

УДК

## ОПТОВОЛОКОННЫЙ СПЕКТРОГРАФ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ БТА: ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

© 2020 Г. Г. Валявин<sup>1,2,3\*</sup>, Ф. А. Мусаев<sup>1</sup>, А. В. Перков<sup>1</sup>, В. Н. Аитов<sup>1</sup>, В. Д. Бычков<sup>1</sup>, С. В. Драбек<sup>1</sup>, В. С. Шергин<sup>1</sup>, Д. А. Сазоненко<sup>4,2</sup>, Д. Е. Кукушкин<sup>4,2</sup>, Г. А. Галазутдинов<sup>5,6,1</sup>, Э. В. Емельянов<sup>1</sup>, Г. В. Якопов<sup>1</sup>, Т. Е. Бурлакова<sup>1</sup>, Ж.-Л. Берто<sup>7</sup>, А. В. Тавров<sup>7</sup>, О. И. Кораблев<sup>7</sup>, М. В. Юшкин<sup>1</sup>, А. Ф. Валеев<sup>1</sup>, Д. Р. Гадельшин<sup>1</sup>, К.-М. Ким<sup>8</sup>, Инву Хан<sup>8</sup>, Б.-Ч. Ли<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

<sup>3</sup>Факультет математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 198504 Россия

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101 Россия

<sup>5</sup>Институт астрономии Северного католического университета, Антофагаста, 1270709 Чили

<sup>6</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

<sup>7</sup>Институт космических исследований, Москва, 117997 Россия

<sup>8</sup>Институт астрономии и космических исследований, Тэджон 305-348 Южная Корея

Поступила в редакцию 15 октября 2019 года; после доработки 5 февраля 2020 года; принята к публикации 5 февраля 2020 года

Представлены результаты лабораторных испытаний первой версии оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения, который строится в Специальной астрофизической обсерватории (САО РАН). В ходе лабораторных тестов достигнуто спектральное разрешение около 70 000. Пиковая эффективность всего оптического тракта спектрографа (без учета световых потерь на ПЗС, главном зеркале БТА и атмосфере) на длине волны 620 нм и с эквивалентными ширинами входной щели 1''5 и 0''75 составляет 8% и 4% соответственно. Наибольшие значения спектрального разрешения ( $R = 70\,000\text{--}100\,000$ ) достигаются с ширинами входной щели 0''75–0''4. В настоящей версии спектрографа этот режим работы инструмента реализован механическим диафрагмированием щели. Специально сконструирована и строится проекционная камера для работы с коллимированным пучком диаметром 200 мм, что позволит довести спектральное разрешение до 100 000. Для сохранения световой эффективности инструмента на уровне не менее 6% будет применяться двухступенчатый резатель изображения.

Ключевые слова: *техника: фотометрия — техника: спектроскопия — техника: поляриметрия*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности проведения ряда наблюдательных астрофизических программ, связанных с высокоточной спектроскопией, в САО РАН строится оптоволоконный эшелле-спектрограф высокого спектрального разрешения. Среди этих программ выделяется недавно начатая в обсерватории программа поиска и исследования экзопланет. Первые результаты (Valyavin et al. 2015; Grauzhanina et al. 2015; Gadelshin et al.

2017; Lee et al. 2017; Grauzhanina et al. 2017a; Grauzhanina et al. 2017b), полученные с помощью уже существующего на БТА САО РАН инструментария, показали, что, несмотря на общую успешность, целый ряд задач, связанных, в частности, с высокоточным мониторингом переменности лучевых скоростей звезд из-за присутствия на их орбитах экзопланет, требует серьезного обновления спектроскопической аппаратуры обсерватории. Другая традиционная для САО РАН программа — исследование магнитных звезд (Romanyuk 2016; Romanyuk 2017; Romanyuk et al. 2016; Romanyuk

\*E-mail: gvalyavin@sao.ru

et al. 2017). В рамках ее выполнения уже давно назрела необходимость повышения точности спектрополяриметрических измерений магнитных полей звезд до субгауссовых величин.

Общая концепция и базовая оптическая схема строящегося спектрографа представлены в работах (Valyavin et al. 2014; Valyavin et al. 2015). Схемы щелевой оптики, элементов кросс-дисперсии, проекционной камеры и поляризационного узла, доработанные с учетом российских производственных стандартов, приведены в статьях (Kukushkin et al. 2016a; Sazonenko et al. 2016; Vasilyev et al. 2016; Kukushkin et al. 2016b; Sazonenko et al. 2017; Kukushkin et al. 2017). К настоящему моменту сконструированы и собраны в единую схему все оптические узлы: узел навесного оборудования в соответствии с эскизом (Valyavin et al. 2014), эшелле-мозаика с узлом коллимации и кросс-дисперсионной призмой (Vasilyev et al. 2016) и оптоволоконный привод со щелевой сборкой. В производстве все еще находится проекционная камера (Vasilyev et al. 2016) (далее объектив), с которой мы связываем достижение предельных характеристик. Однако благодаря наличию на рынках оптической продукции более простых, но пригодных для работы в комбинации с нашим спектрографом стандартных линзовых объективов, мы смогли начать опытную эксплуатацию сконструированного спектрографа и его экспериментальное исследование. В настоящей работе мы представляем первые результаты.

## 2. ОПТОМЕХАНИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРОГРАФА

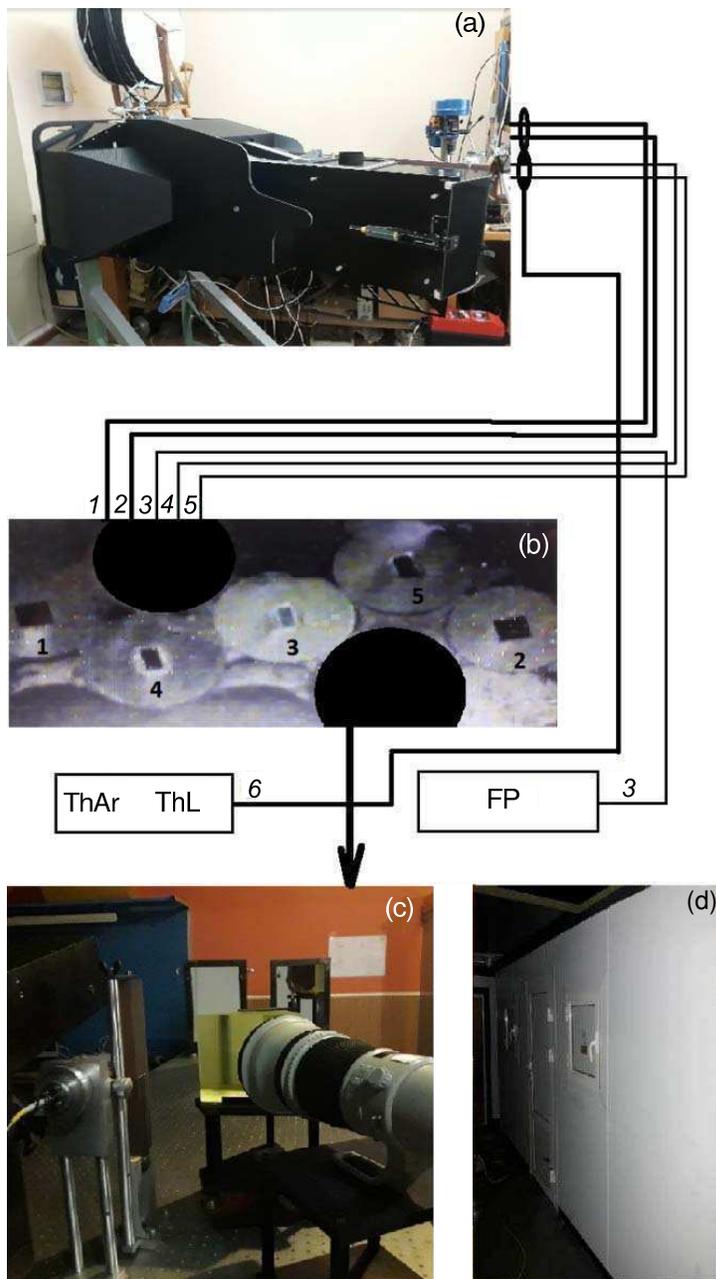
При выборе схемы оптоволоконного спектрографа разработчики предъявляли максимальные требования к точности позиционных измерений спектральных линий и к точности спектрополяриметрических измерений. Как известно, оптоволоконные спектрографы в таких измерениях значительно превосходят щелевые (см. краткий обзор и ссылки в работе Valyavin et al. (2014)). В свою очередь оптоволоконные спектрографы проигрывают щелевым в эффективности собираемого света в УФ-диапазоне вследствие селективного поглощения в оптоволокне значительной длины. Удобное для размещения спектрального узла место на фундаменте телескопа БТА предполагает использование оптоволокна длиной более 50 м (см. раздел 6 в статье Valyavin et al. (2014)). В этом случае для волн короче 400 нм поглощение света становится настолько существенным, что попытки рассмотрения УФ-диапазона как рабочего в настоящем проекте теряют смысл. В реализуемой оптической схеме спектрографа мы жертвуем, насколько это возможно, УФ-диапазоном инструмента, для того

чтобы достичь максимально возможных точностей позиционных и поляризационных измерений в видимой части спектра. Для этих целей эффективным является рабочий диапазон от 400 до 750 нм.

В качестве оптической конфигурации спектрального узла (Valyavin et al. 2014; Valyavin et al. 2015) выбрана классическая схема, известная под названием “белый зрачок” (Dekker et al. 2000). В отличие от традиционных схем, “белый зрачок” использует два внеосевых коллиматора. Один из коллиматоров работает с эшелле-решеткой в режиме автоколлимации, другой формирует плоскость зрачка в своем фокусе, строя там недиспергированное изображение эшелле-решетки. В этом месте размещается узел кросс-дисперсии и затем фокусирующая оптика с ПЗС-приемником. Основное преимущество выбранной схемы спектрографа состоит в его компактности. В данном варианте узел кросс-дисперсии располагается непосредственно в плоскости зрачка, что позволяет минимизировать размеры этого узла и размер фокусирующей камеры и значительно удешевить стоимость всего инструмента.

Изготовление спектрографа было начато в 2015 г. и к 2017 г. закончен его лабораторный вариант (Valyavin et al. 2019). Строительство велось с использованием мощностей оптикомеханических мастерских САО РАН (конструирование оправ и сборка спектрографа) при взаимодействии с Государственным оптическим институтом им. Вавилова (ГОИ, Санкт-Петербург) и Научно-производственным объединением “Оптика” (НПО “Оптика”, Москва). На этих предприятиях были изготовлены крупногабаритные дифракционные эшелле-решетки (ГОИ) и система коллимации (НПО “Оптика”). Часть обслуживающих зеркал была создана для нашего проекта в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН, Санкт-Петербург). Изготовленные на базе этих производств узел коллимации и основной диспергирующий элемент (мозаика из двух крупногабаритных дифракционных решеток и кросс-дисперсор, собранные в соответствии с требованиями (Valyavin et al. 2014; Vasilyev et al. 2016) являются законченными устройствами и будут использованы в окончательной версии спектрографа в неизменном виде.

На рис. 1 представлены внешний вид и принципиальная схема лабораторной версии спектрографа. На верхней панели приведена фотография собранного комплекса навесной аппаратуры, которая при проведении наблюдений устанавливается в первичном фокусе БТА. На средней панели показан вид выхода оптоволоконной сборки под микроскопом. Всего используется пять выходов, обозначенных цифрами от 1 до 5. Соответствующие



**Рис. 1.** (а) — общий вид навесного оборудования спектрографа; (б) — вид под микроскопом выхода оптоволоконной сборки; (с) — общий вид спектрографа на оптическом столе со стороны щелевой сборки; (д) — спектрограф в саркофаге на пяте телескопа БТА. Сплошными линиями и цифрами обозначены принципиальная схема оптоволоконной связи узлов, модуль калибровки по длинам волн (ThAr) с “плоским полем” (ThAl), и интерферометр Фабри–Перо для контроля стабильности спектрографа.

этим цифрам оптоволоконна пронумерованы в том же порядке и схематически изображены сплошными линиями, соединяющими навесное оборудование со спектрографом (рис. 1с).

Оптоволоконный выход формирует:

- канал контроля нуля-пункта, по которому передается свет с интерференционной картиной, полученной с использованием эталона Фабри–

Перо (соответствующий оптоволоконный выход обозначен цифрой 3 на рис. 1б);

- два информационных канала, обеспечивающих наблюдения в режиме “высокого спектрального разрешения” ( $R > 70\,000$ ) — цифры 4 и 5;
- два информационных канала для наблюдений в режиме “низкого спектрального разрешения” ( $R = 35\,000$ ) — цифры 1 и 2;

Разница спектральных разрешений пар каналов 1, 2 и 4, 5 определяется ширинами их ядер прямоугольной формы, которые по сути являются образами щелей каждого из этих каналов. Для реализации режима “низкого спектрального разрешения” используются квадратные ядра со стороной 150 мкм, что эквивалентно полторасекундному изображению звезды в пучке с относительным отверстием  $f/3.3$ , преобразованному на входе в оптоволокно с помощью конверсионной оптики (Valyavin et al. 2014) и микролинз от относительного отверстия БТА ( $f/4$ ). В режиме “высокого спектрального разрешения” используется ширина ядра в 2.3 раза меньше, что обеспечивает  $R > 80\,000$ . Каналы используются парами для проведения спектрополяриметрических наблюдений (подробности см. в работе Valyavin et al. (2014)) либо для одновременных наблюдений спектров объекта и окружающего его фона.

Канал 3 обеспечивает постоянный контроль оптикомеханической стабильности всего инструмента. Он переносит интерференционную картину, полученную с использованием эталона Фабри–Перо, спектр которой представлен гребенкой узких частот в диапазоне длин волн от 400 до 750 нм. Эталон находится в вакуумизированном баллоне и стабилизирован по температуре с перепадами не более 0.2 К, что позволяет контролировать положения спектральных линий с точностями, превышающими  $2 \text{ мс}^{-1}$  в единицах их доплеровских смещений. Об экспериментальном исследовании этого канала будет сказано в отдельной статье, в которой будут представлены спектрограф в его окончательном виде и результаты первых наблюдений с ним.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОГРАФА

Для первичного исследования спектрографа в лабораторных условиях ранее нами был собран и съюстирован макет (Valyavin et al. 2019) на основе оптоволокна с числовой апертурой 0.11, диаметром ядра 50 мкм и длиной 25 м. На выходе из оптоволокна использовалась специально разработанная и созданная в оптических мастерских САО линзовая система, преобразующая пучок, соответствующий апертуре оптоволокна 0.11, к пучку  $f/15$  для создания на входном коллиматоре с фокусным расстоянием 2175 мм светового пятна диаметром около 140 мм. С таким преобразованием пучок затем диафрагмировался горизонтально расположенной щелью до рабочего размера 120 мкм (ширина щели) на 220 мкм (высота щели). Такая щелевая сборка имитирует работу спектрографа в связке с телескопом метрового класса с размером щели около  $2''$  с теоретически достижимым разрешением около 150 000, что по критерию Найквиста в

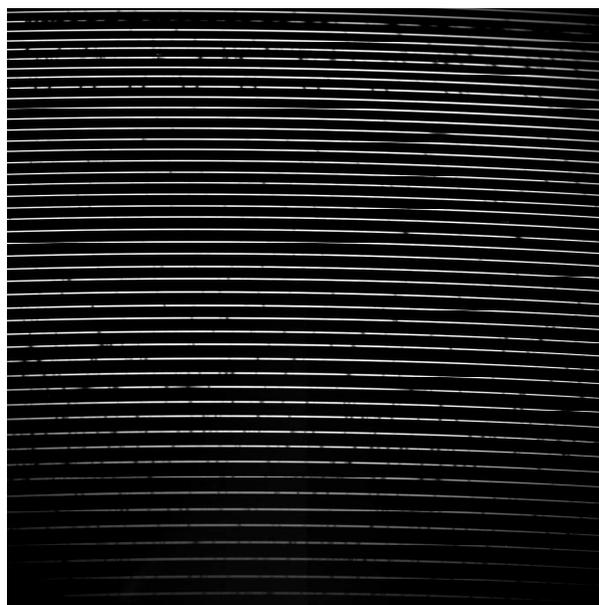


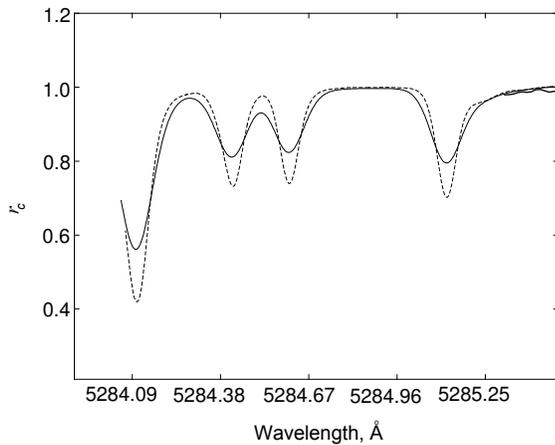
Рис. 2. Изображение эшелле-спектра Солнца.

проекции на используемую в исследовании ПЗС соответствует предельно достижимому спектральному разрешению прибора. Очевидно, что реально достижимое спектральное разрешение в этой конфигурации должно быть существенно ниже из-за общей абберационной картины всех оптических элементов спектрографа. Наша задача состояла в том, чтобы выяснить, насколько существенен вклад аббераций в схеме диспергирующего узла, а также экспериментально оценить эффективность спектрографа в сопряжении с оптоволоконным модулем.

#### 3.1. Тестирование спектрального разрешения

Для исследования спектрального разрешения был использован рассеянный солнечный свет, подаваемый с помощью оптоволокна на щель спектрографа. В опытах с солнечным светом использовалась стандартная ПЗС-матрица  $2\text{k} \times 2\text{k}$  с размером пиксела 13.5 мкм. Такой формат не позволяет полностью перекрыть все регистрируемые спектральные порядки, но позволяет получить спектр в избранных диапазонах. Для полного перекрытия спектральных порядков во всем рабочем диапазоне в САО строится специальная ПЗС-система размерностью  $4\text{k} \times 4\text{k}$  с размером пиксела 15 мкм. Пример изображения солнечного спектра представлен на рис. 2.

Анализируя схему собранного спектрографа в среде ZEMAX и экспериментально, мы установили, что на выходе из кросс-дисперсионного элемента цилиндрическая форма волнового фронта значительно искажается. В фокальной плоскости



**Рис. 3.** Фрагмент спектра Солнца: сплошная линия — обработанный результат наблюдений; пунктирная линия — атлас спектра Солнца полученный со спектральным разрешением более одного миллиона; тонкая сплошная линия — результат свертки атласа солнечного спектра с гауссовым профилем, имитирующим спектральное разрешение  $R = 70\,000$ .

проекционной камеры это искажение реализуется в виде кривизны поля с характерной амплитудой около 100 мкм, что не позволяет одновременно сфокусировать все поле кадра с эшелле-спектром в кружке рассеяния диаметром менее 25 мкм (примерно два пиксела используемой ПЗС-матрицы). В свою очередь такой размер aberrации накладывает ограничение на допустимое среднее по кадру спектральное разрешение инструмента, равное примерно 70 000. При этом характерно, что все остальные aberrации оптической схемы до кросс-дисперсионного узла имеют гораздо меньшие масштабы и могут не учитываться.

Диафрагмирование щели и наклон камеры к оптической оси в плоскости главной дисперсии позволили довести разрешение до 70 000 (Valyavin et al. 2019), что является оптимальным результатом в условиях опытной конфигурации спектрографа. Результат проиллюстрирован на рис. 3, где приведен фрагмент спектра Солнца (жирная сплошная линия), полученного в ходе эксперимента. Пунктирной линией показан фрагмент спектра солнечного атласа, полученного со спектральным разрешением около 1 000 000 (Kurucz et al. 1984). Тонкая сплошная линия соответствует результату свертки атласа солнечного спектра с гауссовым профилем, имитирующим спектральное разрешение 70 000 (наблюденный спектр немного сдвинут по длинам волн для лучшей наглядности). Как можно видеть на рисунке, разрешения 70 000 мы достигли в ходе эксперимента с неполной версией инструмента (для сравнения качества с другими подобными спектрографами см. изображение того же фрагмента спектра на рис. 1 в работе Valenti et

al. (1995)). В окончательной версии спектрографа будет использована проекционная камера, в которой цилиндрическая кривизна поля будет компенсирована, что значительно увеличит номинальное спектральное разрешение инструмента.

### 3.2. Тестирование световой эффективности

Исследование световой эффективности инструмента проводилось как теоретически с использованием расчетов в среде ZEMAX, так и в лабораторных условиях путем измерения эффективности его отдельных оптических элементов. Эффективность оптоволоконного канала длиной 63 м в сопряжении с конверсионной оптикой на входе в волокно (Valyavin et al. 2014) и щелевой оптикой на выходе измерялись в двух полосах, соответствующих фильтрам  $V$  и  $R$  широкополосной системы Джонсона. В других областях спектра эффективность пересчитывалась подгонкой теоретически рассчитанных функций пропускания оптоволоконного, конверсионной и щелевой оптики под измеренные в двух спектральных полосах. Спектральная эффективность серебряных покрытий отражающей оптики измерена в лаборатории НПО «Луч» (Подольск), где это покрытие наносилось. Эффективность узла кросс-дисперсии измерялась в нескольких длинах волн в диапазоне 450–650 нм непосредственно производителем. Вне этого диапазона проводилась экстраполяция с использованием теоретического анализа дифракционной эффективности гримзы. Эшелле-решетка исследовалась экспериментально посредством наблюдения искусственного источника непрерывного спектра с использованием стандартного перестраиваемого монохроматора, фильтрующего полосы шириной 100–200 Å. Для проекционной камеры, которая находится в производстве, в настоящем исследовании мы оценили эффективность из теоретических расчетов в среде ZEMAX. Результаты измерений эффективности отдельных оптических узлов спектрографа и инструмента в целом представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно. Как можно видеть, эффективность остается в пределах ожидаемых величин, заложенных в оригинальном проекте спектрографа (Valyavin et al. 2014).

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено исследование нового спектрополяриметра высокого спектрального разрешения с оптоволоконным входом для наблюдений на БТА в рабочем диапазоне от 4000 до 7500 Å. В 2019 г. спектрограф установлен на телескоп БТА и готов к работе в режиме опытной эксплуатации. В 2020–2021 гг. планируется последующая модернизация прибора с заменой проекционной камеры

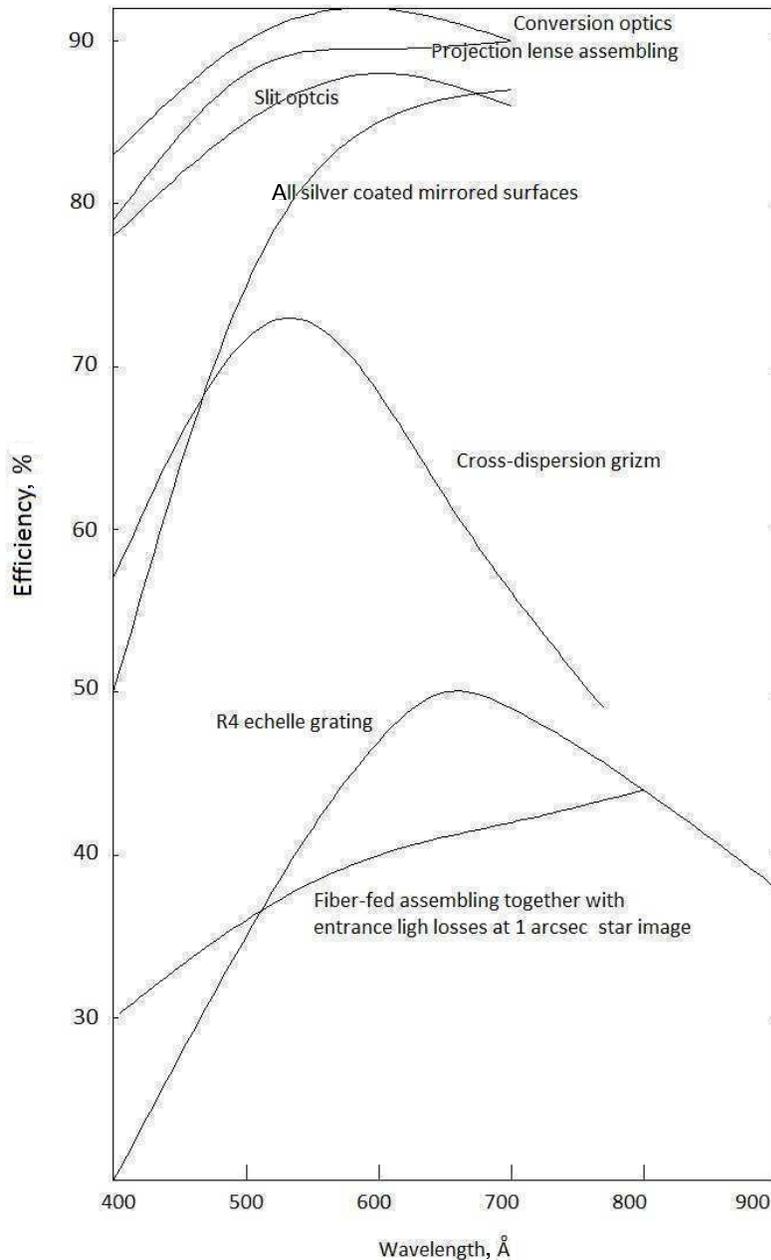
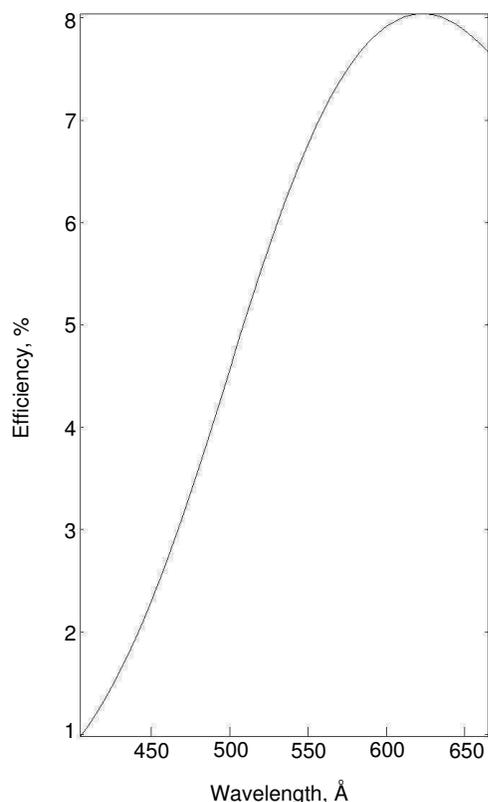


Рис. 4. Эффективность отдельных элементов схемы спектрографа.

при сохранении неизменности остальных элементов конструкции. По нашим оценкам, характерное спектральное разрешение спектрографа, реализованное в первой версии инструмента, составляет 70 000. В окончательной версии спектрографа с использованием двухступенчатого резателя изображения разрешение спектрографа будет доведено до 100 000. Можно оценить и полную эффективность спектрографа после замены камеры. Сплошная линия на рис. 5 иллюстрирует результаты исследования эффективности спектрографа без учета атмосферных потерь, потерь на оптике теле-

скопа и ПЗС. Оценки потерь на щели получены экспериментально с использованием искусственного источника света и диафрагмы, имитирующей наблюдения звезды размером  $1''$ . В этом режиме наблюдений спектральное разрешение прибора находится на уровне  $R = 50\,000$ . Отметим, что в первой версии инструмента мы используем режим работы с полуторасекундными изображениями, при котором спектральное разрешение уменьшается до  $R = 35\,000$ . Данное решение продиктовано характерным состоянием атмосферы в районе САО РАН, при котором такое качество изобра-



**Рис. 5.** Полная эффективность оптической схемы спектрографа без атмосферных потерь, потерь на ПЗС и на оптике телескопа в расчете на размер изображения звезды, эквивалентный  $1''$ .

жений является типичным. Как уже указывалось (см. рис. 1), этот режим (“низкого спектрального разрешения”) обеспечивается оптоволоконными каналами 1 и 2. Режим  $R = 70\,000$  и выше обеспечивается каналами 4 и 5 с эквивалентными размерами  $0''.75$ . При этом эффективность инструмента не будет превышать 4% соответственно. Наибольшего спектрального разрешения ( $R = 70\,000\text{--}100\,000$ ) можно достичь с ширинами входной щели  $0''.75\text{--}0''.4$ . В настоящей версии спектрографа этот режим работы инструмента реализован механическим диафрагмированием выходных ядер оптоволоконных каналов 4 и 5, что ведет к еще большим светопотерям. Для сохранения общей световой эффективности инструмента на уровне не менее 6% в будущем мы используем резатель изображения. В режим наблюдений  $R = 100\,000$  спектрограф будет соответствовать лучшим мировым стандартам (см., например, сравнение со спектрографом HARPS (Mayor et al. 2003), имеющем характерную эффективность 5–6%).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Строительство и исследование спектрографа выполнены при поддержке Российского научного фонда (строительство — проект No. 14-50-00043, направление “Экзопланеты”; исследование спектрального разрешения и оптической стабильности — проект No. 19-72-10023, “Поиск и исследование экзопланет и экзопланетных систем”; измерение эффективности — No. 19-72-00127 “Исследование транзитных экзопланет переходного размера”). Создание поляризационной оптики для спектрографа ведется при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект No. 18-29-21030). Строительство интерференционного узла калибровки инструмента по длинам волн ведется при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (грант No. N14.W03.31.0017). ГВБ и ГАГ благодарят чилийский фонд CONICYT (программа “Международная кооперация”, проект REDES 180136) за поддержку их сотрудничества, в частности, по созданию программы обработки спектров для строящегося спектрографа.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Dekker, S. D’Odorico, A. Kaufer, et al., SPIE Conf. Proc. **4008**, 534 (2000).
2. D. R. Gadelshin, G. G. Valyavin, M. V. Yushkin, et al., Astrophysical Bulletin **72**, 330 (2017).
3. A. Grauzhanina, G. Valyavin, D. Gadelshin, et al., ASP Conf. Ser. **494**, 289 (2015).
4. A. O. Grauzhanina, D. R. Gadelshin, D. N. Baklanova, et al., ASP Conf. Ser., **510**, 376 (2017a).
5. A. O. Grauzhanina, G. G. Valyavin, D. R. Gadelshin, et al., Astrophysical Bulletin **72**, 67 (2017b).
6. D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, et al., Astrophysical Bulletin **71**, 249 (2016a).
7. D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, et al., ASP Conf. Ser., **510**, 542 (2017).
8. D. E. Kukushkin, D. A. Sazonenko, A. V. Bakholdin, and G. G. Valyavin, SPIE Conf. Proc. **9908**, 6DK (2016b).
9. R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman, *Solar flux atlas from 296 to 1300 nm* (Nat. Solar Obs., New Mexico, 1984).
10. B.-Ch. Lee, D. Gadelshin, I. Han, D.-I. Kang, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **473**, 41L (2017).
11. M. Mayor, F. Pepe, D. Queloz, et al., Messenger, No. 114, 20 (2003).
12. I. I. Romanyuk, Astrophysical Bulletin **71**, 314 (2016).
13. I. I. Romanyuk, Astrophysical Bulletin **72**, 286 (2017).

14. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 436 (2016).
15. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 165 (2017).
16. D. Sazonenko, D. Kukushkin, A. Bakholdin, and G. Valyavin, *SPIE Conf. Proc.* **9908**, 6ES (2016).
17. D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, A. V. Bakholdin, et al., *ASP Conf. Ser.*, **510**, 547 (2017).
18. J. A. Valenti, R. P. Butler, and G. W. Marcy, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 966 (1995).
19. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69**, 224 (2014).
20. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 305 (2015a).
21. G. G. Valyavin, A. O. Grauzhanina, G. A. Galazutdinov, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 466 (2015).
22. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 242 (2019).
23. V. N. Vasilyev, D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, et al., *Optical Rev.* **23**, 878 (2016).

### **High-Resolution Fiber-Fed Spectrograph for the 6-m Telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences: Assessment of Efficiency**

G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, V. N. Aitov, V. D. Bychkov, S. V. Drabek, V. S. Shergin, D. A. Sazonenko, D. E. Kukushkin, G. A. Galazutdinov, E. V. Emel'yanov, G. V. Yakopov, T. E. Burlakova, J. -L. Bertaux, A. V. Tavrov, O. I. Korablev, M. V. Yushkin, A. F. Valeev, D. R. Gadelshin, K.-M. Kim, Inwoo Han, B.-Ch. Lee

We report the results of laboratory tests of the first version of the high-resolution fiber-fed spectrograph designed for the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS). During laboratory tests a spectral resolution of about 70 000 was achieved. The peak efficiency of the entire optical path of the spectrograph (without light losses at the CCD, primary mirror of the 6-m telescope, and in the atmosphere) at 620 nm and with the equivalent slit widths of the 1''5 and 0''75 are equal to 8% and 4%, respectively. The resolving power  $R = 70\,000$  and  $100\,000$  can be reached with the sky aperture 0''75 and 0''4 respectively. In the current version of the spectrograph these regimes of operation are implemented by mechanic aperturing of the slit. A dedicated projecting camera has been developed and is currently manufactured to operate with a collimated 200-mm diameter beam, which will make it possible to increase the spectral resolution up to 100 000. A two-beam image slicer will be used to maintain the luminous efficiency of the instrument at least at the 6% level.

Keywords: *techniques: photometry—techniques: spectroscopy—techniques: polarimetry*