

УДК 520.84:520.2

РАЗВИТИЕ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ БТА САО РАН

© 2025 В. Е. Панчук^{1*}, В. Г. Клочкова^{1**}, М. В. Юшкин^{1***}, Г. С. Жуклевич^{1****}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 июня 2024 года; после доработки 15 июля 2024 года; принята к публикации 23 июля 2024 года

В обзоре охарактеризовано развитие спектральной аппаратуры высокого разрешения, размещенной на подвижной части альт-азимутальной монтировки 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Перечислены основные проблемы, выявленные на этапах применения различных типов светоприемников и выполнения различных наблюдательных программ. Определены ограничения на программы, связанные с различными требованиями к позиционной стабильности спектрографов. Оцениваются перспективы проектов реконструкции приборов фокуса Нэсмита.

Ключевые слова: наземные телескопы — спектроскопия с высоким разрешением

1. ШТАТНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Уникальность телескопа БТА САО РАН (см. Ioannisianni, 1971) состоит не только в альт-азимутальной монтировке и системе разгрузки главного оптического элемента — монолитного зеркала диаметром 6 м, но также в конструкции и расположении спектрографов, размещенных на подвижной части телескопа. Все эти приборы были предназначены для наблюдений различных типов объектов с различным спектральным разрешением, степень использования этих спектрографов определялась как научными интересами немногочисленного коллектива первого поколения астрономов САО РАН, так и степенью пригодности аппаратуры к предстоящей адаптации новых приемников излучения. Основной задачей коллектива астрономов-наблюдателей являлось освоение спектральной аппаратуры, построенной в промышленности по техническим заданиям астрономов, а также оснащение этой аппаратуры новыми фотоэлектрическими приемниками, с чем институты Академии наук и ведомственные учреждения так и не справились (эту оценку — «обсерватория в начале работ по оснащению БТА современным светоприемным оборудованием оказалась в одиночестве, астрономическое сообщество страны в этих работах не участвовало» — заимствуем из публикации Afanasiev (2006), с. 24). В первые годы

работы задача разработки дополнительной аппаратуры высокого спектрального разрешения для БТА официально не стояла. Исключение составил проект камеры для основного звездного спектрографа (ОЗСП, Vasil'ev et al., 1977), предназначенной для расширения возможностей спектроскопии звезд путем применения электронно-оптического преобразователя (ЭОП) с фотокатодом большого диаметра. Опытные образцы такого светоприемника в обсерваторию так и не поступили, но катодиоптрическая камера с внешним фокусом была в 1980-х годах разработана и построена на Ленинградском оптико-механическом объединении (ЛОМО). Под размещение спектральной аппаратуры на БТА были выделены объем четырехэтажной конструкции опоры горизонтальной оси Z и, с противоположной стороны, площадка четвертого этажа второй опоры этой же оси. В нижних этажах этой опоры размещается механизм привода оси Z . Над плоскостями верхних (четвертых) этажей опор находятся оси и фокальные поверхности фокусов Нэсмит-2 и Нэсмит-1 соответственно. Отметим, что кроме симметричных фокусов Нэсмита (относительное отверстие 1 : 30.74) на площадках четвертых этажей платформ предполагалось разместить аппаратуру, работающую и с другими значениями относительного отверстия и масштаба изображения (см. Lobachev and Yakhupova, 1977), но после корректировки технического задания набор этих значений и перечень соответствующей спектральной аппаратуры были сокращены (см. Panchuk and Klochkova, 1996). Итак, к началу испытаний БТА в комплексе со спектральной аппаратурой промышленного производства астро-

*E-mail: panchuk@ya.ru

**E-mail: valentina.r11@yandex.ru

***E-mail: yumaks@gmail.com

****E-mail: zhuklevich.gleb@gmail.com

номы получили: Основной звездный спектрограф (ОЗСП, Vasil'ev et al., 1977), стационарно расположенный в объеме опоры оси Z (фокус Нэсмита-2), а также звездный спектрограф со скрещенной дисперсией (СП-161, Zandin et al., 1977) и, позже, планетный спектрограф (СП-124, Gusev et al., 1976), поочередно устанавливаемые на платформе фокуса Нэсмита-1. В совокупности с одним из приборов спектральной аппаратуры первичного фокуса (рассмотрение которой не входит в рамки данной публикации) на БТА, смонтированными, в состоянии готовности к наблюдениям находились ОЗСП (с вариантами наблюдений на трех сменных камерах, две из которых работали с комплектом сменных дифракционных решеток) и один из сменных спектрографов фокуса Нэсмита-1 (СП-161 или СП-124). Смена спектрографов на площадке фокуса Нэсмита-1 сопровождалась проводимой в дневное время балансировкой механизма опорно-поворотной части (ОПЧ) телескопа. Вначале обратимся к результатам приемки ОЗСП (см. рис. 1), на использование которого исследователи звездных спектров возлагали большие надежды. В наборе параметров камер спектрографа имеется «зазор» между фокусными расстояниями $F1 = 3013$ мм и $F2 = 600$ мм, обычно заполняемый еще одним значением в наборах камер классических спектрографов фокуса кудэ (см., например, Dunham, 1956; Vasil'ev, 1976). Остановимся вначале на свойствах камеры № 1 ($F1 = 3013$ мм), где особенности вертикальной компоновки схемы ОЗСП проявились в виде первого сюрприза. В марте 1975 г. астрономы обнаружили (визуально и фотографически) нестабильность положения спектральных линий в фокальной поверхности камеры. За типичное время экспозиции изображение спектральной линии перемещалось на величину до 0.2 мм, что при величине обратной линейной дисперсии $P = 1.0\text{--}1.8$ Å/мм соответственно в 5–3 порядках эшелле-спектра понижало спектральное разрешение до величин, характерных для светосильной камеры № 2.

В качестве причин нестабильности рассматривались особенность конструкции спектрографа (монтаж различных оптико-механических узлов на пилонх, распределенных вертикально по объему опоры оси Z , рис. 1) и конвекция, наблюдаемая как визуально (нестабильность изображений спектральных линий), так и ожидаемая в результате вертикального градиента температуры в спектрографе. Анализ влияния разности температур для элементов камеры № 1 показал, что потеря спектрального разрешения R критична к изменению постоянной дифракционной решетки и к изменению фокусного расстояния камеры. В обоих случаях 20-процентная потеря R ожидается уже

при температурном перепаде в 0.5°C . Продолжительный мониторинг температур в объемах ОЗСП и подкупольного пространства башни БТА подтвердил предположения о недостаточной теплоизоляции ОЗСП, приводящей к невозможности выполнять длительные экспозиции спектров на камере № 1. Оригинальное решение использования дифракционной решетки для одновременной регистрации в низких порядках спектра, с разведением последних призмой двойного хода, приводило к снижению проникающей способности как за счет потерь света на центральном экранировании кассетой уширенных размеров, так и за счет ограничения на продолжительность экспозиции из-за развития нестабильностей спектра. В итоге камера № 1 в ее первоначальной схеме практически не использовалась.

Дальнейшие шаги по выяснению (и устранению) причин снижения спектрального разрешения на камере № 1 были выполнены путем теплоизоляции всего объема ОЗСП и дооснащения спектрографа светозащитным павильоном, последнее продлило время работы спектрографа и на утренние сумерки. При мониторинге температуры выяснилось, что в объем спектрографа поступает значительный поток тепла от опорно-поворотной части (ОПЧ) БТА (через конструкцию пола этажа I) и от вертикальных маслопроводов, идущих от маслостанции к подшипнику оси Z через весь объем ОЗСП. Перенос маслостанции из ОПЧ в стационарное помещение, переход на низкотемпературный сорт масла, дополнительная теплоизоляция маслопроводов, удаление механизма гидроподъемника наблюдателя к визуальной части общего гида — все эти последовательные меры изменили тепловой и механический режимы объема опоры, в которой смонтирован ОЗСП. В итоге оказалось, что объем спектрографа начинает реагировать на ночную температуру подкупольного пространства не ранее следующего дня, когда наблюдения уже не проводятся (подробнее см. в работе Klochkova et al., 2008). Что касается камеры № 1, то ее схема была реконструирована (см. Gazhur et al., 1986) с целью регистрации однопорядковых спектров, с использованием сменных решеток из комплекта светосильной камеры № 2 ($F2 = 600$ мм). Это позволило выполнять работы по составлению фотографических атласов ярких звезд (см., например, Kirper and Klochkova, 1987).

Оптическая схема ОЗСП, где коллимированный пучок перехватывается поочередно диспергирующими узлами камеры № 1 или 2, оказалась пригодной для эксперимента по оценке влияния конвекции на положение и форму профиля спектральной линии. В работе Vikmaev and Ranshuk (1986) одна и та же продолжительная экспозиция спектра сравнения регистрировалась поочередно

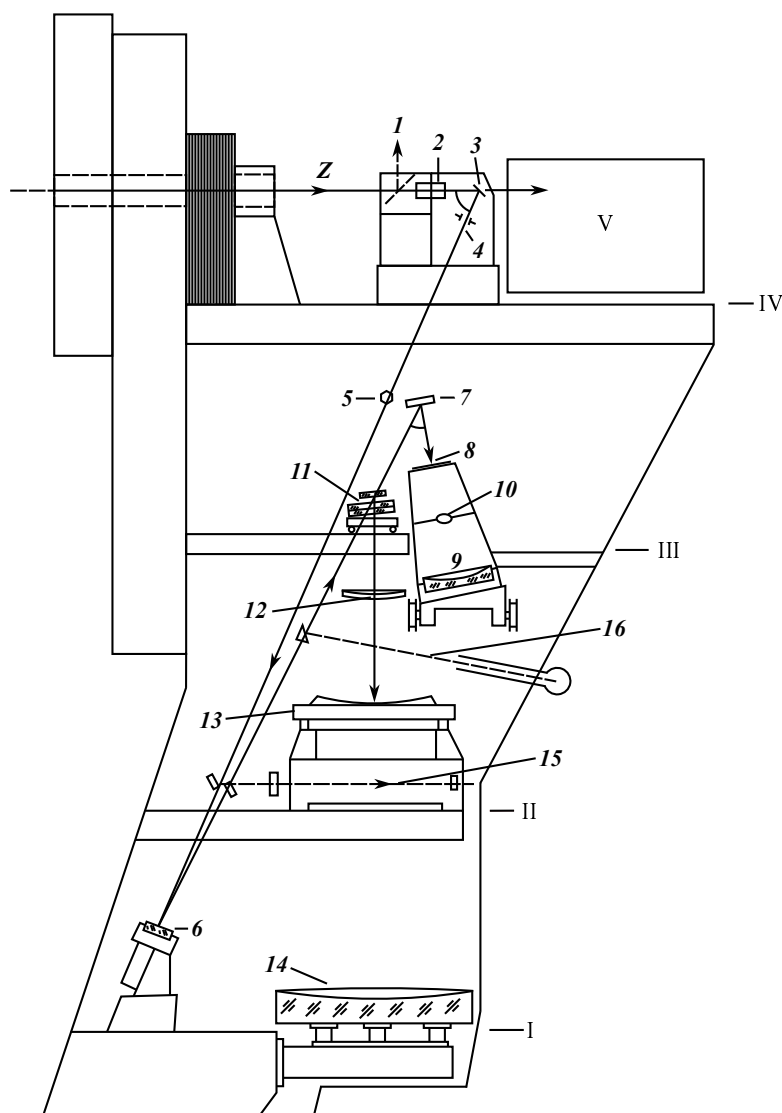


Рис. 1. Схема Основного звездного спектрографа (ОЗСП), разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось зенитного расстояния — Z . Обозначения: I–IV — уровни пола этажей опоры оси Z , V — объем, занимаемый эшелле-спектрографами; 1 — канал подсматривания поля, 2 — блок сменных предщелевых устройств, 3 — поворотное зеркало, 4 — щель, 5 — место ввода порядкоразводящей призмы, 6 — зеркало коллиматора, 7 — узел дифракционной решетки светосильных камер, 8 — коррекционная пластина камеры Шмидта, 9 — сферическое зеркало камеры Шмидта, 10 — плоское зеркало в сходящемся пучке (вариант работы с матрицей ПЗС) и полеспрямляющая линза, 11 — диспергирующий узел камеры № 1 (решетка и призма двойного хода), 12 — мениск объектива камеры № 1, 13 — кассетная часть камеры № 1, 14 — сферическое зеркало объектива камеры № 1, 15 — канал фотоэкспонетра, 16 — канал калибровки.

на камере № 1 и № 2, очередность определялась смещением диспергирующего узла камеры № 1. Смещения линий показали общий (с точностью до масштаба) характер, хотя условия для конвекции в камерах были различными из-за конструкции камер. Была выдвинута гипотеза об изменении (в течение экспозиции) высоты опоры БТА, поддерживающей ось Z со стороны фокуса Нэсмита-2. Впоследствии неравномерность температурного удлинения стоек оси БТА подтвердилась геодезическими измерениями Vainberg and Gryzulin (1986).

Камера № 3 ($F3 = 300$ мм) оснащена комплектом из четырех сменных коррекционных пластин Шмидта, предназначенных для работы в одном из четырех поддиапазонов (центральные длины волн 3930, 5200, 6560, и 9100 Å). Испытания показали высокое качество спектра в каждом из поддиапазонов. При смене коррекционной пластины требовалось центрировать ее с высокой точностью (для устранения aberrаций, связанных с ошибкой коллимации). Даже при идеальном положении коррекционной пластины характеристики комы резко ограничивают размер требуемого поля (50 мм)

хороших изображений. Потенциальные характеристики камеры № 3 приведены в таблице 1 работы Klochkova and Panchuk (1991). Кроме того, при смене поддиапазона было необходимо перенастраивать наклон кассеты относительно полеспрямляющей линзы, что также требовало проводить юстировку в дневное время.

Необходимость выполнять дополнительные работы при смене поддиапазона не привлекала астрономов-наблюдателей, и камера с ее уникальным значением широкощельности (отношение $F_{\text{coll}}/F_{\text{cam}} = 26.4$) и набором коррекционных пластин Шмидта оказалась в числе неиспользуемой спектральной аппаратуры БТА.

В результате исследований спектральной аппаратуры ОЗСП БТА астрономы сосредоточились на использовании камеры № 2 с набором дифракционных решеток (600 штрихов/мм), позволявшим работать в 3–1 порядках с широкощельностью 13. Что касается нестабильности положения спектра, где требования технического задания (максимально допустимый сдвиг линий около 0.02 мм) так и не были выполнены, то в программах астрономов САО приоритет был отдан наблюдательным программам, где астрофизический результат определялся по относительным измерениям в спектре (по эквивалентным ширинам линий и по относительным смещениям линий в разных знаках круговой поляризации). Схема впечатывания спектра ступенчатого ослабителя на фотопластинку, содержащую спектр звезды, была реализована с грубейшей конструктивной ошибкой. Дело в том, что пучок канала спектра фотометрической калибровки, построенный в центральной части коллимированного пучка, экранируемой кабиной первичного фокуса, после дифракции на решетке наталкивался на кассетную часть в камере Шмидта (см. рис. 1) и соотношение интенсивностей в полосках спектра калибровки искажалось из-за центрального экранирования в схеме камеры. От использования механизма подбора цветных и нейтральных светофильтров в канале калибровки также пришлось отказаться. Со значениями обратной линейной дисперсии $P = 9.1, 13.4$ и $27.3 \text{ \AA/мм}$ в третьем, втором и первом порядках соответственно, ошибки определения лучевой скорости составляли около 1 км с^{-1} , в зависимости от ширины спектральных линий и способа аппроксимации дисперсионной кривой в каждом из вариантов наблюдений.

Проницающая способность ОЗСП с камерой № 2 была рассчитана в работе Rylov (1970). Как испытания, так и результаты выполнения спектроскопических заявок показали переоценку в расчетах, что вызывало вопросы внешних заявителей. Причиной расхождений (в среднем на $1^{\text{м}}$) явился эффект колебаний изображения звезды на щели

спектрографа, который не учитывался в цитируемой схеме расчетов, идеализированной по Боуэну (Bowen, 1952). Дальнейшие работы по локальному корректору положения звезды (Ivanov et al., 2001; Yushkin et al., 2023) в фокусе Нэсмит-2 дали численное подтверждение этого эффекта.

Для снижения потерь света функция расширения спектра в ОЗСП была конструктивно совмещена с функцией выделения рабочего порядка дифракционной решетки. Однако в этом случае кривая концентрации энергии изменяет свою форму при различных углах наклона расширителя спектра, толщина которого остается неизменной. Работа по выбору сорта и толщины порядкообразовательного фильтра, в зависимости от спектрального класса звезды, сорта фотоэмульсии, параметров дифракционной решетки, была проведена на ЭВМ (Bikmaev et al., 1986). При определении проницающей способности учитывался опыт выполнения многочисленных заявок на различные режимы наблюдений.

Обзор научных программ (до 2011 г.) по физике и эволюции звезд опубликован в работе Klochkova (2012), там же можно найти упоминание об основных работах, выполненных на ОЗСП фотографическими методами. В целом можно утверждать, что результаты исследований характеристик ОЗСП в сочетании с камерами № 1–3 были учтены при формировании наблюдательных программ. К недостаткам фотографического периода регистрации спектров можно отнести незавершенность программы оцифровки фотографических спектров, начатой на автоматических микроденситометрах (АМД) в лаборатории информатики. Это обстоятельство не позволило суммировать полоски спектров, полученных на камерах № 1 и № 2 с резальными изображения (Bikmaev and Gazhur, 1990). Кроме того, не владея технологией сканирования двумерных фотографических изображений, спектроскописты не имели возможности оцифровывать искривленные эшельные спектры, полученные в низких порядках на камере № 1.

Фотографическая регистрация спектров применялась и на планетном спектрографе СП-124 (Gusev et al., 1976), оснащенном асферической зеркальной камерой (Lobachev, 1978) с набором решеток, позволяющим работать от наземного ультрафиолета до ближнего ИК-диапазона включительно. Этот спектрограф был предназначен для наблюдений во всем диапазоне чувствительности фотографических эмульсий с набором величины спектрального разрешения, позволяющим выполнять наблюдения планет различной поверхностной яркости и углового диаметра. К моменту получения

спектрографа для испытаний в САО направление исследования планет в обсерватории не было укомплектовано специалистами, поэтому прибор испытывался с точки зрения пригодности для спектроскопии звезд. Проницающая способность СП-124 уступала значениям, полученным на камере № 2 ОЗСП, на 1^m4-2^m . Из-за низкой широкощельности ($F_{\text{coll}}/F_{\text{cam}} = 2400/647 = 3.71$) освещенность в фокальной плоскости камеры спектрографа пропорциональна не диаметру звездного изображения (как в случае камеры № 3 ОЗСП), а его квадрату (за счет увеличения высоты полосы спектра). В случае спектроскопии планет ухудшение качества изображения приводило к снижению числа элементов изображения, спектроскопию которых можно считать независимой. Точность измерения лучевых скоростей была по тем временам высокой (до 0.5 км с^{-1} при калибровке по теллурическим линиям). По сильным звездным линиям в ближнем ИК-диапазоне получена точность 0.15 км с^{-1} . Единственным достоинством СП-124 для задач спектроскопии звезд явилась высокая позиционная стабильность спектров, что позволяло обеспечить предельные значения спектрального разрешения, реализуемые на БТА в первые годы наблюдений.

СП-124 был единственным спектрографом высокого разрешения с внешним фокусом, то есть пригодным для применения габаритных фотоэлектрических приемников. Вначале на нем был испытан телевизионный многоканальный спектрофотометр (Balega et al., 1979). На точность измерения с этим приемником могут влиять: нестабильность источников питания, s-образная дисторсия электронно-оптических систем, нестабильность размера и положения развертки, внешние магнитные и электрические поля. Позиционная нестабильность, измеряемая по спектру сравнения в условиях наблюдений, определялась вариациями s-образной формы дисперсионной кривой. Сканы спектров, полученные при неизменном положении дифракционной решетки, показали сдвиги линий до восьми каналов, за счет изменения ориентации светоприемника относительно магнитного поля Земли. Магнитное экранирование суперкремникона снижает этот эффект до $0.3-1$ канала. Если в спектре исследуемого объекта имеются теллурические или ионосферные линии, то в этом случае систематические ошибки измерения лучевой скорости можно уменьшить до 0.002 мм . Итак, первое применение фотоэлектронного светоприемника на спектрографе, стабильного в позиционном отношении, показало, что задача повышения точности измерения лучевых скоростей переходит в область других методических приемов, связанных не с оптико-механической конструкцией, а с условиями экс-

плуатации электроники и с изменениями в технике обработки сигнала.

Второй попыткой оснастить спектрограф СП-124 фотоэлектронным приемником явилась разработка, выполненная в Ростовском государственном университете (Fasenko et al., 1979). Идея измерения лучевой скорости корреляционным методом сравнения наблюдаемого спектра с опорным была высказана еще в работе Fellgett (1955) и неоднократно реализована (см., например, Griffin, 1967; Griffin and Gunn, 1974; Baranne et al., 1979). Для телескопов разных диаметров (от 0.9 до 5.0 м) было построено несколько корреляционных спектрометров, где фрагменты изображения спектра выделялись и модулировались подвижной маской спектра, а излучение, прошедшее через маску спектра, регистрировалось одноканальным приемником (фотоумножителем). Лабораторные испытания макета фотоэлектрической приставки к СП-124 показали точность измерения лучевой скорости 1 км с^{-1} . Ожидаемая проницающая способность метода ограничивалась низкой широкощельностью спектрографа.

Третьим этапом попыток использования планетного спектрографа СП-124 явилось его оснащение светосильной камерой с внешним фокусом, сначала для работ с диссектором в режиме спектроскопии быстрых процессов с использованием фотометрического и спектроскопического комплексов (Alekseev et al., 1983), а затем с телевизионным счетчиком фотонов (Balega et al., 1979), усовершенствованным в работе Drabek et al. (1986). Такой вариант схемы планетного спектрографа уже не соответствовал критериям высокого спектрального разрешения.

Итак, первый период работ по увеличению позиционной точности измерений звездных спектров высокого разрешения определялся исходным набором штатных спектрографов, их механическим и температурным режимами, а также проблемами разработки и эксплуатации первых фотоэлектронных устройств, которыми эти спектрографы впоследствии были оснащены. Точность измерения лучевых скоростей в среднем осталась неизменной: около 1 км с^{-1} .

2. АППАРАТУРА ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Спектральная аппаратура, которая в работе Panchuk and Klochkova (1996) классифицирована как аппаратура второго поколения БТА, характеризуется активным применением двумерных счетчиков фотонов. Двумерность приемника определила интерес к применению систем скрещенной дисперсии, что несколько увеличивало спектральное разрешение. Однако низкая инерционность телевизионного счетчика фотонов ограничивала фотометрические параметры спектров, и, как

следствие, их позиционные характеристики. Действительно, при ограничениях на скорость счета не более 0.5 события на канал в секунду предельное число отсчетов, регистрируемых за час экспозиции, не превысит 1800, но за этот час изображение спектра «расползется», вследствие взаимодействия магнитного поля электронных систем приемника с магнитным полем Земли. Таким образом, спектральная аппаратура второго поколения не обеспечивала перспектив в задаче повышения характеристик спектров высокого разрешения. Однако в этот период были созданы первые системы скрещенной дисперсии, что позволило проверить выполнимость и предложить новую концепцию астроспектроскопии (Klochko and Panchuk, 1991), ориентированную на увеличение функциональности спектрального комплекса и количества одновременно регистрируемых элементов спектра. Поэтому аппаратура третьего поколения (с матрицами ПЗС), начавшись со спектрографов с диаметром коллимированного пучка $d_{\text{coll}} = 80\text{--}100$ мм (Gazhur et al., 1990; Klochkova et al., 1991), включает и спектрограф с рекордным размером: $d_{\text{coll}} = 235$ мм (Panchuk et al., 2009). Эта аппаратура, проектируемая «с нуля», отличалась квазигоризонтальной компоновкой оптической схемы, что позволило избежать неприятностей, вызванных температурными градиентами из-за вертикальной монтировки ОЗСП. В качестве приемников использовались ПЗС-матрицы, которые первоначально (а priori) рассматривались как приемники более стабильные, чем системы на усилителях яркости с электромагнитной фокусировкой.

Классическое решение схемы спектрографа скрещенной дисперсии состоит из комбинации эшелле с призмой (призмами) скрещенной дисперсии и камеры по схеме «ломаный Шмидт». Размеры и формат выходного отверстия этой камеры определяются выносом фокальной поверхности (за тыльную поверхность зеркала) и форматом приемника. Поэтому при изменении формата ПЗС и монтировки модуля приемника следует переопределить характеристики плоского зеркала и конфигурацию центрального отверстия в нем. Кроме того, сохраняется проблема точного крепления полеспрямляющей линзы перед плоскостью изображения спектра. В кварцевой камере спектрографа НЭС БТА (Panchuk et al., 2017) коррекция поля выполняется мениском двойного хода, поэтому проблема юстировки полеспрямляющей линзы отсутствует. Пространственное разведение эшелльных порядков выполняется сменными решетками, что устраняет «слипание» изображений низких (длинноволновых) порядков и оставляет их пригодными для обработки глубоких абсорбций. Набор решеток скрещенной

дисперсии позволяет применять резатели изображения во всем рабочем диапазоне камеры и приемника. Внедрение спектрографа НЭС БТА сделало ОЗСП прибором второстепенным (в плане позиционной спектроскопии), поэтому дальнейшие исследования позиционной стабильности ОЗСП проводились эпизодически. На камере № 2 ОЗСП была выполнена работа по компенсации известных смещений положения спектра звезды (Chountonov and Naidenov, 2009), откуда можно получить представления о величине смещений и возможности повышения спектрального разрешения путем такой компенсации. Проблема перехода к значению откалиброванной лучевой скорости в данном методе сохраняется.

Период создания и эксплуатации первых эшелле-спектрографов БТА (с диаметрами коллимированного пучка до 100 мм), оснащенных ПЗС-матрицами 520×580 и 1040×1160 элементов, показал, что позиционные точности, обеспечиваемые на ОЗСП с этой же матрицей, превзойдены.

После постройки большого эшелле-спектрографа на горизонтальной монтировке (НЭС БТА, рис. 2) проблема вертикального градиента температуры в объеме спектрографа была устранена, и оставалось изучить чувствительность спектрографа к изменениям температуры элементов конструкции.

С этой целью был выбран период, когда вследствие резких вариаций метеоусловий наблюдения не проводились и телескоп был неподвижен (Panchuk et al., 2006). В этом эксперименте предполагалось, что нестабильности, связанные с конвекцией в вертикальной монтировке спектрографа, не проявляются и на первый план выйдут нестабильности, связанные с тепловыми деформациями металлоконструкции. Именно с этой целью выбраны такие метеоусловия, когда выполнение наблюдений запрещено и телескоп неподвижен. На протяжении двух суток было получено три серии экспозиций спектра сравнения. В каждой серии с интервалом в 15 минут регистрировался спектр сравнения и записывались показания датчиков температуры, установленных на металлоконструкциях спектрографа НЭС, в различных объемах опоры телескопа, в подкупольном пространстве и за пределами башни БТА. Корреляционный анализ полученных данных показал, что основной причиной нестабильности НЭС в данном состоянии являются тепловая деформация элементов предцелевой части спектрографов НЭС и ОЗСП и тепловые потоки с нижних этажей опоры телескопа, проходящие через оптический тракт спектрографа ОЗСП. Результаты исследований послужили основанием для предпринятой нами программы ре-

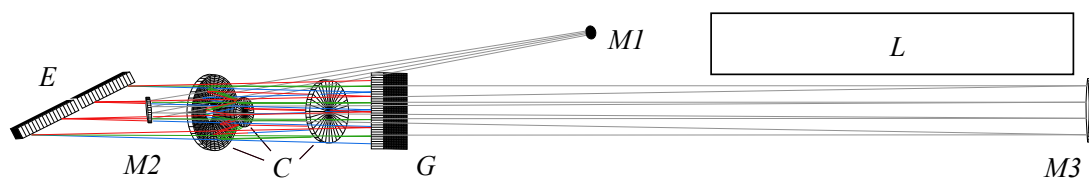


Рис. 2. Схема Нэсмитовского эшелюного спектрографа (НЭС), вид в плоскости, перпендикулярной оси Z , вдоль плоскости балкона фокуса Нэсмита-2. Обозначения: $M1$ – $M3$ — зеркала коллиматора, E — решетка эшелле, G — сменная решетка скрещенной дисперсии, C — оптика камеры, L — объем, занимаемый спектрографом Lynx.

конструкции предщелевой части, являющейся общей для спектрографов ОЗСП и НЭС.

При исследованиях причин нестабильности спектра (изменения температуры, жесткость механической конструкции) мы столкнулись с дополнительным эффектом — нестабильностями, которые развиваются непосредственно в модуле светоприемника. Попытки исследовать связь смещений спектра сравнения с азимутом и зенитным расстоянием БТА не выявили повторяющихся эффектов. Затем приемник (криостат с матрицей ПЗС) был исследован на других спектрографах (астрономических и лабораторных), находящихся в неподвижном состоянии. Эффект повторился с точностью до порядка величины. Отличительным свойством наших экспериментов является повторяемость эффекта на приемниках разных типов и форматов: на рис. 5–7 работы Klochkova et al. (1999) — для ПЗС-матрицы 1040×1160 элементов, на рис. 1 работы Panchuk et al. (2002) — для ПЗС-матрицы 2048×2048 элементов. С приемником форматом 4608×2048 элементов (размер пикселя 0.0135×0.0135 мм, шум считывания $1.8 e^-$) эффект также повторился (Zhuklevich and Panchuk, 2024). На рис. 3 приведены результаты испытаний. Желтым обозначены интервалы времени, когда смещение изображения спектра нелинейное. Нелинейность наблюдается с начала охлаждения криостата и в начале выкипания хладагента.

Основная цель испытаний стабильности спектрографа на продолжительной шкале — выработка тактики позиционной калибровки в течение наблюдательного сета. Действительно, необходимо минимизировать потери ночного времени на позиционную калибровку, при этом сохраняя частоту калибровки настолько, чтобы нестабильности, проявляемые между научными экспозициями, можно было учесть при обработке спектров. Для решения этой задачи узел канала калибровки следует реконструировать как с целью минимизации времени, затрачиваемого на калибровку, так и для обеспечения идентичности заполнения апертуры спектрографа спектром научного объекта и спектром калибровки. Это позволит вносить поправки, учитывающие обнаруженные смещения площадки

приемника относительно конструкции спектрографа. Понятно, что режим калибровки по длинам волн будет определяться типом спектра звезды и решаемой задачей.

Исследование изображений спектра показало, что требования технического задания на камеру спектрографа удовлетворены. Поэтому в настоящее время НЭС используется с ПЗС-матрицей форматом 4608×2048 , исследования которой выполнены в работе Zhuklevich and Panchuk (2024).

Опыт эксплуатации НЭС в течение 25 лет, результаты наблюдений по различным научным программам, применение новых методов анализа цифровых изображений, результаты исследований фотометрических и позиционных характеристик спектрографа — все это позволяет нам в дополнение к опубликованной программе повышения характеристик спектрографа (Panchuk et al., 2017), предложить некоторые разработки и усовершенствования конструкции и техники наблюдений. На первом плане стоит реконструкция предщелевой части спектрографов фокуса Нэсмита-2. Эта работа позволит провести ряд экспериментов в отношении позиционной калибровки спектров и расширить набор вариантов наблюдений за счет увеличения ассортимента предщелевых устройств спектрографов с большим диаметром коллимированного пучка.

Что касается ОЗСП — единственного спектрографа из аппаратуры первого поколения, одна из камер которого (№ 2) еще эксплуатируется, то здесь следует проанализировать два дополнительных варианта развития. В качестве первого из новых вариантов использования ОЗСП можно рассматривать интерферометр постоянного сдвига (Panchuk et al., 2021), где ОЗСП фигурирует в качестве постдисперсора. Такой вариант наблюдения (с камерой Шмидта № 2) также требует реконструировать предщелевую часть спектральной аппаратуры фокуса Нэсмита-2. Во втором варианте светосильную камеру № 3 можно использовать с новым светоприемником — камерой с матрицей во внутреннем фокусе, — используя рекордный диаметр коллимированного пучка. Если световой диаметр модуля светоприемника не превышает 77 мм, то в этом случае модуль впишется в тень кабины

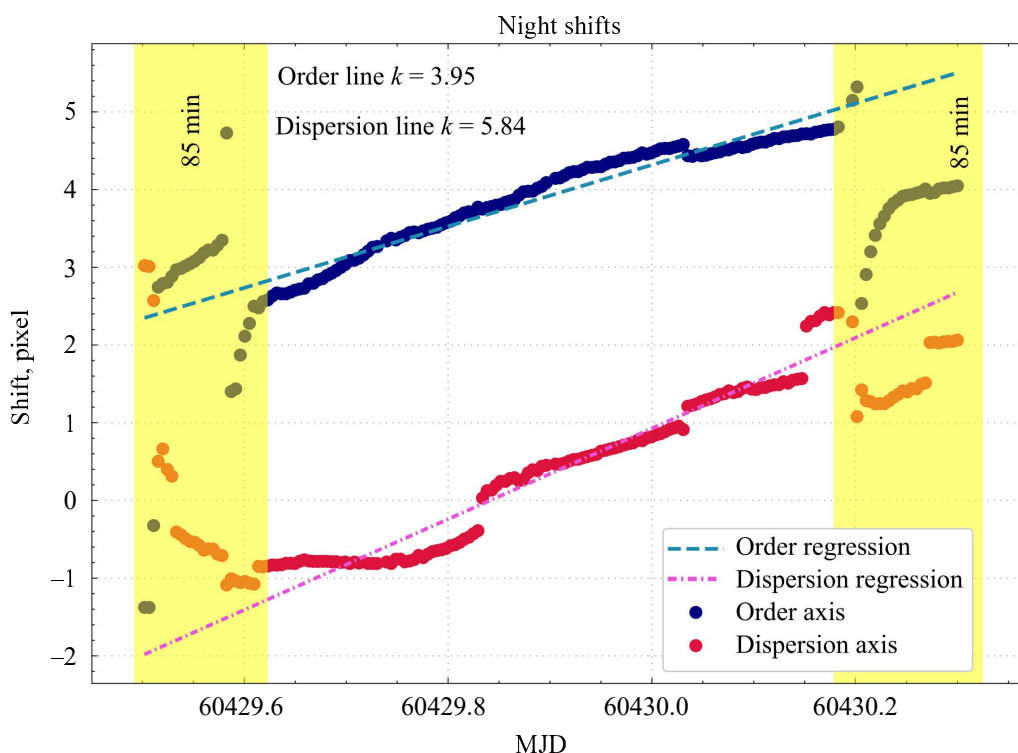


Рис. 3. Перемещение спектра сравнения на неподвижном приемнике (телескопе) в течение ночи. Сдвиги (в пикселях, ордината) измерены вдоль оси дисперсии эшелле (синим) и вдоль оси дисперсии решетки скрещенной дисперсии (красным). Выход на линейное изменение сдвигов в течение наблюдательной ночи аппроксимирован прямой с коэффициентом наклона k . По оси абсцисс отложена модифицированная юлианская дата.

первичного фокуса, проходящую в центре коллимированного пучка. Камера № 3 рассчитана на работу с нормальной щелью, около $1''$, и при обратной линейной дисперсии $56 \text{ \AA mm}^{-1}$ в первом порядке дифракции с решеткой 600 штр мм^{-1} обеспечивает спектральное разрешение $R \sim 4000$. Этот вариант наблюдений не касается тематики обзора, так как уже не попадает в категорию систем высокого спектрального разрешения, но он может оказаться интересным в программах быстрой спектроскопии и спектрополяриметрии слабых карликовых звезд.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-12-00069).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev, *Special Astrophysical Observatory 40 years* (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 2006) [in Russian].
2. G. N. Alekseev, S. V. Drabek, Y. A. Samorukov, G. S. Roze, and V. M. Suvorin, *Izvestiya Krymskoi Astrofiz. Obs.* **67**, 177 (1983).
3. I. I. Balega, R. G. Vereshchagina, and S. V. Markelov, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **11**, 248 (1979).
4. A. Baranne, M. Mayor, and J. L. Poncet, *Vistas in Astronomy* **23** (4), 279 (1979). DOI:10.1016/0083-6656(79)90016-3
5. I. F. Bikmaev and E. B. Gazhur, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **32**, 181 (1990).
6. I. F. Bikmaev, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **23**, 118 (1986).
7. I. F. Bikmaev and V. E. Panchuk, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **23**, 111 (1986).
8. I. S. Bowen, *Astrophys. J.* **116**, 1 (1952). DOI:10.1086/145586
9. G. A. Chountonov and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 106 (2009). DOI:10.1134/S1990341309010064

10. S. V. Drabek, I. M. Kopylov, N. N. Somov, and T. A. Somova, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **22**, 64 (1986).
11. T. Dunham Jr., *Vistas in Astronomy* **2**, 1223 (1956). DOI:10.1016/0083-6656(56)90054-X
12. E. G. Fassenko, V. V. Leushin, and M. Y. Nevskii, *Nauchno-tehnicheskii otchet No. 82*, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 1979) [in Russian].
13. P. Fellgett, *Optica Acta: International Journal of Optics* **2** (1), 9 (1955). DOI:10.1080/713820996
14. E. B. Gazhur, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Pis'ma Astron. Zh.* **16**, 473 (1990).
15. E. B. Gazhur, I. D. Naidenov, and V. E. Panchuk, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **23**, 105 (1986).
16. R. F. Griffin, *Astrophys. J.* **148**, 465 (1967). DOI:10.1086/149168
17. R. F. Griffin and J. E. Gunn, *Astrophys. J.* **191**, 545 (1974). DOI:10.1086/152994
18. O. N. Gusev, N. G. Zandin, and I. V. Peisakhson, *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* (12), 63 (1976).
19. B. K. Ioannisiani, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **3**, 3 (1971).
20. A. A. Ivanov, V. E. Panchuk, and V. S. Shergin, Preprint No. (155), SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 2001).
21. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Tartu Astrofüüsika Observatorium Teated* **87**, 1 (1987).
22. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **67**, 385 (2012). DOI:10.1134/S1990341312040049
23. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and V. Ryadchenko, *Sov. Astron. Letters* **17** (4), 274 (1991).
24. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 386 (2008). DOI:10.1134/S199034130804007X
25. V. G. Klochkova, S. V. Ermakov, V. E. Panchuk, and N. S. Tavalzhanskaya, Preprint No. 137 SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 1999).
26. V. S. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **33**, 3 (1991).
27. M. V. Lobachev, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **10**, 61 (1978).
28. M. V. Lobachev and L. E. Yakhunova, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **9**, 99 (1977).
29. V. E. Panchuk, V. L. Afanasiev, A. G. Pelmenev, et al., *INASAN Science Reports* **6**, 129 (2021). DOI:10.51194/INASAN.2021.6.4.006
30. V. E. Panchuk and V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **41**, 154 (1996).
31. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017). DOI:10.1134/S1063772917080091
32. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Naidenov, *Journal of Optical Technology* **76** (2), 87 (2009). DOI:10.1364/JOT.76.000087
33. V. E. Panchuk, N. E. Piskunov, V. G. Klochkova, et al., Preprint No. 169, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 2002).
34. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and E. V. Emel'yanov, Preprint SAO No. 212 SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 2006).
35. V. S. Rylov, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **2**, 121 (1970).
36. V. Y. Vainberg and S. I. Gryzulin, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **27**, 90 (1986).
37. A. S. Vasil'ev, *Izvestiya Krymskoi Astrofiz. Obs.* **55**, 224 (1976).
38. A. S. Vasil'ev, A. M. Evzerov, M. V. Lobachev, and I. V. Peisakhson, *Soviet J. Optical Technology* **44**, 89 (1977).
39. M. V. Yushkin, E. V. Emelianov, Y. B. Verich, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **78** (4), 613 (2023). DOI:10.1134/S1990341323700220
40. N. G. Zandin, O. N. Gusev, and I. V. Peisakhson, *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* (6), 20 (1977).
41. G. S. Zhuklevich and V. E. Panchuk, *Nauchno-tehnicheskii otchet No. 361*, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 2024) [in Russian].

Development of High-Resolution Spectroscopy on the Moving Part of the 6-m Telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences

V. E. Panchuk¹, V. G. Klochkova¹, M. V. Yushkin¹, and G. S. Zhuklevich¹

¹Special Astrophysical Observatory RAS, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The review describes the evolution of high-resolution spectroscopic equipment mounted on the moving part of the alt-azimuth mount of the 6-m BTA telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. We list the main problems identified during operation of various detector types and execution of various observational programs. Restrictions on programs are identified that arise from various requirements for the positional stability of spectrographs. Prospects for reconstruction projects for Nasmyth focus instruments are assessed.

Keywords: *ground based telescopes—high resolution spectroscopy*