

УДК 520.353

ЭШЕЛЬНЫЙ СПЕКТРОГРАФ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ОПТОВОЛОКОННЫМ ВХОДОМ ДЛЯ БТА. I. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА, РАЗМЕЩЕНИЕ, СИСТЕМА КОНТРОЛЯ

© 2014 Г. Г. Валявин^{1*}, В. Д. Бычков¹, М. В. Юшкин¹, Г. А. Галазутдинов²,
С. В. Драбек¹, В. С. Шергин¹, А. Н. Саркисян¹, Е. А. Семенко¹,
Т. Е. Бурлакова¹, В. М. Кравченко¹, Д. О. Кудрявцев¹, А. М. Притыченко¹,
П. Г. Крюков³, С. Л. Семёнов³, Ф. А. Мусаев¹, С. Н. Фабрика¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

² Институт астрономии Северного католического университета, Антофагаста, Чили

³ Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, 119333 Россия

Поступила в редакцию 27 февраля 2013 года; принята в печать 17 марта 2014 года

Мы предлагаем проект высокоточного оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения ($R = 100\,000$) для комплексных исследований атмосфер звезд, поиска экзопланет, астро-сейсмологических исследований, исследования звездного магнетизма, активных ядер ярких галактик, межзвездной среды и т.д. Представлена оптическая схема прибора. Рабочий диапазон от 4000 до 7500 Å. Представлена также оптическая схема предоптоволоконного блока спектрографа. Блок обеспечивает четыре основных режима спектральных наблюдений: режим обычной спектроскопии с получением спектра исследуемого объекта и спектра фона в непосредственной близости от него; режим одновременного получения спектра объекта и спектра эталона длин волн; режим высокоточной спектроскопии с йодной ячейкой и режим спектрополяриметрических наблюдений с получением всех параметров Стокса.

Ключевые слова: *оборудование: спектрографы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительная, если не преобладающая, часть наших знаний о космосе получена с помощью спектрального анализа. Спектральные исследования астрофизических объектов позволяют проводить одновременные определения их температур, магнитных полей, масс, химического состава, скоростей движения и других параметров. С развитием методов моделирования атмосфер звезд, излучения туманностей и других протяженных космических объектов требования к характеристикам астрономических спектрографов также повышаются. Все это стимулирует развитие спектроскопии как в направлении улучшения технических характеристик существующих спектрографов, так и в направлении создания новых конструктивных схем этих приборов. Одним из таких прогрессивных решений была разработка и внедрение в астрономическую практику специализированных спектрографов с оптоволоконным входом (далее оптоволоконный спектрограф). Создание первого такого инструмента

описано в [1]. С подробным историческим обзором по оптоволоконным спектрографам можно также ознакомиться в [2].

Отличие оптоволоконных спектрографов от традиционных состоит в способе передачи собранного в фокусе телескопа света от исследуемого объекта до щели спектрографа. В оптоволоконных спектрографах изображение изучаемого объекта передается на щель с помощью оптических волокон. Такой способ передачи световой энергии обладает целым рядом очевидных преимуществ. Перечислим некоторые из них.

(1) Возможность размещения спектрографа вне подвижных частей конструкции телескопа, что обеспечивает ему более высокую механическую и температурную стабильность и, соответственно, более высокую, чем у традиционных щелевых спектрографов, точность позиционных спектральных измерений (что, в частности, важно в измерениях лучевых скоростей звезд).

(2) Возможность деления изображения отдельными световодами с дальнейшим позиционировани-

*E-mail: gvalyavin@sao.ru

ем их на щели спектрографа. В ряде случаев это облегчает техническое решение по обеспечению высокого спектрального разрешения с минимальными потерями света.

(3) Обеспечение высокой стабильности позиционных и фотометрических характеристик спроецированных на приемник спектров как от исследуемых объектов, так и от эталонных источников света.

(4) Возможность оснащения спектрографа поляриметрической аппаратурой для измерения всех параметров Стокса без использования наклонных зеркал, вносящих значительную инструментальную поляризацию.

Благодаря высокой механической стабильности, на оптоволоконных спектрографах достигнуты точности измерений лучевых скоростей звезд вплоть до 1 м/с и выше [3]. Создание первых таких инструментов позволило начать ряд новых уникальных исследований, выполнение которых с использованием традиционных схем спектрографов было затруднительным или даже невозможным. Отсутствие у российских обсерваторий аналогичных инструментов автоматически определило их отставание по целому ряду направлений исследований в последние двадцать лет. Кратко остановимся на описании наиболее актуальных из этих исследований.

Поиск экзопланет. Использование высокоточных спектрографов при определении лучевых скоростей звезд позволило астрофизикам в конце 80–90-х годов начать систематический поиск малых (менее 10 м/с) вариаций лучевых скоростей у звезд солнечного типа для астросейсмологических исследований и обнаружения планетных систем [4]. На сегодняшний день открыто уже более полутора тысяч экзопланет [5]. Актуальной задачей является мониторинг этих систем для детальных исследований средствами наземной высокоточной спектроскопии. С помощью спектроскопии и спектрополяриметрии можно измерять магнитные поля и поляризации центральных звезд этих систем. Такие измерения могли бы выявить те системы, физические условия в которых наиболее близки к условиям в Солнечной системе.

Астросейсмология. Эта тематика объединяет целое семейство задач, связанных с исследованием малоамплитудных пульсаций фотосфер и структур ветров горячих звезд, акустического шума у звезд солнечного типа и многие другие задачи, методом которых является измерение позиционных положений и форм профилей спектральных линий.

Исследование динамики профилей спектральных линий звезд. Проблематика, требующая исследования профилей линий звездных спектров, покрывает все задачи, связанные с процессами в атмосферах звезд (нестационарные проявления типа звездных пульсаций и т.д., см., например, [6]), со структурами звездных ветров (см., например, [7]) и т.д. Все эти задачи требуют высоких точностных характеристик используемого спектрографа.

Исследование магнитных полей звезд. При подобных исследованиях измеряется разница позиционных положений одних и тех же спектральных линий в лучах разной поляризации, пространственно разделенных анализатором. Обычная точность измерения магнитного поля по разным линиям составляет несколько десятков Гаусс и доходит до 1 Гс (см., например, достигнутую точность в попытке измерения крупномасштабного магнитного поля у Проциона [8]). В скором будущем потребуется на порядок большая точность. Использование оптоволоконна позволяет размещать поляризационную оптику непосредственно в первичном фокусе телескопа и тем самым избежать использования дополнительных зеркал, способных внести искажающий вклад в наблюдения поляризации.

Доплер-зеemanовское картирование с анализом четырех параметров Стокса. Это сравнительно молодая методика построения карт поверхностного распределения температур звезд, химсостава, магнитного поля и др. Традиционный подход, связанный с картированием магнитного поля или пятенной структуры химсостава атмосфер звезд, в последнее время начал применяться также к исследованию структуры звездного ветра горячих звезд [9]. Метод основан на детальном исследовании изменения во времени как линейной, так и круговой поляризации в спектральных линиях и континууме спектров звезд. Для этого к настоящему времени созданы специальные высокоточные оптоволоконные спектрополяриметры с возможностью одновременного анализа всех параметров Стокса (см., например, работу [9] и ссылки в ней). Требование к высокой механической стабильности таких спектрографов является определяющим, что выявляет все преимущества для использования оптоволоконного спектрографа в данных исследованиях.

Мы кратко описали некоторые задачи, решение которых может быть эффективным при наличии высокоточного оптоволоконного спектрографа-поляриметра на телескопе большого размера. Также оптоволоконный спектрограф решает и другие задачи, обычные для щелевой спектроскопии высокого спектрального разрешения, почти с такой

же степени эффективности, уступая незначительно только в задачах, требующих исследований голубой части звездного спектра. В этой работе мы представляем эскиз проекта спектрографа высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для 6-м телескопа Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН).

САО РАН имеет многолетние традиции в области создания спектрографов различных типов и проведения исследований с ними. На сегодняшний день на 6-м телескопе САО имеются в распоряжении несколько спектрографов высокого спектрального разрешения, созданных главным образом усилиями лаборатории астроспектроскопии. Среди этих инструментов наиболее успешными по научной отдаче являются Основной звездный спектрограф (ОЗСП [10,11]) и большой эшелле-спектрограф, расположенный в одном из фокусов Несмита 6-м телескопа (Nasmyth Echelle Spectrograph, NES [12]). Кроме этих спектрографов в разные годы в САО были созданы также эшелле-спектрограф высокого спектрального разрешения РЫСЬ (LYNX [13]) и эшелле-спектрограф первичного фокуса (PFES [14]). Все эти инструменты в совокупности решают большинство из перечисленных задач с той или иной степенью эффективности. Тем не менее их точностные характеристики в измерении лучевых скоростей и магнитных полей звезд начинают отставать от общемирового уровня, что, в частности, подтолкнуло нас выступить с инициативой создания для САО нового специализированного высокоточного спектрографа.

В конструкции спектрографа мы частично исходим из мирового опыта создания подобных инструментов для больших оптических телескопов с апертурами более трех метров. Для отдельных узлов мы предлагаем свое решение. В частности, в вопросе передачи света по оптоволокну из первичного фокуса 6-м телескопа до щели мы решили отказаться от использования классических резателей изображений в пользу разветвленных делителей изображений. В этой статье мы приводим эскизную и оптическую схемы спектрографа, обсуждаем варианты его размещения в башне БТА, систему контроля и калибровок. Даем также нижнюю оценку эффективности оптического тракта инструмента. Детальное описание отдельных узлов спектрографа (в частности, его поляризационной оптики), оценка его эффективности и модельный анализ стабильности будут даны в следующих статьях.

2. ПРЕДЛОЖЕНИЕ БАЗОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ СПЕКТРОГРАФА

Опираясь на мотивацию, озвученную выше, мы считаем, что в планировании конфигурации оптоволоконного спектрографа необходимо исходить из максимальных требований к точности позиционных измерений спектральных линий и к точности спектрополяриметрических измерений. Как отмечалось выше, в этих измерениях спектрографы с оптоволоконным входом превосходят щелевые. В свою очередь, оптоволоконные спектрографы проигрывают щелевым по эффективности собираемого света в УФ-диапазоне вследствие его поглощения в оптоволокне значительной длины (более полутора десятков метров). Поэтому в предложенной оптической схеме спектрографа решено пожертвовать, насколько это возможно, УФ-диапазоном инструмента в пользу достижения максимально возможных точностей позиционных и поляризационных измерений. В предельных измерениях лучевых скоростей звезд с применением йодных ячеек используется диапазон длин волн от 5000 до 6000 Å. В высокоточных магнитометрических и поляризационных измерениях спектральных линий этот диапазон шире. Эффективным диапазоном магнитометрических измерений является диапазон от 4000 до 7000 Å. Исходя из этого, мы предлагаем следующее:

- (1) спектральное разрешение вплоть до $R = 100\,000$ (в пределе до $R = 120\,000$) с возможностью использования дополнительных режимов с более низким спектральным разрешением в режиме электронного биннинга;
- (2) одновременно регистрируемый спектральный диапазон 4000–7500 Å с полным перекрытием спектральных порядков;
- (3) оптический тракт снабжен необходимым набором инструментов для измерения всех параметров Стокса, эталонных ламп для фотометрических калибровок и калибровок по длинам волн, включая йодную ячейку I2 [15] для точных измерений лучевых скоростей звезд;
- (4) свет из первичного фокуса (ПФ) БТА передается до щели спектрографа по волокну.

Конфигурация прибора должна обеспечивать следующие точностные характеристики и эффективность спектрографа в исследованиях звезд.

- (1) Характерная звездная величина, наблюдаемая в нормальных для САО погодных условиях (размер изображения $1''.5$) за час экспозиции с достижением $S/N = 100$:

Таблица 1. Спектральное разрешение спектрографа на 6-м телескопе в зависимости от диаметра d коллимированного пучка, тангенса угла блеска $\tan \alpha$ эшелле-решетки и углового размера S щели в проекции на небо

d , мм	$\tan \alpha$		
	4	5	6
200	28 000 $S = 2''0$	34 000 $S = 2''0$	41 000 $S = 2''0$
	37 000 $S = 1''5$	46 000 $S = 1''5$	55 000 $S = 1''5$
	55 000 $S = 1''0$	69 000 $S = 1''0$	83 000 $S = 1''0$
	110 000 $S = 0''5$	138 000 $S = 0''5$	165 000 $S = 0''5$
300	41 000 $S = 2''0$	52 000 $S = 2''0$	62 000 $S = 2''0$
	55 000 $S = 1''5$	69 000 $S = 1''5$	83 000 $S = 1''5$
	83 000 $S = 1''0$	103 000 $S = 1''0$	124 000 $S = 1''0$
	165 000 $S = 0''5$	206 000 $S = 0''5$	248 000 $S = 0''5$

(а) для $R = 100\,000 - 11^m - 12^m$ в режиме спектроскопии и $10^m - 11^m$ в режиме спектрополяриметрии;

(б) для $R = 40\,000$ (с электронным биннингом) — $12^m - 13^m$ в режиме спектроскопии и $11^m - 12^m$ в режиме спектрополяриметрии;

(в) для $R = 20\,000$ (с электронным биннингом) — $13^m - 14^m$ в режиме спектроскопии и $12^m - 13^m$ в режиме спектрополяриметрии;

(г) для $R = 10\,000$ (с электронным биннингом) — $14^m - 15^m$ в режиме спектроскопии и $13^m - 14^m$ в режиме спектрополяриметрии.

(2) Предельная точность измерения лучевых скоростей холодных звезд — 1 м/с.

(3) Предельная точность измерения магнитных полей холодных звезд — не хуже 1 Гс.

(4) Точность регистрации линейной и круговой поляризации в спектральных линиях — менее 0.1 %.

В основу настоящего предложения по конструкции спектрографа заложен опыт известных разработок, используемых в мировой практике. Идеи авторов проекта близки к идеям, использовавшимся при разработке спектрографов UVES ESO [16], PEPSI [17] и BOES [8].

В базовой конфигурации спектрограф предполагается однолучевым, работающим в диапазоне длин волн от 4000 до 7500 Å. Подразумевается и дальнейшее расширение диапазона в ближнюю инфракрасную область путем строительства

ИК-плеча. В целях достижения максимальной эффективности по свету в спектрографе предполагается режим автоколлимации (квазилиттровская конфигурация).

Спектральное разрешение R спектрографа в варианте автоколлимации определяется формулой:

$$R = 2d \tan \alpha / D \tan S, \quad (1)$$

где d — диаметр коллимированного пучка, α — угол блеска эшелле-решетки, D — диаметр главного зеркала телескопа, S — угловой размер щели спектрографа [18]. Из приведенной формулы очевидно, что увеличение размера главного зеркала ведет к уменьшению спектрального разрешения при прочих фиксированных параметрах. Этот факт является определенной проблемой на пути создания спектрографа высокого спектрального разрешения для телескопа с большим диаметром главного зеркала. В качестве иллюстрации к технологической сложности создания такого спектрографа для БТА приведем следующие оценки. В таблице 1 мы представляем наборы теоретически возможных спектральных разрешений как функций остальных параметров формулы (1) для телескопа БТА с $D = 6$ м.

Как можно видеть из таблицы 1, спектральное разрешение более 100 000 достижимо, главным образом, при весьма малых ширинах входной щели, менее $1''$, что негативно влияет на световую эффективность спектрографа. Увеличение же диаметра коллимированного пучка d для достижения больших спектральных разрешений при более широкой щели не представляется возможным: диаметр $d = 300$ мм является на сегодняшний день технологическим пределом. Использование эшелле-решеток с большими тангенсами углов блеска также проблематично, поскольку требует создания очень дорогих и сложных в юстировке составных мозаик. Иными словами, решение обозначенной проблемы широкощельности вынуждает конструкторов спектрографов идти на дорогостоящие компромиссы в достижении высоких спектральных разрешений для спектрографов, работающих на телескопах с зеркалами больших диаметров.

Таким образом, исходя из перечисленных ограничений и требования достижения в базовой конфигурации спектрального разрешения $R = 100\,000$, мы считаем разумным компромиссом использование эшелле-решетки с тангенсом угла блеска 4 (угол блеска $75^\circ 5'$) в варианте с пучком около 200 мм. Выбор эшелле-решетки с тангенсом угла блеска 4 продиктован тем, что российские дифракционные эшелле-решетки с тангенсами углов блеска от 5 и выше имеют низкую эффективность по свету. Ограничение на диаметр коллимированного пучка в 200 мм

обусловлено тем, что пучки большего диаметра делают спектрограф очень дорогим и громоздким.

Для достижения спектрального разрешения около $R = 100\,000$ мы исходим из размеров щели $0''.5$. Конструкция такой щели в условиях астроклимата САО с изображениями $1''.5$ потребует использования либо трехступенчатого резателя изображений, либо микролинзового растроделителя изображения, либо оптоволоконного разветвителя. Это будет описано ниже, где мы предлагаем конфигурацию оптоволоконного тракта прибора. Здесь мы просто зафиксируем размеры щели: ширина $0''.5$ и высота $3''.5$. Такая щель может быть реализована микролинзовым растром или оптоволоконным разветвителем в наблюдениях звезды с диафрагмой $1''.5$.

В качестве базовой конфигурации спектральной части предлагается классическая схема, известная под названием «белый зрачок» [16]. Отличие «белого зрачка» от традиционных схем оптических спектрографов состоит в том, что коллимация пучка осуществляется двумя внеосевыми коллиматорами. Один из коллиматоров работает в автоколлимационном режиме с эшелле-решеткой, другой строит изображение эшелле-решетки в плоскости фокуса коллиматора, где и формируется «белый зрачок» — недиспергированное изображение эшелле-решетки. В непосредственной близости за «белым зрачком» свет опять диспергирован так, как если бы в этом месте эшелле-решетка находилась физически. Там размещается кросс-диспергирующий узел и затем фокусирующая оптика с ПЗС-приемником.

Был проведен полный самосогласованный расчет всех оптических элементов и aberrаций этой конфигурации по программе Zemax. Он определил набор следующих наиболее оптимальных параметров оптической схемы спектрографа для БТА:

- (1) диаметр монохроматического коллимированного пучка $d = 187$ мм;
- (2) фокусное расстояние входного коллиматора 2175 мм (соответствует входному пучку $F/11.6$);
- (3) тангенс угла блеска эшелле-решетки 4 (решетка $R4$);
- (4) эффективное фокусное расстояние проекционной камеры 470 мм;
- (5) размер элемента ПЗС-матрицы 15 мкм;
- (6) формат ПЗС-матрицы $4\text{ К} \times 4\text{ К}$ элементов.

Приведенные базовые параметры оптимизированы для обеспечения основного режима высокого спектрального разрешения $R = 100\,000$, который достигается при ширине входной щели $0''.5$. В этом

случае проекция на ПЗС-матрицу монохроматического изображения щели шириной $0''.5$ соответствует примерно 2.4 элемента матрицы. Ширина элемента входной щели спектрографа в этом режиме наблюдений равна 168.4 мкм, что при всех геометрических преобразованиях от ПФ до щели соответствует угловому размеру изображения в ПФ БТА $0''.5$. Высота щелевого элемента — 1180 мкм. В такой элемент щели можно передать свет от $1''.5$ изображения звезды, например, предварительно поделив его микролинзовым растром, состоящим из семи гексагональных элементов и передав посредством семи индивидуальных оптоволокон, которые на выходе будут выстроены в линию высотой 1180 мкм. Альтернативно может быть использовано одно толстое оптоволокно с эквивалентным размером ядра в $1''.5$ на входе. На выходе из этого толстого оптоволокон вытягиваются семь тонких волокон с эквивалентным размером ядер в $0''.5$, которые выстраиваются в линию, формируя элемент щели. На настоящем этапе мы рассматриваем именно этот способ переброски и деления света до щели. Возможность создания такой конфигурации оптоволоконной переброски света предварительно обсуждалась с сотрудниками института волоконной оптики (ИЦВО РАН). Подробности по данной технологии см. ниже.

Щелевая сборка для наблюдений в режиме $R = 100\,000$ состоит из двух таких щелевых элементов, расположенных непосредственно друг над другом и разделенных расстоянием 620 мкм. Спаренные таким образом элементы щели обеспечат два отдельных канала, на каждый из которых будет передан свет, собранный в ПФ БТА. В случае спектрополяриметрических наблюдений один из каналов будет использоваться для передачи в спектрограф света обыкновенного луча, другой — необыкновенного после разведения их анализатором поляризации. В случае обычной спектроскопии это будут каналы, соответственно, «объекта» и «фона неба», либо каналы «объекта» и лампы-эталоны лучевых скоростей. Подробно о формировании этих каналов до щели см. в соответствующих разделах ниже.

3. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ

Принципиальная оптическая схема спектрографа приведена на рис. 1. Свет от щели 1 коллимируется в отношении $F/11.6$ внеосевым коллиматором 2 и падает на эшелле-решетку 3, которая работает с коллиматором 2 в режиме автоколлимации под небольшим углом к оптической оси в плоскости рисунка для отвода диспергированного пучка в сторону от пути света от щели. После отражения от эшелле-решетки и коллиматора 2

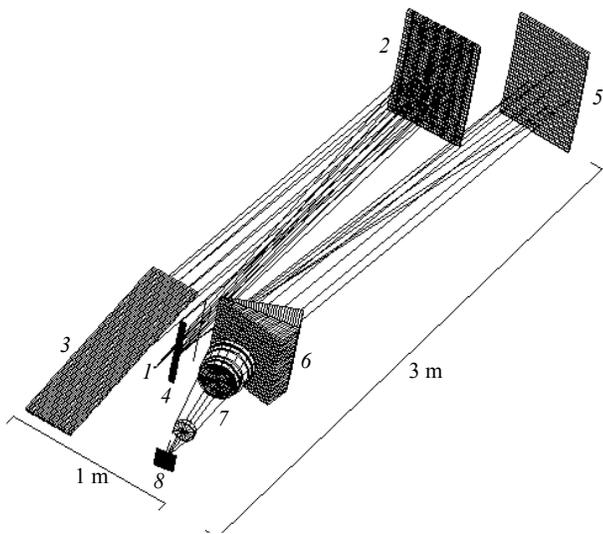


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа.

Таблица 2. Параметры камеры. Маркировка стекол дана в соответствии со стандартной номенклатурой базы данных Zemax. Знак «-» в радиусах кривизны оптических поверхностей и в толщине слоя условный, означающий инверсию оптического пути в схеме спектрографа

Стекло	Радиус кривизны, мм	Толщина слоя, мм	Диаметр линзы, мм
S-FPL51	-325.02	-35	98.62
	42220.32	-1	96.46
S-FPL51	-567.10	-37	94.98
	649.71	-2	91.61
KZFSN4	779.51	-14	90.66
BK10	-174.42	-41	85.32
	853.72	-10	83.94
BK10	446.09	-12	82.69
	-1539.25	-323	81.32
SF55	-307.96	-23	61.19
	∞	-165	59.16
LAN65	298.99	-4	24.20
F-SILICA	∞	-16	23.80
VACUUM	∞	-8	22.24
VACUUM	∞	-	21.11

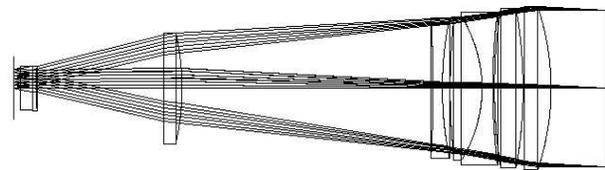


Рис. 2. Оптическая схема линзовой камеры, используемой в проекте.

диспергированный свет возвращается к фокальной плоскости коллиматора 2, где перехватывается логмающим зеркалом 4 и вновь коллимируется коллиматором переноса 5. В фокусе коллиматора 5 диспергированный пучок формирует изображения зрачка («белый зрачок» — вторичное изображение эшелле-решетки). В этом месте размещается кросс-дисперсионная гризма 6, после чего пучок фокусируется на ПЗС 8 линзовой камерой 7.

В представленной схеме выбраны следующие параметры составляющих ее элементов:

(1) Внеосевые зеркальные коллиматоры 2 и 5 имеют параболическую поверхность с фокусным расстоянием 2175 мм.

(2) В качестве эшелле-решетки 3 используется мозаика из двух стандартных эшелле-решеток с углом блеска равным $75^\circ 5'$ (решетка R4).

(3) Кросс-дисперсор 6 состоит из двух призм, изготовленных из стекла Sf7 (по списку каталога Шотта), и голографической решетки между ними. Решетка 110 штр/мм работает в первом порядке (в этом узле в дальнейшем могут быть изменения). Углы рефракции в призмах — 25° для каждой призмы.

(4) В качестве ПЗС-приемника 6 используется камера с матрицей $4K \times 4K$ элементов с размером элемента 15 мкм. На данный момент мы рассматриваем возможность использования чипа CCD 231-84 компании E2V (<http://www.e2v.com>).

(5) В качестве фокусирующей камеры 7 используется $F/2.35$ линзовая комбинация из семи сферических оптических элементов с эффективным фокусом 470 мм. Камера схематически изображена на рис. 2. Детали элементов поверхностей и используемые стекла приведены в таблице 2. Эта камера является адаптированным к нашей схеме клоном камеры красного плеча спектрографа UVES [16]. Выбор этой камеры определен ее весьма удачными аберрационными характеристиками, что позволяет достичь спектрального разрешения $R = 100\,000$ без больших потерь. Фигуры рассеяния точки из-за аберраций камеры в

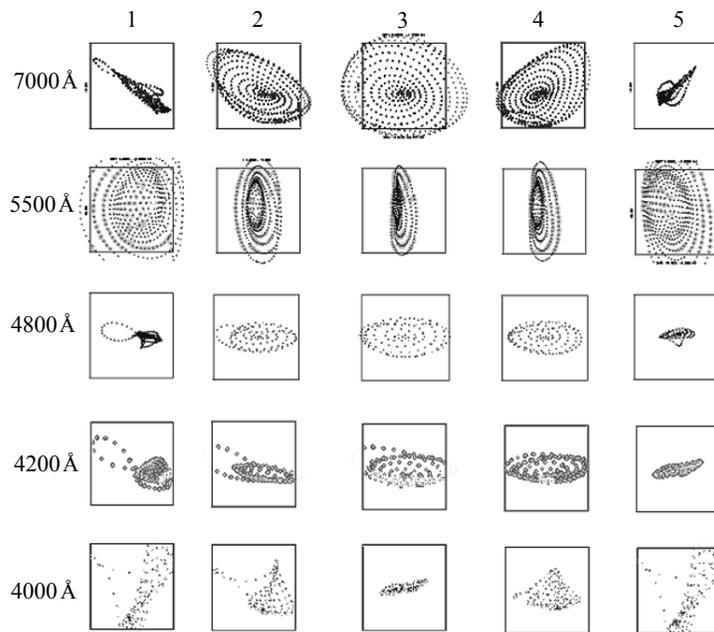


Рис. 3. Полные фигуры рассеяния точки по длинам волн в разных порядках дифракции на всем поле кадра (горизонтальное направление рисунка соответствует равномерно распределенным положениям иллюстрируемых точек между линиями перекрытия спектральных порядков — от левой до правой границы). Размер стороны каждого квадрата кадра соответствует размеру элемента ПЗС 15 мкм.

разных порядках дифракции в проекции на ПЗС показаны на рис. 3. Как видно из рис. 3, камера обеспечивает сходимость лучей внутри одного элемента ПЗС-приемника практически во всем рабочем диапазоне длин волн. Это, в свою очередь, обеспечивает размер элемента разрешения спектрографа на уровне около 2.5 элемента ПЗС в режиме высокого спектрального разрешения при ширине входной щели спектрографа 0.75 .

В целом преимущества описанной оптической схемы спектрографа состоят, в первую очередь, в его компактности. В этом варианте узел кросс-дисперсии располагается непосредственно в плоскости «белого зрачка», что позволяет использовать фокусирующую камеру меньшей апертуры по сравнению с традиционными аналогами спектрографов. С учетом того, что стоимость дорогой фокусирующей камеры (обычно это самый дорогой и сложный в изготовлении элемент спектрографа) растет примерно как квадрат радиуса ее апертуры, это решение существенно удешевляет спектрограф. Вторым преимуществом является то, что эта схема минимизирует величину рассеянного света. И, наконец, третьим существенным преимуществом являются относительно небольшие параллаксы в системе и возможность ее горизонтальной монтажа на компактном виброзащищенном оптическом столе размером 3×1 м (см. масштабы на рис. 1). Более

подробную информацию о деталях оптики спектрографа можно будет найти, начиная с 2014 г., в соответствующих отчетах на сайте САО РАН (<http://www.sao.ru>).

4. НАВЕСНАЯ ЧАСТЬ СПЕКТРОГРАФА: ЭСКИЗНАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМЫ КОНВЕРСИОННОЙ ОПТИКИ

Во всех вариантах наблюдений с различными спектральными разрешениями мы планируем использовать два световодных канала, организованных на спаренных оптоволоконных сборках различных конфигураций (детали этих конфигураций см. ниже). Такая концепция позволяет в разных вариантах проводить одновременные наблюдения:

- (1) спектров объекта и лампы для одновременной калибровки длин волн;
- (2) спектров объекта и фона;
- (3) спектров обыкновенного и необыкновенного лучей в варианте спектрополяриметрических наблюдений.

На рис. 4 приведена схема навесной (предоптоволоконной) части спектрографа, которую мы планируем разместить в первичном фокусе (ПФ) БТА. В этой схеме пучок от 6-м зеркала с относительным отверстием $F/4$ коллимируется за

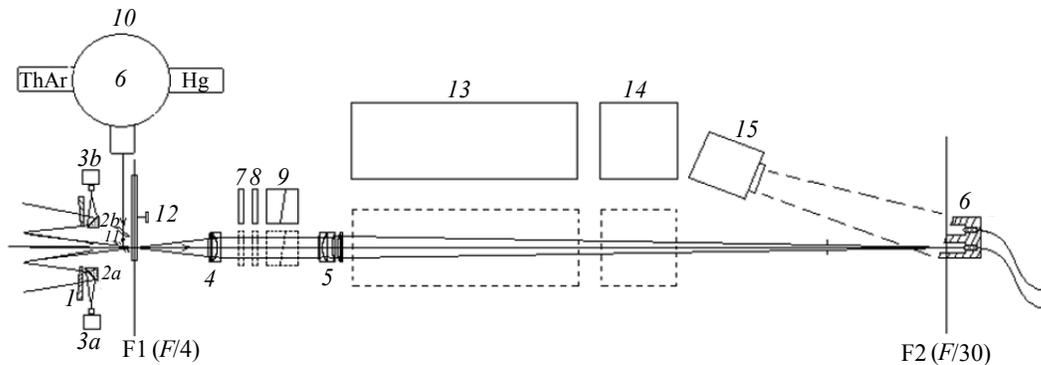


Рис. 4. Схема предоптоволоконной части спектрографа.

фокальной плоскостью F1 группой линз 4 и затем преобразуется к относительному отверстию $F/30$ группой линз 5. Участок между группами линз 4 и 5 предназначен для введения в него поляризационной оптики при поляриметрии.

В сходящемся после линз 5 пучке мы также предлагаем разместить дополнительные оптические элементы для организации режимов высокоточных измерений лучевых скоростей звезд и компенсации атмосферной дисперсии. Рассмотрим кратко все режимы работы спектрографа.

(1) *Стандартный режим.* В режиме стандартных наблюдений пучок в фокальной плоскости F1 проходит через различные комбинации диафрагм, расположенные на турели 12. В стандартном режиме это две полторасекундные диафрагмы, разнесенные друг от друга на расстояние $10''$ (в проекте подразумевается также использование и других диафрагм). После прохождения групп линз 4 и 5 в стандартном режиме пучок свободен от какой-либо служебной оптики. В этом режиме для получения спектров от исследуемой звезды используется лишь один из световодных каналов. Другой канал может быть использован либо для получения спектра фона, либо для получения эталонного спектра для калибровки по длинам волн или спектра плоского поля. Искусственные источники света для калибровки по длинам волн (лампа с полым катодом из тория, заполненная смесью газов) и для плоского поля (галогенная лампа) размещаются в сфере интегрирования света 10. Пучок света, выходящий из сферы, имеет ту же сходимости, что и основной пучок от БТА с относительным отверстием $F/4$. Этот пучок может перехватываться диагональным зеркалом 11 и направляться на входы световодных каналов в фокальной плоскости F2. При этом зеркало 11 будет иметь несколько фиксированных рабочих положений для направления света либо

одновременно в оба канала, либо в один из них. Таким образом достигаются режимы как традиционных последовательных наблюдений «объект + калибровочная лампа», так и одновременных наблюдений «объект + фон».

(2) *Режим высокоточных измерений лучевых скоростей звезд.* Для высокоточных измерений лучевых скоростей в качестве источника спектра сравнения мы планируем использовать йодную ячейку 13, которая будет вводиться в пучок в режиме удаленного контроля. В остальном режиме наблюдений полностью идентичны описанным выше стандартным наблюдениям.

(3) *Режим спектрополяриметрических наблюдений.* Для спектрополяриметрических наблюдений мы планируем использовать в разных комбинациях четвертьволновую 7 и полуволновую 8 пластинки совместно с анализатором 9, который разводит обыкновенный и необыкновенный лучи. В качестве анализатора мы планируем использовать либо призму Волластона, либо пластину Саварра. По этому поводу нами будет дано специальное дополнение к проекту на этапе его детализации. Далее эти лучи проецируются на соответствующие входы световодных каналов, собранные в оптоволоконную сборку на подвижной каретке 6.

Перечисленные выше режимы наблюдений покрывают основные задачи, традиционные для спектроскопии высокого спектрального разрешения. Остановимся также на описании узлов поддержки наблюдений.

(1) *Узел офсетного гидирования.* Узел офсетного гидирования состоит из корректора поля 1, двух подвижных диагональных зеркал 2a и 2b и жестко связанных с ними камер телевизионных подсмотров 3a и 3b. Эти зеркала и

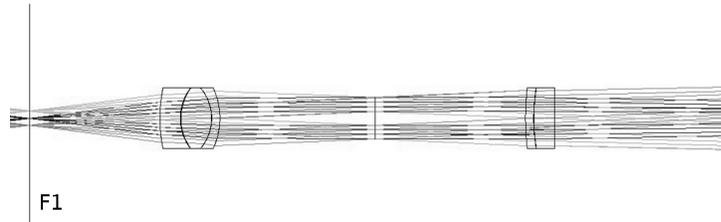


Рис. 5. Оптическая схема конверсионной оптики навесной части спектрографа.

камеры осуществляют цифровой контроль положений опорных звезд гидирования, находящихся вне центрального полезного поля (несколько десятков угловых секунд). Корректор поля имеет отверстие в центре для обеспечения полезного поля, свободного от дополнительных поглощений света на стекле корректора. Полное поле гида — около двух десятков угловых минут. В таком поле с высокой вероятностью найдется яркая звезда $m_V = 12-14^m$, что необходимо для обеспечения гидирования с высокой частотой (10–20 Гц), которой будет достаточно для контроля механических колебаний телескопа с характерными частотами около 1 Гц. С соответствующими характерным временем (1 с) гид будет управлять подвижной кареткой *б*, на которой закреплены входы в световодные каналы спектрографа. Кроме того, каждые 2–3 секунды гид будет корректировать положение телескопа, анализируя накопленную за это время суммарную коррекционную поправку. В настоящем описании корректор поля пока не рассчитан, поскольку мы рассматриваем также альтернативный вариант использования офсетного гидирования без корректора в трехминутном центральном поле с использованием быстрых и чувствительных ПЗС-камер, обеспечивающих устойчивое гидирование по более слабым звездам. Этот вопрос будет рассмотрен на этапе детальной разработки узлов спектрографа в соответствующей статье.

(2) *Контроль поля и входа в оптоволоконно.* Для отождествления объекта исследования и вывода его на вход спектрографа будет использоваться одно из зеркал *2a*, *2b* с соответствующей ПЗС-камерой одного из подсмотров офсетного гидирования (гидирования с отступом от оптической оси). В режиме наблюдений с отведенным от оптической оси зеркалом офсетного гида визуальный контроль за торцами оптоволокон на каретке *б* осуществляется подсмотром оптоволоконного входа *15*. В качестве этого подсмотра мы планируем использовать быструю высокочувствительную камеру с пельтье-охлаждением, обеспечивающую скорость считывания кадров с частотой более 100 Гц. Камера с такими высокими характеристиками нужна для обеспечения режи-

ма наблюдений с коррекцией наклона волнового фронта от исследуемых объектов. Рабочая частота коррекции — 10 Гц.

(3) *Узел компенсации атмосферной дисперсии.* В проекте предусматривается также оборудование спектрографа компенсатором атмосферной дисперсии *14* для наблюдений объектов на больших зенитных расстояниях. Компенсатор будет спроектирован сотрудниками Группы методов астрономии высокого разрешения САО РАН. Подробная схема его конструкции будет представлена на этапе детальной разработки узлов спектрографа.

На рис. 5 и 6 приведены оптическая схема и точечная диаграмма конверсионной оптики навесной части. Параметры линз приведены в таблице 3. Навесная часть будет располагаться в кабине первичного фокуса вдоль оптической оси телескопа.

Таблица 3. Параметры линз конверсионной оптики

Стекло	Радиус кривизны, мм	Толщина, мм	Диаметр линзы, мм
K-8	-76.89	-10	15
	-24.99	-0.3	
OK-4	-24.99	-15	15
ACRYLIC	22.92	-0.1	15
STK-12	22.92	-4	15
	35.80	-76	15
	∞	-74	10
STK-12	-138.53	-4	15
ACRYLIC	-89.49	-0.1	15
OK-4	-89.49	-10	15
	-915.06	-600	15
	∞		0.05

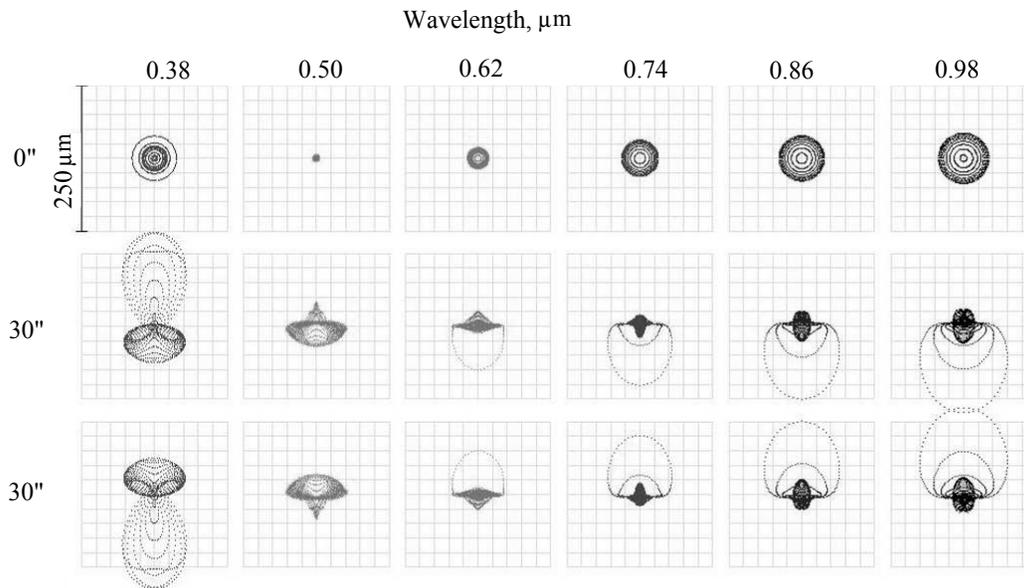


Рис. 6. Полные фигуры рассеяния точки при конверсионной оптике в фокальной плоскости F2 на оптической оси и при экстремальных углах (около 30'') от оптической оси.

5. КОНФИГУРАЦИЯ ОПТОВОЛОКОННОЙ СБОРКИ СВЕТОВОДНОГО ТРАКТА СПЕКТРОГРАФА

В основной конфигурации оптоволоконная сборка представлена двумя оптоволоконками с числовыми апертурами $NA = 0.22$ и диаметрами ядер 150 мкм. Каждое из этих оптоволокон представляет собой индивидуальный световодный канал. Всего имеется два канала. Для согласования входной числовой апертуры оптоволокон с относительным отверстием входящего пучка $F/30$ торцы световодов каждого из каналов снабжены согласующей микролинзой (Rod-lens), преобразующей пучок с относительным отверстием $F/30$ в пучок $F/3.2$, что соответствует числовой апертуре $NA = 0.22$ на границе среды кварц–кварц. Принципиальная схема одного из световодных каналов приведена на рис. 7. Другой канал абсолютно идентичен.

Радиус кривизны $r = 1.37$ мм и диаметр $d = 1.29$ мм согласующей микролинзы, расположенной на расстоянии 1 мм за фокальной плоскостью F2, позволяет полностью собрать свет от изображения звезды в диафрагме размером 1''5 и передать изображение зрачка на торец ядра оптоволоконки размером 150 мкм. Центрирование такой линзы может быть выполнено с точностью до 5 мкм, что делает светопотери на центрировании не превышающими 2–3%.

На рис. 8 приведена матрица изображений проекции зрачка (главного зеркала БТА) на торец

оптоволоконки после прохождения всех конверсионных оптических элементов и согласующей микролинзы. В левом верхнем углу приведено изображение зрачка от элемента входной диафрагмы на оптической оси. Другие изображения зрачка в разных квадрантах картинной плоскости представлены краевыми зонами полуторасекундной диафрагмы. Суммарное изображение проекции зрачка от всех элементов полуторасекундной диафрагмы (рис. 9) не превышает в диаметре размера ядра оптоволоконки, равного 150 мкм. Это означает, что светопотери, представленной оптической схемой переноса изображения зрачка телескопа в оптоволоконно практически равны нулю при использовании полуторасекундной диафрагмы. Использование диафрагм больших размеров также возможно, но в результате (см. ниже) будет сложнее обеспечить необходимое спектральное разрешение спектрографа на уровне $R = 100\,000$.

Оптоволоконно переносит изображение зрачка телескопа от ПФ БТА до стационарной части спектрографа. Расстояние переноса (длина оптоволоконки) зависит от выбора места расположения этой стационарной части. Наилучшим местом расположения, по нашему мнению, является фундамент телескопа, что обеспечивает наибольшую механическую и температурную стабильность. В этом случае общая длина световодного оптоволоконки составит 53 ± 2 м. Если, однако, местом для размещения спектрографа будет все же выбран один из фокусов Несмита, то длина оптоволоконки составит 25–27 м. В этом представлении мы не

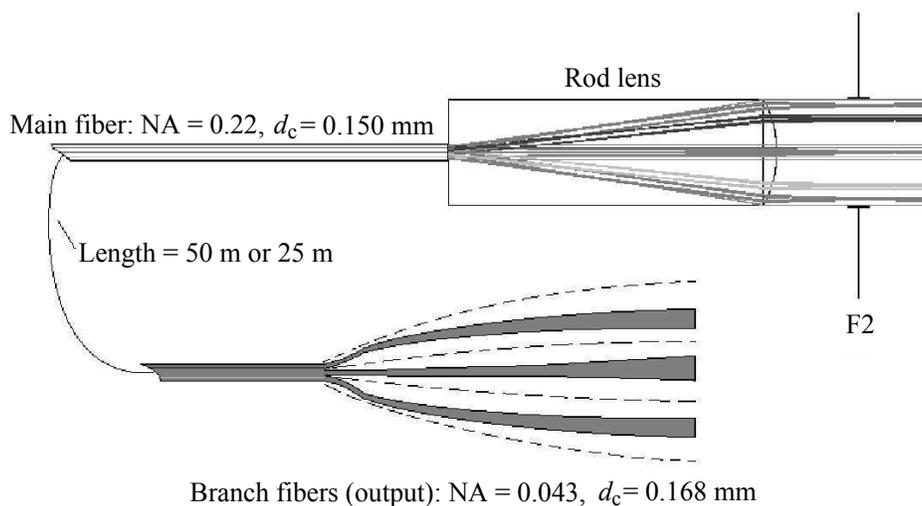


Рис. 7. Принципиальная схема оптоволоконной сборки световодного канала.

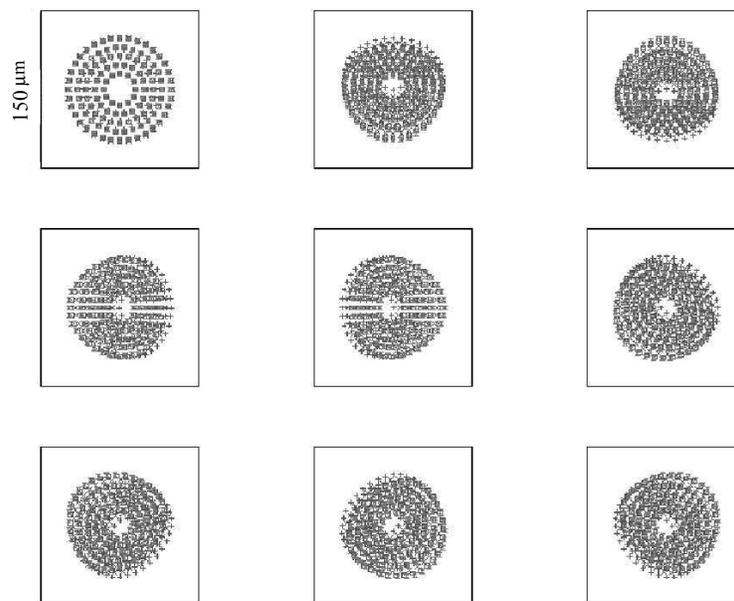


Рис. 8. Матрица изображений проекции зрачка на торец оптоволоконна с диаметром ядра 150 мкм при разных углах от оптической оси. Изображение в левом верхнем углу соответствует положению на оптической оси. Остальные изображения соответствуют изображениям от краевых зон входной диафрагмы. Центры тяжести фигур во всех случаях смещены от центров кадров к оптической оси.

делаем окончательного выбора, поскольку принципиальные элементы оптических и механических схем спектрографа от этого никак не зависят. В расчетах же общей эффективности инструмента мы исходим из длины оптоволоконна, равной 53 м.

Как уже говорилось выше, для достижения рабочего спектрального разрешения спектрографа $R = 100\,000$ необходимо деление прошедшего через оптоволоконно пучка от полторасекундной диа-

фрагмы на несколько пучков с эквивалентными размерами диафрагм $0''5$. Для этой процедуры нами рассмотрена возможность создания специального оптоволоконного разветвителя, который разносит пучок на выходе из основного оптоволоконна с $NA = 0.22$ в семь оптоволоконных рукавов с сечением гексагональной формы. На входе эти рукава имеют ту же апертуру, что и основное волокно. Эффективные диаметры ядер имеют на входе размеры

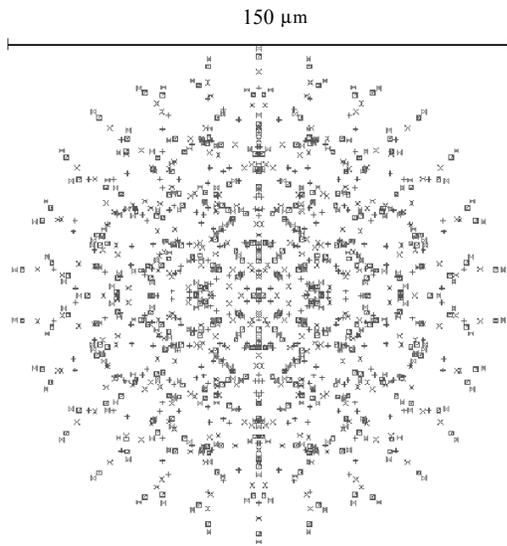


Рис. 9. Суммарное изображение проекции зрачка от всех элементов полторысекундной диафрагмы на торец оптоволоконна с диаметром ядра 150 мкм.

50 мкм. На выходе эти оптоволоконна имеют числовую апертуру $NA = 0.043$ и диаметры ядер 168 мкм. Числовая апертура 0.043 соответствует относительному отверстию $F/11.6$ на границе кварц-воздух, что согласует выходящий конус излучения с относительным отверстием входного коллиматора спектрографа. Эти семь оптоволокон, выстроенные на выходе в прямую линию, формируют элемент щели каждого из световых каналов. Эти элементы расположены друг над другом на некотором расстоянии. Расстояние по высоте щели определяется таким образом, чтобы индивидуальные спектральные порядки, соответствующие двум каналам, не сливались в проекции на ПЗС-приемник. Конфигурация нашего спектрографа требует разведения линеек каждого из световодных каналов на расстояние 600 мкм друг от друга по высоте. Таким образом, полная высота щели l этой, основной, конфигурации щелевой сборки составляет $l = 2 \times 7 \times 168 + 600 + h \times 28$ мкм. Здесь h — толщина преломляющего световодного слоя (clad). В нашем проекте h имеет характерную толщину в 10 мкм, полная высота щели $l \approx 3.2$ мм, что в проекции на ПЗС-приемник составляет величину 700 мкм. Максимально возможное разведение спектральных порядков с использованием описанного выше узла кросс-дисперсии составляет величину более 800 мкм. Это полностью согласуется с оценкой высоты щели.

Описанная технология предложена и будет создана группой оптоволоконной оптики ИЦВО РАН (Научный центр волоконной оптики Российской академии наук) в рамках совместного сотрудничества с САО РАН. Эта же группа берет на себя

изготовление оптоволоконных сборок для настоящего проекта.

6. РАЗМЕЩЕНИЕ СПЕКТРОГРАФА. ОПТОВОЛОКНО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СВЕТА НА РАССТОЯНИЕ БОЛЕЕ 10 М

В поиске места для размещения стационарной части спектрографа вне штатных фокусов БТА мы исходили из трех требований:

- (1) температурная стабильность около 0.5°C на шкале до пяти дней — типичной длительности сета наблюдений на БТА;
- (2) отсутствие механических вибраций;
- (3) длина оптоволоконного тракта не должна существенно превышать 50 м, что, по всей видимости, является пределом в мировом опыте конструирования оптоволоконных спектрографов.

Анализ всех возможных вариантов размещения спектрографа вблизи телескопа показал, что идеальными являются площади вблизи пяты телескопа, непосредственно на ее фундаменте. К сожалению, это место неудобно из-за большой длины оптоволоконного тракта, который будет в этом случае около 53 м. Тем не менее эта длина еще является допустимой, и мы считаем, что в совокупности с остальными преимуществами это место является оптимальным для размещения. Кроме того, даже если этот вариант размещения окажется неосуществимым, спектрограф можно будет легко перенести в любое другое место без каких-либо серьезных финансовых затрат.

Фундамент телескопа «чувствует» только моменты пуска и остановки телескопа. На все остальные помехи фундамент не реагирует даже в случае перемещения людей внутри телескопа и работы служебных лифтов.

Фундамент телескопа также удобен тем, что там в течение нескольких дней сохраняется постоянная температура на уровне десятых долей градуса. В течение года характерные изменения температуры составляют полтора—два градуса. Принимая во внимание все это, мы считаем, что фундамент телескопа является наиболее подходящим местом для размещения стационарной части спектрографа.

Для непосредственного размещения оптических узлов стационарной части спектрографа мы разработали проект саркофага с системой демпфирования резких скачков давления и температуры. С конструкцией и чертежами саркофага можно ознакомиться в соответствующем отчете на официальном сайте САО РАН, начиная с 2014 г. По согласованию с работниками, обслуживающими 6-м телескоп, принято решение о размещении этого саркофага со всей оптикой в помещении пяты на

высоте 1.8 м над полом. Подъем инструмента на эту высоту необходим для обеспечения пространства для других работ на фундаменте.

В качестве альтернативы может быть также рассмотрен вариант размещения спектрографа на балконе фокуса Несмит-1 на специальной виброзащищенной платформе. Этот вариант также возможен, но требования к термостабилизации конструкции будут существенно выше, что приведет к увеличению стоимости конструкции.

Для создания оптоволокон, оптимально работающих в необходимом нам диапазоне длин волн и при требуемой длине, нами планируется проведение соответствующих совместных исследований с НЦВО РАН. С другой стороны, мировой рынок уже предоставляет варианты астрономических оптоволокон, пригодных для использования их при вышеобозначенных ограничениях. Светопотери на оптической толщине таких волокон длиной около 50 м составляют не более 35% на длине волны 4000 Å (коротковолновая граница планируемого нами диапазона) и менее 10% — в середине диапазона. Такие потери не являются критичными.

7. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕКТРОГРАФА

В этой главе мы приводим оценку эффективности всего спектрографа для варианта самого простого и доступного из просветляющих покрытий оптических элементов — однослойного покрытия MgF₂ с толщиной слоя 0.22 мкм. Этот вариант покрытия может быть обеспечен в мастерских САО. В ходе проекта и в зависимости от бюджета для инструмента будут, скорее всего, выбраны более эффективные покрытия. Этот простейший вариант покрытия мы приводим здесь лишь для иллюстрации, как обеспечивающий нижний предел световой эффективности инструмента. Оценки эффективности для этого варианта покрытия приведены в таблице 4.

Как можно видеть из таблицы 4, даже в случае использования недорогого однослойного просветляющего покрытия MgF₂ общая эффективность спектрографа достаточно высока и составляет в максимуме 10%. В случае использования новейших многослойных просветляющих покрытий эффективность всего оптического тракта спектрографа может быть поднята до 20% (см., например, покрытия, примененные для просветления оптики спектрографа PEPSI: таблицы 3 и 4 в [19]).

Эффективность спектрографа, приведенная в таблице 4, дана для режима обычной спектроскопии, без поляризметрической оптики и йодной ячейки. Введение поляризметрической оптики и ячейки

в разных комбинациях уменьшает результирующую эффективность на 10–30%. В расчетах также не фигурируют потери на главном зеркале БТА и потери на щели из-за больших размеров турбулентных дисков звезд. Примем отражательную способность главного зеркала БТА равной 0.8. Пропускание на входе в оптоволокно при изображениях 1"5–2" примем равным 0.5 (эта величина может быть сведена до минимума с использованием системы офсетного гидирования и адаптивной оптики). Полагая вместе с этими параметрами пропускание атмосферы равным 0.8 (в зените), получаем уменьшение эффективности спектрографа в три раза. Это является естественным ограничением эффективности спектроскопии высокого спектрального разрешения в условиях астроклимата с характерными изображениями размером 1"5–2". Несмотря на это, даже результирующие 3–4% общей эффективности в системе «спектрограф + потери на щели + главное зеркало БТА + атмосфера» соответствует принятым на сегодня мировым стандартам спектроскопии высокого спектрального разрешения (см., например, [20]).

При такой эффективности за час экспозиции мы можем ожидать качество спектрального материала, оцениваемого отношением сигнал/шум $S/N = 100$ от звезды 11^m7 при наблюдениях в зените. В условиях наблюдений на больших зенитных расстояниях такое качество спектрального материала следует ожидать от звезд одиннадцатой звездной величины. В условиях секундных изображений следует ожидать $S/N = 100$ от звезды 12^m. Таким образом, примем значения $m_V = 11^m-12^m$ в качестве оценки характерных звездных величин, которые можно будет наблюдать на БТА в режиме $R = 100\,000$, имея при этом $S/N = 100$ за один час экспозиции.

Предельная звездная величина ($S/N = 10$ за час экспозиции) будет находиться в пределах 16^m–17^m в случае безлунной ночи с хорошим качеством изображения. В случае наблюдений с полной Луной и в непосредственной близости от нее (несколько градусов) это будет лишь 15^m. Поэтому наблюдения слабых объектов в лунные ночи не рекомендуются.

Детали, связанные с повышением эффективности спектрографа через использование офсетного гидирования и системы адаптации волнового фронта, нами также рассмотрены и могут быть найдены с 2014 г. в соответствующих отчетах по проекту на сайте САО РАН (<http://www.sao.ru>).

Таблица 4. Эффективность оптических элементов и суммарная эффективность спектрографа в варианте использования однослойного просветляющего покрытия на основе MgF₂

Элемент тракта	Длина волны, Å			
	4000	4600	5800	7000
Конверсионная оптика + вход в волокно + потери на разветвителе + выход из оптоволоконна	0.73	0.77	0.78	0.74
Пропускание волокна FBP на длине 50 м	0.65	0.77	0.90	0.94
Первичный коллиматор	0.85	0.83	0.79	0.77
Эшелле	0.49	0.49	0.48	0.40
Ломающее зеркало	0.92	0.91	0.89	0.88
Коллиматор переноса	0.92	0.91	0.89	0.88
Кросс-дисперсионная призма	0.72	0.80	0.82	0.82
Проекционная камера с однослойным покрытием MgF ₂ на всех ее элементах	0.609	0.775	0.714	0.688
ПЗС на основе чипа CCD231-84	0.76	0.82	0.80	0.83
Эффективность спектрографа в варианте с камерой, просветленной на основе однослойного покрытия MgF ₂	5.6%	10%	9.9%	7.8%

8. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОГРАФОМ И ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ КАЛИБРОВОК

В этом разделе мы кратко затронем вопросы, связанные с управлением спектрографом и эталонными источниками света для калибровок (подробно эти вопросы будут также представлены в технических отчетах на сайте обсерватории).

Управляющий комплекс спектрографа планируется организовать в виде распределенной совокупности технических ресурсов и управляющего программного обеспечения, объединенных центральным управляющим компьютером на рабочем месте наблюдателя. Физической средой, объединяющей все элементы данного комплекса, является локальная вычислительная сеть обсерватории. Подключение управляемых устройств (смену фильтров, подсмотров, юстировочных узлов и т.д.) планируется осуществлять с использованием CAN-шины (CAN — Controller Area Network — стандарт промышленных сетей, разработанный в 80-х годах компанией Robert Bosch GmbH). Структурно весь рассматриваемый комплекс состоит из четырех основных частей.

(1) Предоптоволоконная (навесная) часть комплекса, устанавливаемая на время наблюдений в первичном фокусе. Предоптоволоконная часть спектрографа имеет встроенную систему управления с сетевым компьютерным интерфейсом.

(2) Спектральная часть, располагаемая в нижней части башни на фундаменте (помещение пяты) телескопа или в фокусе Несмита, которая соединяется с предоптоволоконной частью гибким световодным жгутом оптоволокон. Спектральная часть комплекса имеет встроенную систему управления с сетевым компьютерным интерфейсом.

(3) Рабочее место наблюдателя, оснащенное необходимыми вычислительными средствами, сетевыми интерфейсами, устройствами отображения и сохранения информации. Физически это место может располагаться на значительном удалении от места установки спектрографа и обеспечивать комфортные условия труда астронома в ночное время.

(4) Четвертой частью комплекса является сам телескоп БТА с его системой управления и сервисными службами: времени, метеорологических параметров, энергоснабжения и т.п.

Интегрирование всех описанных выше частей комплекса в единое информационное целое производится через локальную вычислительную сеть обсерватории. Такое решение предоставляет возможность гибкого конфигурирования системы в зависимости от решаемой задачи — юстировки, контроля характеристик и проведения наблюдений.

В качестве источников света для калибровок мы планируем использование традиционных ламп: торий-аргоновых — для привязок по длинам волн

и галогенных — для получения плоских полей. Однако в процессе обсуждений проекта спектрографа с нашими партнерами из Института оптоволоконной оптики (ИЦВО РАН) нами рассмотрена возможность использования фемтосекундных лазеров. С помощью этих лазеров возможны сверхточные привязки наблюдаемых спектров по длинам волн и энергетические калибровки. Остановимся на этом инновационном вопросе более детально.

9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ В АСТРОСПЕКТРОСКОПИИ

Растущий интерес к астрофизической спектроскопии высокого разрешения требует измерений радиальных скоростей космических объектов с точностями, превосходящими несколько м/с. Это очень малые величины, поэтому астрофизический спектрограф должен быть соответствующим образом прокалиброван. Такая калибровка обычно осуществляется с помощью спектральных ламп (лампы с полым катодом с различными наполнителями) или с помощью абсорбционных ячеек с узкими линиями поглощения. Идеальное устройство для калибровки должно давать набор узких спектральных линий яркого излучения или глубокого поглощения. Эти линии должны быть однородными по величине и достаточно часто расположенными. Характеристики калибровочного источника должны быть воспроизводимы.

Успехи в области лазеров дали новый источник для калибровки с замечательными свойствами. Это генераторы гребёнки оптических частот (ГОЧ), принцип работы которых основан на использовании фемтосекундных лазеров непрерывного действия. Такие лазеры генерируют строго регулярную последовательность совершенно одинаковых импульсов фемтосекундной длительности. Особенность этих лазеров состоит в том, что они сочетают свойства источников чрезвычайно коротких импульсов мощного лазерного излучения со свойствами спектральных источников излучения с чрезвычайно узкими спектральными линиями. Эта особенность проистекает из того факта, что непрерывной, строго периодической последовательности импульсов во времени соответствует, согласно преобразованию Фурье, спектр равномерно расположенных частот. Таким образом, непрерывный лазер фемтосекундных импульсов является генератором ГОЧ с замечательными особенностями. Ширина спектральной линии каждой из частот определяется стабильностью работы лазера и может быть очень узкой (доли Гц). С другой стороны, полная ширина спектра всей гребёнки связана с

длительностью импульса и может быть очень широкой (сотни нм). Поскольку интенсивность фемтосекундных импульсов высока, можно эффективно использовать методы нелинейной оптики (генерация гармоник и суперконтинуума) для получения ГОЧ во всём диапазоне от ближнего ИК до УФ. Чрезвычайно важным обстоятельством является то, что положение линий ГОЧ на шкале частот (длин волн) можно точно сопоставить с эталоном секунды (цезиевые или рубидиевые атомные часы), т.е. осуществлять абсолютное измерение оптической частоты. Это означает абсолютную воспроизводимость измерений. Всё это привело к подлинной революции в области метрологии частот (Нобелевская премия 2005 г.) [21, 22] прецизионной спектроскопии и в создании сверхточных оптических часов.

Возникла идея использовать ГОЧ для калибровки в сверхточных астрономических спектрографах высокого спектрального разрешения, предназначенных для прецизионного измерения радиальных скоростей [23]. Однако на пути такого применения ГОЧ имеется существенное затруднение. Интервал между линиями определяется частотой повторения импульсов, которая, в свою очередь, определяется оптической длиной резонатора лазера. Обычно этот интервал составляет порядка 100 МГц. Это означает, что интервал между линиями в спектре около 500 нм будет составлять 2.5×10^{-4} нм. Очевидно, что это не годится для калибровки, поскольку в спектрографе линии сольются в сплошной спектр. Требуется существенное увеличение интервала между линиями ГОЧ. С этой целью используется фильтрация излучения ГОЧ через эталоны Фабри—Перо. Длина эталона подбирается таким образом, чтобы она была меньше оптической длины резонатора в целое число раз. Тогда через эталон будут проходить лишь частоты, кратные этому числу. На практике используются два—три эталона Фабри—Перо в последовательности. В результате получается ГОЧ с интервалом, достаточным для получения в спектрографе набора линий, пригодных для калибровки.

Этот подход был успешно реализован. Так, в работе [24] было продемонстрировано использование ГОЧ для калибровки солнечного спектра. Ряд исследовательских групп, например [25, 26], получили с помощью методики ГОЧ успешные результаты в исследованиях, направленных на улучшение методик прецизионного измерения радиальных скоростей. Следует отметить, что использование методики ГОЧ предполагается для проекта ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanet and Stable Spectroscopic Observations) [27], а также для проекта CODEX (Cosmic Dynamics Experiment) [28]. Цель этого проекта — впервые непосредственно измерить

величину ускорения разлёта Вселенной. Это предполагается сделать путём наблюдения линий квазаров. Для этого требуется беспрецедентная точность измерения радиальной скорости (1 см/с) при наблюдениях свыше десяти лет. Считается, что новейшая лазерная техника будет использоваться для получения сверхточной калибровки по длинам волн в уникальных астрофизических спектрографах, предназначенных для этих проектов.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена оптическая схема эшелюнного спектрографа высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для спектроскопии звезд на БТА. Рабочий диапазон от 4000 до 7500 Å. В спектрографе заложено несколько режимов работы для обеспечения набора спектральных разрешений $R = 100\,000$ и ниже с возможностью использования наборов широких щелей и аппаратного биннинга ПЗС.

Схема спектрографа позволяет дальнейшую модернизацию в рамках неизменных базовых конструкций в направлении увеличения его спектрального диапазона до 4000–10000 Å путем создания дополнительного красного плеча и применения адаптивной оптики.

Сделанные выше оценки характерных и предельных звездных величин являются несколько идеализированными. В этих оценках не присутствует собственный шум (главным образом, шум считывания) ПЗС. Не учтен также тот факт, что традиционно спектральные исследования на стационарных спектрографах высокого разрешения проводятся в САО, главным образом, в лунное время, что еще более снижает эффективность наблюдений.

Использование детекторов с шумами считывания $2\text{--}4e^-$ уменьшают эффективность наблюдений звезд предельно слабых величин на десятки и более процентов. Наблюдения в полную Луну уменьшают как возможность проведения предельных наблюдений слабых звезд, опуская оцененные выше пределы вплоть до $m_V = 14\text{--}15^m$, так и эффективность исследований звезд с характерными звездными величинами $m_V = 11\text{--}12^m$. Оснащение спектрографа адаптивной оптикой значительно улучшит ситуацию. Уменьшение характерного изображения диска звезды методами адаптивной оптики лишь в два раза сразу добавляет одну величину к характерным звездным величинам. В безлунное время за час экспозиции станет возможным получение спектров с $S/N = 100$ для звезд с m_V слабее 12^m . Эффективность наблюдений в лунное время вырастет еще выше. Все эти вопросы детально рассмотрены в технических приложениях

к проекту и с 2014 г. будут доступны на Интернет-сайте САО РАН (<http://www.sao.ru>) в соответствующих разделах, посвященных спектрографу.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят руководство Специальной астрофизической обсерватории за финансовую поддержку подготовки проекта. М. Юшкин также благодарит Российский фонд фундаментальных исследований (проект № 12-07-00739-а) за частичную поддержку его участия в проекте. Г. Валявин особенно благодарен К.-М. Киму и Инву Хану за обсуждение и практическую помощь в разработке спектрографа. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Furenlid and O. Cardona, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **100**, 101 (1988).
2. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
3. M. Mayor, F. Pepe, D. Queloz, et al., *Messenger* **114**, 20 (2003).
4. B. Campbell, G. A. H. Walker, and S. Yang, *Astrophys. J.* **331**, 902 (1988).
5. Каталог экзопланет, <http://exoplanet.eu/catalog/>
6. A. F. Kholtygin, G. A. Galazutdinov, T. E. Burlakova, et al., *Astronomy Reports* **50**, 220 (2006).
7. A. F. Kholtygin, T. E. Burlakova, S. N. Fabrika, et al., *Astronomy Reports* **50**, 887 (2006).
8. К.-М. Kim, I. Han, G. G. Valyavin, et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **119**, 1052 (2007).
9. T. Eversberg, A. F. J. Moffat, M. Debruyne, et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **110**, 1356 (1998).
10. В. Е. Панчук, Отчет САО, № 20 (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1997).
11. I. D. Najdenov and V. E. Panchuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **41**, 143 (1996).
12. В. Г. Клочкова, Научно-технический отчет № 266 (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1998).
13. В. Г. Клочкова, Препринт № 139 (Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 1999).
14. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1998).
15. J. A. Valenti, R. P. Butler, and G. W. Marcy, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **107**, 966 (1995).
16. H. Dekker, S. D'Odorico, A. Kaufer, et al., *Proc. SPIE* **4008**, 534 (2000).
17. K. G. Strassmeier, R. Pallavicini, J. B. Rice, and M. I. Andersen, *Astronomische Nachrichten* **325**, 278 (2004).

18. S. Vogt, Publ. Astronom. Soc. Pacific **99**, 1214 (1987).
19. K. G. Strassmeier, A. Hofmann, and M. F. Woche, Astronomische Nachrichten **323**, 510 (2002).
20. M. Mayor, F. Pepe, D. Queloz, et al., Messenger **114**, 20 (2003).
21. Дж. Л. Холл, Успехи физич. наук **176**, 1353 (2006).
22. Т. В. Хэнш, Успехи физич. наук **176**, 1368 (2006).
23. M. T. Murphy, Th. Udem, R. Holzwarth, et al., Monthly Notices Royal Astronom. Soc. **380**, 839 (2007).
24. T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck, et al., Science **321**, 1335 (2008).
25. G. G. Ycas, F. Quinlan, S. A. Diddams, et al., Optics Express **20**, 6631 (2012).
26. T. Wilken, G. Lo Curto, R. A. Probst, et al., Nature **485**, 611 (2012).
27. F. A. Pepe, S. Cristiani, L. R. Rebolo, et al., Proc. SPIE **7735**, 14 (2010).
28. L. Pasquini, S. Cristiani, H. Dekker, et al., Messenger, No. 122, 10 (2005).

High-Resolution Fiber-Fed Echelle Spectrograph for the 6-m Telescope. I. Optical Scheme, Arrangement, and Control System

G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, G. A. Galazutdinov, S. V. Drabek, V. S. Shergin, A. N. Sarkisyan, E. A. Semenko, T. E. Burlakova, V. M. Kravchenko, D. O. Kudryavtsev, A. M. Pritychenko, P. G. Kryukov, S. L. Semjonov, F. A. Musaev, and S. N. Fabrika

We propose a project of a high-resolution ($R = 100\,000$) fiber-fed spectrograph for comprehensive studies of stellar atmospheres, exoplanet searches, asteroseismological studies, studies of stellar magnetism, active nuclei of bright galaxies, interstellar medium, etc. We present the optical scheme of the instrument. The operating wavelength region spans from 4000 to 7500 Å. We also present the optical scheme of the pre-fiber optic unit of the spectrograph. The unit supports four main modes of spectroscopic observations: the mode of traditional spectroscopy with the spectrum of the studied object taken along with the background spectrum in the immediate vicinity of the object; the mode of the simultaneous recording of the spectrum of the object and that of the wavelength standard; the mode of high-precision spectroscopy with an iodine cell, and the mode of spectropolarimetric observations with the measurement of all the Stokes parameters.

Keywords: *instrumentation: spectrographs*