлен в пучке  $F/8$  перед фокальной плоскостью телескопа. Положение эталона подобрано так, чтобы зазор между пластинами  $l$  находился как можно ближе к фокальной плоскости телескопа, но не в самом фокусе (рисунок 28). Чтобы избежать возможных паразитных отражений, фокальная плоскость “помещена” в толщу одной из пластин ( $a$ ). Далее по ходу лучей вводятся среднеполосный интерференционный светофильтр и полевая линза ( $б, в$ ), перестраивающая световой пучок на объектив ( $г$ ), который в свою очередь строит изображение источника на поверхности приёмника ( $д$ ).

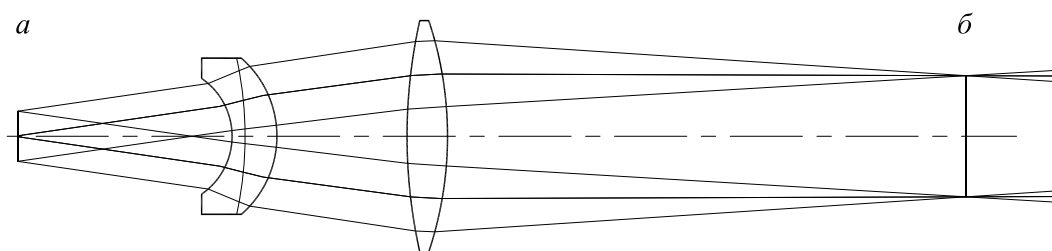


**Рис. 28.** Оптическая схема MaNGaL:  $a$  — эталон Фабри-Перо (перестраиваемый фильтр), с обозначением положения зазора  $l$  относительно фокальной плоскости телескопа,  $б$  — среднеполосный светофильтр,  $в$  — линза поля,  $г$  — главная плоскость объектива,  $д$  — плоскость светоприёмника

Рисунок 28 также иллюстрирует одно из преимуществ схемы Куртеса, когда и эталон, и интерференционный светофильтр помещены в неколлимированный

пучок, что позволяет избежать эффекта паразитных отражений и бликов.

В фотометре MaNGaL предусмотрена калибровочная система, оптическая схема которой рассчитана таким образом, чтобы сформировать на входе редуктора сходящийся пучок со светосилой, эквивалентной светосиле 2.5-м телескопа КГО  $F/8$  (рисунок 29). Другими словами, оптика калибровки обеспечивает телецентрическую засветку [29], подобно тому, как это сделано в адаптере первичного фокуса БТА (Глава I раздел 2).



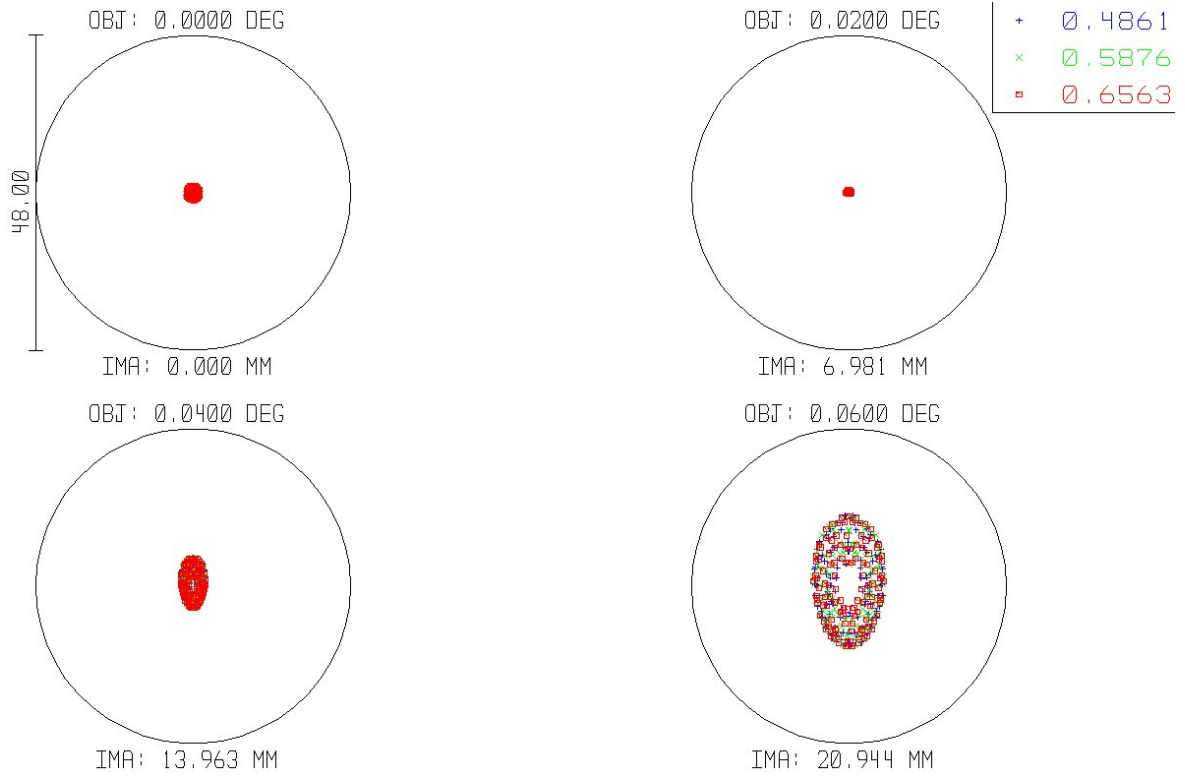
**Рис. 29.** Оптика калибровки MaNGaL: *a* — матовое стекло осветителя, *б* — фокальная плоскость телескопа, перед которой устанавливается эталон

## Выбор объектива

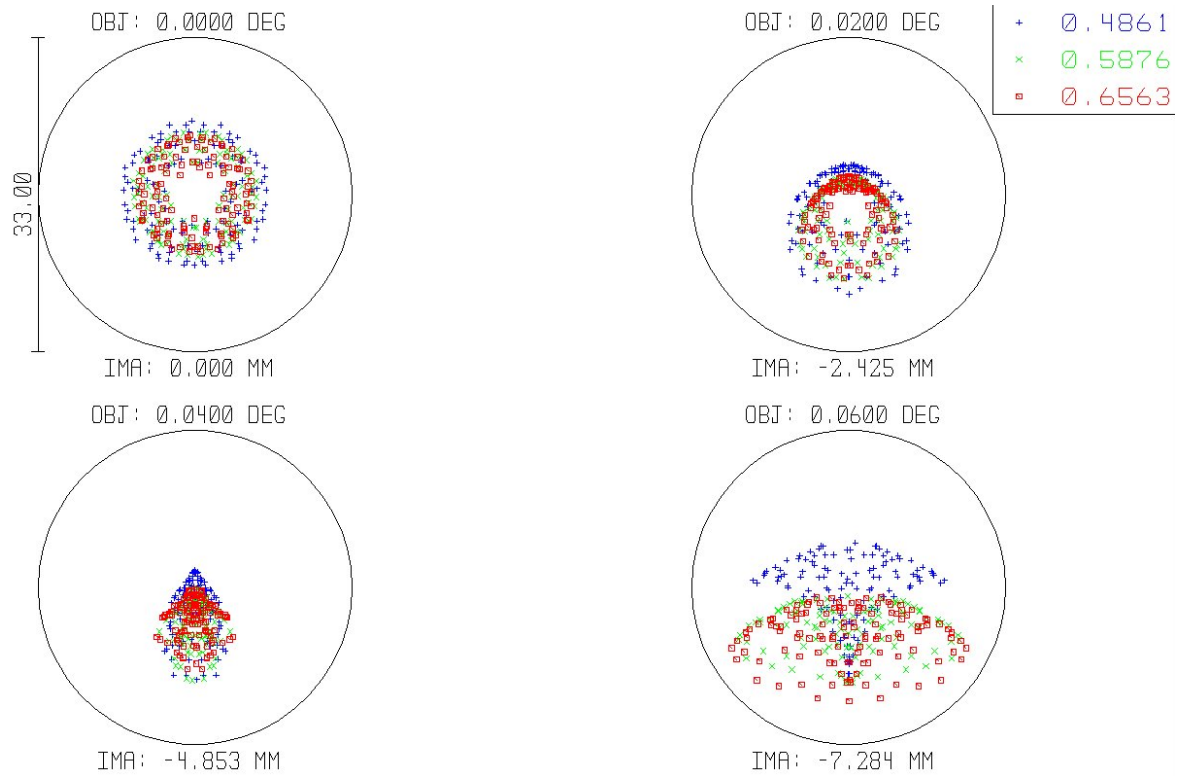
Фотометр MaNGaL требовалось изготовить в достаточно сжатые сроки, поэтому объектив Гелиос-44М-7 был подобран, как лучший из доступных изделий отечественной промышленности. Это светосильный  $f/2$  шестистлинзовый анастигмат с просветлённой оптикой и линейным размером входной апертуры 29 мм. Отличается достаточно точным построением изображения, без завала по краям поля, и наивысшим из всей серии “Гелиосов” разрешением (центр/край) 50/30 пар линий/мм<sup>1</sup>.

Качество изображения для системы MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО  $F/8$  ограничено влиянием атмосферы и составляет порядка 1" и Гелиос-44М-7 это качество не ухудшает. Однако объектив не новый, ему порядка двадцати лет, а со временем постепенно происходит деградация просветляющих покрытий и механические повреждения внешних оптических поверхностей. Поэтому в будущем планируется его заменить, повысив за счёт этого пропускание системы на 5-10%.

<sup>1</sup>Фототехника. Объективы: Гелиос-44: [сайт]. URL: <http://www.zenitcamera.com/archive/lenses/helios-44.html>



**Рис. 30.** Диаграмма рассеяния света оптикой 2.5-м телескопа КГО. Окружность обозначает поле зрения, равное 1''



**Рис. 31.** Диаграмма рассеяния света оптикой 2.5-м телескопа КГО совместно с полевой линзой MaNGaL. Окружность обозначает поле зрения, равное 1''

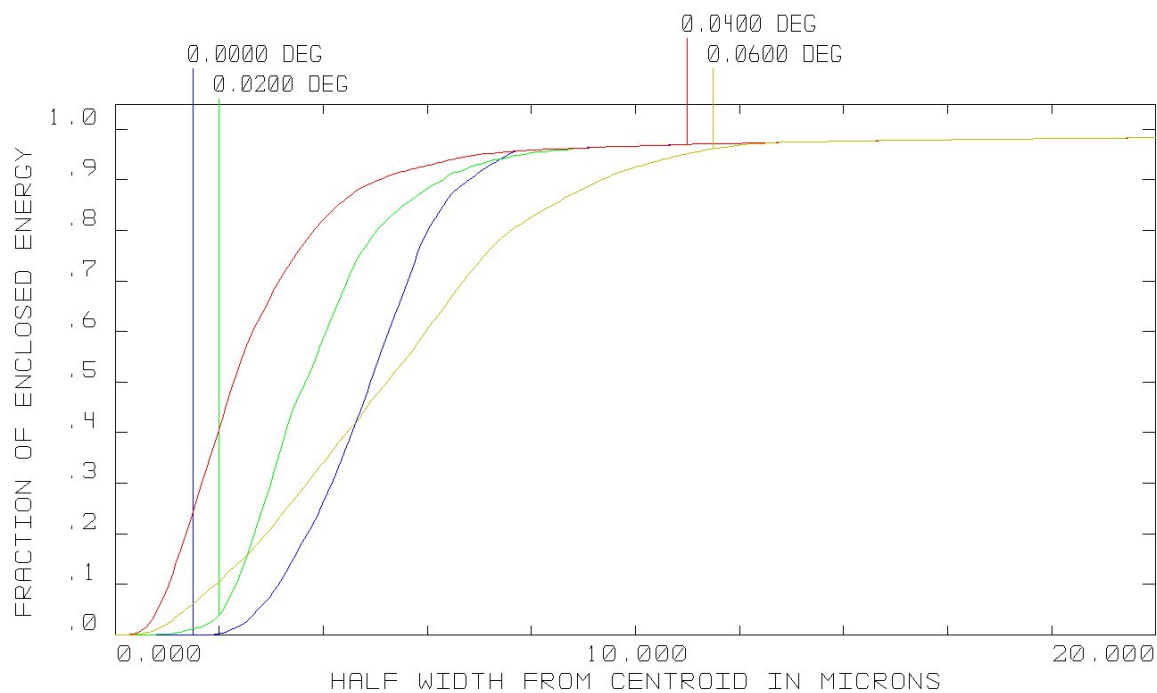


Рис. 32. Функция рассеяния точки для полевой линзы MaNGaL

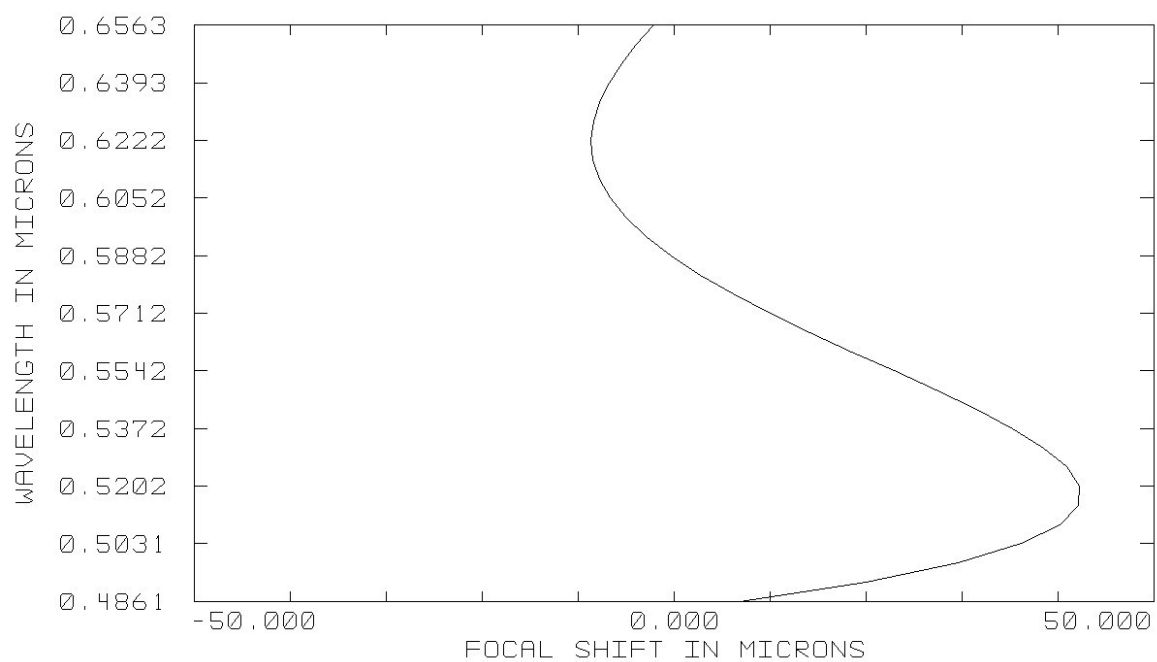


Рис. 33. Смещение положения фокуса пучка, построенного линзой поля



## Расчёт полевой линзы

Ахроматическая полевая линза выполнена из флинта Ф-13, с показателем преломления  $n_D = 1.6241$  и коэффициентом дисперсии  $\nu_D = 36.07$ , и крона К-8:  $n_D = 1.5183$ ,  $\nu_D = 63.83$ .

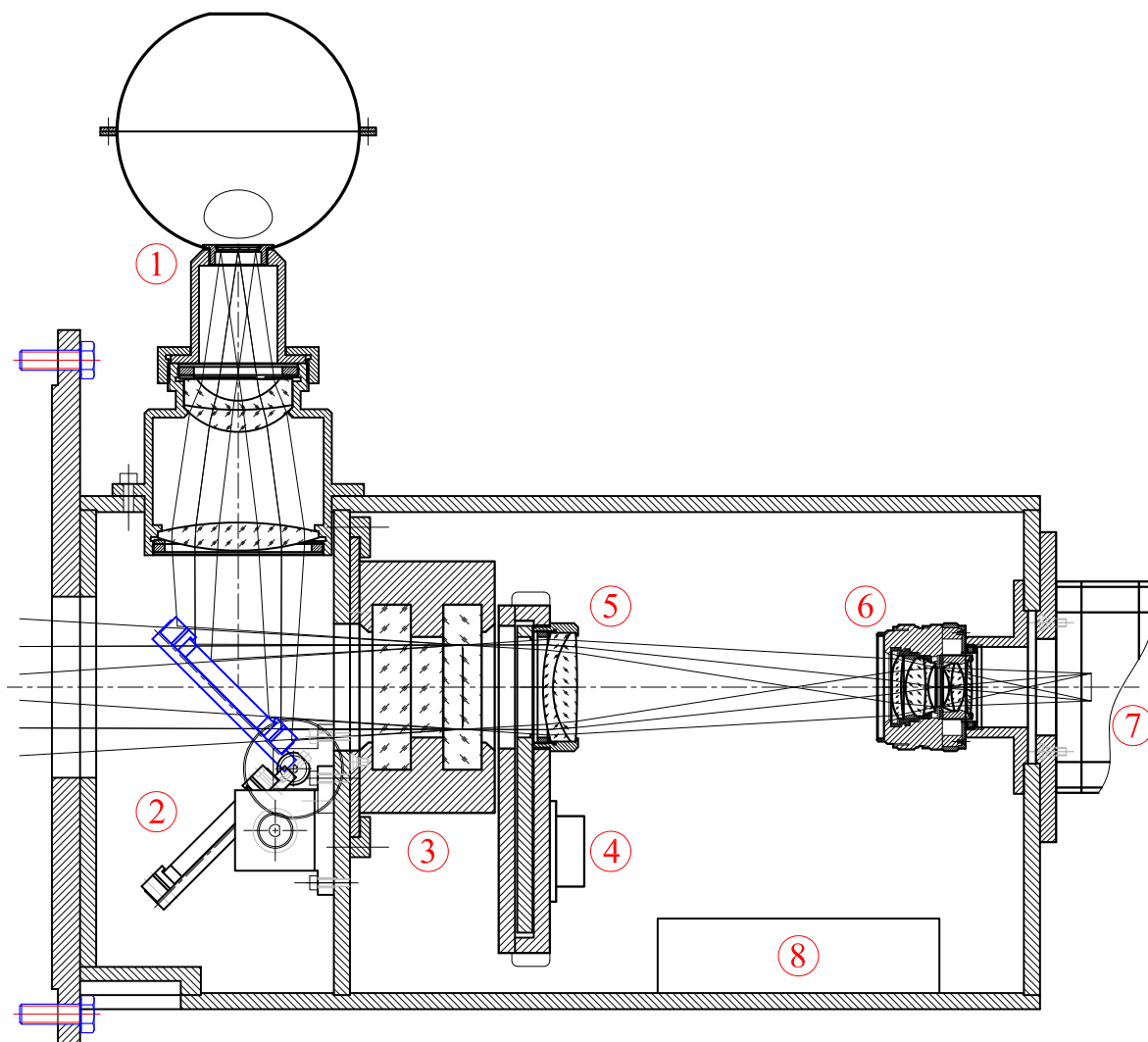
На рисунках 30 и 31 даны диаграммы рассеяния света для оптики 2.5-м телескопа КГО, и для телескопа совместно с полевой линзой MaNGaL соответственно. Окружность, в которой находятся точки, обозначает поле зрения, равное  $1''$ .

На рисунке 32 показана функция рассеяния точки (ФРТ), а на рисунке 33 — фокальное смещение (focal shift) перестроенного линзовым коллективом пучка.

Можно заключить, что линза поля удовлетворяет предъявленным к системе требованиям и не ухудшает качества изображения, которое ограничено влиянием атмосферы и в идеальных условиях составляет порядка  $1''$ . Очевидно, что на 1-м телескопе “Цейсс-1000” САО РАН с меньшей светосилой ( $F/13$ ) и апертурой все рассчитанные показатели качества улучшаются.

## 2.2. Основные узлы и характеристики MaNGaL

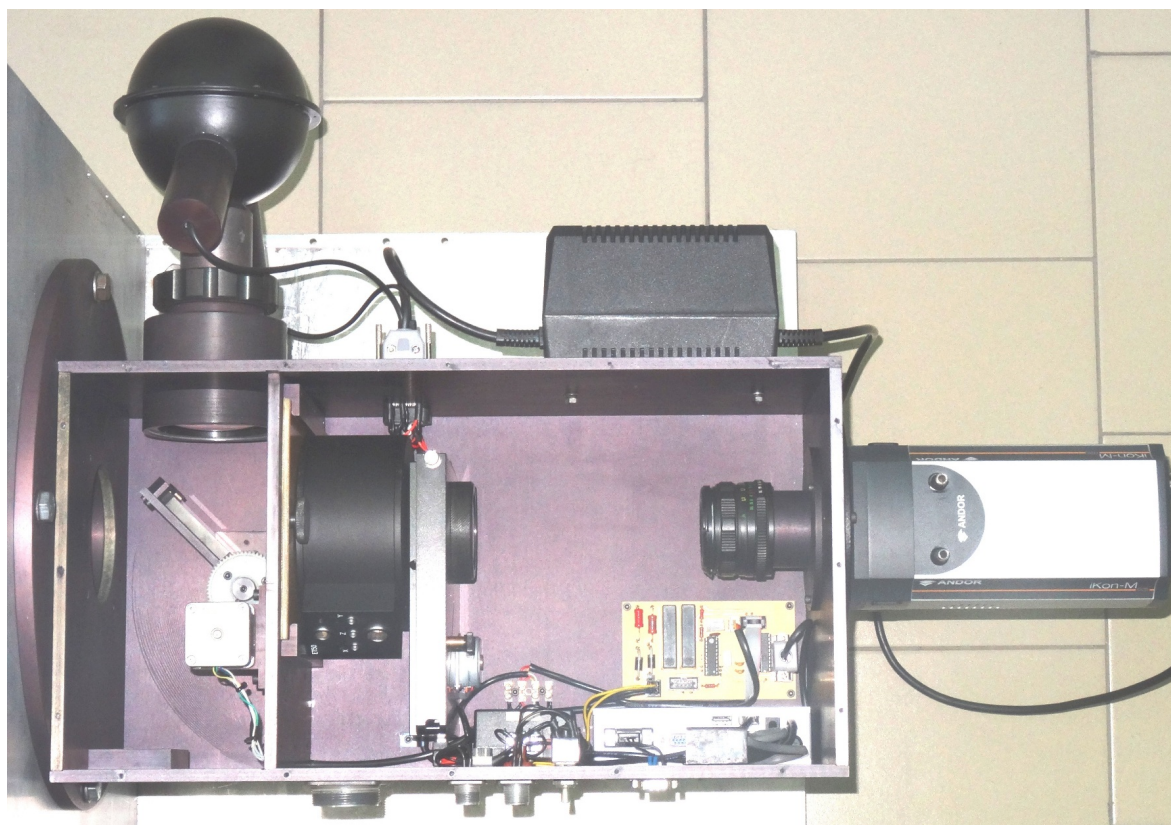
Одной из конструкторских задач было сделать прибор по возможности лёгким и компактным, чтобы его можно было свободно перевозить и использовать на разных, удалённых друг от друга телескопах. Конструирование прибора выполнено в программе AutoCAD. На рисунке 34 показан сборочный чертёж в горизонтальной проекции и обозначены основные узлы прибора. Всей электроникой управляет встроенный в корпус компактный компьютер MR3253S00F(8), идентичный управляющему компьютеру SCORPIO-2. Работа с ПЗС (7), турелью (4), контроллером интерферометра (устанавливается отдельно), микроконтроллером AVR Attiny2313, который, в свою очередь, управляет зеркалом (2) и системой калибровки, осуществляется из оболочки, реализованной на языке IDL. Калибровочный узел состоит из интегрирующей сферы (1), оптики калибровки и двух источников света: стабилитрона СГЗС, излучающего линейчатый спектр He-Ne-Ar, для калибровки шкалы длин волн и лампы накаливания, излучающей непрерывный спектр для формирования “плоских полей”. Предусмотрено резьбовое соединение оптического блока и интегрирующей сферы, которая снимается для транспортировки. Для ввода в световой пучок среднеполосных светофильтров используется готовое



**Рис. 34.** Сборочный чертёж прибора MaNGaL, горизонтальная проекция. Обозначены варианты хода лучей от телескопа и калибровочной лампы, а также следующие узлы: 1 — узел интегрирующей сферы (шар Ульбрихта) и оптики калибровки; 2 — зеркало; 3 — эталон ИФП (перестраиваемый фильтр); 4 — моторизированная турель; 5 — линзовый коллектив; 6 — объектив; 7 — ПЗС-система; 8 — компактный управляющий компьютер

решение от Edmund Optics — моторизированная турель на 5 сменных фильтров диаметром 50 мм, управляемая через USB-порт. Архитектура системы аналогична рассмотренной в **Главе I**, только содержит значительно меньше узлов и подвижных элементов, поэтому подробно останавливаться на ней не имеет смысла. Эталон интерферометра (рисунок 34, 3) крепится к пластине из текстолита и вводится в световой пучок с её помощью. Такой способ крепления обеспечивает возможность быстрой установки или извлечения (например, для подстройки), а также обеспечивает электроизоляцию от корпуса.

Детали корпуса прибора, оправы и оптика изготовлены в Макетных мастерских САО РАН. Корпус было решено изготовить из 8-мм дюралюминия марки Д16Т, который обеспечил достаточную жёсткость конструкции при относительно небольшом весе. Посадочный фланец сделан из 14-мм Д16Т и рассчитан для установки на 1-м телескоп Цейсс-1000. Вынос фокуса и посадочные размеры на 2.5-м телескопе КГО другие, поэтому для него изготовлен специальный переходник. Для доступа внутрь прибора снимается вся верхняя часть (рисунок 35). Крышка из Д16Т толщиной 4 мм крепится невыпадающими винтами и оборудована световым замком из ПВХ.



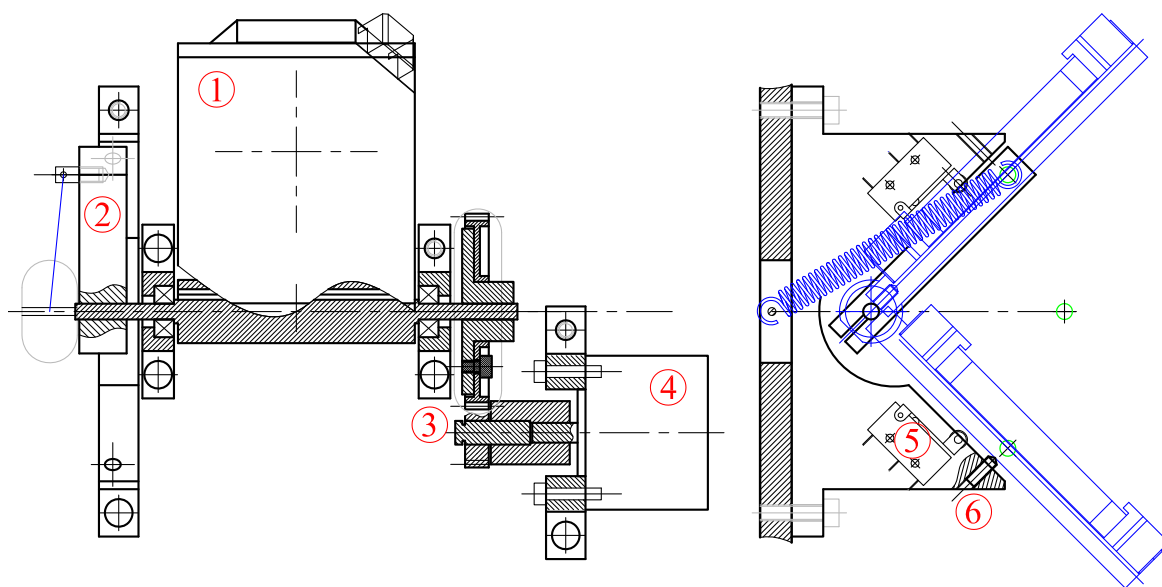
**Рис. 35.** Общий вид MaNGaL со снятой верхней крышкой: рядом с компактным компьютером можно увидеть плату управления зеркалом и системой калибровки, а также преобразователь напряжения 12 В, 5 А, который питает электронику прибора; справа от интегрирующей сферы, на внешней поверхности корпуса закреплён источник питания ПЗС-системы

Все детали из алюминия и его сплавов почернены методом анодирования; стальные элементы оправ и другие детали, требующие высокой точности изготовления — методом химического оксидирования сталей; прочие стальные детали — воронением в масле. При разработке оправ и креплений оптики использовались

идеи из Справочника конструктора опико-механических приборов, под общей редакцией В. А. Панова [63].

### Узел зеркала переброса

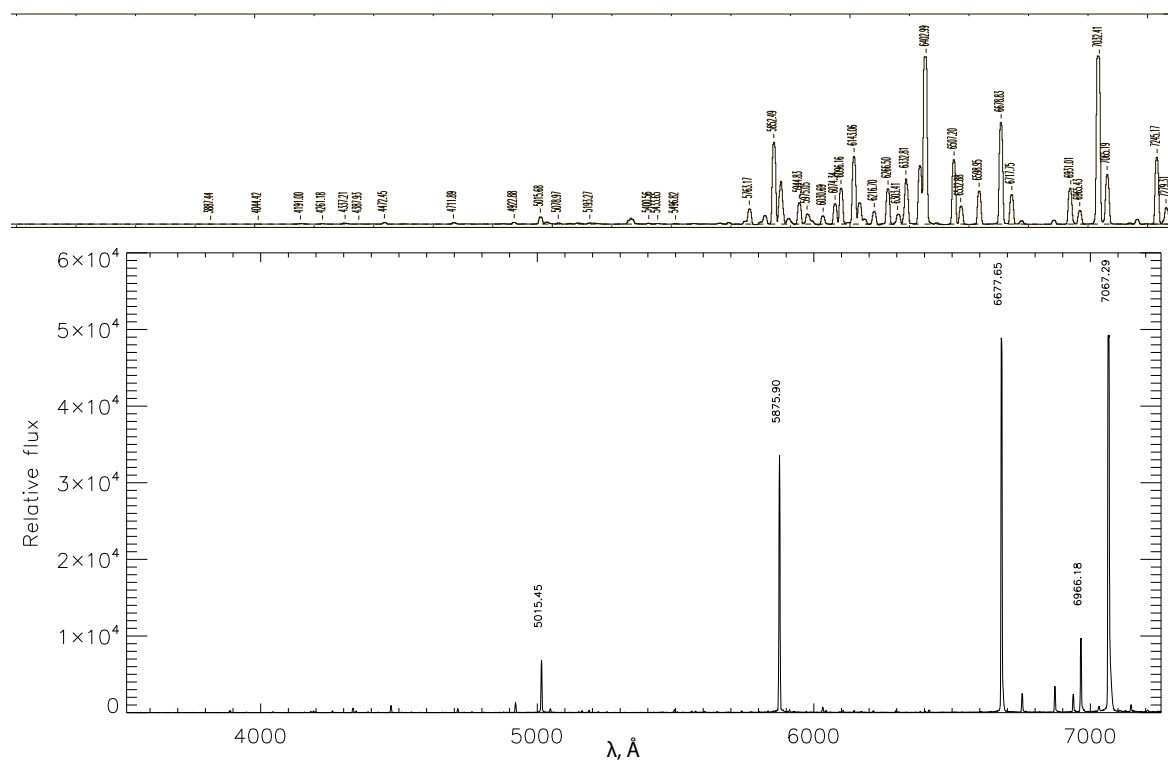
Для поворота зеркала собран редуктор из двух шестерен 3:1 и рассчитан крутящий момент на валу двигателя, после чего подобран соответствующий шаговый двигатель (FL39ST34-0306A 1.3 кг×см). Сборочный чертёж узла показан на рисунке 36. На оси, вместе с конструкцией зеркала (1), закреплён рычаг (2), который обеспечивает правильную работу всего механизма. На рисунке видно, как рычаг и опора ограничивают ход зеркала до  $90^\circ$ , а с помощью юстировочного винта опоры (6) легко настраивается требуемое положение светового калибровочного пучка. Кроме того, рычаг (2) нажимает на концевые выключатели (5). К рычагу крепится пружина, которая единообразно прижимает механизм зеркала в одно из двух положений. Удержание зеркала в нужной позиции можно производить и при помощи шагового двигателя, но механизм с пружиной обеспечивает более надёжную и точную фиксацию.



**Рис. 36.** Сборочный чертёж узла зеркала переброса. Относительно проекции на рисунке 34 левый чертёж будет видом слева, а правый — видом снизу. Цифрами обозначены: 1 — зеркало, 2 — рычаг, 3 — редуктор, 4 — шаговый двигатель, 5 — концевые выключатели (второй — симметрично), 6 — юстировочный винт. Зелёным кружком показаны возможные положения пружины, которая плотно прижимает зеркало в нужном положении

### О тонкостях выбора газоразрядных стабилитронов

Узкая ( $10\text{--}20\text{\AA}$ ) спектральная полоса пропускания перестраиваемого фильтра MaNGaL позволяет использовать в качестве калибровочного источника “плоского поля” обычную миниатюрную лампу накаливания 3–5 В. С другой стороны, из-за узкой полосы пропускания встаёт вопрос о выборе калибровочного источника линейчатого спектра. Классическое решение — газоразрядный стабилитрон СГЗС — изначально казалось неподходящим. Из-за большого количества линий в требуемой области спектра ( $6000\div 7000\text{\AA}$ ) возникали трудности с их отождествлением. Теоретически, чисто гелиевая калибровочная лампа могла бы стать оптимальным вариантом, потому что спектр гелия представлен яркими одиночными линиями в нужном диапазоне (рисунок 37).



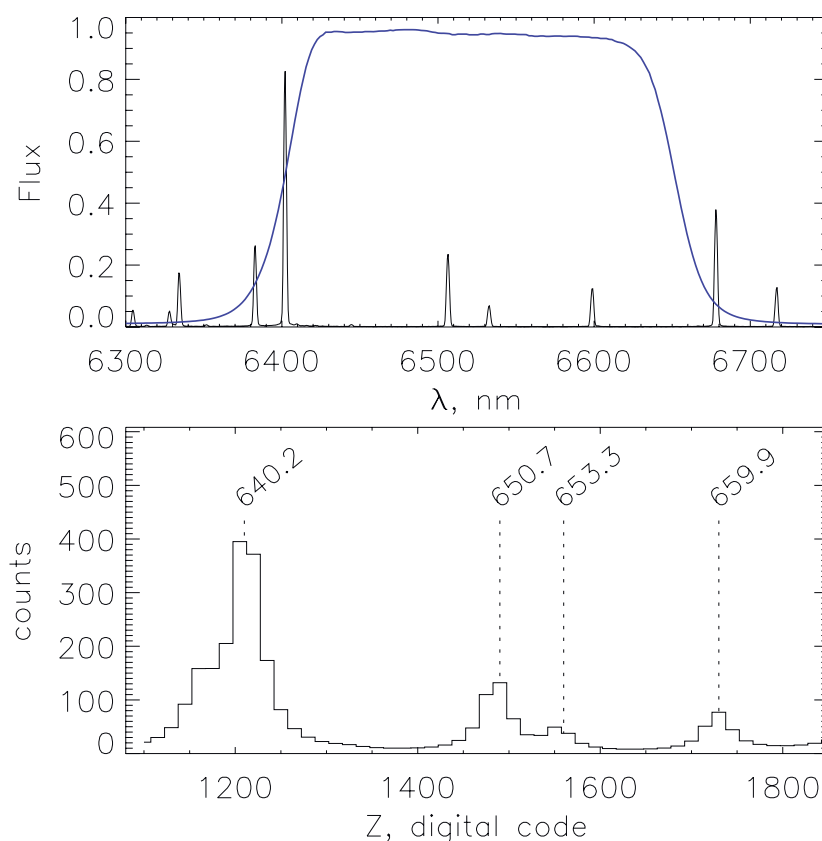
**Рис. 37.** Спектр стабилитрона СГ4С с гелиевым наполнением (снизу). Получен во время исследования характеристик газоразрядных стабилитронов с помощью SCORPIO-2 и адаптера. Для сравнения, сверху показаны линии в спектре СГЗС, сопоставленные по длине волны, но не по интенсивности

Как и в случае со светодиодной засветкой адаптера, мы не смогли остановиться, пока не получили спектры для всех видов имевшихся в наличии стабилитронов (около 15 шт.), и среди них оказался один, заслуживающий отдельного внимания.

Стабилитрон СГ4С с гелиевым наполнением в лабораторных условиях давал повторяемые результаты и подходил по электрическим параметрам. В нижнем блоке рисунка 37 показан спектр СГ4С, полученный с помощью адаптера и SCORPIO-2. Линии  $\lambda 5016$  и  $\lambda 5876$  Å действительно одиночные / разделяемые и должны хорошо подходить для калибровки перестраиваемого фильтра. В верхней части рисунка для сравнения показаны соответствующие линии в спектре СГЗС (интенсивности не сравниваются).

Стабилитрон СГ4С был выбран в качестве рабочего калибровочного источника фотометра MaNGaL, но во время тестовых наблюдений на телескопе оказалось, что линии спектра гелия смещаются, вероятно, под воздействием низкой окружающей температуры. Жёсткие временные рамки не позволили как следует исследовать поведение СГ4С в уличных условиях разобраться в причинах проблемы, тем более что с помощью перестраиваемого фильтра удалось отождествить линии в спектре СГЗС. Стоит отметить, что стабилитроны СГ4С с гелиевым наполнением могут оказаться очень полезными в качестве калибровочных источников линейчатого спектра там, где калибровка возможна только в узком спектральном диапазоне (например, с перестраиваемыми фильтрами). Однако предварительно необходимо произвести тщательное исследование их свойств.

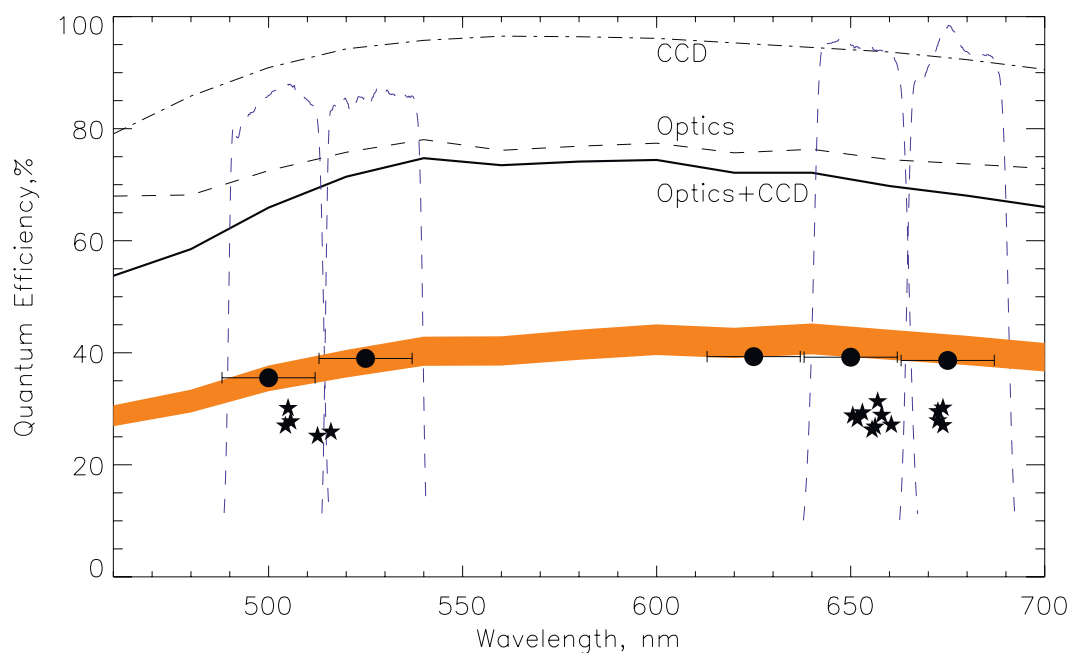
В результате было принято решение использовать проверенный источник линейчатого спектра — СГЗС. В верхнем блоке рисунка 38 показан спектральный диапазон СГЗС, выделенный среднеполосным фильтром ( $\text{FWHM} = 250\text{\AA}$ ) в районе линии  $\text{H}\alpha$ , а в нижнем — линии, отождествлённые после сканирования ИФП. Несмотря на изначальные сложности, сейчас такая калибровка уже стала стандартной. Здесь есть много тонких методических моментов, которые рассматриваются в [18].



**Рис. 38.** Калибровка с помощью He-Ne-Ag стабилизатора СТЗС. Вверху: синяя линия показывает кривую пропускания среднеполосного светофильтра, выбранного в области  $250\text{\AA}$  вокруг линии  $\text{H}\alpha$ ; внизу: отождествлённые линии спектра [18]

### Оценка квантовой эффективности MaNGaL + телескоп

Оценки квантовой эффективности (QE) MaNGaL на 2.5-м телескопе и вклад различных компонентов в общую пропускную способность представлены на рисунке 39. Кривые пропускания оптики и фильтров были измерены в лаборатории САО РАН; QE ПЗС-системы приводится в соответствии с данными производителя. Используется ориентировочная оценка трёх зеркал телескопа, предоставленная сотрудниками КГО. Предполагаемая полная квантовая эффективность телескопа и MaNGaL в режиме прямых снимков (без ИФП) очень хорошо согласуется с наблюдениями фотометрических стандартных звёзд. Полная квантовая эффективность системы составляет 25-30%. Согласно измерениям, эффективность MaNGaL на метровом телескопе САО РАН имеет аналогичное значение, потому что два его зеркала в фокусе Кассегрена дают примерно такие же потери света, как три зеркала 2.5-м телескопа в фокусе Несмита.



**Рис. 39.** Квантовая эффективность MaNGaL на 2.5-м телескопе. Кривые, обозначенные черными линиями различных типов, обозначают кривые пропускания компонентов MaNGaL (сверху-вниз): для ПЗС-системы, для оптики прибора, для оптики вместе с ПЗС. Кривые пропускания среднесполосных светофильтров показаны синим пунктиром. Оранжевая область — полная эффективность системы на телескопе. Её ширина соответствует погрешности, вносимой неопределённостью определения коэффициентов отражения зеркал. Черные символы показывают измерения QE с использованием спектрофотометрических стандартов, наблюдаемых без ИФП (кружки) и с перестраиваемым фильтром (звёздочки) [18]

## Характеристики MaNGaL

- Перестраиваемый фильтр ИФП ET-50-FS-100 IC Optical Systems Ltd:
  - рабочее отверстие  $\varnothing$  50 мм,
  - ширина полосы пропускания (FWHM) 15–25 Å
- Редуктор 1:2.2
- Масштаб изображений и поле зрения:
  - 1-м “Цейсс-1000”: 0.51"/пиксель и 8'7
  - 2.5-м КГО: 0.33"/пиксель и 5'6
- ПЗС-приёмник Andor iKon-M 934BV 1024×1024, 13×13 мкм,  
шум считывания до 2,5 e- при водяном охлаждении до –100°C



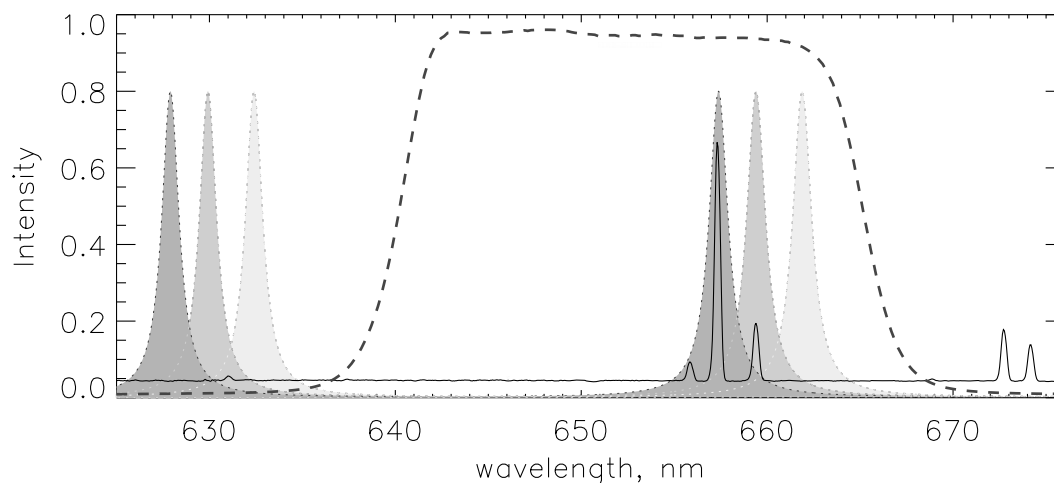
- Квантовая эффективность системы  $QE > 60\%$  и будет повышена
- Рабочий спектральный диапазон: 4600–7500 Å
- Среднеполосные фильтры Edmund Optics,  $FWHM = 250 \text{ Å}$ ,  $QE \approx 95\%$
- Моторизованная USB турель Edmund Optics на 5 сменных фильтров  $\varnothing 50 \text{ мм}$
- Управляющий компактный компьютер MR3253S-00F
- Вес прибора вместе с ИФП (без контроллера) и ПЗС: 25 кг
- Вес контроллера ИФП с креплением: 30 кг [49]

### 3. Наблюдения с MaNGaL

Основные принципы проведения наблюдений с перестраиваемым фильтром иллюстрирует рисунок 40, для случая изучения эмиссионных линий в галактике на фоне непрерывного континуума. Соседние максимумы ИФП отсекаются среднеполосным фильтром с диапазоном пропускания  $200 \div 250 \text{ Å}$ , обозначенным пунктирной кривой. Чёрным схематично изображён спектр исследуемой галактики с яркими линиями  $H\alpha$  в центре и  $[N II]$  справа от неё. Серым разной интенсивности показана полоса пропускания перестраиваемого фильтра, которая настраивается в зависимости от задачи, в данном случае — на  $H\alpha$ , потом — на рядом находящийся азот  $[N II]$  и на континуум.

Рабочий диапазон перестраиваемого фильтра ограничен коэффициентом отражения пластин и составляет 4600–7500 Å. Из выражения (5), добротность интерферометра  $F$  на заданной длине волны целиком определяется характеристиками зеркал, и можно управлять шириной полосы  $\delta\lambda$ , изменяя расстояние между пластинами  $l$ . Во время наблюдений с MaNGaL, среднее значение  $\delta\lambda$  составило 20 Å при возможности регулировки с помощью контроллера в диапазоне  $\delta\lambda = 15 \div 25 \text{ Å}$ .

Благодаря точной настройке узкой полосы пропускания перестраиваемого фильтра на выбранные линии, появляется возможность очень аккуратно вычитать континуум. Это одно из важных преимуществ наблюдений с перестраиваемым фильтром в сравнении с распространенной методикой прямых снимков в



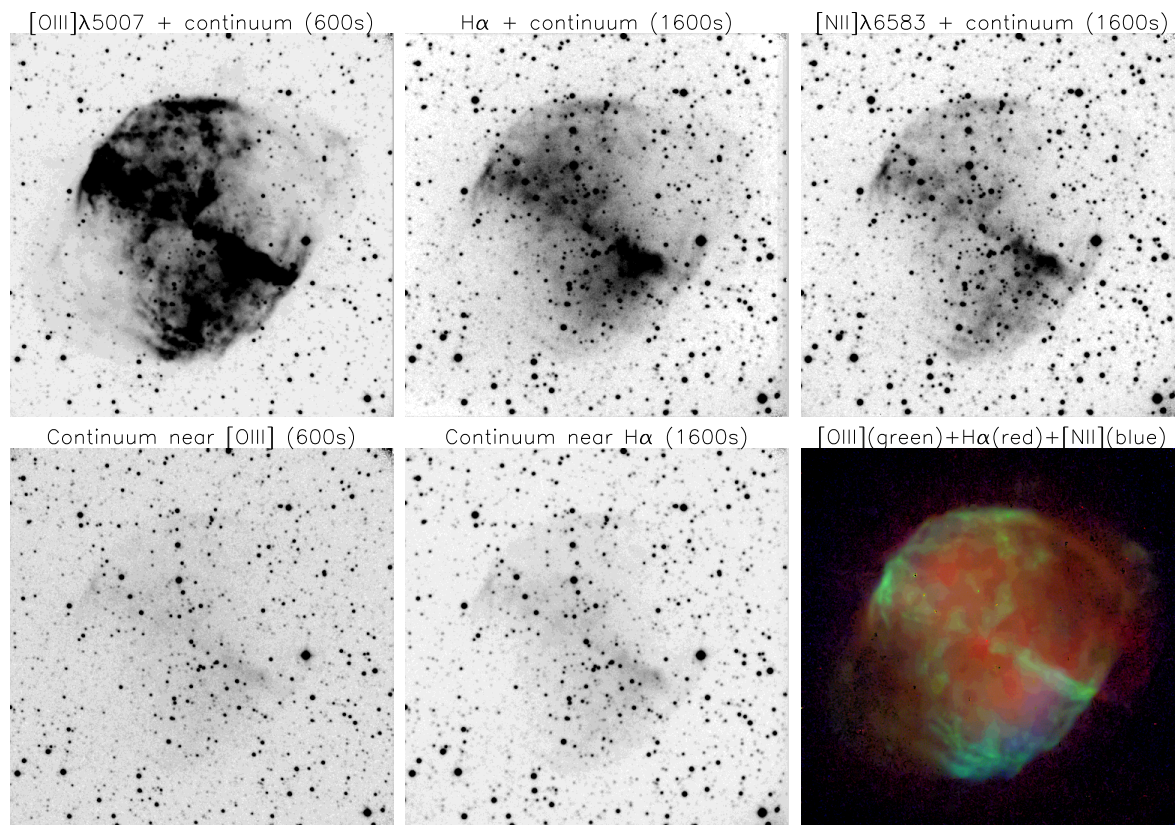
**Рис. 40.** Принцип работы перестраиваемого фильтра. Спектр галактики (континуум + эмиссии) показан сплошной чёрной линией, а чёрным пунктиром — кривая пропускания среднеполосного фильтра, вырезающего требуемые пики пропускания. Серыми градиентами обозначены положения инструментального профиля интерферометра Фабри-Перо, который в данном случае настраивается для наблюдения в эмиссионных линиях H $\alpha$ , [N II] и в соседнем континууме [18]

среднеполосных фильтрах. Точное вычитание континуума особенно важно при изучении межзвездной среды галактик, где вклад звездного населения в континуум может быть существенным.

### Первые испытания

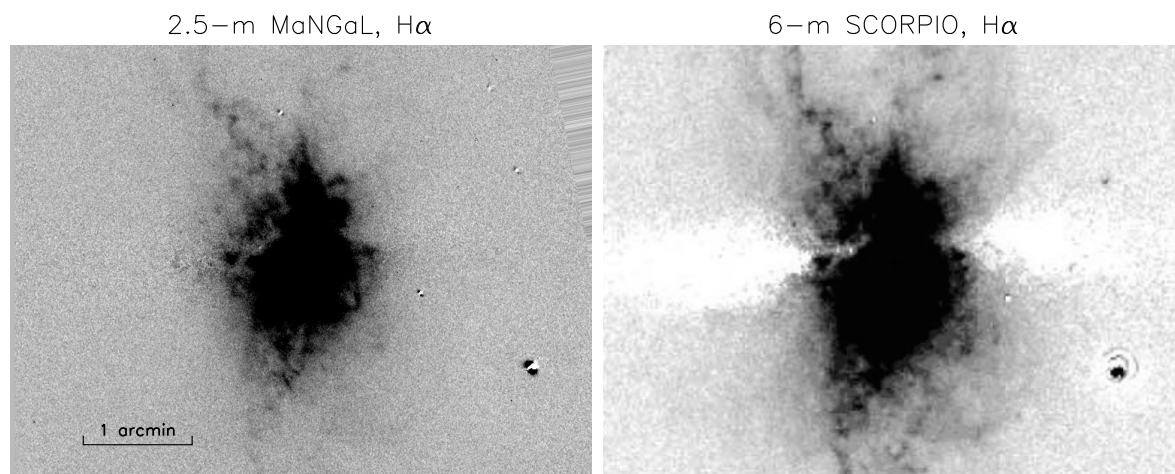
Первые испытания MaNGaL проводились на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН в сентябре 2017 года. Результат наблюдений в режиме перестраиваемого фильтра и цветное композитное изображение в эмиссионных линиях после вычитания континуума показаны на Рисунке 41. Это известная планетарная туманность NGC 6853 “Гантель” в созвездии Лисички. Точная настройка полосы пропускания на требуемую длину волны позволяет построить отдельные изображения как в области эмиссионных линий [O III], H $\alpha$  и [N II], так и в соседнем континууме, благодаря чему появляется возможность эффективно удалять вклад звездного компонента на изображениях в эмиссионных линиях.

Убедившись, что всё работает, в ноябре 2017 года повезли систему на 2.5-м телескоп Кавказской горной обсерватории. На рисунке 42 показаны изображения в эмиссионной линии H $\alpha$  близкой галактики M82 (NGC 3034) с галактическим ветром, полученные с помощью перестраиваемого фильтра (левое) и в средне-



**Рис. 41.** Первые наблюдения с MaNGaL на 1-м Цейсс-1000 в режиме перестраиваемого фильтра. Изображения планетарной туманности NGC 6853 в случае, когда пик пропускания ИФП центрирован на эмиссионные линии  $[\text{O III}]\lambda 5007$ ,  $\text{H}\alpha$ ,  $[\text{N II}]\lambda 6583$  (верхний ряд рисунков) и континуум рядом с линиями (внизу слева и в центре). Внизу справа — цветное композитное изображение в эмиссионных линиях после вычитания звёздного континуума. В скобках указано суммарное время экспозиций

полосных фильтрах на 6-м телескопе из обзора [64]. Изображения получены за сходное время суммарных экспозиций. На снимках MaNGaL, за счет лучшей методики вычитания континуума, удаётся практически полностью вычесть вклад от звёздного населения галактики на эмиссионных изображениях.



**Рис. 42.** Вычитание континуума из  $H\alpha$ -изображения галактического ветра в NGC 3034 (M82), наблюдаемые на 2.5-м телескопе КГО с перестраиваемым фильтром MaNGaL (слева) и данные 6-м телескопа из [64], полученные с помощью классической фотометрии в среднеполосных фильтрах (справа)

#### 4. Выводы и результаты

В межзвёздной и межгалактической среде достаточно много тёплого, ионизованного газа, с температурами от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч кельвинов, излучение которого мы видим в виде оптических эмиссионных линий. По отношению потоков нескольких эмиссионных линий можно определить многие физические параметры, такие как электронная плотность, электронная температура, металличность.

Создан фотометр MaNGaL с перестраиваемым фильтром на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо, позволяющий получать изображения галактических и внегалактических туманностей в эмиссионных линиях и проводить диагностику состояния ионизации газа. Для диагностики состояния ионизованного газа важно разделять близкие эмиссионные линии с разными условиями возбуждения, такие как комплексы линий  $H\alpha$  и  $[N\text{ II}]\lambda 6548, 6583$  или  $[S\text{ II}]\lambda 6717, 6731$ . MaNGaL обеспечивает спектральное разрешение около  $10\text{ \AA}$  с точной подстройкой центральной полосы пропускания фильтра на требуемую линию с учетом ее лучевой скорости.

MaNGaL успешно работает и получает наблюдательные данные на 1-м телескопе САО РАН и 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ. С некоторыми из опубликованных результатов можно ознакомиться в работах [21] о структуре галактических туманностей и [22, 23] — о распределении ионизованного газа в галактиках различных типов.

Основные результаты этой главы изложены в публикациях:

- **Перепелицын А. Е., Моисеев А. В., Опарин Д. В.** — Известия Главной астрономической обсерватории в Пулков. Труды VII Пулковской молодежной астрономической конференции, №226, С. 65-70 (2018).
- *Moiseev, A., **Perepelitsyn, A.**, Oparin, D.* — Experimental Astronomy, **50**, 199–214 (2020).

## Заключение

Разработка навесной аппаратуры для исследования слабых протяжённых объектов в оптическом диапазоне является актуальной задачей. Методы панорамной спектроскопии в настоящее время активно развиваются, и телескопы по всему миру оснащаются высокоэффективными инструментами на основе сканирующих интерферометров Фабри-Перо и интегрально-полевыми модулями. В связи с некоторой технической и методической сложностью таких методов, крайне важным становится реализовать удобную и надёжную систему для осуществления дистанционных наблюдений. Отлаженная и автоматизированная система позволяет не только рационально использовать время на телескопе, но и является необходимым условием для возможности работы заявителей наблюдательного времени сторонних организаций.

В данной диссертации представлены результаты по разработке и созданию таких систем, которые уже применяются на российских инструментах разного класса: 1-м и 6-м телескопах САО РАН, 2,5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Кратко перечислим еще раз итоги выполненной работы:

Создана распределённая система управления экспериментом, позволяющая удалённо управлять самыми разными инструментами: многорежимным редуктором светосилы SCORPIO-2, системой калибровки и внеосевого гидирования — адаптером, системой регистрации изображений, системой архивации наблюдательных данных и телескопом. Система управления редуктора светосилы позволяет собрать в одном блоке все элементы прибора, сократив до минимума количество внутренних и внешних связей. Возможность быстрого переключения между различными режимами обеспечивает гибкость в выборе наблюдательных программ под текущее состояние атмосферы, тем самым экономится наблюдательное время.

В системе калибровочной засветки адаптера решена проблема стандартного

источника непрерывного спектра — галогеновой лампы, которая обладает некоторыми известными недостатками: падением яркости в синей области спектра, а также вкладом в синюю часть рассеянного света из более длинноволновой, красной части. Для решения проблемы была создана система светодиодной калибровочной засветки. “Плоское поле”, формируемое светодиодами, настраивается для каждой решётки и даёт более равномерную засветку по длинам волн в сравнении с галогеновой лампой. На крупном телескопе (БТА) подобная система реализована впервые.

Одним из способов исследования протяжённых объектов является интегрально-полевая спектроскопия. В составе многорежимного редуктора светосилы SCORPIO-2 реализован интегрально-полевой блок, который предназначен для исследования центральных частей галактик и других протяженных объектов в спектральном диапазоне 4800-7100 Å, диагностики состояния ионизации газа и изучения его кинематики. Удалось добиться не менее 65% пропускания узла линзового раstra с оптическими волокнами, благодаря высокой точности расстановки световодов, составившей ~90%. Квантовая эффективность в режиме IFU в зависимости от применяемой решётки, находится в пределах от 6 до 13%. Получены результаты тестовых наблюдений сейфертовской галактики Mrk 78 [16].

Последние технологические разработки в области производства высокоэффективных эталонов ИФП позволили создать надёжные перестраиваемые фильтры с широким монохроматическим полем зрения и регулируемой полосой пропускания. На основе такого фильтра разработан и изготовлен компактный фотометр MaNGaL. Благодаря использованию нестандартной оптической схемы, удалось расширить центральное монохроматическое пятно до размеров всего кадра, с незначительным изменением длины волны полосы пропускания по полю зрения. Универсальный и простой в использовании MaNGaL в настоящее время успешно применяется на телескопах “Цейсс-1000” САО РАН и 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ для наблюдения слабых протяжённых объектов в выбранных эмиссионных линиях. В связи с дефицитом наблюдательного времени на 6-м телескопе БТА возможность работы на телескопах среднего диаметра очень актуальна. Методика наблюдений с перестраиваемым фильтром позволяет решать ряд задач

спектроскопии низкого разрешения, хотя сводится, по сути, к поверхностной фотометрии с преимуществом получения двумерных изображений в широком поле зрения.

Результаты, полученные с MaNGaL уже вошли в ряд публикаций по исследованию состояния ионизованного газа в галактиках и туманностях Млечного Пути [21–23].



\* \* \*

Автор приносит свою глубокую благодарность научному руководителю **А. В. Моисееву**.

Вклад профессора **В. Л. Афанасьева** в развитие российской оптической астрономии трудно переоценить. Без его идей, личного участия и энергии не было бы не только данной работы, но и рассматриваемых в ней приборов и методов на отечественных телескопах. Светлая память Вам, Виктор Леонидович...

Автор благодарит:

**Р. И. Уклеина, В. Р. Амирханяна, С. Н. Додонова**

и весь коллектив

Лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов.

Отдельную благодарность хочется выразить моей жене — **Ю. А. Перепелицыной** и

родителям — **Н. А. Калининой** и **Е. И. Перепелицыну**,

не только за терпение и поддержку, но и

за неоценимую помощь на финальных стадиях работы,

а также дочери — **Перепелицыной М. А.**, которая, несмотря на свой юный возраст, тоже по-своему помогала.

Автор благодарит сотрудников САО РАН:

**Е. И. Кайсину, В. В. Власюка** и весь коллектив САО РАН.

Огромная благодарность Специальной астрофизической обсерватории за предоставленную возможность работать и учиться.

Автор признателен всем соавторам за ценный опыт работы на протяжении исследования.

Отдельное спасибо университету ИТМО и кафедре Астроприборостроения.

Спасибо всем, принявшим участие в дискуссиях и помогавшим в работе.

## Литература

- [1] Multi-Pupil Fiber Spectrograph of the 6-meter Telescope / V. L. Afanasev, V. V. Vlasjuk, S. N. Dodonov, O. K. Sil'shenko // Preprint Spec. Astrophys. Obs. of RAS. — 1990. — Vol. 54. — P. 1–12.
- [2] Moiseev A. V. Reduction of CCD observations with scanning Fabry-Perot interferometer // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 2002. — jan. — Vol. 54. — P. 74–88.
- [3] Afanasiev V. L., Moiseev A. V. SCORPIO on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // Baltic Astronomy. — 2011. — aug. — Vol. 20. — P. 363–370. — 1106.2020.
- [4] Bland-Hawthorn J., Jones D. H. Taurus tunable filter: A flexible approach to narrowband imaging // Publications of the Astronomical Society of Australia. — 1998. — Vol. 15, no. 1. — P. 44–49.
- [5] The ESO Faint Object Spectrograph and Camera / EFOSC / B. Buzzoni, B. Delabre, H. Dekker et al. // The Messenger. — 1984. — dec. — Vol. 38. — P. 9.
- [6] Twenty Years of FORS Science Operations on the VLT / G. Rupprecht, H. Bönhardt, S. Moehler et al. // The Messenger. — 2010. — jun. — Vol. 140. — P. 2–7.
- [7] OSIRIS tunable imager and spectrograph for the GTC: from design to commissioning / Beatriz Sánchez, Marta Aguiar-González, Roberto Barreto et al. // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV / Ed. by Ian S. McLean, Suzanne K. Ramsay, Hideki Takami. — Vol. 8446 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2012. — sep. — P. 84464T.

- 
- [8] Afanasiev V. L., Moiseev A. V. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // *Astronomy Letters*. — 2005. — mar. — Vol. 31, no. 3. — P. 194–204. — astro-ph/0502095.
- [9] Transient Double-beam Spectrograph for the 2.5-m Telescope of the Caucasus Mountain Observatory of SAI MSU / S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin et al. // *arXiv e-prints*. — 2020. — nov. — P. arXiv:2011.03061. — 2011.03061.
- [10] MUSE Commissioning / R. Bacon, J. Vernet, E. Borisova et al. // *The Messenger*. — 2014. — sep. — Vol. 157. — P. 13–16.
- [11] Gemini-north multiobject spectrograph: integral field unit / Graham J. Murray, Jeremy R. Allington-Smith, Robert Content et al. // *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes* / Ed. by Masanori Iye, Alan F. M. Moorwood. — Vol. 4841 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2003. — mar. — P. 1750–1759.
- [12] The SAURON project - I. The panoramic integral-field spectrograph / R. Bacon, Y. Copin, G. Monnet et al. // *MNRAS*. — 2001. — sep. — Vol. 326, no. 1. — P. 23–35. — astro-ph/0103451.
- [13] PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. I. Design, Manufacture, and Performance / Martin M. Roth, Andreas Kelz, Thomas Fechner et al. // *PASP*. — 2005. — jun. — Vol. 117, no. 832. — P. 620–642. — astro-ph/0502581.
- [14] Courtes G. An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes // *IAU Colloq. 67: Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes* / Ed. by C. M. Humphries. — 1982. — Vol. 92. — P. 123.
- [15] Afanasev V. L., Dodonov S. N., Moiseev A. V. "Kinematics of circumnuclear regions of galaxies: 2D spectroscopy on SAO RAS 6m telescope // in *Stellar dynamics: from classic to modern*, Edited by L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov. — 2001. — P. 103–109.
- [16] Afanasev V. L., Egorov O. V., Perepelitsyn A. E. IFU unit in SCORPIO-2 focal reducer for integral-field spectroscopy on the 6-m telescope of the special astro-

- physical observatory of the russian academy of sciences // *Astrophysical Bulletin*. — 2018. — Jul. — Vol. 73, no. 3. — P. 373–386.
- [17] Observations of io's sodium cloud and torus / K. Jockers, N. Thomas, T. Bonev et al. // *Advances in Space Research*. — 1992. — Vol. 12, no. 8. — P. 347–351.
- [18] Moiseev A., Perepelitsyn A., Oparin D. Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaN-GaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes // *Experimental Astronomy*. — 2020. — sep. — Vol. 50, no. 2-3. — P. 199–214. — 2005.14598.
- [19] Courtes G. Technique d'observation de l'emission monochromatique interstellaire // *Astronomical Optics and Related Subjects, Proceedings of a symposium held 19-22 April, 1955 at the University of Manchester*. — Amsterdam: North Holland Publishing Company. — 1956. — P. 195.
- [20] Courtes G. Symposium on instrumental astronomy: Interferometric studies of emission nebulosities // *Astronomical Journal*. — 1964. — jun. — Vol. 69. — P. 325.
- [21] 3D structure of the H II region Sh2-235 from tunable-filter optical observations / M. S. Kirsanova, P. A. Boley, A. V. Moiseev et al. // *MNRAS*. — 2020. — sep. — Vol. 497, no. 1. — P. 1050–1058. — 1911.04551.
- [22] AGN photoionization of gas in companion galaxies as a probe of AGN radiation in time and direction / William C. Keel, Vardha N. Bennert, Anna Pancoast et al. // *MNRAS*. — 2019. — mar. — Vol. 483, no. 4. — P. 4847–4865. — 1711.09936.
- [23] Oparin D. V., Egorov O. V., Moiseev A. V. Ionized Gas in the NGC 3077 Galaxy // *Astrophysical Bulletin*. — 2020. — oct. — Vol. 75, no. 4. — P. 361–375. — 2010.02333.
- [24] EFOSC2 Episode IV: A New Hope / C. Snodgrass, I. Saviane, L. Monaco, P. Sinclair // *The Messenger*. — 2008. — jun. — Vol. 132. — P. 18–19.
- [25] ARDOLORES: an Arduino based motors control system for DOLORES / M. Gonzalez, H. Ventura, J. San Juan, L. Di Fabrizio // *Proc. SPIE, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*. — 2014. — jul. — Vol. 9147. — P. 6 pp.

- 
- [26] Successful commissioning of FORS1 - the first optical instrument on the VLT. / I. Appenzeller, K. Fricke, W. Fürtig et al. // The Messenger. — 1998. — dec. — Vol. 94. — P. 1–6.
- [27] Prime Focus Imaging Spectrograph for the Southern African Large Telescope: optical design / Eric B. Burgh, Kenneth H. Nordsieck, Henry A. Kobulnicky et al. // Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes / Ed. by Masanori Iye, Alan F. M. Moorwood. — Vol. 4841 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2003. — mar. — P. 1463–1471.
- [28] SCORPIO: prime Focus reducer of the BTA / V. L. Afanasev, E. B. Gazhur, S. R. Zhelenkov, A. V. Moiseev // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 2005. — Vol. 58. — P. 90–116.
- [29] SCORPIO-2 Guiding and Calibration System in the Prime Focus of the 6-m Telescope / V. L. Afanasev, V. R. Amirkhanyan, A. V. Moiseev et al. // Astrophysical Bulletin. — 2017. — oct. — Vol. 72. — P. 458–468.
- [30] Moiseev A. V., Egorov O. V. Reduction of CCD observations made with the Fabry-Perot scanning interferometer. II. Additional procedures // Astrophysical Bulletin. — 2008. — jun. — Vol. 63. — P. 181–192.
- [31] Moiseev A. V. Reduction of CCD observations made with a scanning Fabry-Perot interferometer. III. Wavelength scale refinement // Astrophysical Bulletin. — 2015. — oct. — Vol. 70. — P. 494–500.
- [32] Астрономические ПЗС-системы для 6-метрового телескопа БТА (обзор) / Мурзин В. А., Маркелов С. В., Ардиланов В.И. и др. // Успехи прикладной физики. — 2016. — Т. 4, № 5. — С. 500–506.
- [33] Перепелицын А. Е., Амирханян В. Р., Моисеев А. В. Система управления редуктора светосилы SCORPIO-2 // Труды ИПА РАН. — С. 44–53.
- [34] Поляризационные и интерферометрические измерения протяженных астрономических объектов на оптическом телескопе БТА: итоговый, этап №3: Отчет

- о НИР / рук. Афанасьев В.Л. — Нижний Архыз : CAO РАН, 2012. — С. 81–97. — № 01201273569. ГК № 14.740.11.0800.
- [35] Afanasiev V. L., Amirkhanyan V. R. Technique of polarimetric observations of faint objects at the 6-m BTA telescope // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — oct. — Vol. 67, no. 4. — P. 438–452. — 1510.05269.
- [36] Шергин В.С. Доступ из интернета к управлению БТА в реальном времени наблюдательного цикла // Труды Всероссийской научной конференции “Научный сервис в сети Интернет”. — 2003. — С. 153–155.
- [37] Karachentsev I. D. Galaxy counts to apparent magnitude 25 // *Soviet Astronomy Letters*. — 1980. — feb. — Vol. 6. — P. 3–6.
- [38] Marshall J. L., DePoy D. L. Flattening Scientific CCD Imaging Data with a Dome Flat Field System // *arXiv e-prints*. — 2005. — oct. — P. astro-ph/0510233. — astro-ph/0510233.
- [39] Performance Verification of the EXtreme PREcision Spectrograph / Ryan T. Blackman, Debra A. Fischer, Colby A. Jurgenson et al. // *The Astronomical Journal*. — 2020. — may. — Vol. 159, no. 5. — P. 238. — 2003.08852.
- [40] Schubert E. F. *Light-Emitting Diodes* - 2nd Edition. — 2006.
- [41] Vanderriest C., Courtès G., Donas J. Field spectrography with optical fibers in Astronomy: development of a ground-based instrument; proposals for the Space Telescope // *Journal of Optics*. — 1984. — sep. — Vol. 15, no. 4B. — P. 237–241.
- [42] Fibre Optics at the 4.2-METER Telescope - WHT / William Herschel Telescope / S. Arribas, P. M. Gray, R. Terlevich et al. // *Astrophysics and Space Science*. — 1990. — sep. — Vol. 171, no. 1-2. — P. 293–296.
- [43] 3D spectrography at high spatial resolution. I. Concept and realization of the integral field spectrograph TIGER. / R. Bacon, G. Adam, A. Baranne et al. // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. — 1995. — oct. — Vol. 113. — P. 347.
- [44] Design of an Integral Field Unit for MUSE, and Results from Prototyping / Florence Laurent, Francois Henault, Edgard Renault et al. // *PASP*. — 2006. — nov. — Vol. 118, no. 849. — P. 1564–1573.

- 
- [45] The James Webb Space Telescope / Jonathan P. Gardner, John C. Mather, Mark Clampin et al. // *Space Science Reviews*. — 2006. — apr. — Vol. 123, no. 4. — P. 485–606. — astro-ph/0606175.
- [46] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *The Bell System Technical Journal*. — 1969. — Vol. 48, no. 9. — P. 2909–2947.
- [47] Jacquinot P. The luminosity of spectrometers with prisms, gratings, or fabry-perot etalons // *J. Opt. Soc. Am.* — 1954. — Oct. — Vol. 44, no. 10. — P. 761–765.
- [48] MMTF: The Maryland-Magellan Tunable Filter / S. Veilleux, B. J. Weiner, D. S. N. Rupke et al. // *AJ*. — 2010. — jan. — Vol. 139, no. 1. — P. 145–157. — 0908.1629.
- [49] Перепелицын А. Е., Моисеев А. В., Опарин Д. В. Редуктор светосилы MaNGaL с перестраиваемым фильтром для малых и средних телескопов // *Известия ГАО РАН. Труды VII Пулковской молодежной астрономической конференции*. — 2018. — Т. 226. — С. 65–70.
- [50] Buisson H., Fabry C., Bourget H. An application of interference to the the study of the Orion nebula. // *ApJ*. — 1914. — oct. — Vol. 40. — P. 241–258.
- [51] Integral methods in astronomical spectroscopy / V. E. Panchuk, M. E. Sachkov, M. V. Yushkin, M. V. Yakopov // *Astrophys. Bull.* — 2010. — Vol. 65. — P. 75–94.
- [52] Courtès G. Méthodes d’observation et étude de l’hydrogène interstellaire en émission // *Annales d’Astrophysique*. — 1960. — feb. — Vol. 23. — P. 115.
- [53] Tully R. B. The Kinematics and Dynamics of M51. 11. Axisymmetric Properties // *apjs*. — 1974. — may. — Vol. 27. — P. 437.
- [54] The JWST tunable filter imager (TFI) / R. Doyon, N. Rowlands, J. Hutchings et al. // *Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter* / Ed. by Jr. Oschmann, Jacobus M., Mattheus W. M. de Graauw, Howard A. MacEwen. — Vol. 7010 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2008. — jul. — P. 70100X.

- [55] Grantecan S. A., Cepa J. OSIRIS user manual. — 2014. — URL: <http://www.gtc.iac.es/instruments/osiris/>.
- [56] Засов А. В. Общая астрофизика: задачи астрофизического практикума. — Проект Heritage ГАИШ МГУ. — 2009. — URL: <http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zasov/index.html>.
- [57] Thorne A. P. Spectrophysics. — 2nd edition / Ed. by Chapman, Hall Ltd. — 1988.
- [58] Jones D. H., Shopbell P. L., Bland-Hawthorn J. Detection and measurement from narrow-band tunable filter scans // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2002. — 02. — Vol. 329, no. 4. — P. 759–774.
- [59] Boulesteix J. ADHOCw software. — 2014. — URL: <http://www.astro.umontreal.ca/fantommm/Modedemploi/>.
- [60] A guide to TAURUS-2 Fabry-Perot data reduction / Scott Gordon, Bärbel Koribalski, Sally Houghton, Keith Jones // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2000. — 06. — Vol. 315, no. 2. — P. 248–262.
- [61] Bland J., Tully R. B. The Hawaii imaging Fabry-Perot interferometer (HIFI) // Astronomical Journal. — 1989. — aug. — Vol. 98. — P. 723–735.
- [62] Arsenault R. User's Manual for Scanning Fabry-Perot Spectrography. — 1997. — URL: <https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Spectroscopy/Fabry-Perot/mosaicfp1.html>.
- [63] Справочник конструктора оптико-механических приборов / Панов В. А., Кругер М. Я., Кулагин В. В. и др. ; Под ред. Панова В. А. — 3-е издание. — 1980. — С. 742.
- [64] Karachentsev I. D., Kaisin S. S. A View of the M81 Galaxy Group via the H $\alpha$  Window // AJ. — 2007. — may. — Vol. 133. — P. 1883–1902. — astro-ph/0701465.



# Приложение А

## Светодиодная калибровочная система адаптера

**Таблица А1.** Характеристики светодиодов

| No | $\lambda_{real\ max},$<br>Å | $\lambda_{typ\ max},$<br>Å | LED name       | $U_{typ},$<br>V | $U_{typ\ max},$<br>V | $I_{typ},$<br>mA | $U_{real},$<br>V | $R_{real},$<br>Ohm |
|----|-----------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 0  | –                           | 3570                       | XSL355-5E      | 3.6             | 4.2                  | 25               | 3.56             | 51                 |
| 1  | 3733.65                     | 3610                       | XSL360-3E      | 3.6             | 4.2                  | 25               | 3.57             | 51                 |
| 2  | 3735.51                     | 3650                       | RLT365-525     | –               | –                    | –                | 4.27             | -0-                |
| 3  | 3750.36                     | 3750                       | LED375-04      | 3.8             | 4.3                  | 20               | 3.58             | 39                 |
| 4  | 3876.59                     | 3850                       | LED385-04      | 3.5             | 4.0                  | 20               | 3.95             | 33                 |
| 5  | 3986.11                     | 3950                       | RLU395-8-30    | 3.7             | 4.0                  | 20               | 3.73             | 39                 |
| 6  | 4056.65                     | 4050                       | GB333UV1CL1    | 3.7             | 4.5                  | 20               | 3.42             | 270                |
| 7  | 4179.16                     | 4200                       | LED420-01      | 3.4             | 4.0                  | 20               | 2.91             | 1000               |
| 8  | 4342.52                     | 4350                       | LED-435-12-30  | 3.5             | –                    | 20               | 2.72             | 2000               |
| 9  | 4520.72                     | 4500                       | LED450-01      | 3.3             | 4.0                  | 20               | 2.61             | 2700               |
| 10 | 4687.79                     | 4680                       | B5B-437-IX     | 3.2             | 3.8                  | 20               | 2.97             | 560                |
| 11 | –                           | 5070                       | B3B-443-B505   | 3.5             | 4.0                  | 20               | 2.64             | 470                |
| 12 | 4951.38                     | 4900                       | LED490-03U     | 3.8             | 4.3                  | 20               | 2.84             | 2000               |
| 13 | –                           | –                          | “white china”  | 2.9             | –                    | –                | 2.93             | 360                |
| 14 | –                           | 6100                       | LED610-03V     | 2.0             | 2.3                  | 20               | 1.80             | 3600               |
| 15 | 5914.80                     | 6250                       | B5-435-30      | 2.0             | 2.4                  | 20               | 1.98             | 620                |
| 16 | 6341.75                     | 6280                       | B5-435-TL      | 2.2             | 2.6                  | 20               | 1.76             | 4700               |
| 17 | 6443.85                     | 6390                       | OPE5T64UR      | 2.0             | 2.3                  | 20               | 1.72             | 1500               |
| 18 | 6562.65                     | 6600                       | B5-436-30D     | 2.0             | 2.4                  | 20               | 1.66             | 1800               |
| 19 | –                           | –                          | –              | –               | –                    | –                | –                | –                  |
| 20 | 7041.58                     | 7000                       | ELD-700-524-1  | 1.9             | 2.2                  | 20               | 1.58             | 2700               |
| 21 | 7294.03                     | 7200                       | ELD-720-524    | 2.0             | 2.4                  | 50               | 1.53             | 3600               |
| 22 | 7531.64                     | 7400                       | ELD-740-524    | 2.1             | 2.3                  | 50               | 1.61             | 2200               |
| 23 | 7624.45                     | 7600                       | LED-760-03AU   | 1.8             | 2.2                  | 50               | 1.40             | 3900               |
| 24 | –                           | 7800                       | ELD-780-524    | 1.7             | 2.0                  | 20               | 1.43             | 2000               |
| 25 | 8069.96                     | 8100                       | ELD-810-525    | 1.4             | 1.7                  | 20               | 1.43             | 2400               |
| 26 | 8415.24                     | 8400                       | ELD-840-515    | 1.7             | 2.1                  | 100              | 1.45             | 1000               |
| 27 | 8745.66                     | 8700                       | ELD-870f-515-2 | 1.5             | 2.1                  | 100              | 1.24             | 1000               |
| 28 | 9159.61                     | 9100                       | LED910-01      | 1.4             | 1.7                  | 50               | 1.24             | 270                |
| 29 | 9517.88                     | 9700                       | LED970-xx      | 1.3             | 1.4                  | 50               | 1.24             | 130                |
| 30 | 10017.22                    | 10500                      | LED1050-03     | 1.2             | 1.5                  | 50               | 1.29             | -0-                |
| 31 | 10050.63                    | 10700                      | LED1070-03     | 1.1             | 1.5                  | 50               | 1.33             | -0-                |

“0-” в колонке сопротивлений обозначает перемычку на плате

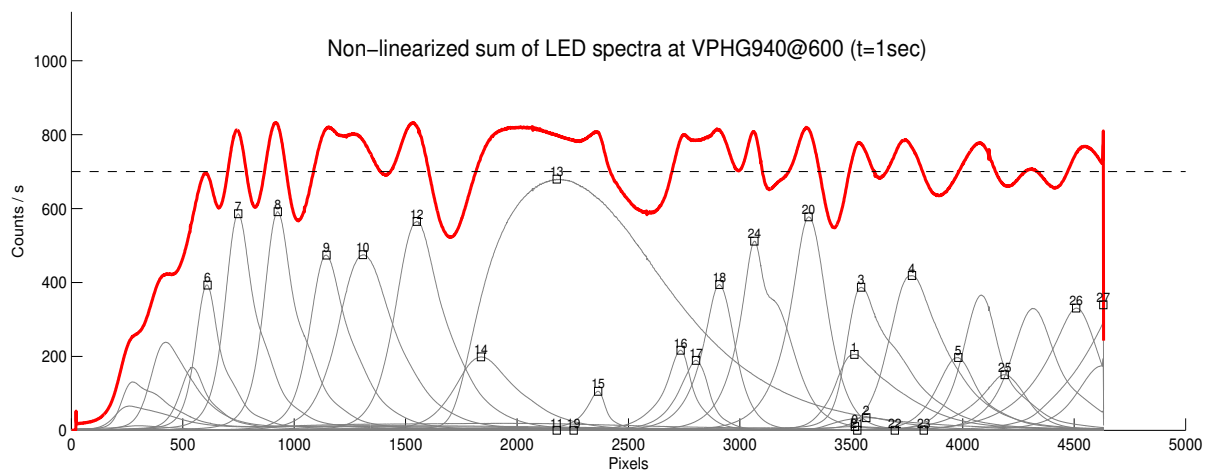


Рис. А1. Светодиодное “плоское поле” для решётки VPHG 940@600

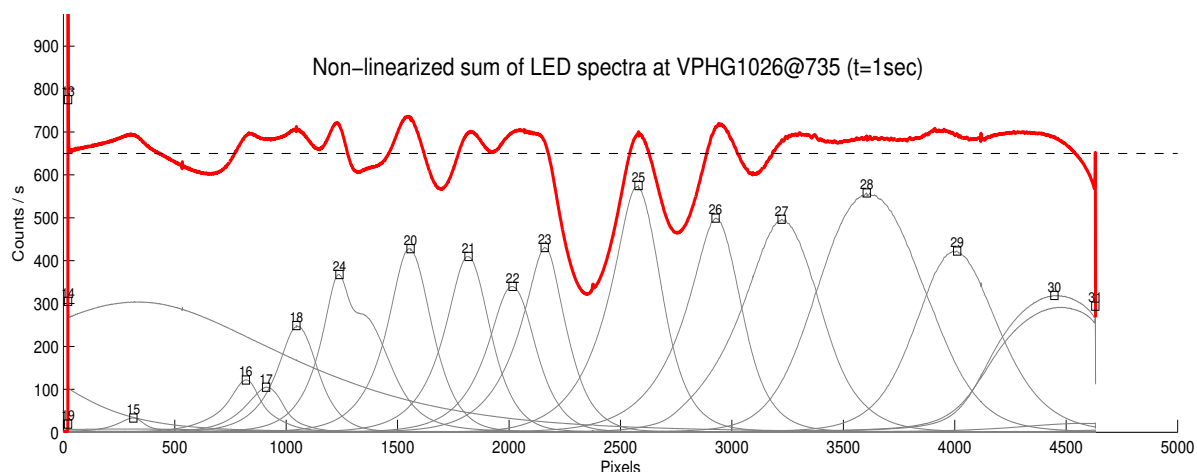


Рис. А2. Светодиодное “плоское поле” для решётки VPHG 1026@735

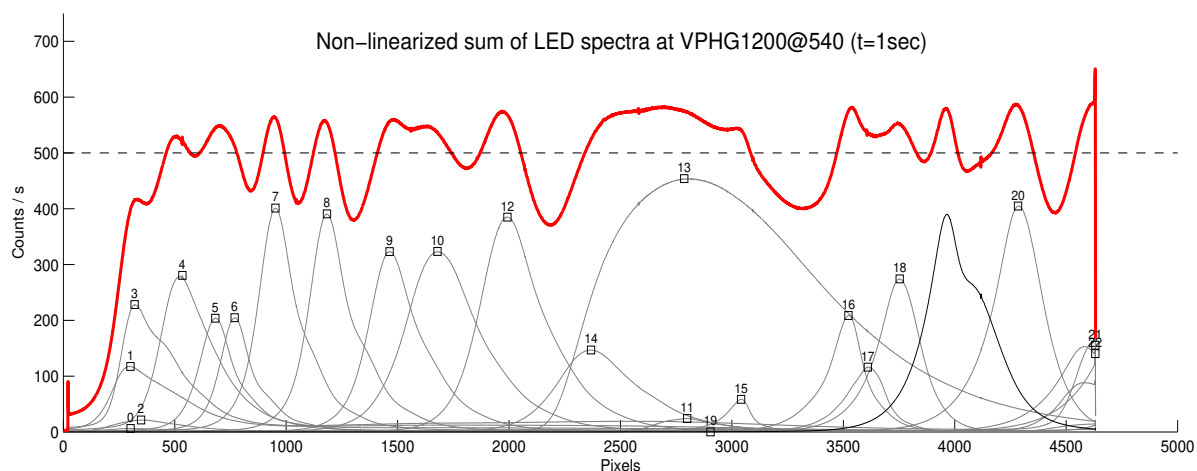


Рис. А3. Светодиодное “плоское поле” для решётки VPHG 1200@540

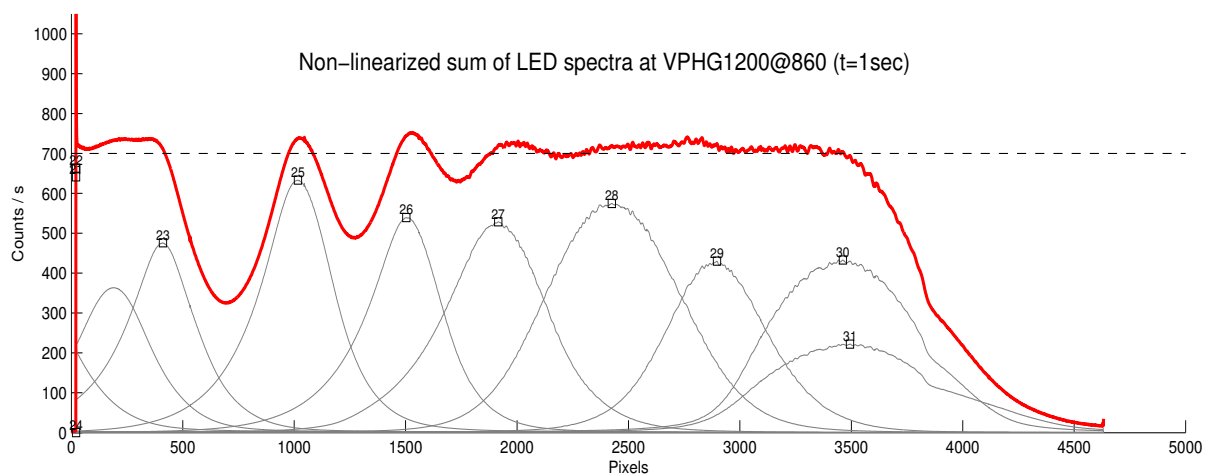


Рис. А4. Светодиодное “плоское поле” для решётки VPHG 1200@860

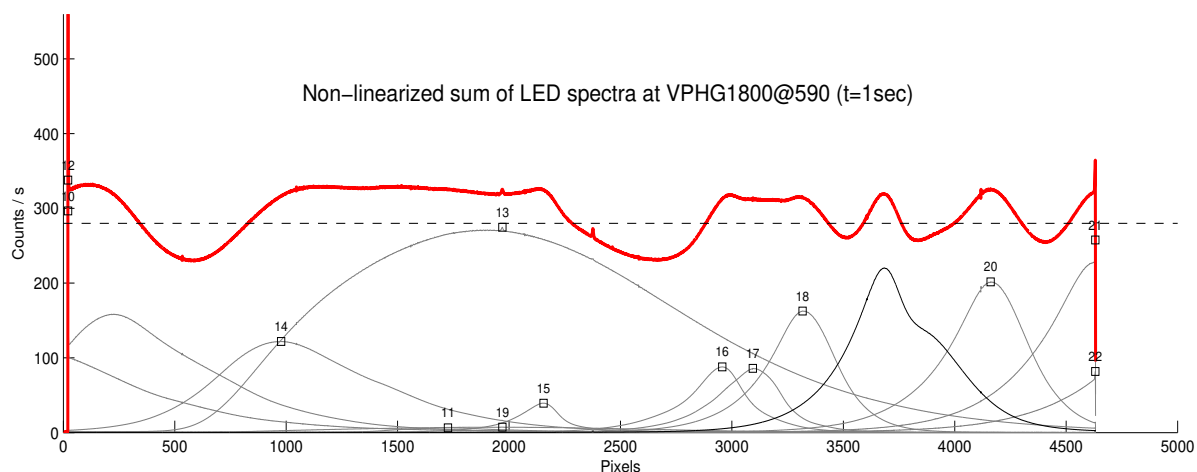


Рис. А5. Светодиодное “плоское поле” для решётки VPHG 1800@590

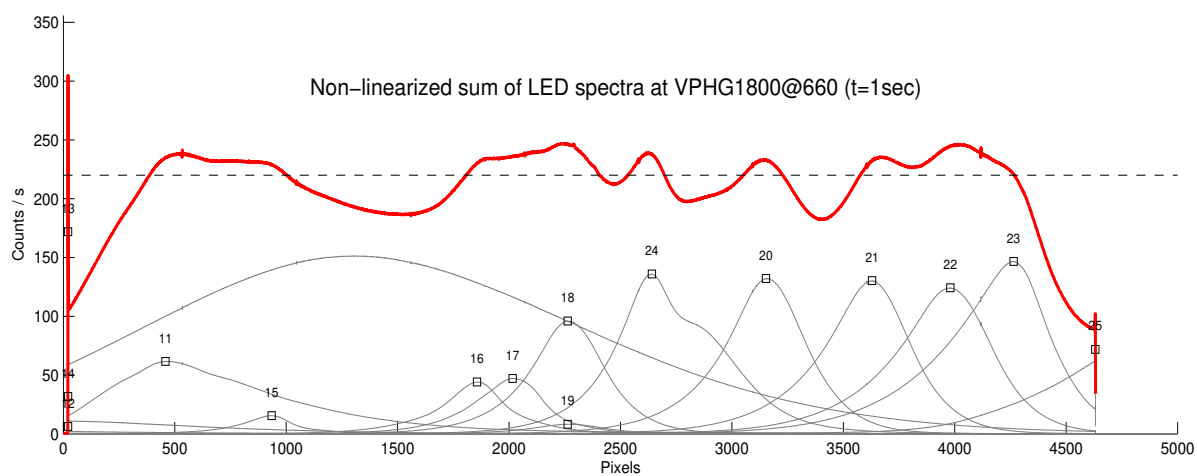


Рис. А6. Светодиодное “плоское поле” для решётки VPHG 1800@660