

ДВУХЛУЧЕВОЙ СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ 2.5-м ТЕЛЕСКОПА КГО ГАИШ МГУ

© 2020 г. С. А. Потанин^{1,2*}, А. А. Белинский², А. В. Додин², С. Г. Желтоухов^{1,2},
В. Ю. Ландер¹, К. А. Постнов^{1,2}, А. Д. Саввин², А. М. Татарников²,
А. М. Черепашук², Д. В. Черясов², И. В. Чилингарян^{2,3}, Н. И. Шатский^{2**}

¹Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

³Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, USA

Поступила в редакцию 27.10.2020 г.

После доработки 27.10.2020 г.; принята к публикации 27.10.2020 г.

Транзиентный Двухлучевой Спектрограф (ТДС) разработан для наблюдений нестационарных и внегалактических источников на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ в оптическом диапазоне с низким спектральным разрешением. Регистрация спектра проводится одновременно в двух каналах, коротковолновом (360–577 нм, дисперсия 1.21 Å/пиксель, разрешающая сила $R = 1300$ с рабочей шириной щели 1") и длинноволновом (567–746 нм, дисперсия 0.87 Å/пиксель, $R = 2500$), свет между которыми распределяется дихроичным зеркалом с 50% уровнем пропускания на длине волны 574 нм. В "синем" канале имеется возможность автоматической смены решетки с основной на дополнительную с удвоенной разрешающей силой. Приемниками служат две ПЗС-камеры на основе детекторов E2V 42-10, охлаждаемые до -70°C и имеющие шум считывания 3 электрона на рабочей скорости считывания 50 кГц. Высота входной щели 3 угл. мин. В составе спектрографа имеются камера защелевого подсмotra и калибровочный узел, позволяющий снимать линейчатый спектр газоразрядной лампы, а также светодиодный источник с непрерывным спектром ("плоское поле") для учета виньетирования и неравномерности ширины щели. Пропускание всего оптического тракта без потерь на щели составляет в зените 20% в "синем" канале и 35% в "красном". За вычетом атмосферы и телескопа, эффективность самого ТДС достигает в максимуме 47 и 65% соответственно. Спектрограф постоянно установлен в фокусе Кассегрена 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ вместе с фотометрической ПЗС-камерой широкого поля, свет в спектрограф подается вводящимся в тракт плоским диагональным зеркалом. С ноября 2019 г. на спектрографе ТДС проводятся регулярные наблюдения нестационарных звезд и внегалактических источников до $\sim 20^m$ с отношением сигнал к шуму выше 5 за 2 ч наблюдений.

Ключевые слова: спектрограф, двухлучевой, оптическая спектроскопия, астрономический спектрограф дихроичный.

DOI: 10.31857/S0320010820120037

ВВЕДЕНИЕ

Современные астрофизические исследования, такие как поиск и классификация сверхновых звезд, оптического послесвечения гамма-всплесков, изучение нестационарных явлений в тесных двойных системах с релятивистскими компонентами и физики объектов до Главной последовательности и т.д., требуют оперативно получать и классифицировать оптические спектры с

телескопами среднего размера в режиме follow-up и мониторинга. Возможность быстрой постановки новой задачи и высокая световая эффективность являются наиболее критичными для наблюдений таких объектов, поэтому результативность таких исследований напрямую зависит от суммарного пропускания оптического тракта и возможности наблюдений в любой благоприятный момент. Несмотря на обилие телескопов среднего и крупного размера, появившихся в последние десятилетия, оперативная характеристика транзитных явлений остается актуальной научной задачей,

* Электронный адрес: potanin@sai.msu.ru

** Электронный адрес: kolja@sai.msu.ru

решаемой как на инструментах крупного, так и среднего размера (Онори и др., 2019; Коппервет и др., 2015, 2016).

Телескоп Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ с диаметром главного зеркала 2.5 м является многозадачным инструментом для научных и научно-образовательных целей (Шатский и др., 2020). Выбор программ наблюдений осуществляется в широком диапазоне исследований на конкурсной основе для достижения максимальной итоговой результативности инструмента с учетом его параметров и особенностей места его установки. Астроклиматические условия наблюдений на обсерватории КГО ГАИШ (Корнилов и др., 2014) и возможность их оперативной оценки позволяют гибко планировать наблюдения с различными штатными навесными приборами, исходя из текущей обстановки, и тем самым наиболее эффективно использовать наблюдательное время. Телескоп установлен в 2014 г. и в настоящий момент (октябрь 2020 г.) готовится к приемным испытаниям после замены аппаратной и программной частей системы управления.

Для поддержки работ по характеристике новых источников или спектральному мониторингу нестационарных объектов, ведущихся в ГАИШ МГУ (см., например, Липунов и др., 2016; Вольнова и др., 2017; Черепашук и др., 2018; Балакина и др., 2020), была поставлена задача построить эффективный инструмент для спектральной классификации и измерения доплеровских сдвигов и интенсивностей эмиссионных и абсорбционных линий. Именно высокое пропускание аналоговых по специализации спектрографов для телескопов 1.5–2.5 м класса является ключом к их высокой продуктивности (см., например, обзор проектов FAST и ссылки в работе Минк и др., 2020).

Относительно большая апертура телескопа и секундное качество изображений (Потанин и др., 2017) позволяют использовать узкую длинную рабочую щель, чтобы выполнять измерения как точечных, так и протяженных объектов, например, галактик, с возможностью точного учета спектра фона неба. В этом отношении инструмент нацелен иметь большую разрешающую силу $R \sim 2000$ и длину щели, чем, например, спектрографы FLOYDS 2-м телескопов обсерватории Las Cumbres ($R < 1000$, $L_{slit} = 30''$; Браун и др., 2013), специально сконструированные для наблюдения чисто транзиентных объектов. По параметрам щели, широте охвата решаемых научных задач и разрешающей силе запланированный прибор больше напоминает Intermediate Dispersion Spectrograph¹ 2.5-м телескопа INT на Канарских островах (см.,

например, Попеску и др., 2019), хотя требования стабильности плохо совмещаются с таким большим набором дисперсоров и сменными приемниками, как у IDS. Поэтому спектрограф TDS с самого начала планировался как инструмент с минимальным числом конфигураций.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ

Хотя построенный 2.5-м телескоп КГО ГАИШ высоко мобилен, умеренный размер апертуры требует выраженной специализации создаваемого инструмента для высокой результативности по главной задаче — получение спектров транзиентных источников и внегалактических объектов до 20-й звездной величины. Поэтому первичным критерием оптимизации конструкции выбрано максимальное пропускание оптики при минимально необходимой спектральной разрешающей силе и компромиссном покрытии диапазона длин волн для классификации объектов. Современная линейка оптических стекол и повсеместный ввод в астрономическую практику голографических дифракционных решеток с объемной фазой (volume phase holographic gratings, VPH, Барден и др., 2000) позволяют решить эту задачу с минимальными потерями света в диоптрической системе.

Размеры выбранной по тематике исследований спектральной области — ближний ультрафиолет от бальмеровского скачка и видимый диапазон — в сочетании с требованием достаточно длинной ($3'$) щели для точного учета влияния фона неба и возможности наблюдений протяженных источников хорошо согласуются с форматом доступных высокоэффективных спектральных ПЗС-приемников, способных длительно работать в околосреднем режиме без существенных затрат на техническое обслуживание системы, функционирующей в режиме постоянного дежурства. Достижение спектральной разрешающей силы порядка 1500–2500, требующейся для задач спектральной классификации и измерений потоков энергии в линиях, оказывается возможным в двухлучевой компоновке прибора с разделением каналов дихроичным делителем в интервале длин волн от 550 до 580 нм. Такое деление диапазона снимает необходимость применять отсекающие фильтры нерабочих порядков и позволяет использовать эффективные просветляющие покрытия оптики и приемников, а также ахроматизировать оптику с небольшим числом элементов. Решение сходно с компоновкой диспергирующей части спектрографов BOSS проекта SDSS последнего поколения² (Сми и др., 2013), но масштабировано по приемнику на более скромные задачи с длинной щелью и более узким спектральным

¹<http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/ids/>

²https://www.sdss.org/instruments/boss_spectrograph/

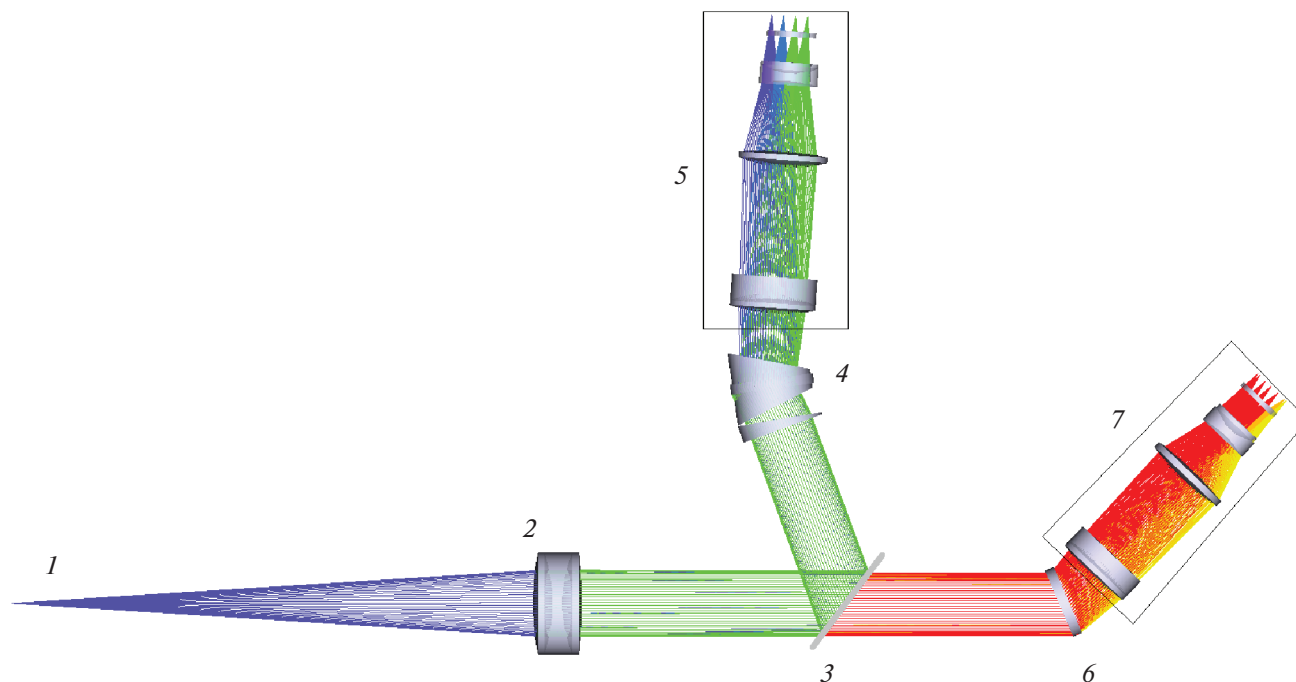


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа ТДС: 1 — щель в фокальной плоскости телескопа, 2 — общий коллиматор, 3 — плоское дихроичное зеркало, 4 — сменный дисперсор синего канала (показаны призмы G и дополнительный клин), 5, 7 — камеры синего и красного канала, 6 — дисперсор красного канала.

диапазоном в красной области. Последнее позволило использовать общий коллиматор каналов с минимальными компромиссами по качеству изображений. Это сделало прибор более компактным и содержащим меньше оптических элементов, чем сходный по схеме спектрограф FRODOSpec Ливерпульского 2-м телескопа с двумя диоптрическими коллиматорами (Моралес-Руэда и др., 2004).

Итоговое мультиплексирование спектрографа определяется почти полным покрытием рабочей поверхности двух ПЗС-приемников формата 2048×512 пикселей спектром $350\text{--}750$ нм с изображением щели высотой 3 мин дуги при выборке в 3 пикселя на ширину изображения рабочей щели в 1 угл. сек. Эти требования согласуются с медианным качеством изображений в $1''0$ в месте наблюдений и качеством изображений, обеспечиваемым оптикой телескопа (Потанин и др., 2017). Оптимизация схемы на широкой линейке современных оптических стекол позволила получить требуемое качество изображений во всем спектральном и пространственном диапазоне с минимальным числом элементов и высоким спектральным пропусканием, которые недостижимы для серийных объективов или линз.

Требуемая спектральная разрешающая сила обеспечивается VPH-решетками, оптимизированными по углу Брэгга под середины своих рабочих областей в каналах. Основные дисперсоры применяются без компенсирующих призм, с изломом

оптической оси инструмента, что позволило уменьшить вес и размеры кассегреновского прибора при условии отказа от режима прямых изображений, обычного для спектрографов типа редукторов фокуса (Буцони и др., 1984; Афанасьев и Моисеев, 2005). Такое решение было предложено еще на заре VPH-астроспектроскопии в проекте ATLAS (Тейлор и др., 2000).

Квазиодновременная фотометрия источников, а также отождествление и центровка на щели слабых объектов выполняются с помощью широкопольного ПЗС-фотометра формата $4\text{K} \times 4\text{K}$ ($10 \times 10'$; Шатский и др., 2020) в том же порту телескопа, при этом свет в спектрограф подается вводимым на его оптическую ось диагональным зеркалом. Такой “тандем” позволяет отказаться при расчете оптики спектрографа от ахроматизации системы в режиме изображений, что значительно упрощает как оптическую, так и механическую конструкцию и дает существенный выигрыш в итоговом пропускании.

Завершают перечень требований к конструкции атермальный дизайн оправ линз камерных объективов, наличие оптической системы калибровки (зеркально-линзовая система переброса изображения источника линейчатого и непрерывного спектра) и обеспечение режима с двойной разрешающей силой в “зеленой” части коротковолнового канала. Эти требования обычны для сходных аппаратов, рассмотренных выше.

Таблица 1. Основные параметры элементов и спектральные характеристики каналов

Параметр	Значение
Щели	
Ширина	1" и 10"
Высота	3' (18 мм)
Коллиматор	
Фокусное расстояние	315 мм
Диаметр	64 мм
Светоделитель	
Угол падения света	35°
Размер	65 × 90 мм
Коротковолновая граница	350 нм
Средний коэф. отражения	98.2%
Длина волны перехода	574 нм
Длинноволновая граница	750 нм
Средний к-т пропускания	95.3%
Дисперсоры	
Диаметр зрачка	39 мм
Световой диаметр	43 мм
Частота штрихов (<i>R, B, G</i>)	1200, 900, 1800 мм ⁻¹
Центральная длина волны	650, 460, 505 нм
Камеры	
Фокусное расстояние	117 мм
Поле зрения, 2Ω	13.9°
Приемники	
Модель	E2V 42-10
Размер пикселя	13.5 × 13.5 мкм
Квантовый выход	90%
Частота оцифровки	50 кГц
Рабочая температура	-70° С
Шум считывания (<i>R, B</i>)	3.8, 3.1 эл.
Синий канал	
Обратная дисперсия (<i>B, G</i>)	1.21, 0.55 Å/пикс
Диапазон длин волн в <i>B</i>	3600–5770 Å
Диапазон длин волн в <i>G</i>	4300–5434 Å
Разрешающая сила <i>R(B, G)</i>	1300, 2600
Макс. эффективность (<i>B, G</i>)	47%, 50%
Красный канал	
Обратная дисперсия	0.87 Å/пикс
Диапазон длин волн	5673–7460 Å
Разрешающая сила <i>R</i>	2500
Макс. эффективность	65%

Примечание. По каналам указана эффективность ТДС без телескопа и атмосферы на центральной волне дисперсора.

В следующих разделах будут рассмотрены подробности конструкции, спроектированной и построенной в результате описанной оптикомеханической оптимизации прибора.

ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМА И ЭЛЕМЕНТЫ

На рис. 1 представлена оптическая схема прибора. Свет достигает щели спектрографа после отражения от вводимого на ось телескопа диагонального алюминированного зеркала. После щели свет попадает на коллиматор, склейку-триплет. Между коллиматором и зрачком системы расположен светоделитель, отражающий излучение с длиной волны короче 0.57 мкм в синий канал спектрографа и пропускающий более длинные волны в красный канал. Нестандартный рабочий угол падения света выбран для оптической и механической оптимизации конструкции. За дисперсорами в зрачках непосредственно установлены камеры каналов спектрографа.

Расчет оптической схемы выполнен в программе ZEMAX в режиме мультikonфигураций, отдельно для красного и синего каналов. С минимальным количеством групп элементов (одна в коллиматоре и два дублета с одиночной линзой в каждой из камер) достигнута концентрация энергии в изображениях в 80% в круге диаметром 24 мкм, примерно равномерно по щели и вдоль дисперсии. Расчетные изображения показаны на рис. 2. Допуски на изготовление и юстировку оптики оказались не очень жесткие (0.1 мм по сдвигу элементов).

Основные параметры и элементы спектрографа сведены в табл. 1. Щели выполнены лазерной резкой из нержавеющей стали толщиной 200 мкм на станке для нарезки фокальных масок инструмента Vinospec и любезно предоставлены Смитсоновской Астрофизической Обсерваторией (D. Fabricant, США, см. Фабрикант и др., 2019), поверхность их не зачернена. В барабане фокальных апертур установлены рабочая щель шириной 0.1 мм (1"; масштаб в фокальной плоскости телескопа 10"/мм), диафрагма поля диаметром 18 мм для отождествления и центровки объекта, применяемая для бесщелевой спектроскопии источников, а также широкая спектрофотометрическая щель.

Ключевым компонентом двухканального спектрографа является дихроичный делитель светового пучка. Он установлен до зрачка системы, поскольку зрачок занят диспергирующими элементами, определяющими спектральные характеристики каналов. Главные требования к делителю — обеспечить высокое среднее пропускание в длинноволновом диапазоне и высокое отражение в смежном. Также важны крутизна переходной характеристики и возможно меньшая амплитуда

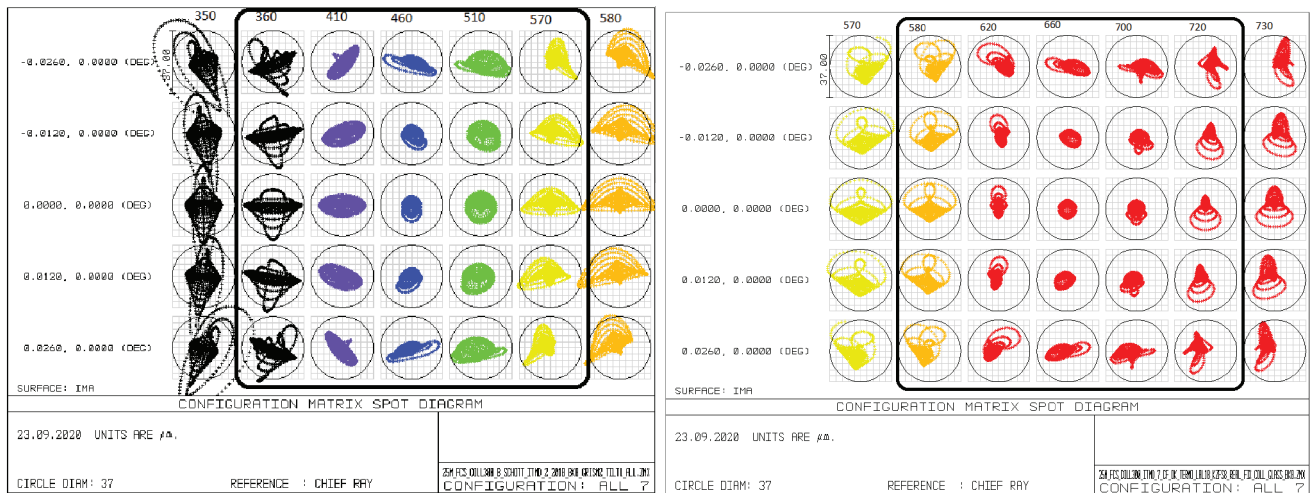


Рис. 2. Расчетные изображения в синем канале (слева; основная решетка B) и в красном канале R (справа). Для различных длин волн (по горизонтали) и участков щели (по вертикали). Круг соответствует диаметру изображения 1 угловая секунда в фокальной плоскости телескопа. Черным прямоугольником выделены рабочие области диапазонов по длинам волн. Длина волны в нанометрах указана сверху над соответствующими колонками изображений.

колебаний (“волн”) спектральной характеристики на фоне среднего уровня. Это определяет спектральный профиль световой эффективности всего прибора и возможности исправления результатов редукиции спектров за его переменность во времени для получения точных спектрофотометрических характеристик источников.

Первоначальный (опорный) расчет дихроичного делителя был любезно выполнен фирмой Asahi Spectra³ и показал теоретическую возможность обеспечить средние потери в пределах 3% и высоту “волн” менее 5–10%, однако по экономическим причинам заказ этого делителя оказался невозможным, и были предприняты поиски отечественного производителя.

Приемлемые расчетные, а затем и экспериментально подтвержденные характеристики дихроичного покрытия были получены на рязанской производственной площадке ООО “НПП “Александр”⁴, изготовившего рабочий светоделитель каналов. Кривые его пропускания иллюстрированы на рис. 3, на котором показана для сравнения расчетная кривая пропускания дихроика фирмы Asahi Spectra.

Дифракционные решетки спектрографа диаметром 2 дюйма изготовлены фирмой Wasatch Photonics⁵ и работают в первом порядке дифракции; основные решетки каналов имеют просветляющие покрытия, оптимизированные под их рабочий

диапазон. В зрачке красного канала расположена стационарная VPH-решетка R на подложках из стекла В270, отклоняющая лучи с центральной длиной волны на 46° .

В зрачке синего канала расположен блок из двух сменных VPH-решеток на подложках из плавленного кварца, изготовленных специально для проекта. Основная решетка B отклоняет пучок на 24° и используется без дополнительных призм. Вспомогательная решетка G с удвоенной дисперсией имеет 1800 штрихов на мм и рабочую длину волны 505 нм и используется с призмами из флинта $\Phi 1$ для выравнивания угла отклонения с решеткой B . Для устранения возникающих аберраций и разности фокуса в синем и зеленом каналах передняя призма дополнена клином из кварца КУ-1 со слегка выпуклой передней поверхностью ($R = 54$ м).

В обоих каналах используются камерные объективы похожей конструкции, оптимизированные под свой диапазон длин волн. Как применяемые в них стекла⁶, так и просветляющие покрытия различны у объективов в красном и синем каналах. Пятилинзовые объективы имеют задний отрезок 30 мм, позволяющий применять в качестве приемника света ПЗС-камеру практически любой конструкции, включающей оптическое окно и затвор. Отказ от использования флюорита в оптике спектрографа снял необходимость в подфокусировке каналов, изображения остаются резкими в диапазоне температур от -15° до $+25^\circ\text{C}$.

³www.asahi-spectra.com, лидирующий производитель астрономических интерференционных и стеклянных фильтров

⁴<https://macrooptica.ru>; расчет выполнен ООО “Технион”

⁵<https://wasatchphotonics.com/>

⁶В оптике ТДС использованы стекла Schott, Ohara и ЛЗОС, склеенные низкотемпературным клеем ОК-72ФТ5, прозрачным до 350 нм.

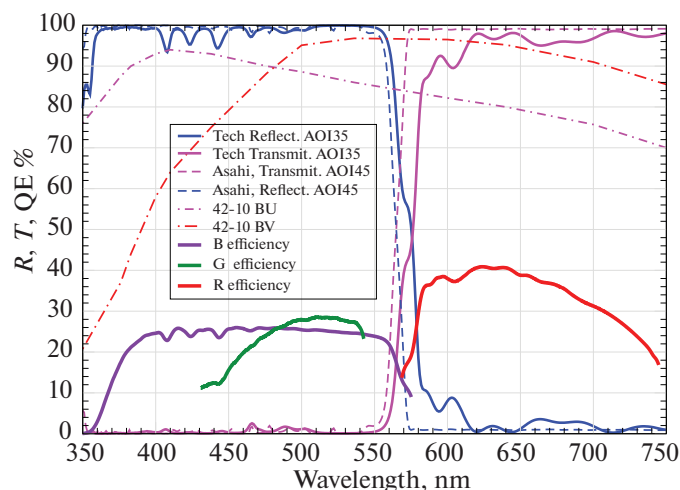


Рис. 3. Средние по поверхности измеренные кривые пропускания и отражения рабочего светоделителя (тонкие сплошные линии, угол падения 35°) и опорные кривые дихроичного делителя, рассчитанного для ТДС в Asahi Spectra (пунктирные линии, для угла падения 45°); приведена полусумма для S- и P-поляризаций. Для наглядности штрих-пунктиром даны кривые квантовой эффективности приемников, а толстыми линиями — примеры итоговой выходной спектральной кривой реакции всей системы с выносом за атмосферу.

В спектрографе ТДС применены камеры модели Newton DU940P фирмы Андор⁷ с центральными затворами и плоскопараллельными кварцевыми оптическими окнами. Приемники первого грейда с обратным освещением имеют просветляющие покрытия типа BU для синего канала (как у аппаратов FLOYDS) и BV для красного и работают с оцифровкой сигнала 1.0 эл/ADU при постоянной рабочей температуре круглый год с воздушным термоэлектрическим охлаждением. Вклад темнового тока в шум данных невелик и составляет менее 0.005 электрона в секунду.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Спектрограф полностью спроектирован и собран в ГАИШ МГУ, где сделана также и часть деталей, остальные изготовлены на станках с ЧПУ по заказу. Корпус прибора выполнен из деформируемых алюминиевых сплавов (АМГ-6 и Д16) для предотвращения поволоков в процессе обработки и состоит из несущей плиты основания толщиной 3 см с ребрами жесткости, прямоугольных жестких стоек для оправ оптических компонентов и фланцев ПЗС-камер и крышки прибора, аналогичной основанию, толщиной 2 см. Эта пространственная конструкция придает необходимую прибору жесткость и снабжена боковыми светозащитными крышками. Спектрограф крепится винтовыми шпильками через три осевых отверстия дополнительных стоек корпуса к ферме-суппорту из алюминиевого

уголка, привинченной к кассегреновскому блоку фильтров и затвора (filters & shutter unit, FSU) широкопольной камеры телескопа. Конструкция спектрографа показана на рис. 4.

Блок сменных щелей и защелевого подсмotra смонтирован в едином тубусе, закрепленном на несущей стойке коллиматора. Четырехместный барабан щелей накрыт защитным кожухом (на рисунке не показан) и вращается в прецизионных подшипниках так, что движение происходит в направлении щели для стабильности калибровки по длинам волн. Непосредственно за щелями откидное плоское зеркало перебрасывает изображение входных апертур с уменьшением на CMOS-камеру подсмotra⁸ для контроля и центровки объекта перед экспозицией. Барабан и зеркало управляются микросерводвигателями.

Коллиматор и оба объектива фокусируются вручную при настройке прибора и зажимаются контргайками, причем объективы смонтированы во втулках со скользящей посадкой и при фокусировке не вращаются. Решетка красного канала установлена на поворотном столике для достижения максимальной эффективности в первом порядке. Каретка сменных дисперсоров синего канала с приводом от шагового двигателя и прецизионным датчиком нуля-пункта также имеет регулировки угла поворота относительно пучка. Все дисперсоры тонко подстраиваются по направлению штрихов поворотом вокруг оптической оси.

ПЗС-камера в обоих каналах установлена на регулировочном фланце с шаровой опорой с цен-

⁷<https://andor.oxinst.com/products/newton-ccd-and-emccd-cameras/newton-940>

⁸Модель BFLY-PGE-23S6M-C, <https://www.flir.eu>

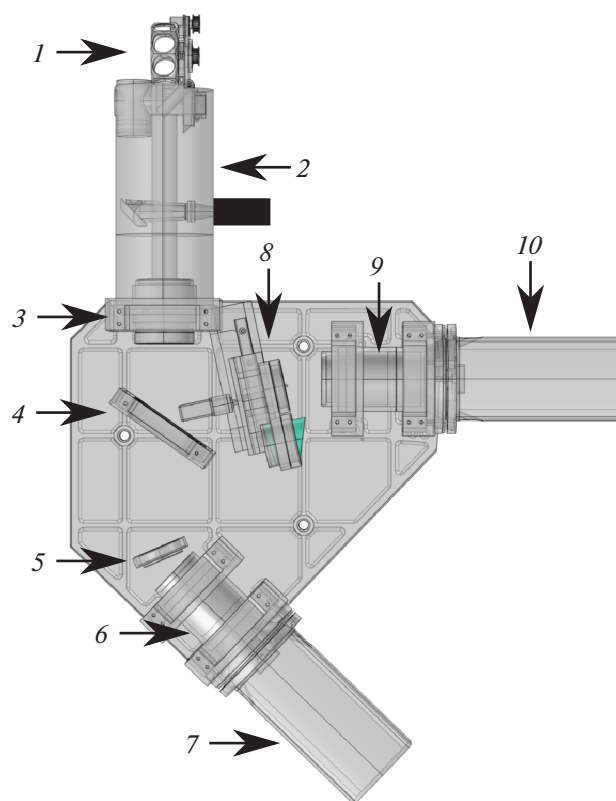


Рис. 4. Модель механики спектрографа. 1 — барабан сменных щелей, 2 — тубус с системой и камерой подмотра, 3 — коллиматор, 4 — дихроичный светоделитель, 5 — решетка красного канала, 6, 9 — объективы красного и синего каналов, 7, 10 — ПЗС-камеры красного и синего каналов, 8 — блок сменных дисперсоров синего канала.

тром кривизны на поверхности матрицы, которая позволяет слегка вращать или наклонять приемник относительно оптической оси без нарушения фокусировки в центральной части.

Система переброса света и калибровки смонтирована отдельно от спектрографа внутри блока FSU и представляет собой линейную направляющую с шариковинтовой передачей, на подвижной платформе которой смонтированы диагональные зеркала с защищенным алюминиевым покрытием⁹. Одно зеркало отклоняет свет телескопа в спектрограф, другое смонтировано в паре с ахроматом (ЕО #49-286) $F = 200$ мм, телецентрично перебрасывающим на щель изображение выходного порта интегрирующей сферы (ИС) с калибровочными источниками, также находящейся внутри FSU. Каретка перемещается шаговым двигателем с энкодером, как и приводы фильтров и затвора FSU, и может занимать также позиции для пропуска света в широкопольную ПЗС-камеру и для третьего диагонального зеркала питания проектируемого волоконного спектрографа высокого разрешения.

⁹38 × 54 мм Elliptical Mirror Protected Aluminum ЕО #30-258, <https://www.edmundoptics.com>

Калибровочные источники представлены газоразрядной лампой для калибровки дисперсионного отношения в каналах и сборным светодиодным источником непрерывного спектра (“плоское поле”). Свет от лампы с полым катодом (ЛПК) подается в ИС по оптическому волокну, а светодиодный источник установлен непосредственно на ИС.

До сентября 2020 г. использовалась лампа с полым катодом, содержащая Ne + Kr + Pb + Na, которая была затем заменена на Ne + Al + Si. Обе лампы изготовлены и любезно предоставлены Ю.Н. Бондаренко (г. Одесса) и показывают ряд одиночных ярких линий в канале *R* и множество слабых линий в канале *B* (рис. 5). Это немного осложняет процесс калибровки, поскольку в канале *B* требуется большее время (около 15 мин) для получения спектра лампы с достаточным для восстановления коэффициентов двумерной дисперсионной зависимости отношением сигнала к шуму (в красном канале это 3–5 мин).

В состав источника непрерывного спектра входит широкополосный сверхъяркий светодиод с “солнцеподобным” спектром¹⁰, а также светодио-

¹⁰Модель STW9C2PB-S Q54CY3, см. <http://www.seoulsemicon.com>

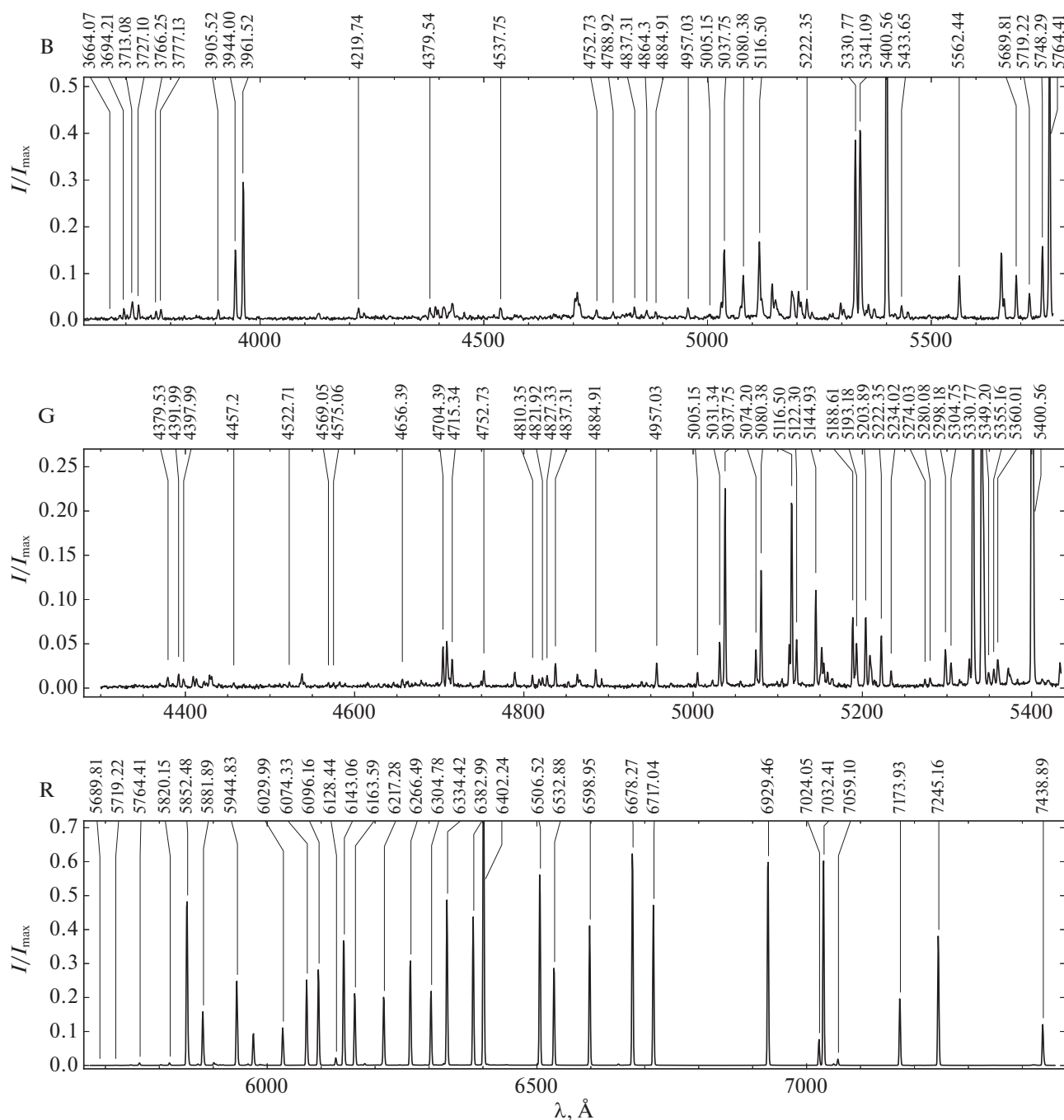


Рис. 5. Спектр калибровочной лампы Ne + Al + Si с обозначенными неблендированными линиями, используемыми для калибровки длин волн в соответствующих каналах.

ды на 402, 380 и 365 нм, поток от которых настроен переменными резисторами. Ток и температура подложки стабилизированы электроникой источника и сохраняют долговременную относительную спектральную яркость диодов в пределах 0.02% после 1-мин прогрева. От использования ксеноновых ламп отказались из-за негладкости (линейчатости) спектра.

Управление и считывание ПЗС-камер каналов

спектрографа осуществляется в ОС Linux при помощи библиотеки SDK версии 2.102.30024 и программы, написанной в ГАИШ на языке C/C++ для работы с камерами фирмы Андор и сохранения в FITS-файлах результатов с метаданными обстоятельств наблюдений. Привода щелей, подсмотра и смены дисперсоров синего канала спектрографа управляются контроллерами Arduino, также считывающими показания цифровых датчиков тем-

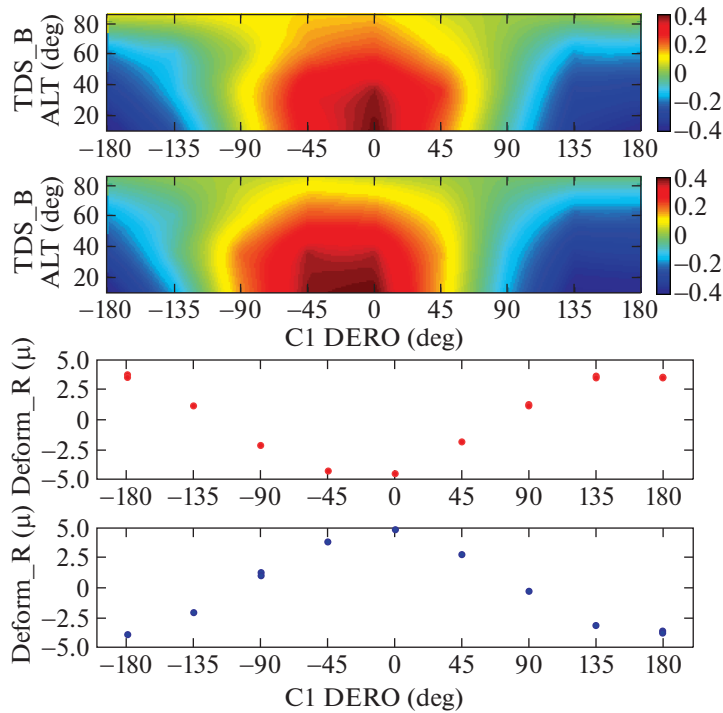


Рис. 6. Измеренная величина гравитационных деформаций ТДС в зависимости от высоты и ориентации ротатора (верхняя панель; сдвиг спектральных линий в ангстремах). График зависимости сдвигов спектров вдоль дисперсии при максимальном зенитном расстоянии 80 градусов в микронах (нижняя панель).

пературы оправ оптики. Управляющий компьютер спектрографа ТДС установлен в серверной комнате башни 2.5-м телескопа и обменивается данными с ПЗС-камерами и контроллерами через оптоволоконный 4-канальный USB-удлинитель. Программное обеспечение для управления спектрографом и обмена данными с системой управления телескопом написано на Python.

ДИСПЕРСИОННОЕ СООТНОШЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИБОРА

Как и многие кассегреновские приборы, ТДС не термостабилизирован и при наблюдениях меняет ориентацию в пространстве в ходе наведения и сопровождения объектов, а также при изменении позиционного угла щели. Возникающие гравитационные и, при изменении наружных условий, температурные деформации влияют на его калибровку (дисперсионное соотношение координат приемников и длин волн в каналах), и недоучет соответствующих сдвигов может приводить к систематическим ошибкам в измеряемых доплеровских смещениях линий в спектрах объектов. Для исследования смещений используется калибровочный источник с линейчатым спектром или эмиссионные линии ночного неба.

В ТДС в качестве дисперсоров используются решетки и призмы, поэтому дисперсия в первом

приближении линейна по длине волны. Для калибровки используется полином пятого-седьмого порядка, дальнейшее повышение степени не приводит к значимому улучшению качества подгонки. Нелинейные члены дисперсионного соотношения имеют полную относительную амплитуду в 2% в B , 1.4% в R и 0.3% в G .

В пространственном направлении наблюдается дисторсия величиной до 0.3%, а также изгиб и наклон изображений щели величиной до 5 пикселей (в красном канале) по отношению к средней линии изображения спектра. Для исправления пространственных искажений используются полиномы 3-й степени.

Хотя моделирование механики спектрографа методом конечных элементов показало устойчивость взаимной ориентации компонентов оптической схемы со сдвигами до 5 мкм при произвольной смене ориентации прибора, мы выполнили серии специальных измерений для независимого определения характера и величины гравитационных деформаций. При разных высотах трубы телескопа над горизонтом измерялся сдвиг шкалы длин волн в зависимости от угла ротатора кассегреновского порта телескопа, на котором установлен ТДС (рис. 6). Из графиков видно, что упругая составляющая сдвига имеет амплитуду ± 5 мкм (0.3 \AA или 20 км/с для линии водорода $H\alpha$) и одинакова в

обоих каналах. Эти сдвиги обязательны для учета и устраняются из определяемых доплеровских смещений калибровками шкалы длин волн по ЛПК или линиям ночного неба.

Гистерезис и невоспроизводимость гравитационных деформаций существенно меньше и составляют менее 0.5 мкм. Отдельно исследована воспроизводимость установки щели на место, она составила примерно 0.7 мкм. В целом можно заключить, что общая некорректируемая механическая погрешность в измеряемых сдвигах линий в спектре не превышает 1 мкм (0.06 Å или 3 км/с для линии водорода H α). Ошибки измерений положения спектральных линий, связанные с вариацией положения изображений звезд относительно центра щели спектрографа, как правило, заметно выше этих ошибок механического происхождения.

Кроме гравитационных деформаций обнаружены и термические, возможно, связанные с температурно-зависимыми напряжениями в корпусе спектрографа. Их величина составляет 0.05 Å/1°C в красном канале; в синем канале сдвиг существенно меньше, менее 0.01 Å/1°C.

На основе приведенных данных оценивается достоверность измерений доплеровских сдвигов линий при наблюдениях, и реализована тактика калибровки, описанная ниже.

К деформациям системы относится и переменный сдвиг корпуса как целого из-за прогиба фермы-суппорта, посредством которой ТДС крепится к телескопу. При различных ориентациях прибора относительный сдвиг центра щели к центру приемника широкопольной ПЗС-камеры меняется в пределах порядка 0.1–0.2 мм (1–2"), что усложняет задачу постановки на щель слабых источников, не видимых в подсмотр камеры, и является дополнительным источником смещений звезд относительно щели во время длинных экспозиций. Эти эффекты приходится учитывать методикой наблюдений.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В управляющее программное обеспечение ТДС входят следующие блоки: демоны управления ПЗС-камерами каналов *andor-daemon* и скрипты для управления приводами исполнительных механизмов спектрографа, запуска экспозиций и GUI оператора, написанные на Python. Две копии *andor-daemon* работают постоянно, так как прерывание связи с камерами Андор приводит к остановке термоэлектрических охладителей приемников; команды запуска и параметры конфигурации и состояния приемников передаются через сокетное соединение. Вся информация о состоянии системы управления телескопа, щели и

обстоятельствах наблюдений поступает через шину EPICS¹¹, через которую также идет управление FSU и узлами ТДС.

Интерфейс оператора ТДС построен вокруг GUI, посредством которого наблюдатель управляет камерой подсмotra спектрографа, выполняет коррекции точки наведения, позиционного угла щели спектрографа и фокусировки телескопа, выбирает рабочую щель и дисперсор синего канала и запускает серии экспозиций спектров (синхронно или раздельно по каналам). Ниже описана процедура наблюдений и калибровки прибора.

Центрирование объекта. 2.5-м телескоп КГО ГАИШ имеет случайную ошибку наведения около 2", но по ряду причин некомпенсированные систематические отклонения положения объекта относительно щели после наведения могут достигать 5–10". Поэтому перед запуском экспозиций в щелевом режиме требуется центрирование.

В камеру подсмotra спектрографа видны звезды до $V \sim 19^m$, более слабые звезды устанавливаются на щель следующими способами:

1) по более яркой звезде, также помещаемой на щель с рассчитанным позиционным углом;

2) рассчитанными относительными сдвигами точки наведения по склонению и прямому восхождению после центрирования щели по звезде на небольшом (<1°) расстоянии от объекта;

3) центрированием на заданные координаты приемника в широкопольной ПЗС-камере порта Кассегрена. Последний способ выгоден тем, что одновременно может быть получена фотометрическая информация об изучаемом объекте, например величины в полосах системы SDSS. Координаты "щели" на приемнике 4К-матрицы слегка зависят от высоты и ориентации ротатора Кассегрена из-за гнущих в подвесе спектрографа и поэтому калибруются по более ярким звездам каждый раз после снятия и установки спектрографа или широкопольной камеры на телескоп.

Выполнение экспозиций объекта. Немедленно после установки объекта на щель запускается автоматическое гидирование штатным офсетным гидом порта Кассегрена телескопа, выполняемое с точностью $\sigma \sim 0.1''$ в

¹¹<https://epics.anl.gov/>

течение всей сессии измерений; гидировочная звезда выбирается в кольце радиусом 10–15' вокруг точки наведения. Зеркало подсмотра спектрографа откидывается, устанавливается рабочая или широкая щель, и запускаются экспозиции. Для спектров обычно используется серия из 3–5 экспозиций длительностью до 20 мин каждая; более длинные выдержки невыгодны из-за накопления следов космических частиц.

Из-за гнуптий в подвесе спектрографа, при длительных наблюдениях (мониторинге) между экспозициями контролируется положение объекта на щели. Для этого в тракт вводится зеркало подсмотра спектрографа, а для невидимых в подсмотр объектов с оси телескопа выводится зеркало FSU, отклоняющее свет в ТДС, и выполняются короткие экспозиции на широкопольной камере. На вывод/установку зеркала FSU уходит 16 с; зеркало подсмотра ТДС и барабан щелей перемещаются в целевую позицию за 1–2 с.

Скрипт выполнения экспозиций сохраняется в FITS-файлах спектров и в базе данных результатов наблюдений все релевантные параметры цели и обстоятельств наблюдений: настройки приемника и момент начала экспозиции, идентификаторы объекта и программы (заявки на наблюдения), каталожные координаты объекта и текущие координаты монтировки (параллактический и позиционный углы ротатора Кассегрена, а также высота объекта над горизонтом записываются на моменты начала и конца экспозиции), положения приводов ТДС и FSU, метеопараметры и температуры оптики телескопа и элементов спектрографа. Считывание и сохранение кадра занимают около 25 с.

Калибровка по длине волны. Получение спектров линейчатой лампы с высоким отношением сигнал/шум достаточно проводить с периодичностью 1 раз в месяц или после вмешательства в оптическую систему. Поправки к шкале длин волн, связанные с деформациями прибора, для слабых объектов могут быть вычислены по линиям неба. В случае необходимости получения надежной шкалы длин волн для ярких объектов, когда экспозиции недостаточны для проявления линий неба, целесообразно получать спектр лампы до и после получения спектров исследуемого объекта. Для этого достаточны экспозиции порядка 100 с.

Спектрофотометрические стандарты измеряются до или после основных объектов на близкой воздушной массе. Для этого обычно используются звезды из списка Европейской Южной Обсерватории¹², среди которых есть белые карлики с гладкими и хорошо изученными спектрами; возможно использование и других каталогов. Для теллурической коррекции (удаления линий поглощения в земной атмосфере) могут использоваться любые звезды спектрального класса A0V без пекулярностей в спектре и с межзвездным поглощением $A_V < 0.2^m$.

Калибровка плоских полей выполняется по светодиодному источнику непрерывного спектра раз в сутки. В ясные вечера приблизительно раз в неделю выполняется измерение сумеречного сегмента для уточнения формы функции щели (см. следующий раздел).

Темновые кадры снимаются приблизительно раз в сезон при рабочих режимах и настройках приемника в пасмурные ночи. Поскольку рост отсчетов в горячих пикселях происходит нелинейно и выходит на насыщение, используется ряд наиболее часто применяемых экспозиций $T_{\text{exp}} = 0, 300, 600, 1200$ с по 10 кадров с каждой.

Выполнение описанной процедуры обеспечивает оператор, в дальнейшем планируется автоматизировать выполнение центровки объекта и калибровочных измерений.

ОБРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В нижней части табл. 1 показаны практически измеренные выходные характеристики диапазона и разрешения спектрографа (эффективность обсуждается в следующем разделе). Фокусировка спектрографа по калибровочной лампе обеспечила разрешающую способность всего на 10–20% хуже определяемой по геометрической ширине изображения рабочей 1" щели. Сходные значения R получены при подгонке спектров дневного неба к синтетическим, получаемым сверткой библиотечного спектра Солнца¹³ с моделью аппаратного контура переменной ширины. Изображения во всем диапазоне длин волн практически симметричны.

Для обработки наблюдений был написан пакет программ на языке Python, работающий в автоматическом и интерактивном режимах и опирающийся на ключевые слова в заголовках входных

¹²<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

¹³<https://noirlab.edu/public/images/noao-sun/>

FITS-файлов. Пакет включает в себя следующие процедуры:

Комбинирование темновых кадров выполняется с помощью медианного усреднения.

Вычитание темнового кадра производится с линейной интерполяцией комбинированных темновых кадров на необходимое время экспозиции.

Удаление следов космических лучей производится по необходимости с помощью пакета LAcosmic (ван Доккум, 2001).

Калибровка длин волн и кривизны изображения щели производится по спектру ЛПК. Для калибровки составлен список наименее блендированных линий, равномерно распределенных по спектральному диапазону. Положения линий в каждой строке ПЗС определяются подбором гауссианы, после чего эти положения для каждой линии аппроксимируются параболой, имитирующей наблюдаемую кривизну изображения щели. Дисперсионные кривые для удобства строятся для каждой строки приемника с использованием этих усредненных положений и описываются полиномом 5-й степени для каналов B и G и 7-й степени для R . Типичный остаточный разброс составляет 0.20 \AA в B , 0.07 \AA в G и 0.01 \AA в R . Низкая точность калибровки в синем канале обусловлена более слабым спектром, малым количеством неблендированных линий и меньшим спектральным разрешением.

Ребиннинг данных на равномерную сетку длин волн выполняется линейной интерполяцией кадров по индивидуальной дисперсионной кривой для каждой строки приемника, что одновременно исправляет кривизну изображения щели.

Неравномерность чувствительности вдоль щели исправляется путем вычисления “плоского поля” (“flats”) по спектру сумеречного неба и по спектру светодиодного источника непрерывного спектра. Поля со светодиодной лампой регистрируются быстрее и однороднее по шумам, поскольку не имеют сильных линий поглощения, которые присутствуют в спектре неба. Неравномерность освещения щели светодиодным источником видна как градиент освещенности $\sim 10\%$ по высоте щели. Для устранения этой неравномерности вычисляется низкочастотная поправка с использованием калибровки,

полученной по сумеречному небу. Учет плоских полей не только исправляет тени от пылинок и неидеальность щели, но также эффективно устраняет интерференционные полосы (“fringes”), наблюдаемые в красном канале.

Экстракция спектров производится в графической программе двумя способами:

1. Стандартная (линейная) экстракция с суммированием отсчетов объекта внутри заданной апертуры с вычетом фона, который определяется по участкам вдали от источника.
2. Оптимальная экстракция по алгоритму, описанному Хорн (1986), состоит в вычислении пространственного профиля спектра и последующем суммировании отсчетов с весами этого профиля.

Применение оптимальной экстракции дает возможность удалить следы космических лучей и целесообразно для относительно слабых объектов, для которых возможно получить на практике отношения сигнала к шуму на 20–30% выше, чем с линейной экстракцией. Для ярких объектов стандартная и оптимальная экстракции приводят практически к одинаковым результатам.

Коррекция длин волн. Одновременно с экстракцией спектра может быть вычислена и учтена поправка к длинам волн по линиям неба. В синем канале для этого используются линия 5577 \AA и линии ртути Hg I 4046.57 , 4358.34 , 5460.75 \AA от искусственной засветки неба. В R -канале для вычисления поправки доступны множество линий кислорода и дублет натрия.

Вычисление кривой реакции системы производится по полученным близко по времени и воздушной массе спектрам звезд-стандартов с известными распределениями энергии в спектрах. Коррекция за кривую реакции системы выполняется по найденному отношению экстрагированных спектров стандартов к опубликованным распределениям энергии. Полученное отношение отражает спектральную эффективность прибора для всего тракта измерений от верхней границы атмосферы до получаемых фотоэлектронов сигнала приемников. Реакция системы зависит от переменных потерь света в атмосфере и на щели спектрографа, ее обсуждению посвящен следующий раздел.

Вычисление потока производится путем деления инструментального потока, измеряемого в отсчетах в секунду, на кривую реакции. Итоговые величины имеют размерность $[\text{эрг}/(\text{см}^2 \times \text{с} \times \text{Å})]$.

Вся история и параметры обработки, контрольная информация, а также барицентрические коррекции длин волн и времени измерения сохраняются в заголовках выходных FITS-файлов, содержащих калиброванное изображение спектра. Параметры и результаты экстракции спектров записываются в дополнительные расширения (FITS extensions). Сшивка результатов разных каналов в единый спектр производится при необходимости отдельно от описанной выше стандартной обработки.

Помимо вышеописанного программного пакета, доступен альтернативный вариант системы обработки данных ТДС, работающий в среде Interactive Data Language (IDL, коммерческий программный пакет) либо ее бесплатном аналоге GNU Data Language (GDL). Данный пакет является свободно распространяемым программным обеспечением под лицензией GPLv3¹⁴ и основан на алгоритмах из автоматических систем обработки данных спектрографов MMIRS и Vinospec (Чилингарян и др., 2015; Кански и др., 2019), установленных на 6.5-м телескопе ММТ. Он представляет универсальную систему обработки длиннощелевых спектров, в которую был добавлен блок с конфигурацией для ТДС. В целом используемые в нем алгоритмы похожи на описанные выше, но имеется ряд отличий: (а) для построения калибровки по длинам волн используется аппроксимация положений линий лампы спектра сравнения по всему кадру двумерным полиномом; (б) реализован алгоритм чистки следов космических частиц на основе одновременного статистического анализа нескольких спектров сразу (если они доступны); (в) в качестве спектрофотометрического стандарта возможно использование любой звезды спектрального класса A0V без заметного поглощения на луче зрения (до $E(B - V) = 0.05^m$) и сильных аномалий химического состава, что дает гибкость в процессе выбора звезды поблизости от объекта, поскольку такие звезды часто встречаются на небе; (г) процедура вычитания ночного неба оптимизирована под слабые объекты и происходит до линеаризации и исправления геометрии двумерного спектра (Катков и Чилингарян, 2011); (д) опционально производится коррекция финального спектра за теллурические абсорбции.

СВЕТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Наблюдения с широкой щелью позволяют проводить спектрофотометрию ценой снижения спектральной разрешающей силы. Эти наблюдения, выполненные квазиодновременно при разных воздушных массах, позволяют отдельно восстановить текущую кривую пропускания атмосферы и функцию реакции прибора. Для достижения высокого разрешения и фотометрической точности необходимо проводить два измерения — с широкой и узкой щелями.

На рис. 3 жирными линиями показан пример восстановления кривой реакции системы, вынесенной за атмосферу вышеупомянутым способом. Восстановление выполнялось по стандартам BD+75d325 и BD+28d4211, наблюдавшимся со щелью $10''$ на воздушных массах $M = 2.0$ и $M = 1.03$ соответственно. Наличие узких деталей в кривой реакции, которые располагаются в области линий $\text{H}\gamma$ – $\text{H}\delta$, предъясняет повышенные требования к качеству и разрешению спектров стандартов. Недостаточное спектральное разрешение использованных данных приводит к сглаживанию формы этих узких деталей в восстановленной кривой.

Неисправленная за атмосферу измеренная эффективность при высоте объекта 75° достигает 35% в красном, 22% в зеленом и 20% в синем канале. Похожие величины и кривые реакции получены и с другими стандартами.

Пониженная чувствительность синего канала по сравнению с красным побудила независимо вычислить ожидаемое пропускание системы вблизи средних длин волн каналов для объекта около зенита. Для поглощения атмосферы взята медианная экстинкция в КГО (0.13 в R и 0.25 в B , Корнилов и др., 2016), для зеркал телескопа M1 и M2 приняты средние по поверхности коэффициенты отражения зеркал, уменьшенные на 8 и 5% для учета старения покрытий¹⁵. Для остальных элементов взяты коэффициенты пропускания, отражения и квантовый выход приемников от производителей.

Итоговое значение теоретического пропускания всего тракта около зенита в канале R равно 37%, что близко к измеренному. В то же время приведенное выше измеренное пропускание в B составляет лишь 73% от ожидаемого значения 27.6%. При этом пропускание в G на длине волны максимума эффективности его решетки (505 нм) оказалось на 10% выше, чем в B , хотя теоретически не превышает последнего. Причины этих несоответствий еще предстоит выяснить.

С учетом оцененного нами пропускания питающей оптики спектрографа (телескоп и вводимое

¹⁴https://bitbucket.org/chil_sai/mosifu-pipeline

¹⁵В КГО ведется мониторинг отражательной способности зеркал 2.5-м телескопа в относительной шкале.

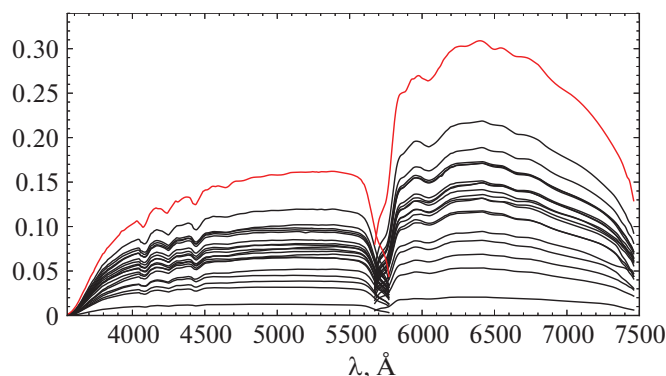


Рис. 7. Совокупность измеренных (не вынесенных за атмосферу) кривых эффективности каналов *B* и *R* по спектрофотометрическому стандарту BD+75d325. Верхние (красные) кривые — измерения со спектрофотометрической щелью 10'' на высоте 30°, остальные — с рабочей щелью 1'' на высотах 30–50°.

диагональное зеркало), квантовая эффективность самого ТДС (включая ПЗС-приемники) достигает значений 65% в канале *R*, 47% в канале *B* и 50% в канале *G* вблизи центральных длин волн дисперсоров. Именно эти характеристики спектрографа даны в табл. 1.

При наблюдениях с узкой щелью кривая реакции системы позволяет учесть только мелкомасштабные неоднородности пропускания, а полное пропускание остается неопределенным вследствие потерь на щели, которые могут меняться с длиной волны из-за зависимости профиля звездных изображений от длины волны и атмосферной дисперсии. Последний эффект устраняется выставлением щели вдоль направления дисперсии, если это возможно для решаемой задачи. Однако итоговая величина потерь в атмосфере и на щели может варьироваться в очень широких пределах (рис. 7).

Для оценки ожидаемого сигнала в максимумах чувствительности каналов мы вычислили величины звезд класса A0V, которые без учета атмосферы дают сигнал в 1 фотон за секунду на пиксель экстрагированного спектра: $\text{mag}_1(B) = 17.6^m$, $\text{mag}_1(G) = 16.8^m$, $\text{mag}_1(R) = 17.2^m$. При расчете экспозиции эта величина должна быть скорректирована за ожидаемые значения экстинкции, воздушной массы и оценку потерь на щели спектрографа из-за качества изображений.

НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Благодаря хорошему пропусканию системы за счет простого и эффективного дизайна оптической системы и среднему спектральному разрешению, в 1.5–2 раза превышающему типичные значения для существующих массовых спектральных обзоров (SDSS, LAMOST), ТДС занимает специфическую нишу, которую он делит с типичными спектрографами низкого разрешения на телескопах с размером зеркала порядка 3–3.5 м (Shane Telescope

Ликской Обсерватории, NTT Европейской Южной Обсерватории). ТДС позволяет за разумное время экспозиции (2–4 ч) детально исследовать объекты на 2–3 звездные величины слабее, чем включенные в выборки современных спектральных обзоров (т.е. квази-точечные объекты до 21.5^m), либо получать спектры с высоким отношением сигнал–шум для объектов, для которых в обзорах доступны спектры лишь посредственного качества.

Со спектрографом исследуются точечные и протяженные источники разной природы: нестационарные звезды, ядра планетарных туманностей, активные ядра и диски галактик, спектры квазаров, сверхновых звезд и др. Регулярные наблюдения ведутся по программам мониторинга микроквазара SS433, новых звезд (Соколовский и др., 2020), спектроскопии объектов миссии Спектр-РГ/e-Rosita (Додин и др., 2020), активных ядер галактик (Илич и др., 2020), симбиотических звезд, белых карликов (Пширков и др., 2020) и планетарных туманностей (Архипова и др., 2020), по программе исследования галактик с черными дырами промежуточных масс (Чилингарян и др., 2018), а также программе исследования окружения редких гигантских галактик низкой поверхностной яркости (Сабурова и др., 2018; Онори и др., 2019), у которых недавно были обнаружены спутники еще более редкого типа “компактные эллиптические галактики” (Чилингарян и др., 2009; Чилингарян и Золотухин, 2015).

Ниже представлены некоторые результаты, показывающие возможности инструмента.

Мониторинг SS433

С помощью ТДС проведены несколько сессий мониторинга с целью изучения переменности профилей и лучевых скоростей эмиссионных линий в спектре микроквазара SS433, традиционного объекта исследований в ГАИШ Черепашук и др. (2018,

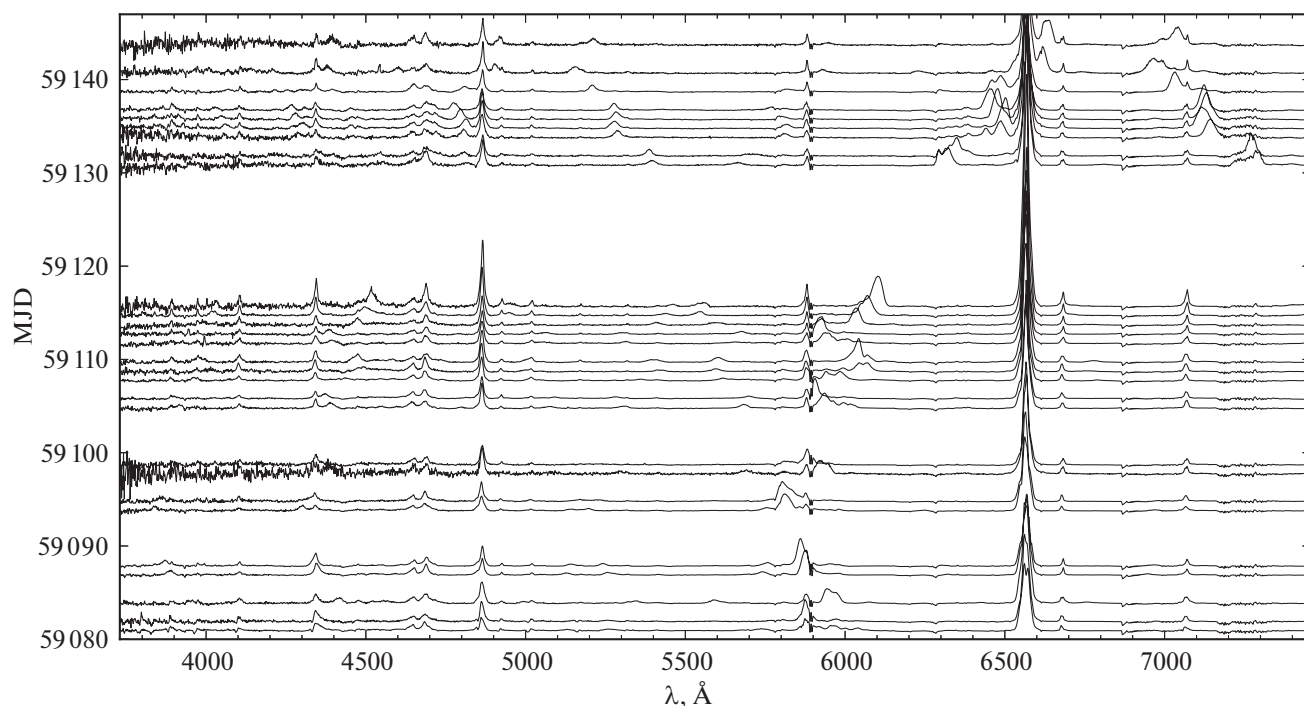


Рис. 8. Эволюция спектра SS433 в период с 19 августа по 21 октября 2020 г. Время экспозиции от 300 до 900 с, прозрачность и качество изображений переменные.

2020). На рис. 8 показана временная развертка спектров, полученных в августе–октябре 2020 г. (по вертикали указаны модифицированные юлианские даты наблюдений MJD). Спектры двух каналов сшиты, континуум вычтен, шкала интенсивностей относительная. Яркость этого объекта позволяет вести его мониторинг фактически каждую ночь при любых условиях наблюдений. Эти наблюдения важны для выявления возможных эволюционных изменений параметров этой рентгеновской двойной системы, которая находится на особой стадии вторичного обмена масс. В этом случае общая оболочка по каким-то причинам не образовалась, а потеря массы и углового момента из системы происходит из сверхкритического прецессирующего аккреционного диска вокруг релятивистского объекта. Таким образом, объект SS433 находится на критической стадии эволюции, поэтому поиск его эволюционных изменений является важной наблюдательной задачей.

Изучение симбиотических звезд

На рис. 9 представлены спектры симбиотических звезд V407 Cyg, CSS 1102 и YY Her, находящихся на различных стадиях активности. V407 Cyg в настоящее время находится в пассивном состоянии и демонстрирует типичный спектр кислородной мириды, с характерным для этого класса объектов бальмеровским декрементом (H δ — самая сильная

эмиссионная линия в спектре). Спектр классической симбиотической YY Her был получен в спокойном состоянии. Кроме ярких эмиссионных линий, принадлежащих H I , He I , He II и др., хорошо заметен небулярный континуум, замывающий в голубой области молекулярные полосы холодного компонента. ТДС позволяет получать спектры в районе бальмеровского скачка, что является важным для исследования как туманности, так и аккреционного диска, появляющегося на определенных стадиях развития вспышек у симбиотических звезд.

Средний спектр на рис. 9 принадлежит мало изученной звезде CSS 1102. Объект был открыт в ходе обзора (МакКоннел, 1982) как звезда класса S3. В августе 2020 г. появилось сообщение о возможной симбиотической природе этого объекта¹⁶. Наши спектральные наблюдения показали, что в спектре звезды помимо молекулярных полос TiO и ZrO присутствуют яркие эмиссионные линии водорода, причем бальмеровский декремент имеет нехарактерное для мирид значение (см. выше на этом же рисунке спектр V407 Cyg). В спектре объекта также присутствуют линии нейтрального гелия и даже слабые запрещенные линии [Ne III]. Это несомненно позволяет классифицировать объект как симбиотическую звезду. Наши фотометрические наблюдения, проведенные 26.08.2020 на

¹⁶<https://www.aavso.org/aavso-alert-notice-719>

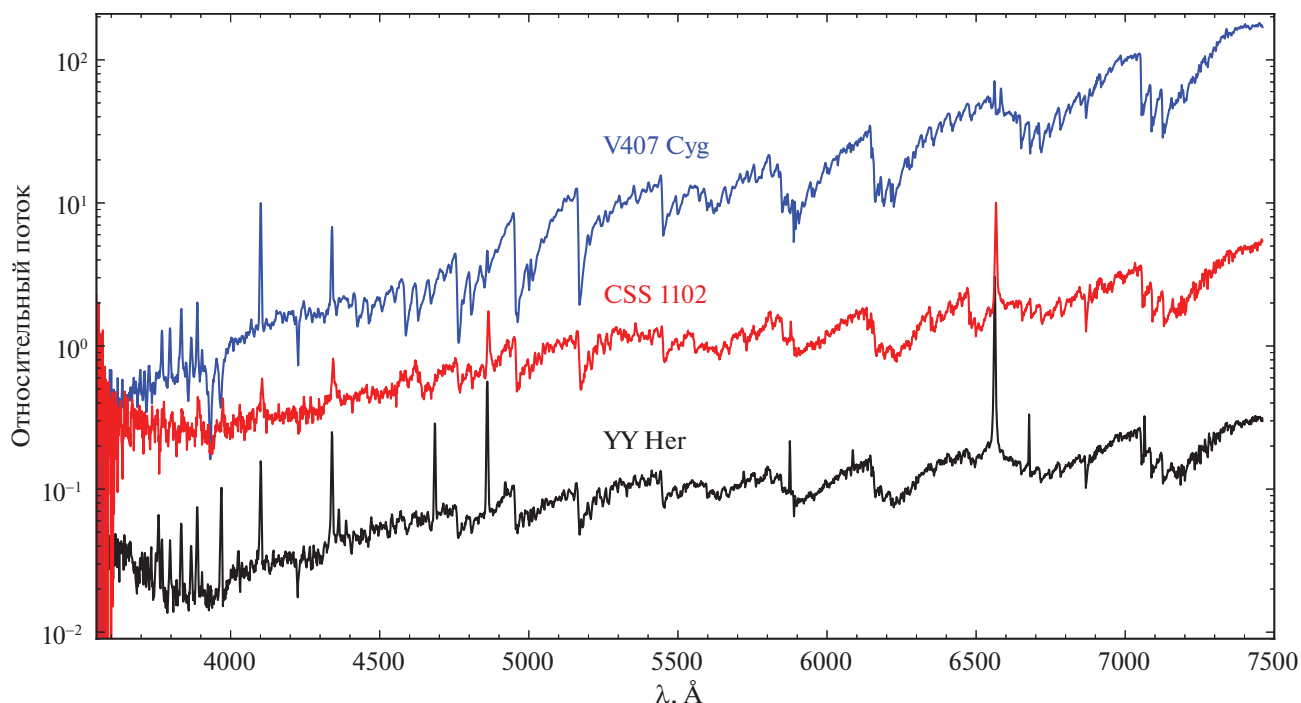


Рис. 9. Спектр CSS 1102 (MJD= 59092.75, $T_{\text{exp}} = 100$ с, $V \sim 13^m$) в сравнении с V407 Cyg ($T_{\text{exp}} = 500$ с, $V \sim 15^m$) и YY Her ($T_{\text{exp}} = 100$ с, $V \sim 11^m$).

60-см телескопе КГО ГАИШ, зарегистрировали быструю переменность блеска в системе CSS 1102 с характерным временем порядка 30 мин и амплитудой 0.1^m в фильтре *B* (Татарникова и др., готовится к печати). Это редкий тип переменности у симбиотических звезд, вероятно, связанный с наличием аккреционных дисков и джетов в этих системах. Абсолютное большинство таких объектов относятся к крайне немногочисленному подклассу повторных симбиотических новых.

Транзиенты и вспыхивающие звезды

Карликовая новая SAI-V J004051.59+591429.7 открыта¹⁷ в ГАИШ МГУ во время фотометрического мониторинга с 60-см телескопом КГО другой переменной звезды. В 2019 г. наблюдались две вспышки объекта. Обе вспышки по характеристикам соответствуют нормальным вспышкам карликовых новых. Спектры переменной ($R_c \sim 20^m$), полученные на 2.5-м телескопе КГО с помощью TDS, характерны для карликовых новых в минимуме блеска. Хорошо видны эмиссионные линии балмеровской серии водорода. Лучевые скорости, определенные по эмиссии $H\alpha$, показывают регулярную переменность, связанную с орбитальным движением в двойной системе (рис. 10). Орбитальный период больше 3.5 ч, дальнейший спектральный мониторинг позволит его уточнить.

¹⁷http://www.sai.msu.ru/new_vars/

Абсорбционные и эмиссионные спектры галактик

ТДС позволяет решать широкий класс задач по исследованию как эмиссионных, так и абсорбционных спектров галактик и активных галактических ядер. Режим среднего спектрального диапазона с гризмой в синем канале покрывает практически все наиболее часто используемые абсорбционные линии в оптических спектрах галактик для измерения звездной кинематики и оценок свойств звездного населения (возраст, химический состав). При этом доступное спектральное разрешение позволяет измерять дисперсии скоростей звезд вплоть до 35–40 км/с в галактиках со старым звездным населением при отношении сигнал–шум около 15 на пиксель (либо до 70–80 км/с при использовании режима низкого разрешения, см. Чилингарян и Гришин, 2020, где обсуждается теоретический расчет качества определения параметров звездной кинематики из абсорбционных спектров, который мы использовали для наших оценок).

Таким образом, появляется возможность исследовать внутреннюю динамику сравнительно маломассивных карликовых галактик, недоступных для исследования на других российских телескопах, в том числе БТА, из-за недостаточного спектрального разрешения. В то же время красный канал позволяет хорошо разрешать профиль эмиссионной линии $H\alpha$, что делает ТДС отличным инструментом для исследования активных галактических ядер, в

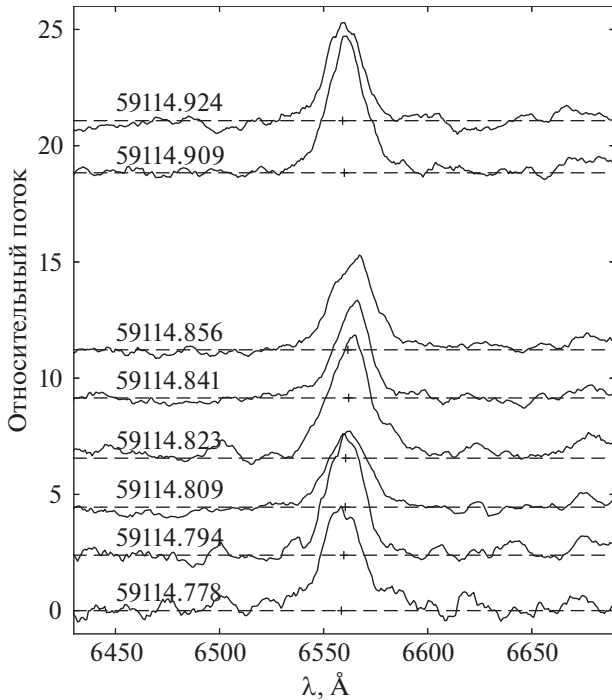


Рис. 10. Переменность профиля $H\alpha$ в спектре карликовой новой SAI-V J004051.59+591429.7 в минимуме блеска ($R_c \sim 20^m$). Центр тяжести линии отмечен крестиком. Экспозиция 1200 с, отношение сигнала к шуму в континууме ≈ 2.5 на пиксель. Спектры сглажены скользящим средним по 10 точкам. Слева подписаны гелиоцентрические моменты MJD для середины экспозиции.

том числе содержащих черные дыры промежуточных масс (Чилингарян и др., 2018), где широкая компонента линии довольно слабая и сравнительно узкая (150–250 км/с). Синий канал для таких объектов будет достаточен для измерения сравнительно низких дисперсий скоростей звезд (40–70 км/с).

На рис. 11 приведены абсорбционно-эмиссионные спектры гигантской галактики низкой поверхностной яркости Malin 1 (черная линия) и ее компактного эллиптического спутника (красная линия). Обе галактики содержат слабые активные ядра. Несмотря на 20-ю звездную величину спутника в фильтре SDSS g , в спектре хорошо видны не только эмиссии, связанные с активным ядром, но и абсорбции от звездного населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных пилотных программ наблюдений показали, что ориентир на высокое пропускание прибора при спектральном разрешении, достаточном не только для оценок интегральных интенсивностей, но и для исследования профилей линий нестационарных объектов, оказался верным. В классе двухлучевых длиннощелевых

спектрографов для телескопов среднего размера, краткий обзор которых дан в начале статьи, аналога ТДС (полностью диоптрической системы с дихроичным светоделителем и голографическими дисперсорами) найти не удалось, поэтому прямые сравнения характеристик спектрографа с родственными аппаратами вряд ли возможны.

Испытания спектрографа показали, что эффективность прибора в красной области отвечает заявленной проектом и рассчитанной по кривым пропускания атмосферы, оптики телескопа и спектрографа, эффективности дисперсора и приемника. По этому параметру ТДС ожидаемо выступает как спектрограф высокой “прозрачности” по критериям мирового уровня. Вместе с тем остается ряд вопросов, требующих отдельного изучения. В частности, требуется выяснить источник пониженной эффективности канала B по отношению к расчетному значению. Судя по относительной эффективности каналов G и B , причиной может быть и пониженная характеристика синей решетки, и неучтенные потери в оптике синего плеча спектрографа. Также нужно исследовать “завал” реакции системы к длине волны 350 нм, который снижает точность спектрофотометрических измерений вблизи бальмеровского скачка в изучаемых объектах.

Возможно дальнейшее повышение эффективности спектрографа. Так, заказ светоделителя у фирм, много лет специализирующихся на сложных диэлектрических покрытиях для астрономии, поможет уменьшить влияние “волн” в характеристике отражения и пропускания и улучшить восстановление кривой реакции, особенно желательное в районе водородных линий синей части рабочей области. Заметное снижение рассеянного света и дополнительные $\sim 6\%$ эффективности могут быть достигнуты заменой стандартных окон приемников на просветленные под диапазоны работы ТДС; сходный выигрыш может дать замена покрытия диагонального зеркала ввода света в спектрограф на многослойное диэлектрическое. Наконец, улучшение ведения изучаемого объекта телескопом может снизить потери на щели, которые могут быть значительными для слабых источников, наблюдаемых с длинными экспозициями.

Как инструмент для спектрофотометрических исследований ТДС имеет большой потенциал. Первые результаты показали, что восстановленные по разным звездам-стандартам кривые реакции согласуются с точностью лучше 2%. Однако для уверенной постановки широких программ спектрофотометрических исследований требуется отдельная работа по изучению сходимости оценок для стандартов в разные заведомо фотометрические ночи.

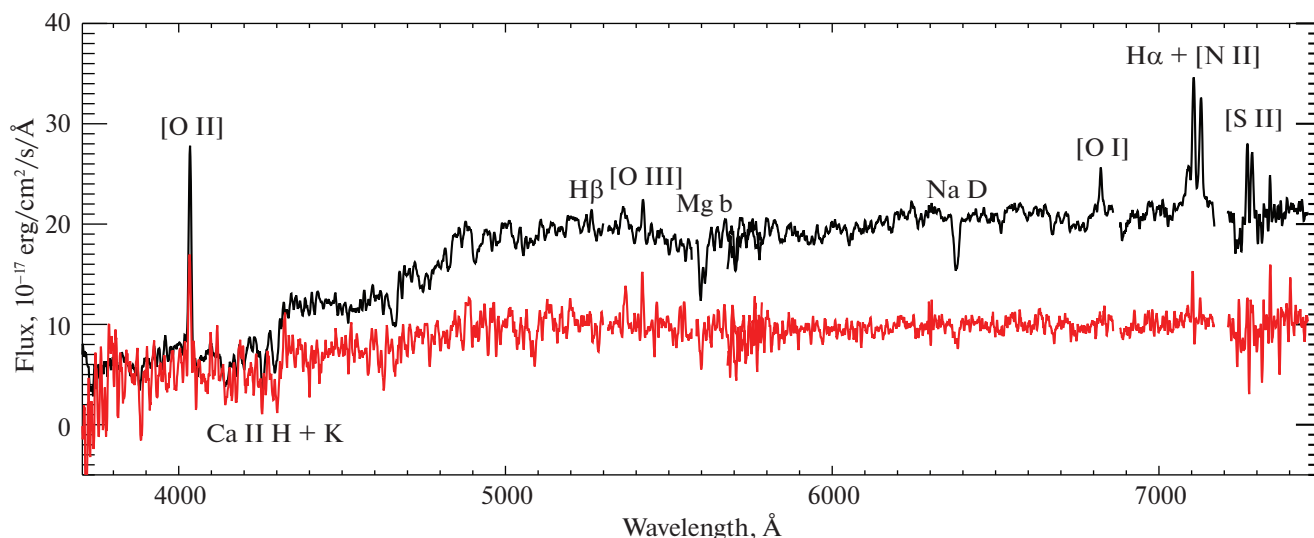


Рис. 11. Примеры спектров центральной части галактики низкой поверхностной яркости Malin 1 с суммарной экспозицией 4 ч, $g = 18.72^m$ (черная линия) и одного из ее компактных эллиптических спутников, $g = 19.94^m$ (красная линия). Потоки в спектре спутника увеличены в три раза для улучшения восприятия. На спектрах отмечены основные абсорбционные и эмиссионные линии. Оба объекта содержат активные галактические ядра.

Пока с ТДС получено немного спектров, нацеленных на мониторинг доплеровских смещений. Работа Пширкова и др. (2020) показала, что при соблюдении методики измерений лучевые скорости надежны в пределах 10–20 км/с даже для слабых объектов, однако требуются более длительные ряды измерений известных спектральных двойных, чтобы уточнить эту цифру.

Приведенные характеристики спектрографа ТДС 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ и первые результаты его работы показывают, что он является оптимальным прибором для задач оперативной характеристики и долговременного мониторинга нестационарных и транзитных объектов. С его помощью уверенно получают спектры объектов $\sim 20^m$ за 1–2 ч наблюдений с отношением сигнал к шуму выше пяти на пиксель приемника и с разрешением $R \sim 1500\text{--}2500$ в зависимости от длины волны.

Спектрограф изготовлен при поддержке грантов РФФ 16-12-10519 (разработка и изготовление оптики красного канала) и 17-12-01241 (оптика и камера синего канала). Работа С.А. Потанина, Н.И. Шатского, А.А. Белинского, С.Г. Желтоухова, А.М. Татарникова, А.В. Додина, К.А. Постнова, А.М. Черепашука, И.В. Чилингаряна поддержана в рамках Научной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”. СГЖ, АВД и КАП также поддержаны Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука”, грант номер 075-15-2020-778. Исследования с ТДС и 2.5-м телескопом

поддерживаются Программой развития МГУ им. М.В. Ломоносова. Авторы выражают признательность сотрудникам САО РАН В.Л. Афанасьеву и А.В. Моисееву за консультации и советы при постройке инструмента и А.А. Токовину за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Бурлак М.А., Додин А.В., Письма в Астрон. журн. **46(9)**, 640 (2020) [V.P. Arkhipova, N.P. Ikonnikova, M.A. Burlak, and A.V. Dodin, *Astron. Lett.* **46(9)** (2020)].
2. Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Astron. Lett.* **31(3)**, 194 (2005).
3. Балакина и др. (E.A. Balakina, M.V. Pruzhinskaya, A.E.S. Moskvitin, et al.), arXiv:2008.07934 (2020).
4. Барден и др. (S.C. Barden, J.A. Arns, W.S. Colburn, and J.B. Williams), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112(772)**, 809 (2000).
5. Браун и др. (T.M. Brown, N. Baliber, F.B. Bianco, M. Bowman, B. Bursell, P. Conway, M. Crellin, E. Depagne, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **125(931)**, 1031 (2013).
6. Буццони и др. (B. Buzzoni, B. Delabre, H. Dekker, S. D’Odorico, D. Enard, P. Focardi, B. Gustafsson, W. Nees, et al.), *The Messenger* **38**, 9 (1984).
7. ван Доккум (P.G. van Dokkum), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113(789)**, 1420 (2001).
8. Вольнова и др. (A. Volnova, M. Pruzhinskaya, A. Pozanenko, S.I. Blinnikov, P.Yu. Minaev, O.A. Burkhanov, A.M. Chernenko, Sh.A. Ehgamberdiev, et al.), *MNRAS* **467**, 3500 (2017).

9. Додин А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И. и др., Письма в Астрон. журн. **46(7)**, 459 (2020) [A.V. Dodin, S.A. Potanin, N.I. Shatsky, et al., *Astron. Lett.* **46**, 429 (2020)].
10. Илич и др. (D. Plić, V. Oknyansky, L.Č. Popović, S.S. Tsygankov, A.A. Belinski, A.M. Tatarnikov, A.V. Dodin, N.I. Shatsky, et al.), *Astron. Astrophys.* **638**, A13 (2020).
11. Кански и др. (J. Kinsky, I. Chilingarian, D. Fabricant, A. Matthews, S. Moran, M. Paegert, J. Duane Gibson, D. Porter, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131(1001)**, 075005 (2019).
12. Катков, Чилингарян (I.Y. Katkov and I.V. Chilingarian), I.N. Evans, A. Accomazzi, D.J. Mink, and A.H. Rots (Ed.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **442**, 143 (2011).
13. Коппервет и др. (C.M. Copperwheat, I.A. Steele, R.M. Barnsley, S.D. Bates, D. Bersier, M.F. Bode, D. Carter, N.R. Clay, et al.), *Experiment. Astron.* **39(1)**, 119 (2015).
14. Коппервет и др. (C.M. Copperwheat, I.A. Steele, A.S. Piascik, et al.), *MNRAS* **462(4)**, 3528 (2016).
15. Корнилов и др. (V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126(939)**, 482 (2014).
16. Корнилов и др. (V. Kornilov, M. Kornilov, O. Voziakova, et al.), *MNRAS* **462(4)**, 4464 (2016).
17. Липунов и др. (V. Lipunov, E. Gorbovskey, V. Afanasiev, et al.), *Astron. Astrophys.* **588**, A90 (2016).
18. МакКоннел (D.J. MacConnell), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **48**, 355 (1982).
19. Минк и др. (J. Mink, J. Rhee, S. Moran, and W. Brown), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **522**, 655 (2020).
20. Моралес-Руэда и др. (L. Morales-Rueda, D. Carter, I.A. Steele, P.A. Charles, and S. Worswick), *Astronomische Nachrichten* **325(3)**, 215 (2004).
21. Онори и др. (F. Onori, G. Cannizzaro, P.G. Jonker, M. Fraser, Z. Kostrzewa-Rutkowska, A. Martin-Carrillo, S. Benetti, N. Elias-Rosa, et al.), *MNRAS* **489(1)**, 1463 (2019).
22. Попеску и др. (M. Popescu, O. Vaduvescu, J. de León, R.M. Gherase, J. Licandro, I.L. Boacă, A.B. Şonka, R. P. Ashley, et al.), *Astron. Astrophys.* **627**, A124 (2019).
23. Потанин и др. (S.A. Potanin, I.A. Gorbunov, A.V. Dodin, A.D. Savvin, B.S. Safonov, and N.I. Shatsky), *Astron. Rep.* **61(8)**, 715 (2017).
24. Пширков и др. (M.S. Pshirkov, A.V. Dodin, A.A. Belinski, S.G. Zheltoukhov, A.A. Fedoteva, O.V. Voziakova, S.A. Potanin, S.I. Blinnikov, and K. A. Postnov), *MNRAS* **499**, L21 (2020).
25. Сабурова и др. (A.S. Saburova, I.V. Chilingarian, I.Y. Katkov, O. V. Egorov, A.V. Kasparova, S.A. Khoperskov, R.I. Uklein, and O.V. Vozyakova), *MNRAS* **481(3)**, 3534 (2018).
26. Сми и др. (S.A. Smee, J.E. Gunn, A. Uomoto, N. Roe, D. Schlegel, C.M. Rockosi, M.A. Carr, F. Leger, et al.), *Astron. J.* **146(2)**, 32 (2013).
27. Соколовский и др. (K.V. Sokolovsky, E. Aydi, L. Izzo, et al.), *Astronomer's Telegram* **14004**, 1 (2020).
28. Тейлор и др. (K. Taylor, G. Robertson, and S. Barden), W. van Breugel and J. Bland-Hawthorn (Ed.), *Imaging the Universe in Three Dimensions*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **195**, 110 (2000).
29. Фабрикант и др. (D. Fabricant, R. Fata, H. Epps, Th. Gaumon, M. Mueller, J. Zajac, S. Amato, J. Barberis, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131(1001)**, 075004 (2019).
30. Хорн (K. Horne), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **98**, 609 (1986).
31. Черепашук и др. (A. Cherepashchuk, K. Postnov, S. Molkov, E. Antokhina, and A. Belinski), *New Astron. Rev.* **89**, 101542 (2020).
32. Черепашук и др. (A.M. Cherepashchuk, V.F. Esipov, A.V. Dodin, V.V. Davydov, and A.A. Belinskii), *Astron. Rep.* **62(11)**, 747 (2018).
33. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, Y. Beletsky, S. Moran, W. Brown, B. McLeod, and D. Fabricant), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127(950)**, 406 (2015).
34. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, V. Cayatte, Y. Revaz, S. Dodonov, D. Durand, F. Durret, A. Micol, and E. Slezak), *Science* **326(5958)**, 1379 (2009).
35. Чилингарян, Золотухин (I. Chilingarian and I. Zolotukhin), *Science* **348(6233)**, 418 (2015).
36. Чилингарян, Гришин (I.V. Chilingarian and K.A. Grishin), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **132(1012)**, 064503 (2020).
37. Чилингарян и др. (I.V. Chilingarian, I.Y. Katkov, I.Y. Zolotukhin, K.A. Grishin, Yu. Beletsky, K. Boutsia, and D.J. Osip), *Astrophys. J.* **863(1)**, 1 (2018).
38. Шатский и др. (N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, S. Potanin, B. Safonov, A. Tatarnikov, and A. Cherepashchuk), arXiv:2010.10850 (2020).