

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Специальная астрофизическая обсерватория

Российской академии наук

УДК 520; 523.3; 523.9; 524

№

УТВЕРЖДАЮ

Вр.и.о. директора САО РАН

член-корр. РАН Ю.Ю.Балега



«02» декабря 2014 г.

ОТЧЕТ

о прикладных научных исследованиях

«Развитие инструментальных средств крупнейшего российского оптического телескопа - Большого телескопа азимутального (УНУ БТА) для обеспечения наземных астрофизических исследований»

Шифр «2014-14-592-0002»

(промежуточный)

Этап 1: «Первый этап реализации Программы развития УНУ БТА»

(Соглашение № 14.619.21.0004 от 22 августа 2014 г.)

Руководитель работ,


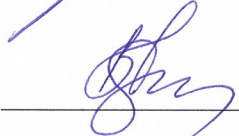

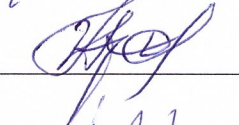
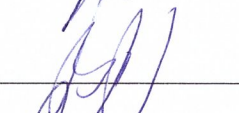
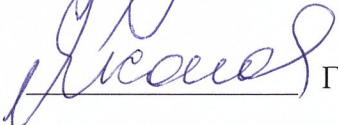


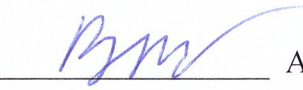
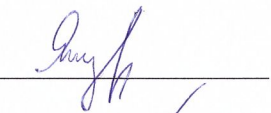
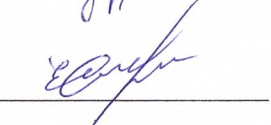

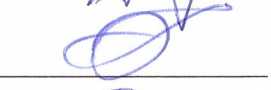


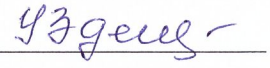
заместитель директора САО РАН

В.В.Власюк

Нижний Архыз

2014

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, к.ф.-м.н.		В.В. Власюк (введение, разделы 1,2,4,10, заключение)
Исполнители темы г.н.с, д.ф.-м.н.		В.Л. Афанасьев (разделы 1,2,3,7)
г.н.с, д.ф.-м.н.		В.Е. Панчук (разделы 1,2,6)
ст.н.с, к.ф.-м.н.		Н.В. Борисов (разделы 1,2,3,9)
с.н.с, к.ф.-м.н.		Г.Г. Валявин (разделы 1,6)
ст.н.с., к.т.н.		Г.В.Якопов (разделы 8,10)
ст.н.с., к.ф.-м.н.		А.Ф.Максимов (разделы 1,2,5)
аспирант		М.М. Габдеев (разделы 1,2)
аспирант		А.С. Винокуров (разделы 1,2)
м.н.с.		И.А. Якунин (разделы 1,2)
к.ф.-м.н.		Е.А. Семенко (разделы 1,2)
к.ф.-м.н.		Д.А. Растегаев (разделы 1,2,5)
к.т.н.		Э.В. Емельянов (разделы 1,2)
к.ф.-м.н.		А. С. Москвитин (разделы 1,2)
к.ф.-м.н.		Д. О. Кудрявцев (разделы 1,2)
нормоконтролер		Ш.А.Узденова

## Реферат

Отчет 165 с., 22 рис., 3 таб., 9 прил.

### АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ, СВЕТОПРИЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, КВАЗАРЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель настоящей работы — подготовка и проведение наблюдений астрофизических объектов методами оптической наземной астрономии, развитие методики исследований этих объектов, научно-методическое и приборное оснащение этих работ, развитие приборной базы УНУ БТА.

В рамках проведения второго этапа ПНИ проведены плановые наблюдения на УНУ БТА, обеспечены условия для проведения на УНУ БТА сторонними организациями, проведены мероприятия по развитию УНУ БТА в части повышения эффективности спектральных наблюдений.

В ходе ПНИ начаты работы по реализации Программы развития УНУ БТА на 2014-2015 годы в части повышения эффективности универсального спектрографа низкого разрешения SCORPIO-II, адаптации метода спекл-интерферометрии для работы в инфракрасной части спектра, разработки методики спектроскопии высокого разрешения и изготовления узлов высокоточного эшелле-спектрографа с оптоволоконным входом. Также разработаны и внедрены методика интегральной полевой спектроскопии для спектрографа первичного фокуса и методика измерения коэффициента отражения поверхности Главного зеркала УНУ БТА для проведения работ по его приемке.

В ходе работ проведено дооснащение объекта научной инфраструктуры необходимыми материалами и оборудованием, начата модернизация узлов приводного механизма УНУ БТА, начаты поисковые работы в целях модернизации систем энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии.

Проведен анализ работы УНУ БТА за истекший период 2014 года, подготовлены планы работ УНУ БТА на первое полугодие 2015 год.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ		6
1	Проведение плановых наблюдений на УНУ БТА	7
2	Обеспечение проведения исследований для сторонних организаций с использованием УНУ БТА	14
3	Изготовление волоконно-линзового блока ИПС и призм, разработка системы регистрации	17
4	Закупка оборудования и комплектующих	19
5	Разработка программного обеспечения для наблюдений и обработки данных	21
6	Разработка технического задания на изготовление всех узлов спектрографа, сдача этих узлов в изготовление	24
7	Разработка методики интегральной полевой спектроскопии для спектрографа первичного фокуса	28
8	Разработка методики измерений коэффициента отражения поверхности Главного зеркала УНУ БТА	29
9	Сертификация анализатора Шака-Гартмана для проведения цеховых измерений качества поверхности заготовки Главного зеркала	30
10	Работы по модернизации, содержанию и ремонту оборудования УНУ БТА	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		35
ЛИТЕРАТУРА		36
ПРИЛОЖЕНИЕ А		37
ПРИЛОЖЕНИЕ Б		53
ПРИЛОЖЕНИЕ В		65
ПРИЛОЖЕНИЕ Г		69
ПРИЛОЖЕНИЕ Д		85
ПРИЛОЖЕНИЕ Е		142
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж		152
ПРИЛОЖЕНИЕ И		163

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

УНУ БТА - уникальная научная установка Большой телескоп Альт-азимутальный

СЭК БТА – служба эксплуатации комплекса БТА

ИПС – интегральная полевая спектроскопия

SCORPIO - Spectral Camera with Optical Reducer for Photometrical and Interferometrical Observations = спектральная камера с оптическим редуктором для фотометрических и интерферометрических наблюдений

ИФП – интерферометр Фабри-Перо

SALT – South African Large Telescope = большой южноафриканский телескоп

## ВВЕДЕНИЕ

Большой Альт-азимутальный телескоп (УНУ БТА) с диаметром зеркала 6 метров, созданный в СССР в середине 70-х гг. XX века, остается основным источником наблюдательных данных для астрофизиков России. Несмотря на ввод в строй за рубежом все более мощных астрономических телескопов (от 6-м класса до инструментов с сегментированными зеркалами диаметром более 10 м) УНУ БТА пользуется спросом среди ученых Российской Федерации, стран СНГ и дальнего зарубежья. В целом работу телескопа обеспечивают более 100 сотрудников САО РАН – как научных работников, так и инженеров, рабочих, вспомогательного персонала, занятых в его текущем обслуживании, модернизации оборудования, создании новых методик научных исследований. Многолетние работы по Госконтрактам с Министерством образования и науки в 2007-2013 гг. позволили Специальной астрофизической обсерватории РАН решать эксплуатационные проблемы телескопа, задачи снабжения его текущей деятельности, развивать наблюдательные методы, своевременно обновлять инструментальный парк научного оборудования.

Цель настоящей работы, проводимой по Соглашению с Минобнауки, - обеспечение текущей деятельности телескопа БТА, включающее в себя как непосредственное проведение астрофизических исследований по научным программам, утверждаемым национальным программным комитетом, так и обеспечение текущего ремонта узлов и систем телескопа, развитие навесной аппаратуры, обеспечение возможностей доступа к возможностям телескопа, создание новых методик, повышающих эффективность использования оборудования УНУ БТА.

Основные результаты проводимых по контракту научных исследований в настоящем отчете представлены в соответствии с содержанием работ.

Актуальность работ, проводимых по контракту. В области фундаментальных исследований наблюдательная астрофизика обеспечивает получение новейших знаний о происхождении и эволюции объектов Вселенной. Этот вопрос является самым важным в естествознании. Результаты астрофизических исследований, полученных сегодня, составят основу для развития физических наук человечества в XXI веке.

В отчете приводятся результаты исследований, проведенных за отчетный период 2014 года по перечисленным выше темам – обеспечению плановых наблюдений, предоставлению услуг внешним пользователям, повышению эффективности использования оборудования, разработке новых методик.

# 1 Проведение плановых наблюдений на УНУ БТА

В ходе проведения 1-го этапа ПНИ обеспечено проведение плановых наблюдений на УНУ БТА в соответствии с расписанием, утвержденным директором САО по результатам распределения времени на II полугодие 2014 года. Расписание приведено в Приложении А к настоящему Отчету.

Среди основных результатов, полученных в ходе проведения плановых наблюдений:

- 22-26.08.2014 - исследования массивных скоплений галактик (заявитель – И.Ф.Бикмаев) и спектроскопия выборки далеких объектов (заявитель – С.Н.Додонов). Оборудование – фокальный редуктор первичного фокуса БТА SCORPIO. В 2014 году продолжена работа по созданию полной выборки квазаров в поле 0940+50. Применяв цветовой критерий отбора в инфракрасном диапазоне к полученным нами данным поля 0940+50, мы создали выборку квазаров 1 типа. Всего выборка содержит более 200 объектов, из которых около половины имеют фотометрические  $Z > 2.2$ . Спектральные наблюдения на 6-м телескопе 22 объектов выборки выявило 12 новых квазаров, 4 объекта типа VL Лас, 1 белый карлик, 2 звезды спектрального класса К, три объекта не удалось идентифицировать. Примеры показаны на рисунке 1.

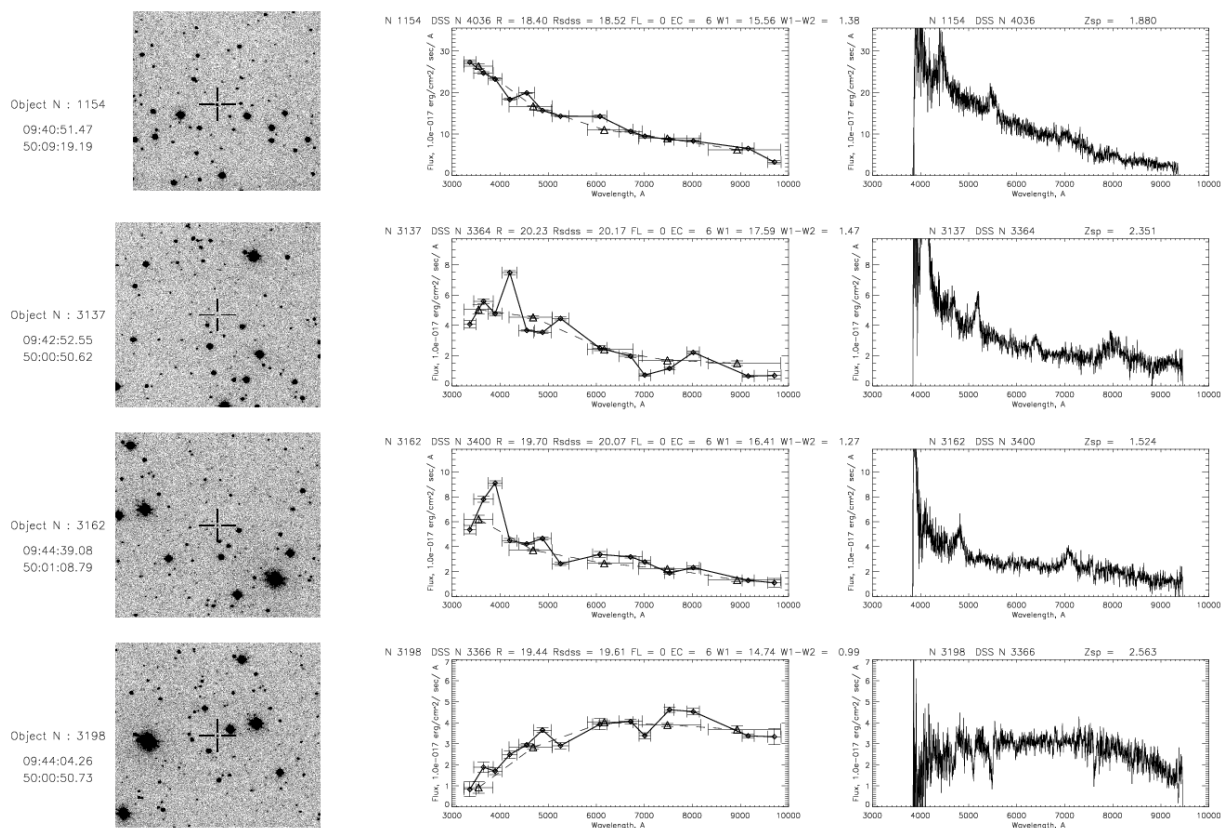


Рисунок 1 – Примеры выделения квазаров в поле 0940+50. Заявитель – С.Додонов (САО РАН).

- 03-07.09.2014 - спекл-интерферометрия магнитных и молодых звезд, заявители – Д.Растегаев, Ю.Балега и Е.Малоголовец (САО РАН). Оборудование – спекл-интерферометр. На рисунке 2 показан пример исследования кратных систем с намагниченным главным компонентом.

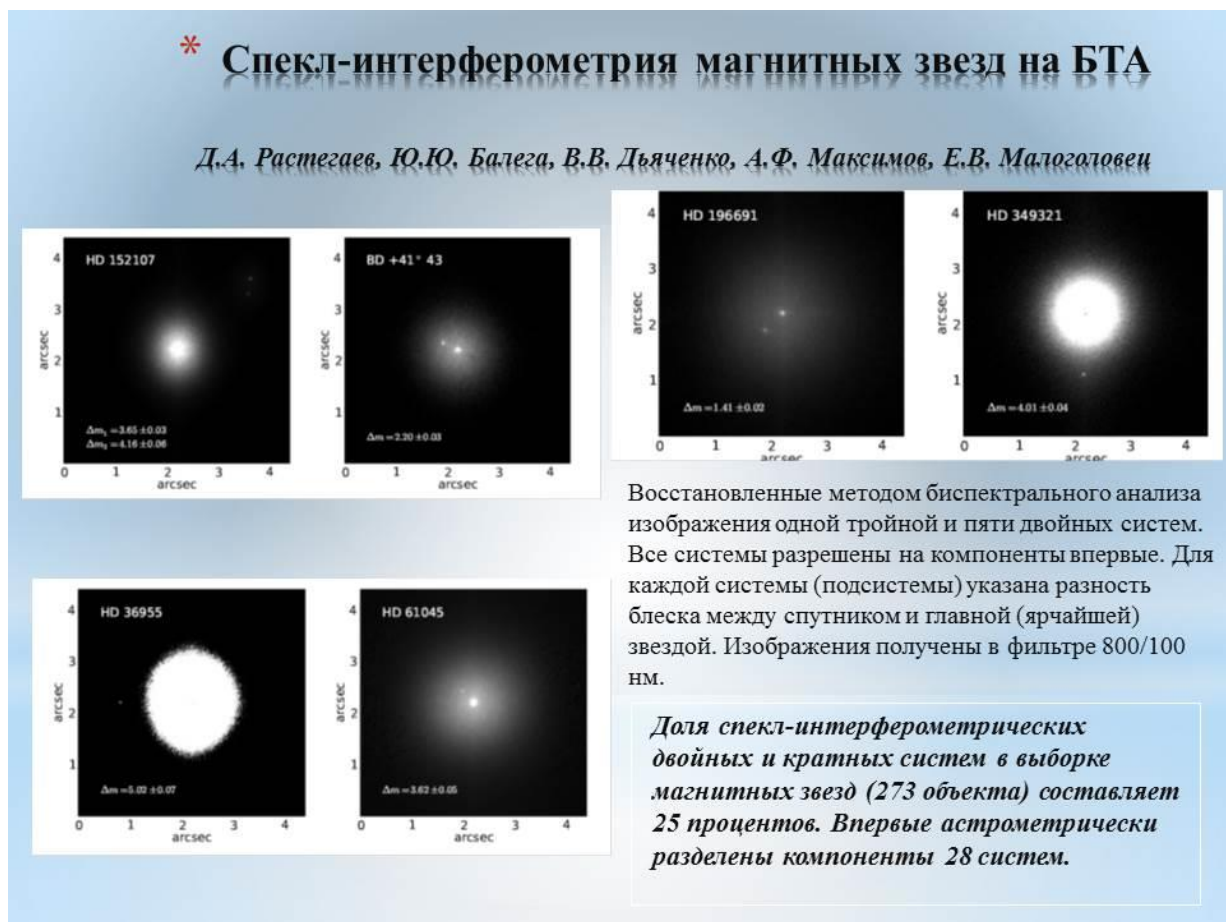


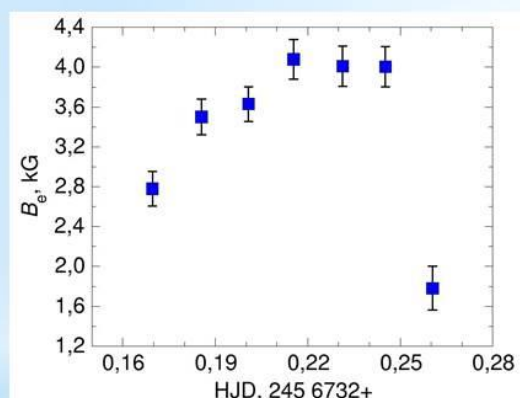
Рисунок 2 – Результаты спекл-интерферометрии кратных звезд на УНУ БТА.

Заявитель – Д.Растегаев (САО РАН).

- 11-14.09.2014 – исследования магнитных полей химически пекулярных звезд и поиск новых магнитных звезд. Заявители – Д.Кудрявцев (САО РАН) и G.Wade (Канада). Оборудование – Основной звездный спектрограф. На рисунке 3 показан результат определения вариаций магнитного поля с суточным периодом вращения RV34736.



## HD 34736 – новая звезда с сильным полем и суточным периодом вращения (Е.А.Семенко)



Вариация магнитного поля HD 34736 на протяжении 2 часов наблюдений с ОЗСП БТА

\* В октябре 2013 г. на 6-м телескопе во время выполнения обзора химически пекулярных звезд ассоциации Ori OB1 было обнаружено сильное (около 4 кГс) магнитное поле у звезды HD 34736. В декабре была выявлена переменность величины продольного поля и лучевой скорости звезды.

\* Изменения формы спектральных линий звезды со временем позволяют классифицировать ее как спектрально-двойную с ожидаемым орбитальным периодом около нескольких дней.

\* HD 34736 -- первая звезда среди химически пекулярных, которая сочетает в себе короткий период вращения, членство в короткопериодической двойной системе и столь сильное магнитное поле на поверхности.

Рисунок 3 – Данные по вариации магнитного поля HD34736, полученные в ходе плановых наблюдений на УНУ БТА в отчетный период. Заявитель – Е.Семенко (САО РАН).

- 25-29.10.2014 –изучение галактик низкой поверхностной яркости (Д.И.Макаров(САО РАН)), изучение дисков и звезд в близких галактиках (С.Фабрика (САО РАН)), исследования новых карликовых галактик в Местном объеме (И.Д.Караченцев (САО РАН)). Оборудование – фокальный редуктор SCORPIO. На рисунке 4 показаны результат исследования галактики низкой поверхностной яркости, предварительно обнаруженной заявителем в данных цифрового обзора неба, а затем детально исследованной спектральными средствами УНУ БТА. Полученные данные позволили надежно установить физические характеристики этой галактики.

## Пример галактики низкой поверхностной яркости J0243-0108 в Stripe82

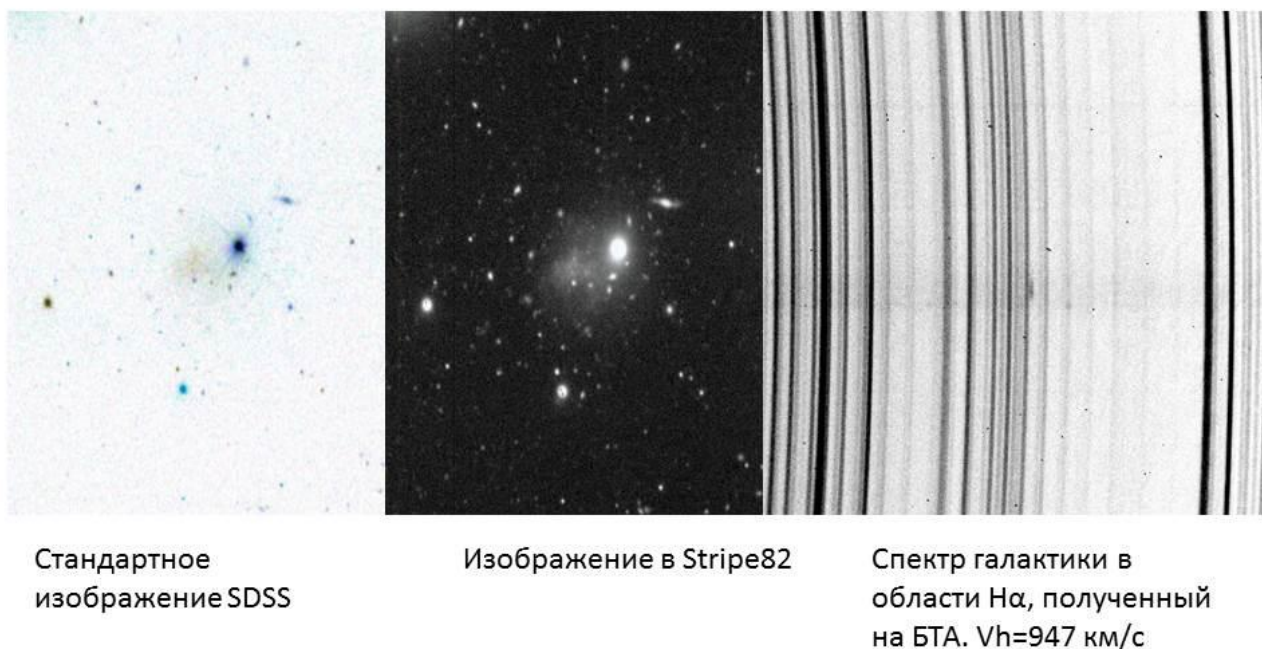


Рисунок 4 – Результаты исследования галактики низкой поверхностной яркости J0243-0108. Слева – изображение из цифрового обзора неба SDSS, в центре – изображение этой же области с лучшим пределом, справа – спектральное накопление, полученное с фокальным редуктором SCORPIO на УНУ БТА. Заявитель – Д.Макаров (САО РАН).

Аналитические данные, характеризующие загрузку УНУ БТА в первом полугодии 2014 года, приведены на нижеследующих рисунках. На рисунке 5 приведено количество рабочих часов УНУ в январе-июне 2014 года. Хорошо выделяются зимние месяцы, что нехарактерно для этого сезона. Для сравнения на рисунке 6 даны усредненные за 5 последних лет значения. По видимому, общее количество рабочих часов в 2014 году ожидается на уровне выше среднего за последние годы.

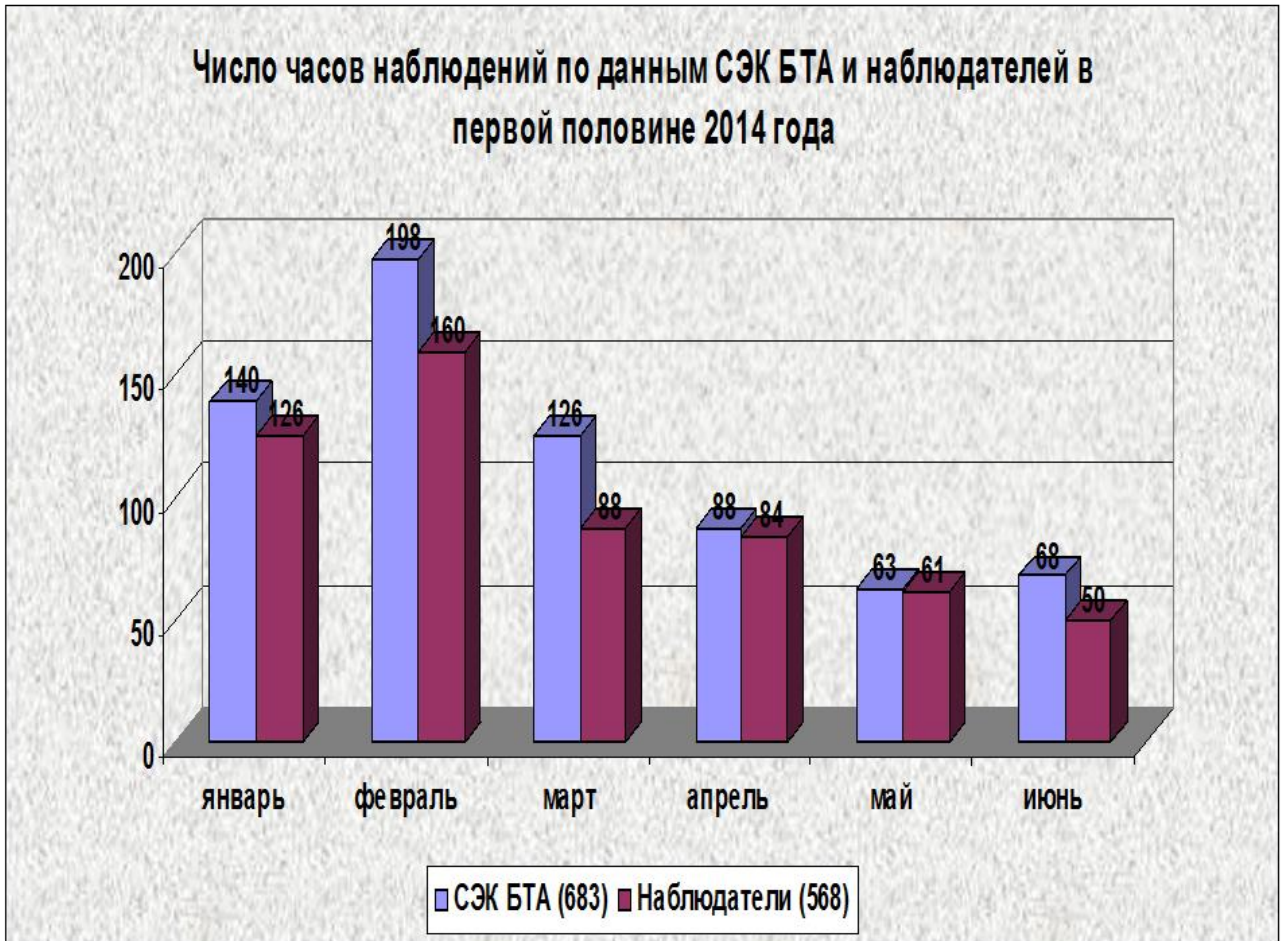


Рисунок 5 – Количество наблюдательного времени УНУ БТА в первом полугодии 2014 года.

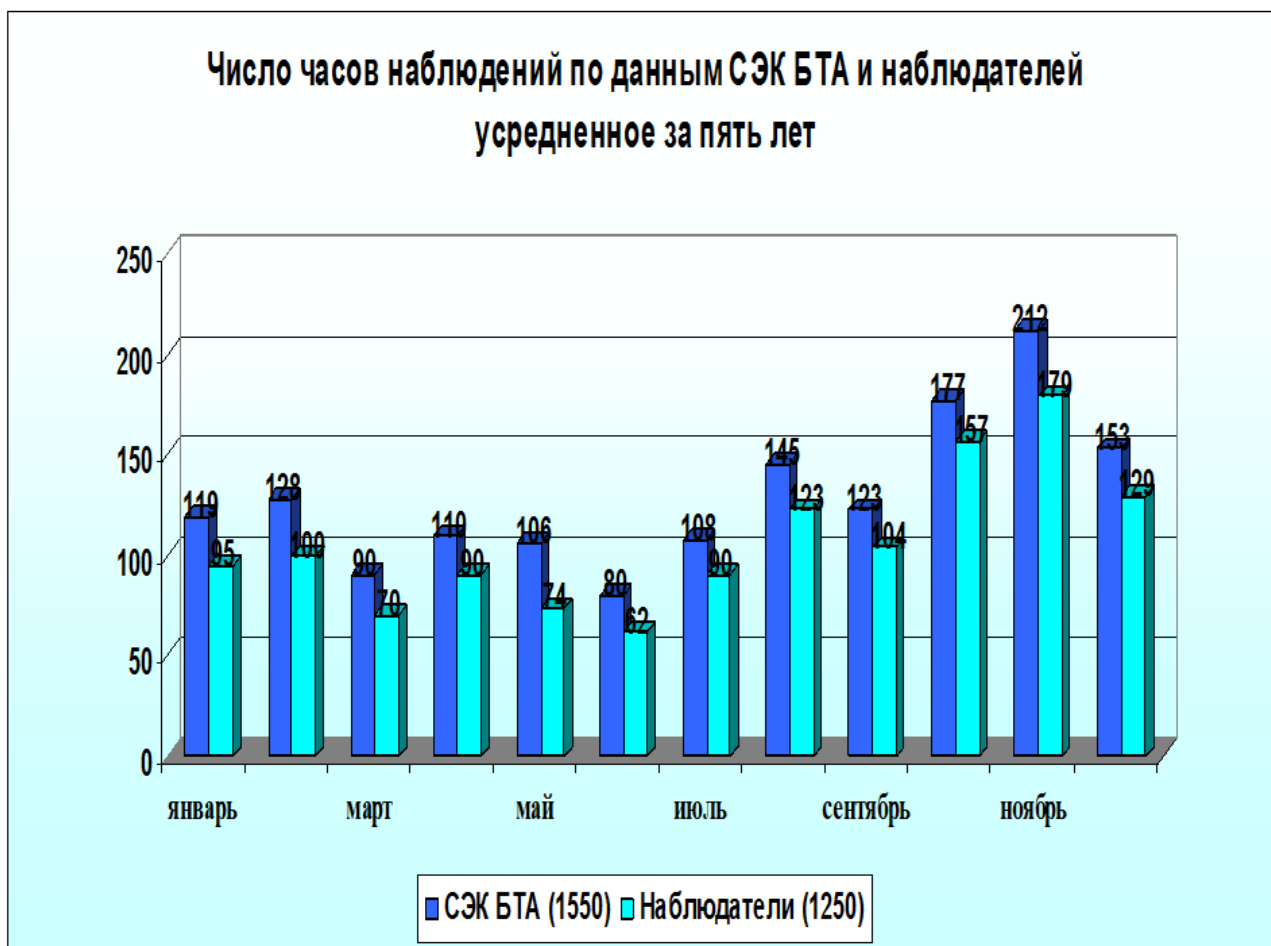


Рисунок 6 – Количество наблюдательного времени УНУ БТА, усредненное за 5 лет.

На рисунке 7 приведено распределение выделенного рабочего времени УНУ БТА между 6 используемыми методами. Как и в прежние годы, безоговорочным лидером остается фокальный редуктор SCORPIO. В планах на 2015 год – пробные исследования с новой версией прибора (SCORPIO-2). Нами планируется опытная эксплуатация SCORPIO-2 в режимах получения прямых снимков, спектроскопии с длинной щелью и интерферометрии Фабри-Перо. За счет более совершенной оптики и большего детектора ожидается выигрыш в качестве данных и ширине одновременно регистрируемого спектрального диапазона.

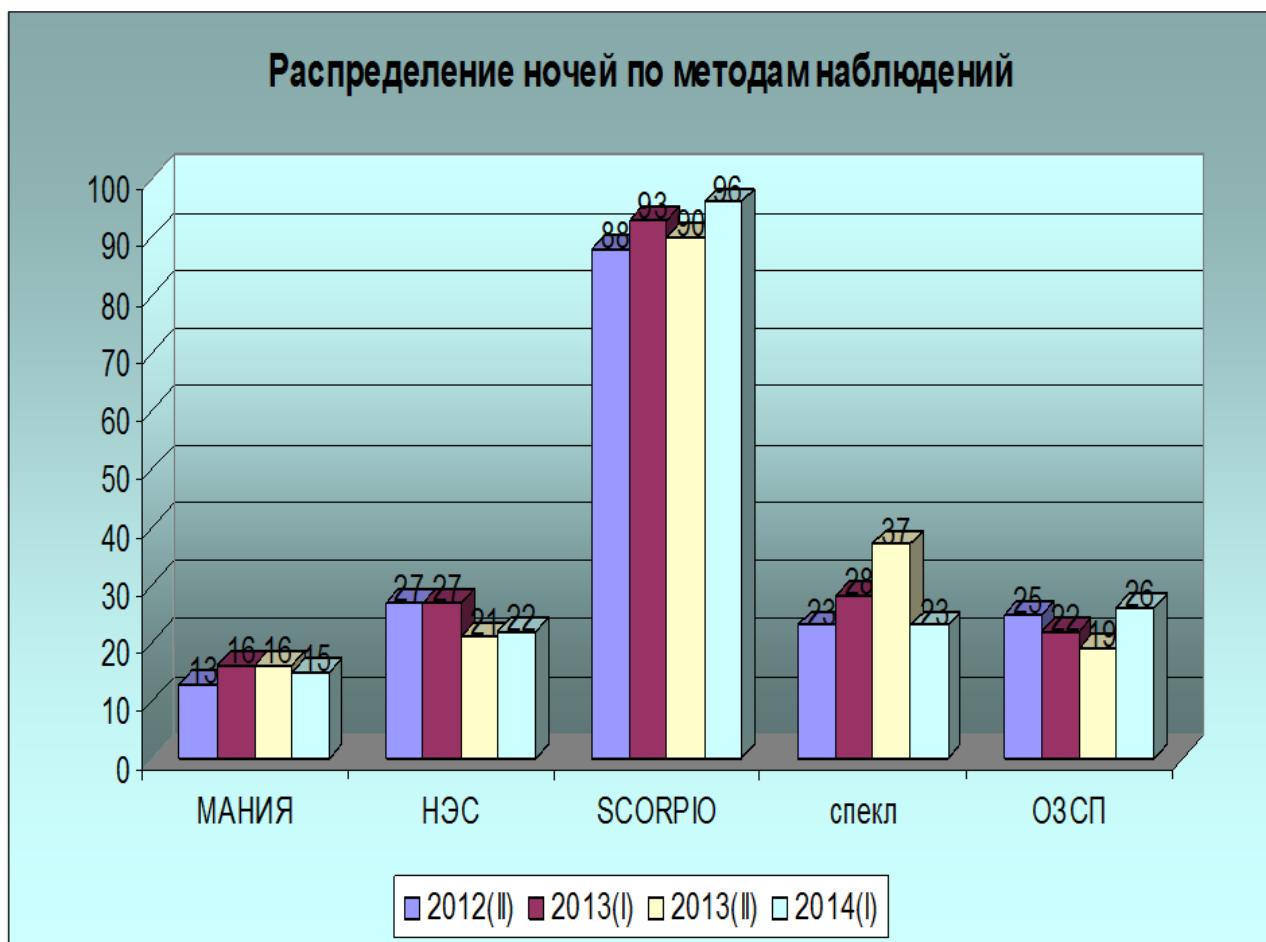


Рисунок 7 – Распределение выделенного календарного времени между наблюдательными методами УНУ БТА за последние 4 полугодия.

В приложении А к настоящему Отчету приведено расписание работы УНУ БТА на первое полугодие 2015 года, подготовленное в соответствии с решениями Комитета по тематике больших телескопов.

## 2 Обеспечение проведения исследований для сторонних организаций с использованием УНУ БТА

На следующих рисунках этого раздела приведен ряд наблюдательных результатов, полученных на УНУ БТА за отчетный период с использованием штатного оборудования УНУ, для заявителей из сторонних организаций. Основные результаты сейчас готовятся к печати в ведущих российских и зарубежных изданиях.

Из большого количества результатов нами отобраны наиболее результативные программы, демонстрирующие потенциальные возможности оптического 6-метрового телескопа.

По наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН с фокальным редуктором SCORPIO-2 в режиме сканирующего интерферометра Фабри-Перо в линии Н-альфа по программе Т.А.Лозинской (ГАИШ МГУ) была исследована кинематика ионизованного газа в гигантской сверхоболочке (ГСО) галактики IC 2574.

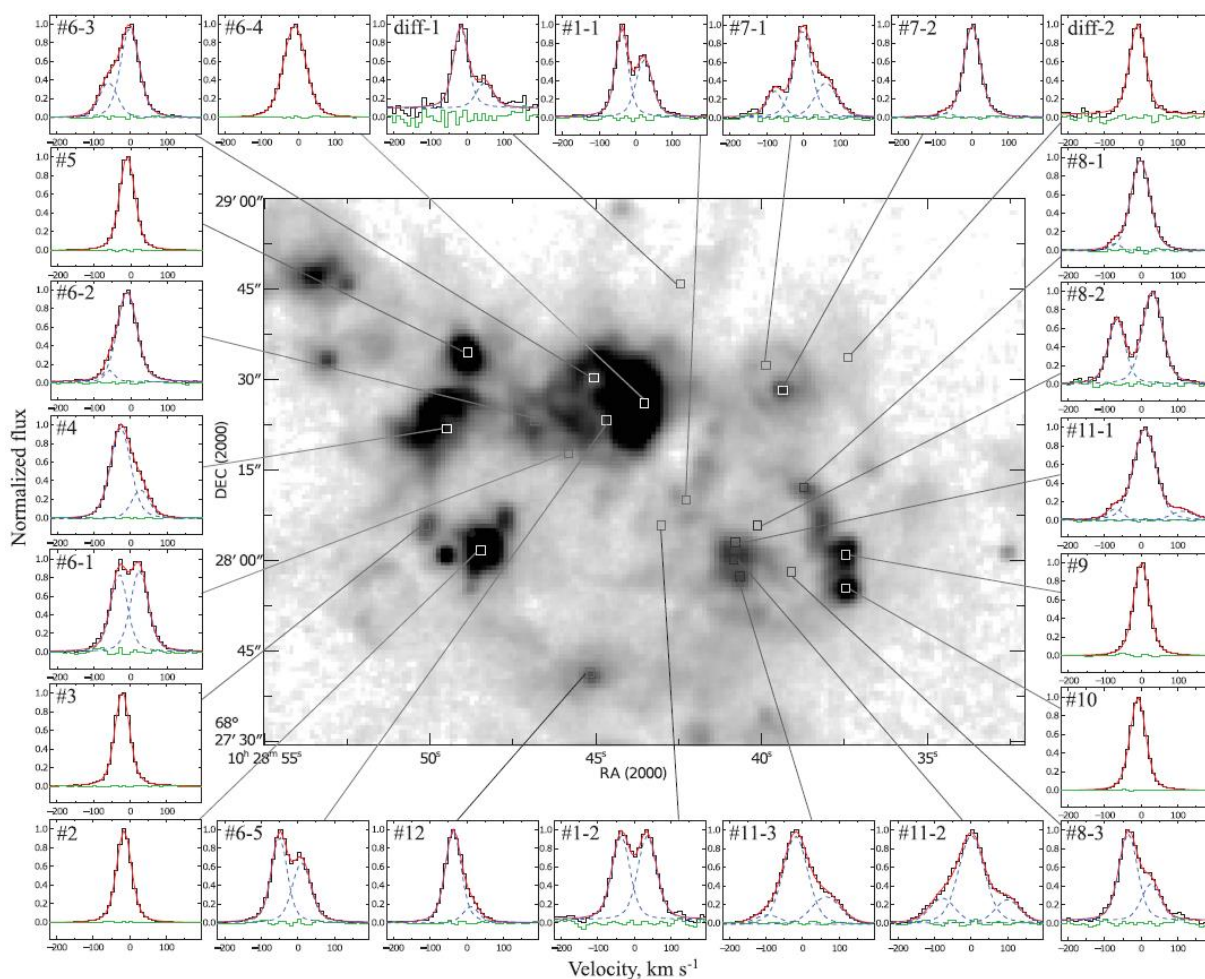


Рисунок 8 – Примеры профилей в линии  $H\alpha$ , построенные по наблюдениям галактики IC 2574 со сканирующим интерферометром Фабри-Перо на УНУ БТА в ходе ПНИ.

По полю скоростей HI была составлена модель вращения IC 2574, использованная для вычитания вращения галактики в кубах данных для H $\alpha$  и HI для исследования локальной кинематики межзвездной среды. Наше исследование кинематики HI в области ГСО подтверждает более ранние результаты о ее расширении. Показано, что ГСО находится на дальней стороне плоскости галактического диска. Панорамная спектроскопия в H $\alpha$  была использована для детального изучения комплексов звездообразования, выглядящие как оболочечные HI области в стенках ГСО. Для четырех комплексов измерены скорости расширения, кинематические возрасты и темп притока механической энергии, необходимый для их образования. Программа выполнялась в интервале 16-19.10.2014 г. и 14-20.12.2014 г.

В рамках изучения эмиссионных областей вокруг локальных активных галактик (заявитель – W.Keel, США) на УНУ БТА выполнены наблюдения выборки галактик, рядом с которыми расстояниях от ядра более 10 кпк обнаружены облака ионизованного газа. С помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо детально изучена кинематика газа в линии [OIII]. Показано, что движения газа в основном согласуются с кривой вращения галактик, т.е. он приобретен извне в результате приливного взаимодействия, а не выброшен из ядра.

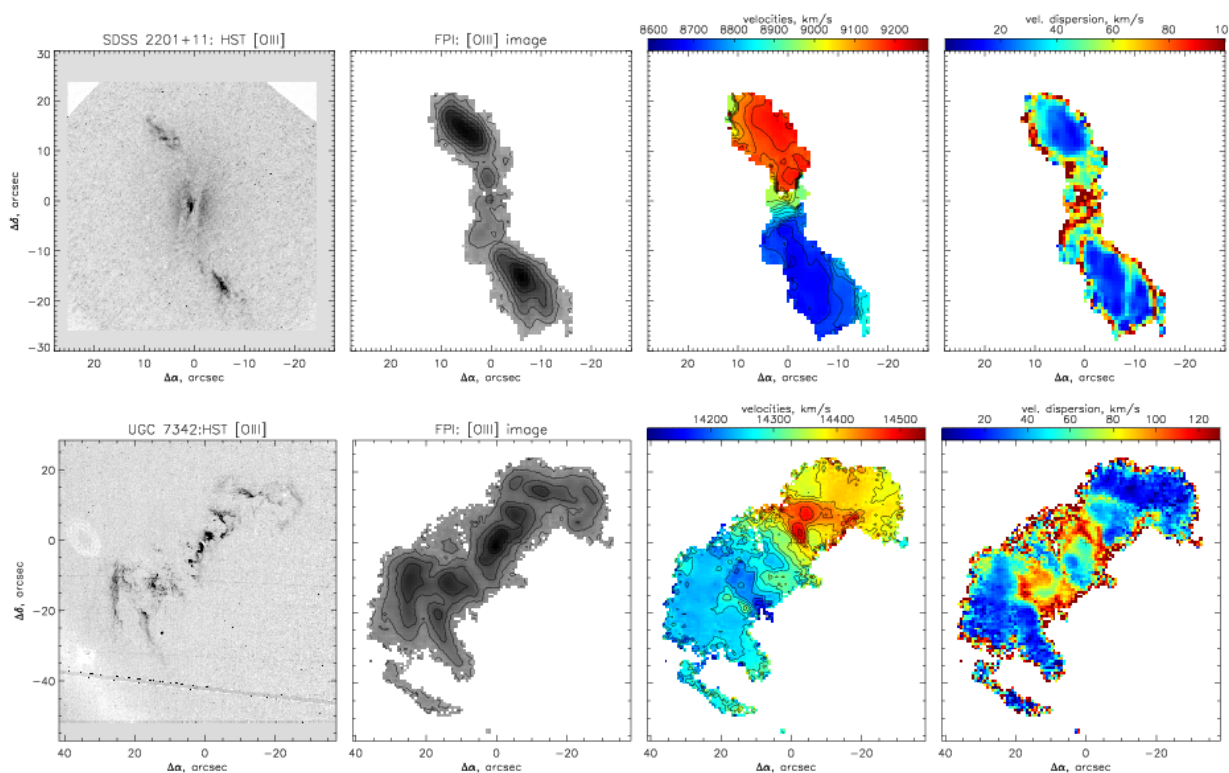


Рисунок 9 – Верхний ряд - галактика SDSS 2201+11, нижний - UGC 7342. Слева направо: изображения с Космического телескопа им.Хаббла в линии [OIII], изображение в той же линии с 6-м телескопа САО РАН, поля скоростей и дисперсии скоростей ионизованного газа.

С учетом имеющихся изображений, полученных для этих же галактик на космическом телескопе им. Хаббла, а также данных длиннощелевой спектроскопии, наблюдаемая картина согласуется с предположением об ионизации газа в приливных структурах активным ядром, светимость которого затем уменьшилась на шкале около 50 000 лет. Наблюдательная программа проводилась в наблюдательном сете 16-19.10.2014 г.

Уже несколько лет на УНУ БТА исследователями из CAO РАН совместно с европейскими учеными ведется программа исследования вспышек новых звезд в ближайшей к нам крупной спиральной галактике М31. Как правило, исследования выполняются в тесной кооперации, с использованием нескольких телескопов.

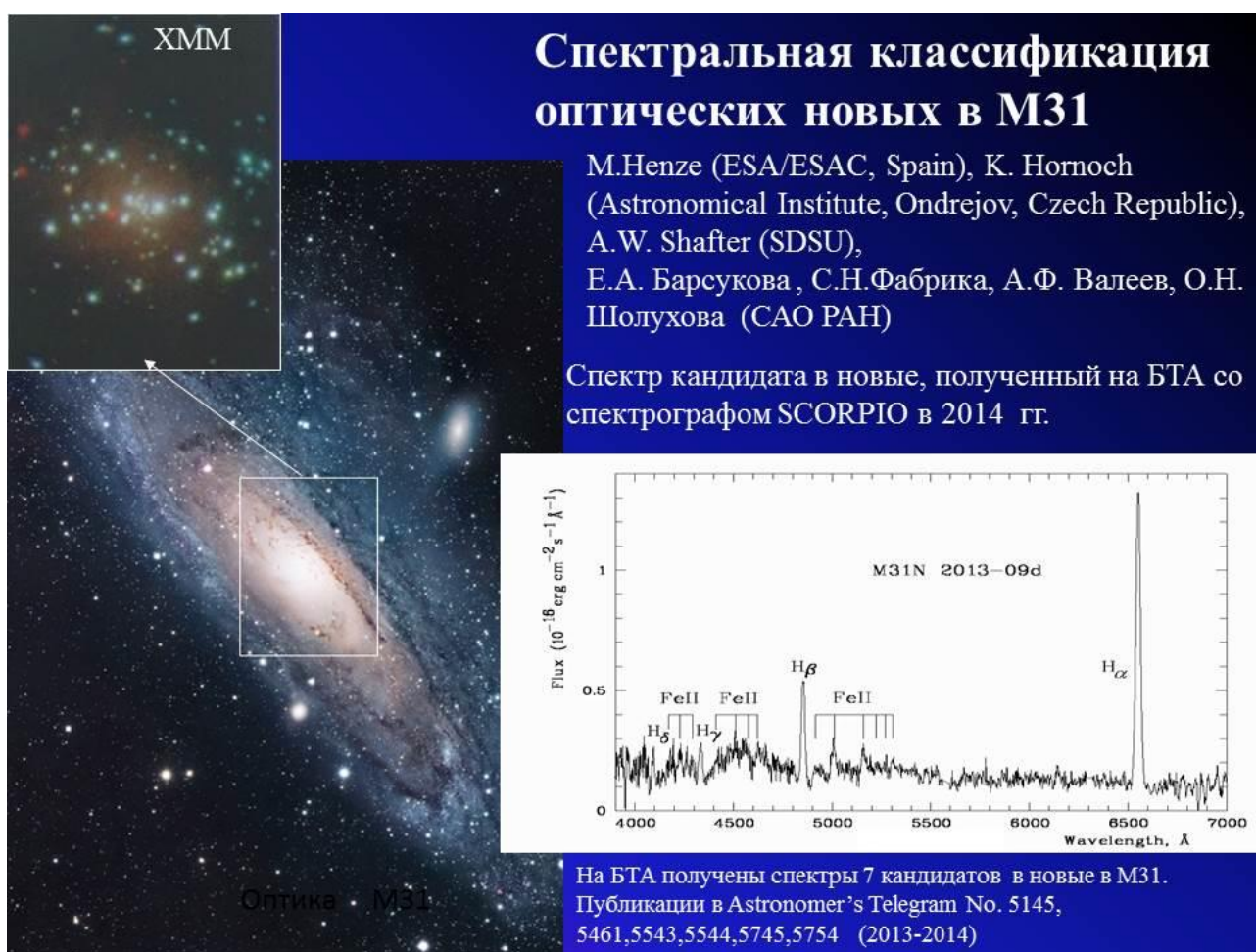


Рисунок 10. Результаты спектральной классификации оптических новых звезд в галактике М31 с фокальным редуктором SCORPIO по программе М. Henze (ESA, Испания).

На Рисунке 10 показан результат исследования одной из таких новых – на фокальном редуторе SCORPIO в режиме регистрации оптического спектра во всем спектральном диапазоне. Сейчас завершается анализ данных, полученных в ходе наблюдательного сета 30.08-02.09.2014 г.



### 3 Изготовление волоконно-линзового блока ИПС и призм, разработка системы регистрации.

#### 3.1 Изготовление волоконно-линзового блока ИПС

1. Разработан и изготовлен блок интегральной полевой спектроскопии (ИПС) для спектрографа SCORPIO, вводимый в спектрографе дистанционно, оптическая схема, которого показана на рисунке 11.

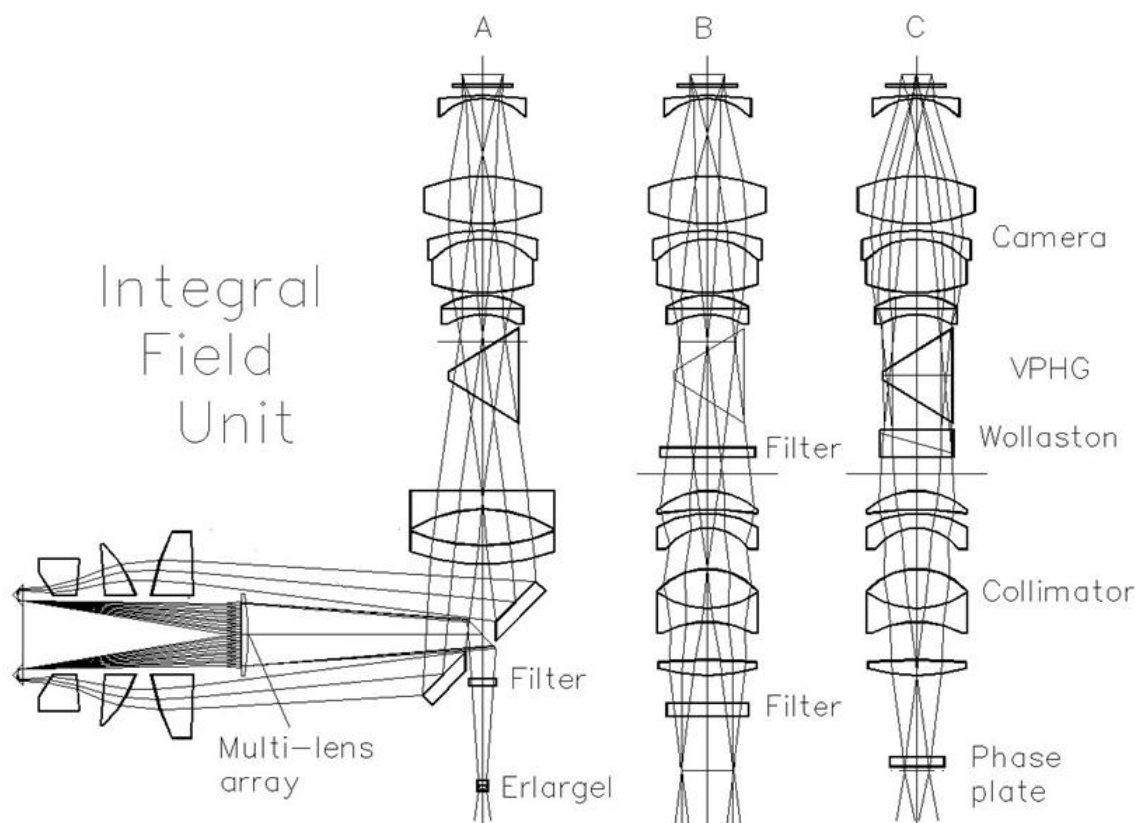


Рисунок 11 – Оптическая схема ИПС, вводимого в спектрографе SCORPIO, путем замены коллиматора и ввода вместо щели трех микрообъективов (enlarger lens).

2. Проведены лабораторные тесты для первого варианта  $22 \times 22$  элементов, которые показали правильность технического решения и соответствие качества оптики блока ИПС расчетному - кружок рассеяния по всему полю зрения  $62 \times 27$  мм не более  $3.5 \text{ px}$  ( $50 \text{ мкм}$ ) в диапазоне длин волн  $0.35\text{-}0.95 \text{ мкм}$ . При этом использовался линзовый блок  $24 \times 24$  квадратные микролинзы апертурой  $2 \times 2$  мм, что в проекции на небесную сферу составило  $0.75$  секунды дуги. Блок формировал матрицу микрозрачков, которая реформировалась в две псевдо щели при помощи волоконных световодов диаметром  $150 \text{ мкм}$  (размер монохроматического изображения торца световода в плоскости приемника  $5 \text{ px}$ ).

Паспорт на образец ИПС приведен в Приложении Б к настоящему Отчету.

### 3.2 Изготовление призм двойного Волластона.

Штатные наблюдения с классическим анализатором Волластона и вращающейся фазовой  $\lambda/2$  пластиной для однозначного измерения линейной поляризации предполагают получение 4-х изображений, содержащих пару спектров для обыкновенного и необыкновенного лучей (проекции электрического вектора 0 и 90 градусов). При этом пластина поворачивается на углы 0, 45, 22.5 и 67.5 градусов, а изображения получают последовательно. Нами реализована методика одновременного получения четырех спектров с использованием двойного анализатора Волластона, который выделяет излучение в четырех проекциях электрического вектора, а при этом достигнута точность измерения линейной поляризации  $\sim 0.1\%$ . На рисунке 12 показано сравнение наблюдаемых и измеренных величин.

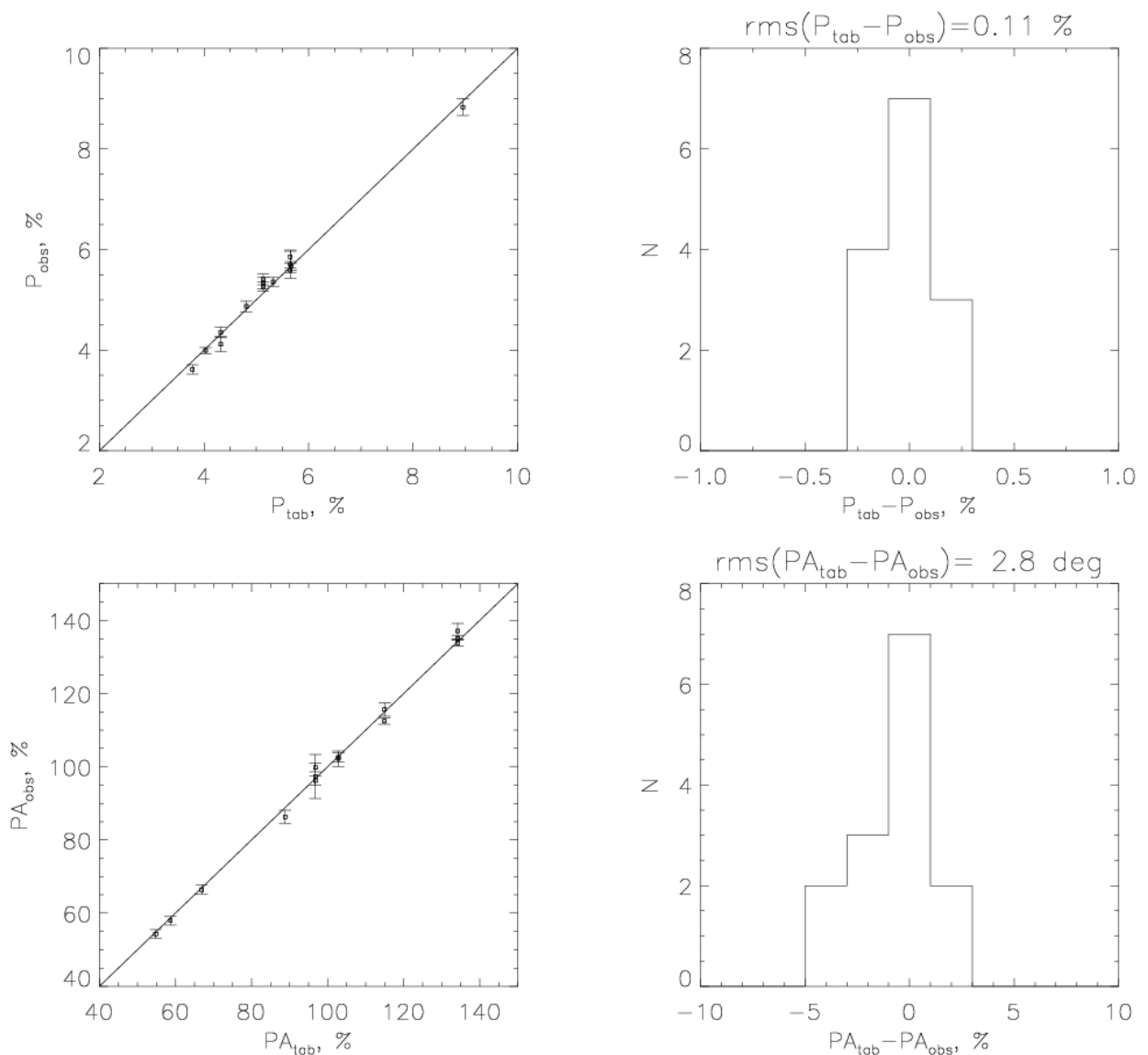


Рисунок 12 – Результат внедрения методики измерений с использованием двойной призмы Волластона. Вверху – измерения величины поляризации, внизу – значения угла поляризации.

Ошибки составляют 0.11% и 2.°8, соответственно.

Паспорт для опытного образца призмы двойного Волластона для поляриметрического блока спектрографа SCORPIO приведен в Приложении В к настоящему Отчету.

### 3.3 Разработка системы регистрации

Для решения задачи по повышению эффективности спектральных наблюдений с УНУ БТА одним из важных этапов является создание новой крупноформатной системы регистрации изображений, обладающей улучшенной чувствительностью в синей части спектра. В ходе ПНИ осуществлен выбор соответствующего типа и проведено его приобретения. Для реализации его потенциальных возможностей потребуются создание новой системы регистрации, в Приложении Г дано техническое задание на ее разработку. Изготовление такой системы планируется в ходе выполнения 2 и 3-м этапов работ по Соглашению.

## 4 Закупка оборудования и комплектующих

В ходе выполнения ПНИ проведены работы по дооснащению УНУ БТА необходимыми материалами и оборудованием в соответствии с п.3.1 раздела 3 Программы развития УНУ БТА на 2014-2015 годы. В частности, рефлектометр для оптики (поз.1) поставлен компанией ЭмЭсЭйчТехно (г.Москва) в соответствии с договором №УНУ-2014-03 от 29.09.2014 г. Закупка ПЗС-чипа CCD 261-84 (поз.2) осуществлена в декабре 2014 года по договору с ООО «Альтекс» (г.Москва). Для изготовления поляризационной оптики (поз.3) заключен договор УНУ-2014-01 от 1.10.2014 г. с ООО «ОПТЭЛ» (г.Санкт-Петербург). Договоры выполнены в декабре. Договор с ООО «Промышленная геодезия» ЭА-12-14 от 20.09.2014 г. на поставку абсолютного трекера Leica AT401/402 (поз.6) уже реализован, идут его испытания на УНУ БТА.

Приобретение и поставка системы регистрации ИК-диапазона SWIR InGaAs (поз.8 Программы) также осуществлено в декабре ООО «Альтекс» (г.Москва). Анализ рыночной конъюнктуры с учетом ограниченных возможностей по приобретению высокотехнологического оборудования привел нас к варианту приобретения охлаждаемой InGaAs системы регистрации производства компании Photonic Science Limited (Великобритания) с приемлемыми для нас параметрами. В частности, размер матрицы элементов – 640x512 элементов, спектральный диапазон – от 900 до 1700 нм, а собственные шумы системы не должны превышать 27 е. Детальные параметры системы приведены на Рисунке 13. Поставка оборудования проведена в декабре 2014 года, начато его внедрение.

В декабре осуществлена закупка вычислительного оборудования для реконструкции вычислительных сетей УНУ БТА и расширения возможностей хранения нарастающих объемов научных данных. Так, маршрутизатор CISCO UCS C240 (поз.12) и 24-портовые коммутаторы 3-го уровня Гбит Ethernet(поз.14) были поставлены ООО «Авалон» (г.Москва). Система хранения данных VNХе3150 (поз.13) была закуплена у ООО «Юпитер» (г.Санкт-Петербург). Документы, подтверждающие закупку и внедрение этого оборудования, даны в приложении Д к Отчету.

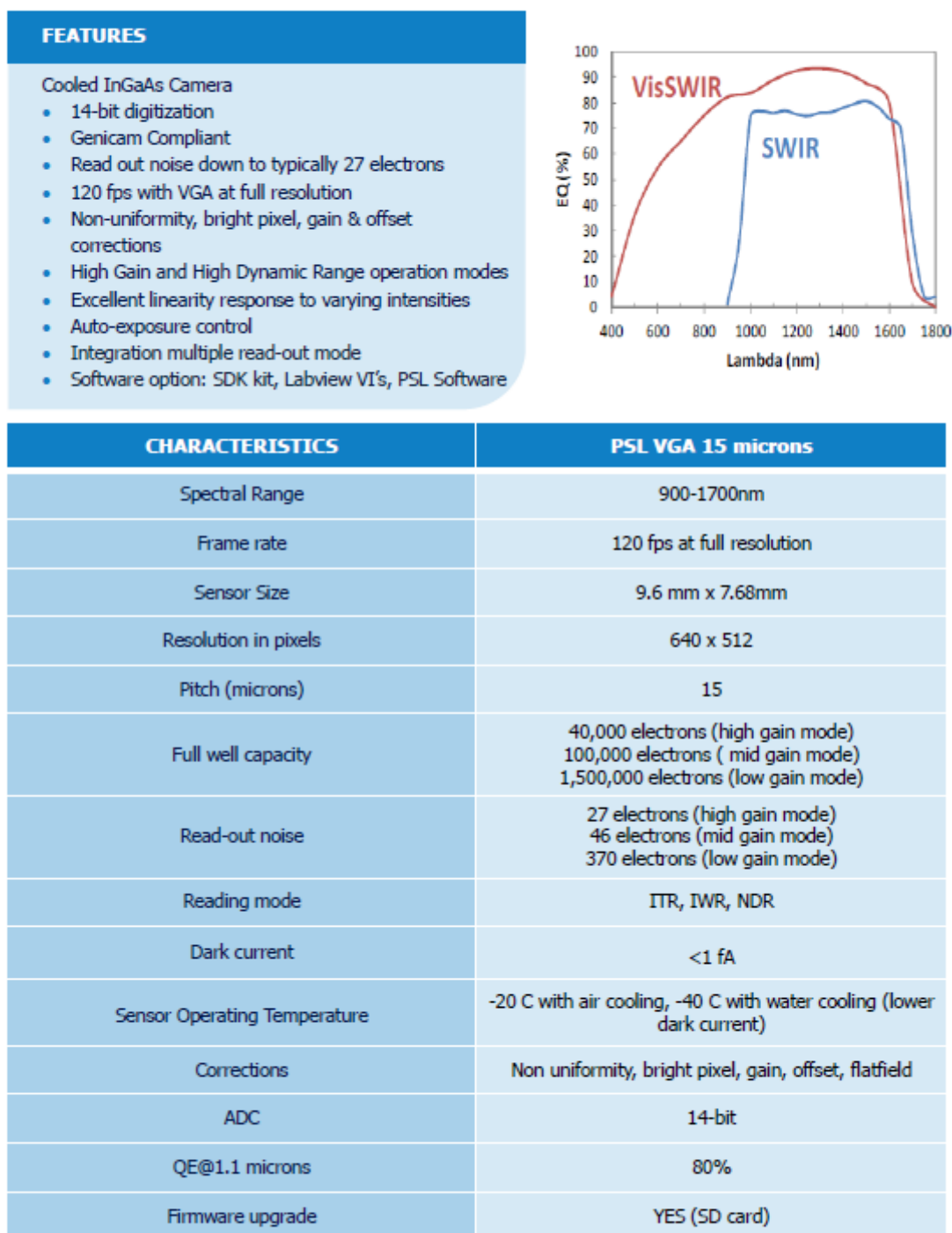


Рисунок 13 – Общие характеристики приобретенной системы регистрации ИК-диапазона.

## 5 Разработка программного обеспечения для наблюдений и обработки данных.

### 5.1 Программное обеспечение для спекл-интерферометрии

В ходе реализации этапа ПНИ проведена разработка необходимого программного обеспечения для анализа получаемых данных.

Звездная спекл-интерферометрия (от англ. speckle --- пятнышко, крапинка) --- метод наблюдения астрономических объектов, через турбулентную атмосферу, с дифракционным пределом разрешения. Это один из методов пространственной интерферометрии, основанный на анализе зернистой структуры телескопического изображения космических объектов. Возможность выявления деталей строения космических объектов зависит от четкости их изображений. Но даже в идеальном оптическом приборе четкость неизбежно ограничена дифракцией, и точечный источник излучения виден как диск с угловым размером  $\alpha \approx \lambda / D$ , где  $D$  - диаметр объектива телескопа. Поэтому реальное изображение протяженного источника, состоящего из многих излучающих точек, также всегда несколько размыто.

Метод спекл-интерферометрии (далее С.-и.) позволяет в значительной мере исключить размытость, вызванную искажениями в атмосфере и оптической системе телескопа, и довести разрешающую способность оптического прибора практически до дифракционной. В методе С.-и. регистрируют сильно увеличенное изображение с короткой экспозицией (порядка 0.01 сек). Оказывается, что оно состоит из множества мелких пятнышек-спеклов (зерен), которые возникают благодаря интерференции лучей света, попадающих в фокальную плоскость телескопа от разных участков объектива. Каждое такое пятнышко похоже на дифракционный диск в фокальной плоскости идеального телескопа, работающего вне атмосферы. Влияние атмосферы в реальных наземных условиях заключается в том, что дошедший от источника до телескопа волновой фронт всегда искажен оптическими неоднородностями атмосферы. Попадающие в телескоп волны имеют поэтому случайные фазовые задержки, а интерференционная картина в фокальной плоскости (мозаика пятен) непрерывно меняется (изображение объекта как бы кипит). При регистрации с малыми экспозициями фиксируется ``мгновенное" распределение пятен, а при больших экспозициях оно усредняется, изображение теряет свою тонкую структуру и приобретает размытый вид.

Процесс стандартной редукции изображения ПЗС использует базовый набор изображений. И для прямых снимков, и для фотометрических и спектроскопических приложений используются тот же самый набор изображений (хотя и полученный разными способами). Базовый набор изображений состоит из трех калибровочных или

вспомогательных кадров: подложка, темновое изображение и изображение плоского поля и кадров изображений объекта(ов) исследования.

Базовый набор калибровочных изображений в редукции изображений объекта используется следующим образом. Сначала из изображения объекта вычитается средний кадр подложки (или, если необходимо, темновое изображение). Затем получившееся изображение делится на среднее плоское поле (также с вычитенной подложкой). Эти два простых шага исправили ваше изображение объекта за уровень подложки (темновой ток, если необходимо) и за неоднородность чувствительности пикселей матрицы. Вероятно, что в дальнейшей обработке изображений ваших объектов, будет необходимо удалить или учесть фон или вклад неба в изображение. Эта коррекция уровня фона неба выполняется как часть конкретной обработки, использующей области ``неба" непосредственно в этом же кадре изображения, а не при помощи некоего отдельного кадра изображения неба.

В классическом варианте обработка спекл-изображений заключается в накоплении среднего спектра мощности (или автокорреляционной функции) серии мгновенных изображений объекта.

Из-за коротких времен накопления отдельных кадров (порядка 10-20 мсек) объем получаемых данных будет составлять десятки гигабайт в ночь, их хранение и обработка потребуют мощных вычислителей и устройств хранения информации.

## 5.2 Программное обеспечение для внедрения методики настраиваемого фильтра для спектрографа первичного фокуса.

Так как заказ и приобретение настраиваемого фильтра для спектрографа SCORPIO-II запланировано на 2015 г., то на этапе 2014 года выполнялись работы по разработке соответствующего матобеспечения, исходя из общих характеристик создаваемой системы, не привязанного к конкретным параметрам интерферометров Фабри-Перо (ИФП) в составе спектрографа SCORPIO-II.

Выполнен обзор описанных в литературе методов и алгоритмов редукции наблюдений с настраиваемым фильтром. За основу решено взять принципы, изложенные в статье (Jones, D. H. et al., 2002) [1], в которой описана методика настраиваемых фильтров (Taurus Tunable Filter) в наблюдениях на 3.9-м телескопе ААТ и 4.2-м телескопе WHT. Дополнительные и обновленные методики редукции данных такого рода изучались по статье (Veilleux S. et al., 2010)[2], относящейся к прибору, работающему на 6.5-м телескопе Magellan. Также мы использовали собственные наработки и матобеспечение, разработанное для анализа данных, получаемых на УНУ БТА с помощью сканирующих интерферометров

Фабри-Перо в высоких порядках интерференции.

По результатам проведенного аналитического обзора на языке Interactive Data Language написан пакет программ для первичной редукции данных наблюдений с настраиваемым фильтром. Основные этапы обработки данных заключаются в следующем:

Учет тока смещения, плоского поля, маскирование плохих столбцов ПЗС.

Чистка следов космических частиц.

По линейчатому спектру калибровочной лампы - измерение центральной длины волны для конкретных объектов, построение дисперсионной зависимости.

Измерение параметров изображений звезд на кадрах, на их основе - определение вариация размеров изображений (seeing), прозрачности атмосферы, смещений кадров.

Фотометрическая коррекция интерферограмм с учетом полученных параметров.

Суммирование кадров на требуемых длинах волн.

Вычитания континуума, получение «чистого» изображения в требуемой линии.

Построение астрометрического решения для полученных изображений: привязка координат (x,y) на ПЗС снимке к астрономическим координатам.

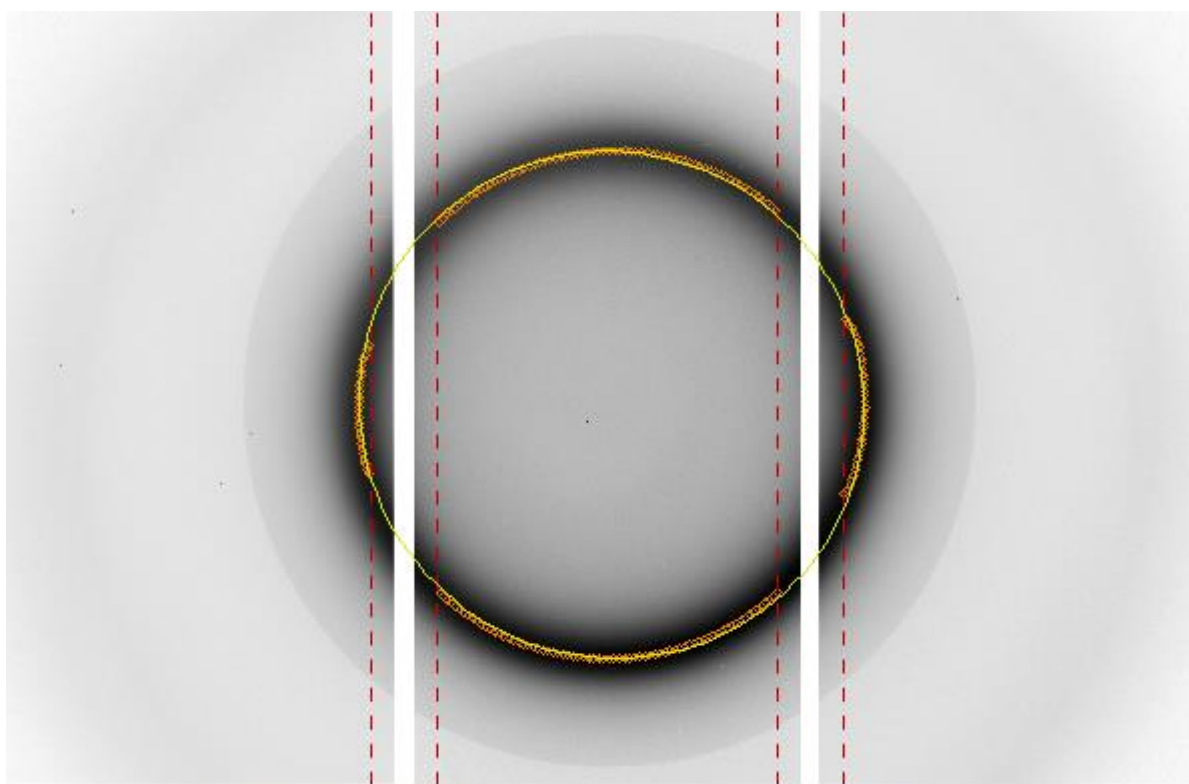


Рисунок 24 –Тестирование программ с помощью наблюдательных данных, полученных на телескопе SALT (ЮАР). Анализ изображения интерференционного кольца от калибровочной лампы.

Тестирование созданного программного обеспечения проводилась на данных

полученных нашими коллегами на 10-м южноафриканском телескопе SALT в рамках совместной наблюдательной программы по изучению кольцевых галактик в линии водорода H $\alpha$ . Нам удалось построить устойчивый алгоритм точного определения положения широкого интерференционного кольца от калибровочной лампы (см рисунок 14), методика построения шкалы длин волн здесь существенно отличается от применяемой нами на БТА.

## 6 Разработка технического задания на изготовление всех узлов спектрографа, сдача этих узлов в изготовление

### 6.1 Разработка методики спектроскопии высокого разрешения

Спектрографы высокого разрешения, имеющие оптоволоконное сочетание с телескопами различных диаметров, являются обязательной принадлежностью большинства современных обсерваторий. Оснащение Специальной астрофизической обсерватории телескопами умеренных диаметров было начато в 70-х и проходило под лозунгом: «нам нужны инструменты поддержки, для фотометрии и спектроскопии с умеренным разрешением объектов, исследуемых на БТА». Кроме того, предполагалось проводить испытания некоторых вариантов наблюдений, планируемых к дальнейшему использованию на 6-метровом телескопе. Развитие техники регистрации изображений и совершенствование оптических технологий позволяет сегодня вернуться к вопросу о первоначально предполагаемом статусе телескопов, вспомогательных для БТА. Теперь в качестве вспомогательного средства мы рассматриваем вариант наблюдений, не уступающий существенно по спектральному разрешению и проникающей способности прибору, используемому на УНУ БТА.

Учитывая опыт выполнения избранных наблюдательных программ на УНУ БТА и научную тематику обсерватории, можно выделить категорию задач, требующих покрытия спектрами по времени, более плотного, чем это представляется возможным на 6-метровом телескопе. Во-первых, это задача спектроскопического мониторинга звезд, находящихся, предположительно, на кратковременных стадиях эволюции [3]. На этих стадиях, продолжающихся  $10^2$ - $10^4$  лет, в атмосферах и оболочках звезд происходят относительно быстрые изменения, обнаружимые только при многомесячном или многолетнем мониторинге с высоким спектральным разрешением [4]. Во-вторых, исследования некоторых двойных систем, проводимые на БТА методами спекл-интерферометрии, желательны



поддерживать спектроскопическими наблюдениями, выполняемыми с адекватной и одинаковой точностью. Здесь примером может служить работа [5], где собраны спектры, полученные на разных инструментах. И, наконец, не исключено, что появление прецизионного инструмента позволит обратиться к новой для САО программе — исследованию избранных экзопланет доплеровскими методами [6]. Все эти программы могут выполняться с высоким спектральным разрешением на 1-метровом телескопе со скважностью во времени, более оптимальной, чем наблюдения на БТА.

В качестве прототипа конструкции мы взяли оптоволоконный спектрограф, разработанный и изготовленный в САО РАН для 1.2-метрового телескопа Коуровской обсерватории Уральского федерального университета. Этот прибор предварительно был испытан на 1-метровом телескопе САО в сочетании со штатным светоприемником телескопа — матрицей 2Кх2К, охлаждаемой жидким азотом. Результаты испытаний показали, что, по сравнению с существующими возможностями 1-метрового телескопа САО, характеристики спектроскопии высокого разрешения были резко улучшены, и соответствуют мировому уровню, см. рис.2 в работе [7].

Опыт использования спектрографа указал на резервы в конструкции прототипа, применительно к возможностям САО и отечественной оптической промышленности. Среди таких возможностей – увеличение спектрального разрешения за счет уменьшения диаметра оптического волокна, изменение характеристик элемента кроссдисперсии, позволяющее более равномерное расположение изображений отдельных спектральных порядков, и, как следствие, возможность использовать фиксированное положение спектров на кадре. Это дает существенное улучшение в качестве получаемых данных.

Расчеты, проведенные при выполнении ПНИ, показали, что при оптимальном выборе параметров решетки эшелле, решетки скрещенной дисперсии и призмы можно обеспечить следующие параметры кадра, регистрируемого матрицей ПЗС 2048х2048, с размером пикселя 13.5х13.5 мкм: диапазон 3850-10850 Å, спектральные порядки с номерами 136÷48 (89 порядков), перекрытие соседних порядков до  $\lambda < 9000\text{Å}$ . При этом оптическое волокно в проекции на небесную сферу будет иметь диаметр 3.3 угл.сек., а реальное спектральное разрешение окажется ближе к  $R=45000$ .

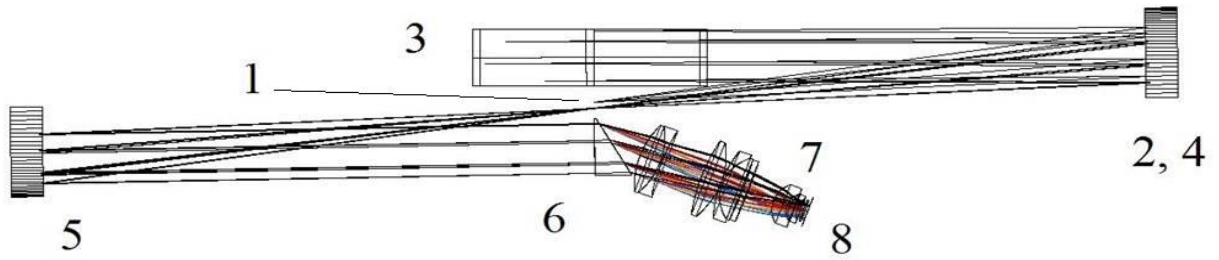


Рисунок 15 – Оптическая схема стационарной части спектрографа. Обозначения: 1 — выходы оптоволокон, 2 — зеркало коллиматора, 3 — эшелле, 4 — зеркало построения промежуточного изображения спектра, 5 — зеркало формирования белого зрачка на гримзе узла кросс-дисперсора(6), 7 — камерный объектив, 8 — детектор.

В настоящее время ведется изготовление узлов этого спектрографа (оптическая схема приведена на рисунке 15).

## 6.2 Разработка технического задания на изготовление узлов высокоточного спектрографа для 6-метрового телескопа

В ходе проведения работ по этапу ПНИ была завершена разработка концепции и проведена детализовка узлов эшелле-спектрографа с оптоволоконным входом для установки на 6-м телескопе БГА. На рисунке 16 показана общая схема спектрографа. Самые крупные узлы – две половины коллиматора (слева), дифракционная решетка-мозаика (справа) и камерный узел с гримзой узла скрещенной дисперсии (по центру и правее).

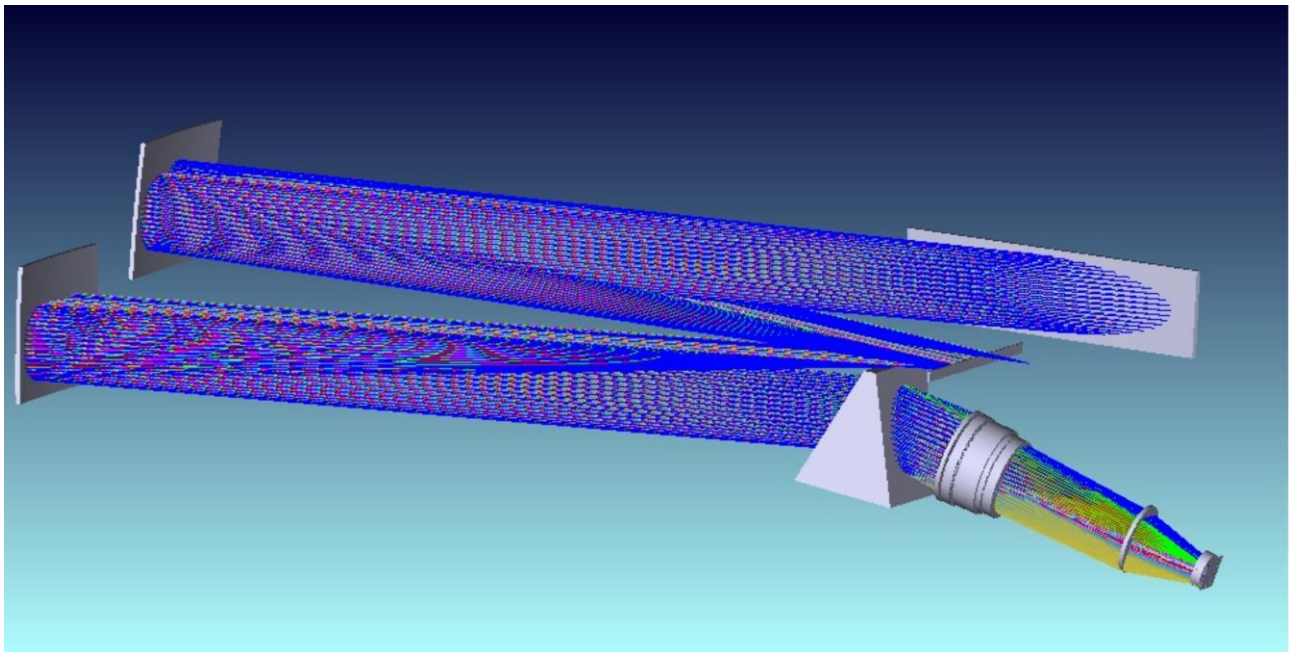


Рисунок 16 – Общая схема спектрографа высокого разрешения для УНУ БГА.

На рисунке 17 приведен расчет точечных диаграмм для оптики спектрографа для набора длин волн и положений по полю камеры спектрографа. Хорошо видно, что практически везде расчетные aberrации оптики не превышают 1 элемента светоприемника, равного 15 мкм.

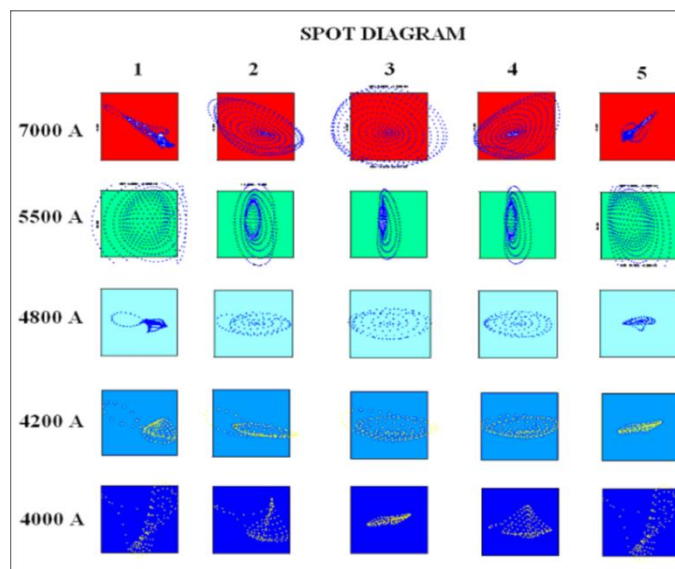


Рисунок 17 – Расчетные точечные диаграммы оптики спектрографа с оптоволоконным входом.

В рамках принятой схемы были рассчитаны характеристики всех оптических элементов, в частности, семилинзовая проекционная камера с эффективным фокусным расстоянием 470 мм и входным отверстием 240 мм. Общий вид камеры приведен на рисунке 18. Параметры камеры (радиусы кривизны, оптические отрезки и марки стёкол в соответствие с базой ZEMAX) детализированы в Таблице 1. Характерные допуски на параметры составляют около 30 мкм.

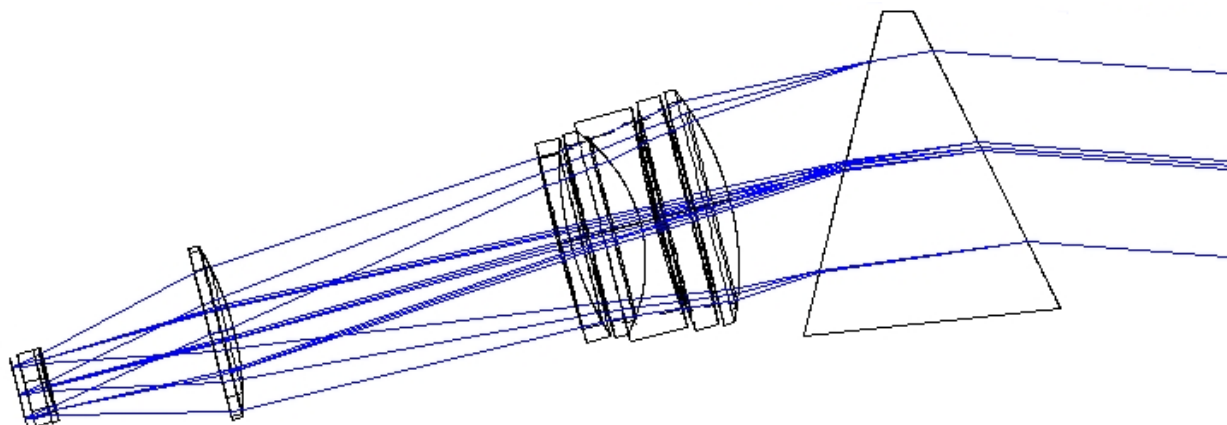


Рисунок 18 – Общий вид камеры.

Таблица 1 – Параметры камеры спектрографа УНУ БТА.

Радиус кривизны	Толщина по оси	Марка стекла	Световая высота
276,1	35	S-FPL51	115,273
13680	1,521		114,169
1336,6	37	S-FPL51	113,248
-642,7	2,1		110,225
-1132,4	14	KZFSN4	108,288
151,36	55	BK10	100,115
-1264,7	14,562		98,884
-331,9	12	BK10	98,244
-1556	323,584		97,935
285,8	23	SF4	80,894
Infinity	164,94		79,164
-300,6	4	LAH65	34,767
Infinity	16	F_SILICA	34,203
Infinity	8	VACUUM	32,351
Infinity		VACUUM	31,012

Аналогичная документация разработана для коллиматорных устройств и узла кроссдисперсора. В настоящее время идет подбор изготовителя крупногабаритной оптики, приобретен оптический стол для монтажа узлов спектрографа. Крупногабаритные дифракционные эшельные решетки с углом блеска 72.5 уже приобретены. Общие данные для изготовления узлов спектрографа приведены в Приложении Е к настоящему Отчету.

## 7 Разработка методики интегральной полевой спектроскопии для спектрографа первичного фокуса

Разработана первая версия программ редукции данных, полученных с ИПС, исправляющая двухмерные искажения спектров и приводящая данные к длинам волн и потокам за атмосферу. Проведены пробные наблюдения с макетом блока ИПС на УНУ БТА в различных спектральных диапазонах. Эффективность спектрографа в режиме ИПС оказалась достаточно высокой – 20-25% (Рисунок 19), что соответствует расчетной величине в проекте ИПС SCORPIO. Следует отметить, что полученная величина оказалась значительно выше эффективности мультизрачкового спектрографа MPFS, который

использовался для интегральной полевой спектроскопии на УНУ БТА и имел пропускание около 3%.

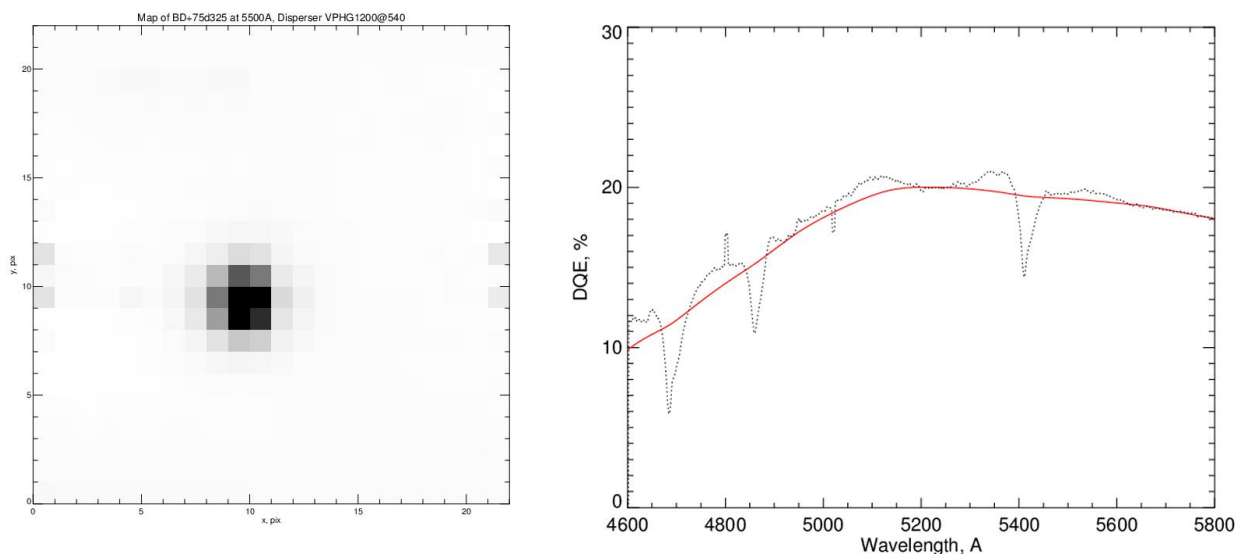


Рисунок 19 – Изображение звезды BD+75d325 для длины волны 0.5 мкм и определенная полная квантовая эффективность DQE системы телескоп+спектрограф+IFU+светоприемник

Разработанная методика и акт о ее внедрении даны в Приложении Б к настоящему Отчету.

## 8 Разработка методики измерений коэффициента отражения поверхности Главного зеркала УНУ БТА.

Для проведения работ по приемке Главного зеркала УНУ БТА одним из важных вопросов остается определение коэффициента отражения его зеркальной поверхности. Для оперативного измерения этого параметра нами решено приобрести широкодиапазонный высокоточный рефлектометр. Поиск предложений на рынке оборудования привел нас к необходимости приобретения рефлектометра СТ7 (Coating Test 7 wavelengths), который предназначен для контроля качества точных оптических покрытий зеркал крупных наземных телескопов. Прибор производится компанией Otto Pregizer Optik (Бельгия).

Рефлектомер СТ7 измеряет зеркальное отражение и коэффициент рассеивания используя семь длин волн, покрывая диапазон от ультрафиолетового до инфракрасного излучения. Они выбраны в диапазоне от UV до IR таким образом, чтобы быть равноудаленными по шкале энергии и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики рабочих диапазонов рефлектометра СТ7/

Длина волны, нм	Полоса пропускания, нм
365	10
405	15
464	25
522	30
624	30
760	40
970	50

Апертурный угол при проведении измерений составляет :  $0.8^\circ$ , абсолютная точность измерений – не хуже 0.5% для коэффициента отражения  $R > 50\%$ , а воспроизводимость измерений – не хуже 0.1% для такого коэффициента.

В ходе выполнения работ был осуществлен выбор поставщика и проведена поставка рефлектометра СТ7.

Разработанная и внедренная методика измерений коэффициента отражения поверхности Главного зеркала УНУ БТА с применением рефлектометра СТ7 дана в Приложении Ж к настоящему отчету. Там же приведен акт о ее внедрении.

## 9 Сертификация анализатора Шака-Гартмана для проведения цеховых измерений ГЗ УНУ БТА.

В ходе реализации настоящего этапа ПНИ была разработана методика использования датчика волнового фронта для Шака-Гартмана (далее и в сертификате - датчик ShaH-CAO) измерения формы крупногабаритных зеркал, в частности заготовки 6-м главного зеркала УНУ БТА, находящегося на обработке в цеху ОАО «ЛЗЭС». Была разработана методика калибровки датчика волнового фронта, предоставленного заказчиком с целью обеспечения возможности измерения формы главного зеркала телескопа БТА в цеховых условиях. Эта методика учитывает требования ГОСТ-Р ИСО 15367-2—2012 и возможность применения ГПСЭ единицы длины отклонений от плоскостности оптических поверхностей. В таблице 3 приведены технические требования к параметрам стенда для аттестации.

Таблица 3 – Требования к параметрам стенда для аттестации

Параметр	Ед. изм.	Значение	Прим.
1. Параметры измеряемого зеркала			
Активная апертура	м	6	
Фокусное расстояние	м	24	
Форма поверхности		Параболическая	
2. Требования к калибровочному стенду			
Имитатор зеркала		Дифракционный	
Компенсатор параболических искажений	-	дифракционный или рефракционный	
Источник излучения		Лазер гелий-неоновый одночастотный стабилизированный	
Длина волны подсветки	мкм	0.632	
Метод транспортировки излучения		Одномодовое волокно	
Тип волоконного соединителя		FC	

После проведения калибровочных работ датчик ShaH-CAO был сертифицирован для проведения цеховых измерений поверхности Главного зеркала, сертификат приведен в Приложении И к настоящему Отчету.

## 10 Работы по модернизации, содержанию и ремонту оборудования УНУ БТА

### Модернизация узлов приводного механизма УНУ БТА

Важной частью работ, выполняемых в ходе ПНИ, стала замена системы управления приводами главных осей телескопа. Эта система отработала практически безотказно с начала 2000-х гг. и уже нуждается в замене. При этом предполагается:

- выполнить полную замену электроники приводов с сохранением или частичной модернизацией обвески электромоторов;
- обеспечение высокой надежности и точности работы приводов главных осей телескопа на ближайшие 15-20 лет;
- значительное уменьшение отскоков положения осей телескопа при сопровождении за счет более высокой плавности движения;
- выполнить переход на одномоторную схему управления в приводе азимута;
- сокращение времени восстановления при отказах.

Созданная система будет гарантировать:

- более высокую точность поддержания скорости вращения;
- увеличение надежности и ремонтпригодности устройств;
- значительное улучшение динамических характеристик монтировки телескопа;
- эффективное управление на низких скоростях;
- эффективные способы управления приводами;
- возможности автономной диагностики состояния;
- модульность и централизация функций управления осями.

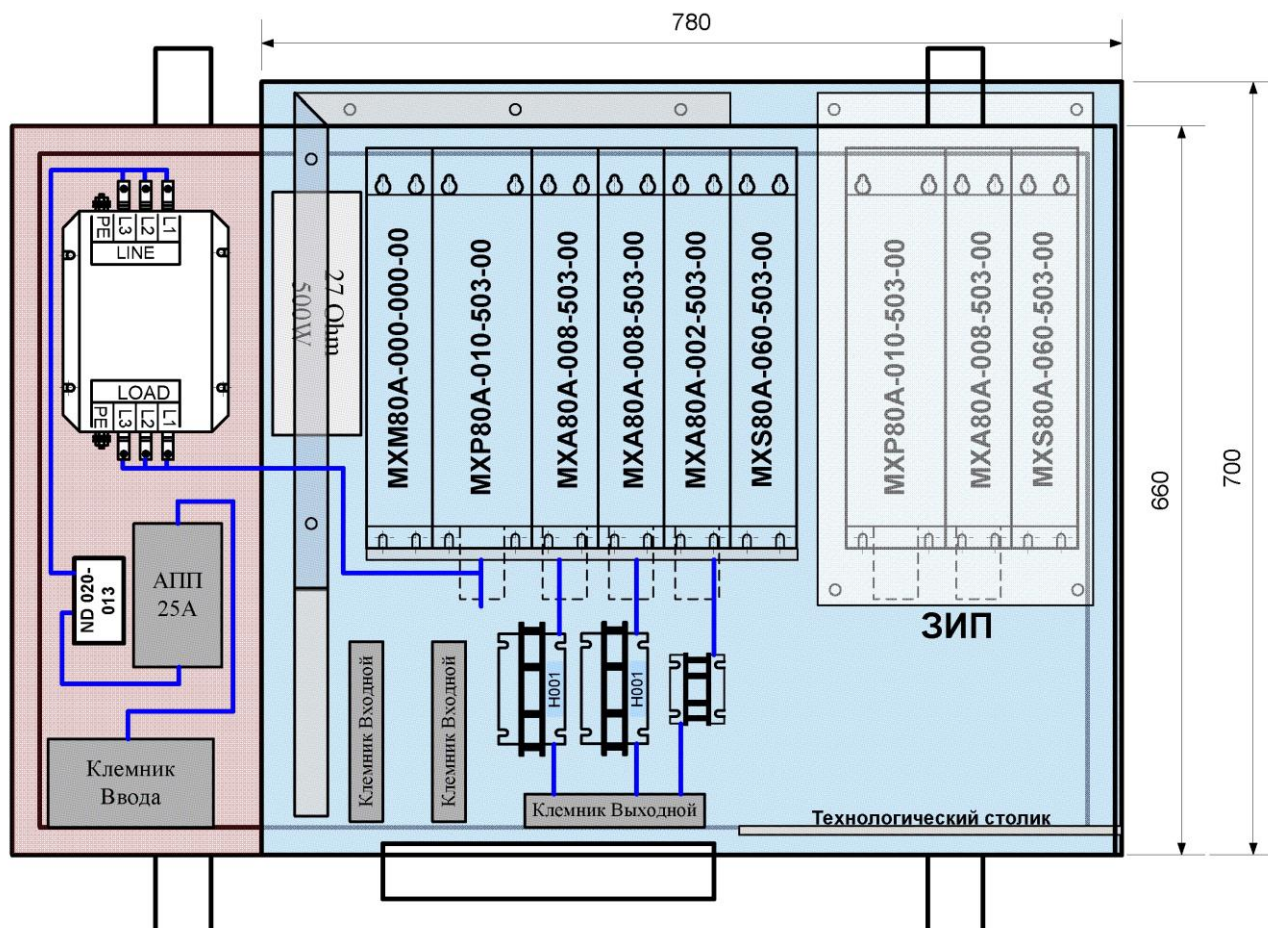


Рисунок 20 – Схема щита управления приводами основных осей телескопа с обозначением основных узлов.

На рисунках 20 и 21 приведены схема основного щита управления приводами осей и ее внешний вид перед установкой в узел азимута на тестовые работы. Плановая эксплуатация узла запланирована на первый квартал 2015 года.



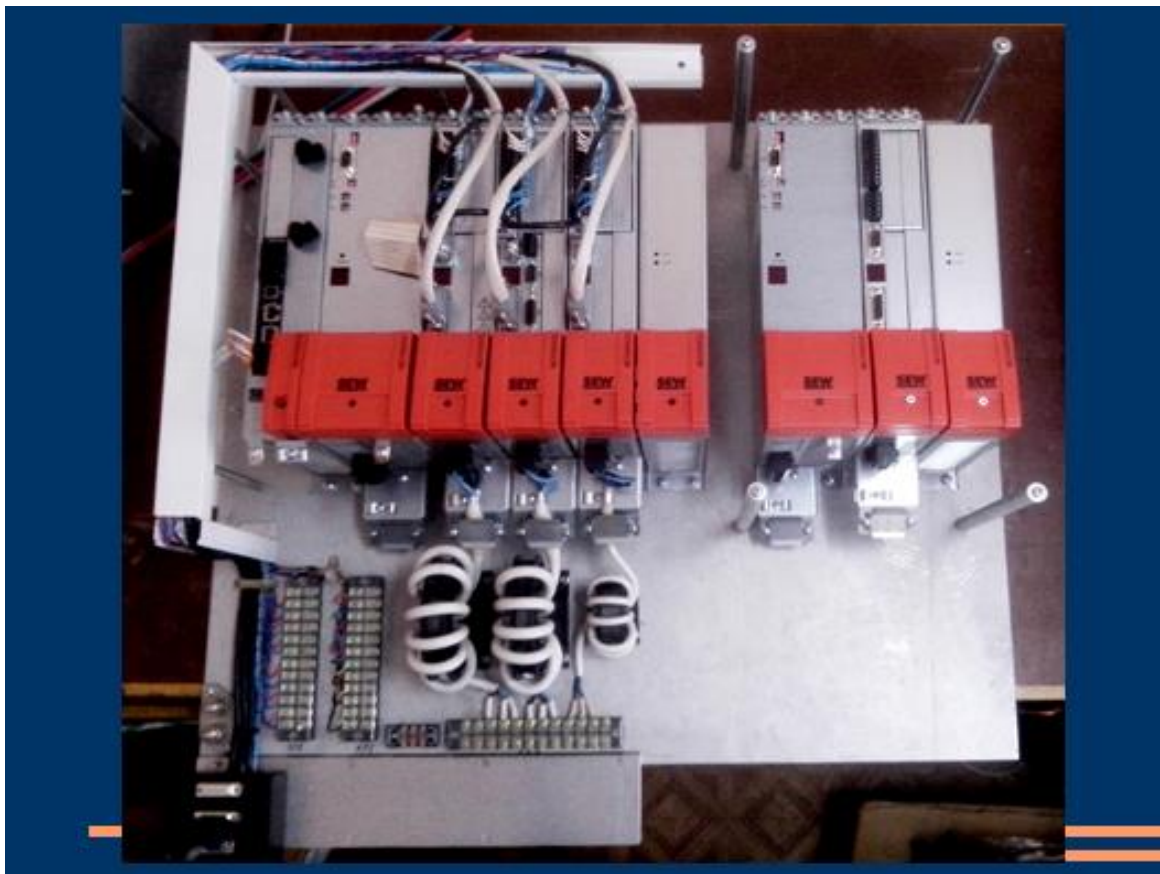


Рисунок 21 – Вид щита управления приводами основных осей телескопа в собранном виде перед установкой на телескоп.

### Модернизация систем энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ)

Для решения задачи модернизации системы энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии заключен договор №Д-2238-14 с Объединенным институтом высоких температур РАН на проведение исследований и обоснование технических решений по повышению энергоэффективности и энергобезопасности УНУ БТА. В рамках работ будут разработаны и обоснованы схемы применения современных электрохимических накопителей электроэнергии и возобновляемых источников энергии в системах гарантированного электропитания УНУ БТА. В декабре завершен первый этап работ.

## Мойка главного зеркала

Как показывает опыт эксплуатации УНУ БТА, рабочая поверхность Главного зеркала нуждается в периодической чистке от загрязнения. Как правило, аттестация зеркала после ежегодной чистки показывает повышение эффективности отражающего слоя на 7-8%. В августе 2014 года была проведена ежегодная процедура мойки его поверхности (Рисунок 22).

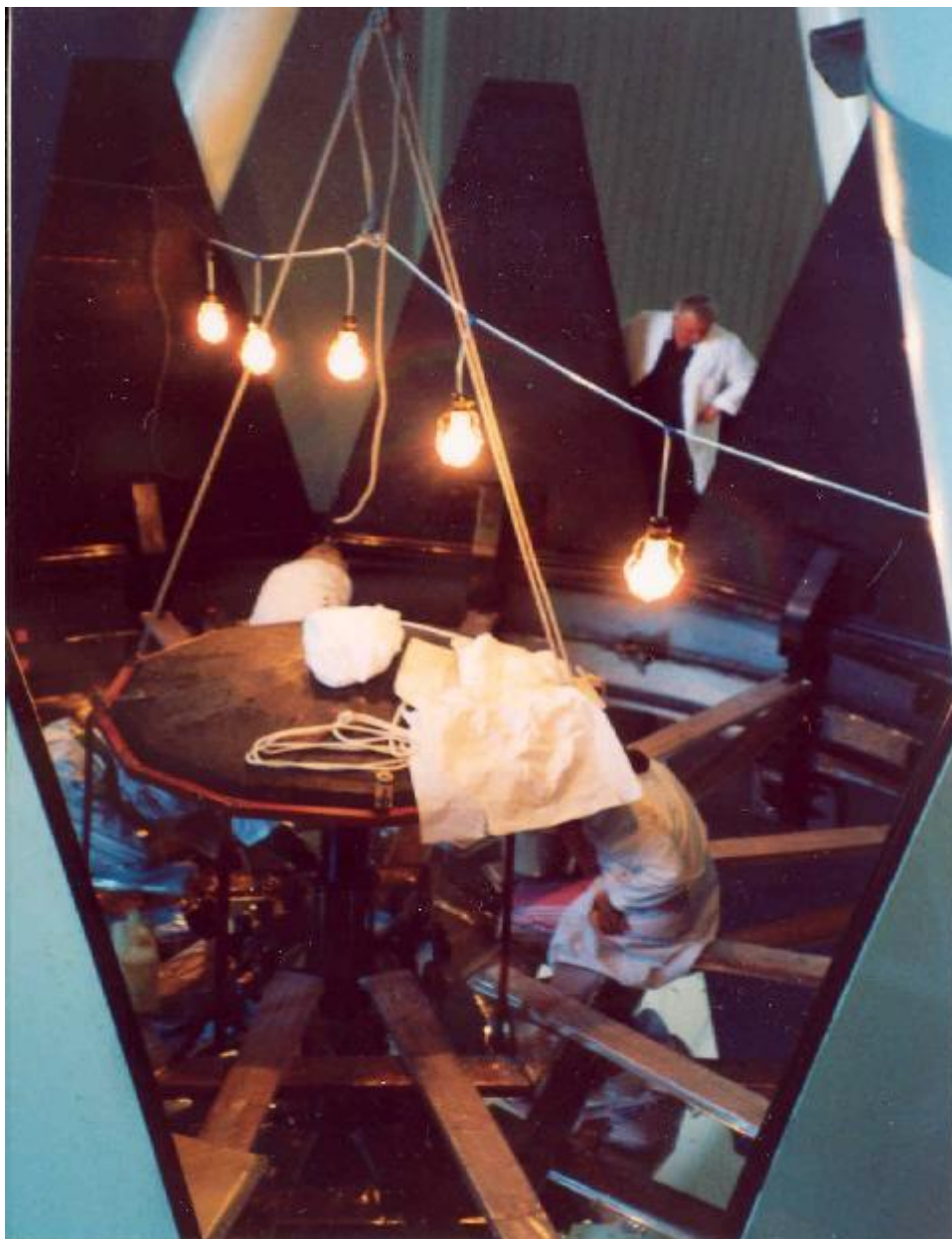


Рисунок 22 – Процедура мойки рабочей поверхности Главного зеркала УНУ БТА.

Проведенные после завершения мойки измерения коэффициента отражения показали рост коэффициента отражения на 5-7% в зависимости от места на поверхности.

## Заключение

Принимая во внимание приведенные выше материалы и результаты работы УНУ БТА в ходе проведения первого этапа ПНИ, приходим к выводу, что в целом задачи, поставленные Заказчиком перед Исполнителем, выполнены и соответствуют требованиям Технического задания.

В настоящем отчете приведены результаты плановых наблюдений, выполненных на УНУ БТА, подтверждено обеспечение условий для выполнения исследований сторонними организациями на оборудовании УНУ.

В рамках этапа ПНИ подготовлен отчет о результатах наблюдений на УНУ БТА в первом полугодии 2014 г., который представлен на заседании КТБТ 16 октября 2014 г. Проведена техническая экспертиза заявок на наблюдения на УНУ БТА на первое полугодие 2015 г., представленная на рассмотрение КТБТ. На основе Протокола распределения времени УНУ БТА составлено «Расписание наблюдений на БТА на первое полугодие 2015 г. (Приложение А к Отчету).

Обеспечены наблюдения на УНУ БТА в полном соответствии с расписанием ([http://www.sao.ru/request/schedule/bta2014\\_2.html](http://www.sao.ru/request/schedule/bta2014_2.html)).

По результатам исследований подготовлены научные статьи.

В ходе ПНИ начаты работы по реализации Программы развития УНУ БТА на 2014-2015 годы в части повышения эффективности универсального спектрографа низкого разрешения SCORPIO-II, адаптации метода спекл-интерферометрии для работы в инфракрасной части спектра, разработке методики спектроскопии высокого разрешения и изготовление узлов высокоточного эшелле-спектрографа с оптоволоконным входом.

В ходе ПНИ внедрены методика интегральной полевой спектроскопии для спектрографа первичного фокуса и методика измерения коэффициента отражения рабочей поверхности Главного зеркала.

В ходе работ проведено дооснащение объекта научной инфраструктуры необходимыми материалами и оборудованием, начата модернизация узлов приводного механизма УНУ БТА, начаты поисковые работы в целях модернизации систем энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии.

Достигнутый научно-технический уровень работ сопоставим с мировым уровнем, что подтверждается растущими запросами зарубежных ученых по использованию оборудования УНУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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, Volume 329, Issue 4, pp. 759-774 (2002)
2. Veilleux S. et al. “MMTF: The Maryland-Magellan Tunable Filter”, The Astronomical Journal, Volume 139, Issue 1, pp. 145-157 (2010)
3. V.G.Klochkova, MNRAS 272, 710 (1995)
4. Клочкова В.Г., Астрофиз. Бюлл. 69, №3, 297-314 (2014)
5. Балега Ю.Ю. и др., Астрофиз.бюлл. 69, №1, 49-61 (2014)
6. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Сендзикас Е.Г., Сачков М.Е., Доплеровские методы поиска экзопланет. В сб. «Исследования экзопланет», ИКИ, 3-4 июня 2014, с.6-7.
7. Панчук В.Е. и Клочкова В.Г. Изв.КрАО 109, №1, 187-203 (2013)