

УДК 520.353

## ОСНОВНОЙ ЗВЁЗДНЫЙ СПЕКТРОГРАФ БТА. ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ, РЕКОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2014 В. Е. Панчук<sup>1,2\*</sup>, Г. А. Чунтонов<sup>1</sup>, И. Д. Найдёнов<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

Поступила в редакцию 23 декабря 2013 года; принята в печать 28 июня 2014 года

Основной звездный спектрограф (ОЗСП) 6-метрового телескопа БТА был разработан в начале 70-х и с 1975 г. находится в постоянной эксплуатации. Сохранить столь длительное время прибор в рабочем состоянии удалось путем внедрения современных приемников излучения и значительных усовершенствований оптической схемы. В работе приведены основные характеристики оптико-механической схемы ОЗСП, конструктивные особенности вспомогательных устройств, опыт и статистика использования прибора с различными приемниками и характеристики соответствующих методов наблюдений.

Ключевые слова: *аппаратура: спектрографы*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик БТА [1] является возможность быстрого (за считанные минуты) изменения оптической схемы телескопа. На момент разработки конструкции это было новаторским решением. Кроме того, в фокусах Несмита (1:30.7) предусматривалось использование сменной линзовой корректирующей оптики, обеспечивающей относительные отверстия 1:14.6 и 1:58.2, а также параллельный пучок для интерферометрии. Состав аппаратуры для фокусов Несмита, указанный О. А. Мельниковым и Н. А. Козыревым в техническом задании (ТЗ) на спектральную аппаратуру БТА [2], был достаточно широким: ОЗСП с фокусным расстоянием коллиматора 8400 мм, планетный спектрограф, дифракционный спектрограф с интерферометром Фабри–Перо (ИФП), бесщелевой спектрограф с интерференционными реперами [3]. Первоначально планировалось оснастить ОЗСП только одной камерой с фокусным расстоянием около 1.6 м. В 1964 г. к обсуждению ТЗ на спектральную аппаратуру были привлечены сотрудники Крымской астрофизической обсерватории, а в 1965 г. Э. Р. Мустель указал на необходимость увеличения светосилы камер и расширения набора дисперсий [4]. Для ОЗСП было решено разработать три камеры различной светосилы. В конце 60-х ТЗ на аппаратуру фокусов Несмита снова изменилось: был удален бесщелевой интерференционный спектрограф Линника

и добавлен эшелельный спектрограф. Позже были свернуты и работы по спектрографу с ИФП, который предполагалось поставить в САО в конце 1973 г.

В итоге перспективные интерференционные методы не были разработаны для БТА на промышленном уровне, и длиннофокусная камера ОЗСП осталась единственным средством спектроскопии высокого разрешения. На платформе фокуса Несмит-1 предполагалось поочередно устанавливать планетный спектрограф СП-124 [5] или эшелельный спектрограф со скрещенной дисперсией СП-161 [6]. На платформе фокуса Несмит-2 располагается щелевая часть ОЗСП [7], остальные элементы которого заполняют трехэтажный объем под платформой (рис. 1). Таким образом, кроме различного навесного оборудования, поочередно размещаемого в первичном фокусе (ПФ), на БТА в постоянной готовности предполагалось держать два спектрографа, что в принципе позволяло быстро переходить от одного метода наблюдений к другому. Проектирование и изготовление ОЗСП выполнено на Ленинградском оптико-механическом объединении (ЛОМО) с участием Государственного оптического института (ГОИ). Разработанный еще в духе боуэновской концепции спектрографа с большим набором сменных камер [8], ОЗСП пережил другие промышленные спектрографы и является единственным спектральным прибором, период постоянной эксплуатации которого пока что равен времени эксплуатации БТА. Расходы на эксплуатацию ОЗСП оказались минимально допу-

\*E-mail: panchuk@sao.ru

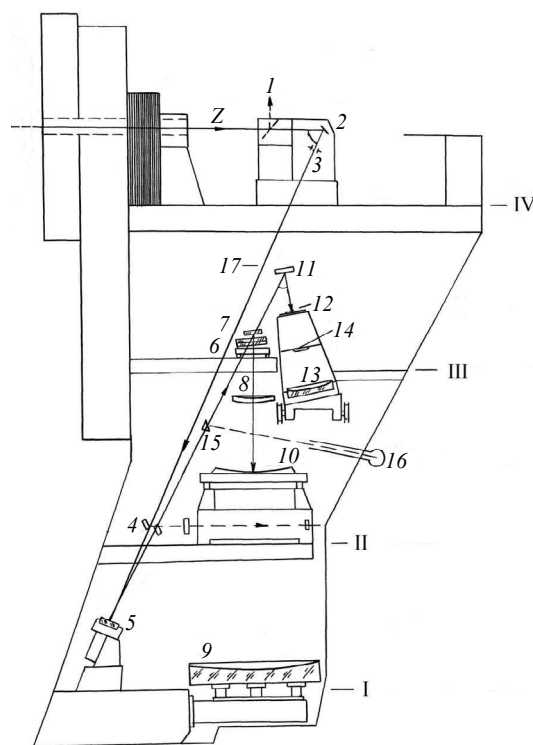
стимыми, что за 38 лет наблюдений вполне компенсировало относительно высокую начальную стоимость оптико-механической части прибора. В период становления и развития на БТА методов эшелле-спектроскопии неоднократно высказывалось мнение, что «время ОЗСП проходит». Ниже покажем, что последовательное развитие возможностей ОЗСП сохранило спрос на использование прибора и даже оставляет некоторые перспективы.

## 2. СОЗДАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РАЗВИТИЕ ОЗСП (1970–1989 ГОДЫ)

Основной звездный спектрограф БТА планировалось использовать только для фотографической регистрации спектров ярких звезд. Внеосевой параболический коллиматор ( $F = 7929$  мм, световой диаметр 310 мм) при относительном отверстии 1:30.74 формирует коллимированный пучок диаметром 258 мм (рис. 1).

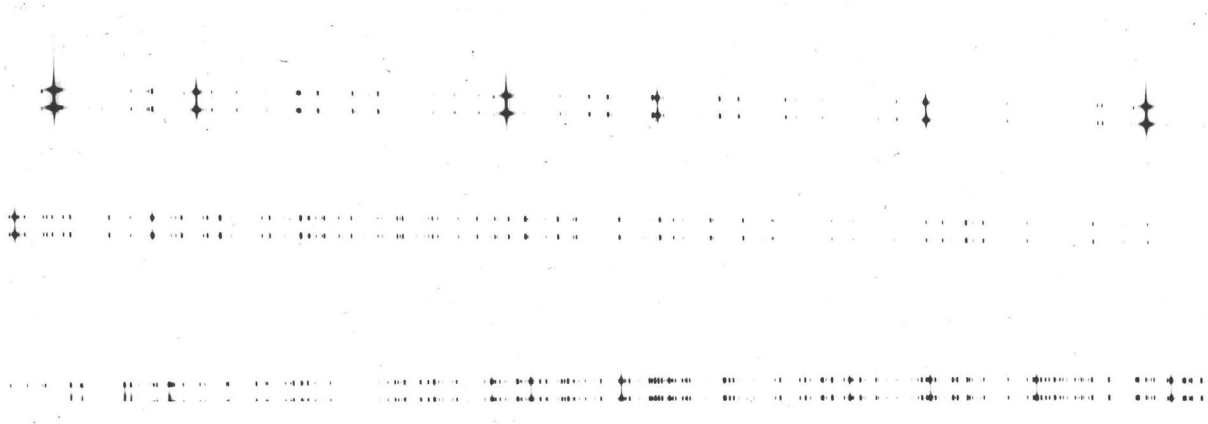
Объектив длиннофокусной камеры [9] состоит из сферического зеркала (световой диаметр 2095 мм,  $F = 3013$  мм) и мениска (световой диаметр 620 мм). Входной зрачок камеры совмещен с диспергирующим узлом, состоящим из дифракционной решетки (угол блеска  $29^\circ 5'$ , плотность нарезки 600 штр./мм) и призмы скрещенной дисперсии (легкий крон К8,  $14^\circ$ ), работающей в двойном прохождении. На четырех фотопластинках общей длиной 1200 мм (поле камеры  $1000 \times 44$  мм) предполагалось одновременно регистрировать диапазоны  $3200\text{--}3900 \text{ \AA}$  (средняя обратная линейная дисперсия  $P = 1.0 \text{ \AA/мм}$ ),  $3600\text{--}4900 \text{ \AA}$  ( $P = 1.3 \text{ \AA/мм}$ ),  $4800\text{--}6700 \text{ \AA}$  ( $P = 1.7 \text{ \AA/мм}$ ) в пятом, четвертом и третьем порядках дифракции соответственно. Примеры спектрограмм приведены на рис. 2 и 3. На рис. 4 для одного из порядков приведена зависимость обратной линейной дисперсии  $P$  от длины волны (дисперсионная кривая).

Схема скрещенной дисперсии не позволяла регистрировать различные диапазоны на эмульсиях соответствующего сорта. Избыточное разведение спектральных порядков (рис. 2) определяет ширину кассетной части. Размещенная в пучке, идущем от решетки к двухметровому зеркалу объектива, кассетная часть экранировала 25% дифрагированного света. При широкощельности 2.6 нормальная ширина входной щели составляла всего  $0''08$ . При среднем качестве изображений на БТА  $1''5$  (см. [10]) наблюдения с нормальной щелью были эквивалентны наблюдениям на метровом рефлекторе при полном использовании собранного телескопом света. На длиннофокусной камере на БТА удавалось получать спектрограммы звезд не слабее  $4^m$ . Верхний предел экспозиции (не более

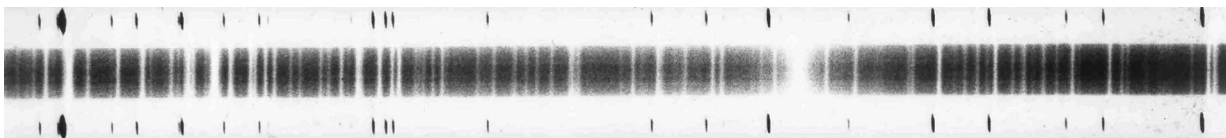


**Рис. 1.** Схема расположения основных оптико-механических узлов ОЗСП (разрез в вертикальной плоскости, проходящей через ось зенитного расстояния  $Z$ ). Обозначения: 1 — канал подзора, 2 — поворотное зеркало, 3 — щель, 4 — зеркала канала фотоэкспонетра, 5 — зеркало коллиматора, 6 — порядкоразводящая призма длиннофокусной камеры, 7 — дифракционная решетка длиннофокусной камеры, 8 — мениск, 9 — зеркало длиннофокусной камеры, 10 — кассетная часть длиннофокусной камеры, 11 — дифракционная решетка светосильных камер, 12 — коррекционная пластина камеры Шмидта, 13 — зеркало камеры Шмидта, 14 — полеспрямляющая линза, 15 — зеркало канала калибровки, 16 — источник спектра фотометрической калибровки, 17 — место ввода порядкоразводящей призмы, I–IV — уровни пола этажей,  $Z$  — ось зенитного расстояния БТА. Вспомогательная оптика предщелевой и щелевой части не показана.

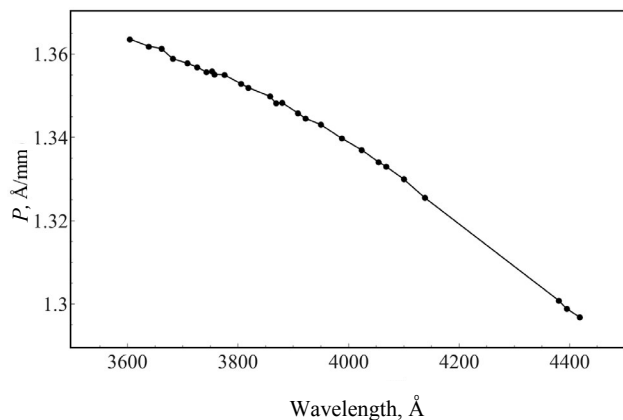
часа) определялся не свойствами фотоэмульсии, а позиционными нестабильностями данного варианта наблюдений [11]. С такими характеристиками проникающей способности, которые уже в то время можно было получать на специализированном телескопе метрового класса [12, 13], спектрограф не мог оказаться «основным звездным спектрографом БТА». К недостаткам длиннофокусной камеры следует отнести высокие потери света и низкую позиционную стабильность, а также формат спектрограмм, неудобный для измерений на однокоординатных приборах. Если призма скрещенной дисперсии расположена до дифракционной решетки, то спектральные линии наклонены к локальному



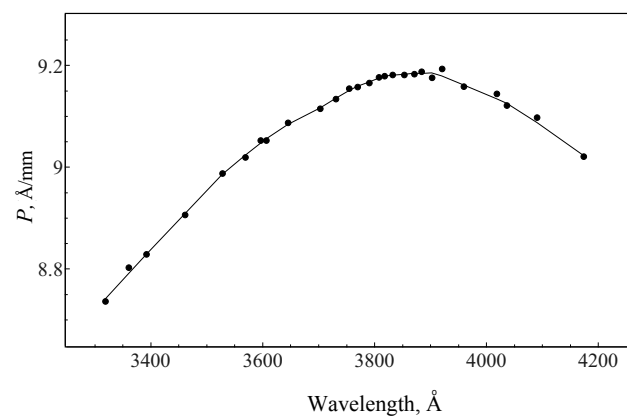
**Рис. 2.** Фрагмент спектрограммы опорного источника (Fe + Ne), полученной на камере  $F = 3013$  мм ОЗСП. Вверху 3-й, в середине 4-й, внизу 5-й порядки дифракции.



**Рис. 3.** Фрагмент (4070–4119 Å) одного из порядков спектрограммы Проциона, полученной на камере  $F = 3013$  мм.



**Рис. 4.** Дисперсионная кривая для 4-го порядка дифракции, камера  $F = 3013$  мм.



**Рис. 5.** Дисперсионная кривая для 3-го порядка дифракции, решетка  $17^\circ 30'$ , камера  $F = 604$  мм.

положению оси спектрограммы, причем этот наклон переменный с длиной волны. Поэтому в схемах скрещенной дисперсии призму предпочитают располагать (по ходу лучей) после дифракционной решетки. В схеме ОЗСП с длиннофокусной камерой призма работает как до, так и после решетки, что приводит к уширению линий и сохранению переменного наклона. Применение расширителя высоты спектра только для спектра звезды не устраняет трудностей позиционной калибровки. На рис. 3 видно, что наклон линий спектра сравнения отличается от наклона линий в расширенном спектре звезды.

В состав ОЗСП входит камера Шмидта ( $F = 604$  мм, диаметр сферического зеркала 700 мм, световой размер коррекционной пластины  $420 \times 210$  мм, световой размер полевой линзы  $153 \times 14$  мм). Конструкция диспергирующего узла длиннофокусной камеры позволяет выводить этот узел из коллимированного пучка, обеспечивая при этом заполнение дифракционной решетки (II на рис. 1) камеры Шмидта. Входной зрачок камеры совмещен с дифракционной решеткой (600 штр./мм, угол блеска  $17^\circ 5'$ ). На пластинках форматом  $150 \times 13$  мм регистрировались (поочередно) спектры в диапазонах  $3300\text{--}4200$  Å

( $P = 8.9 \text{ \AA/мм}$ ),  $3700\text{--}5100 \text{ \AA}$  и  $5600\text{--}6900 \text{ \AA}$  ( $P = 13.3 \text{ \AA/мм}$ ) в третьем и втором порядках соответственно. Немонотонность дисперсионных кривых (пример см. на рис. 5) связана с применением полевой линзы.

При работе с камерой  $F = 604 \text{ мм}$  нормальная ширина щели составляла  $0''45$ . Переход от одной камеры к другой осуществлялся в течение двух минут, т.к. наблюдатель находился непосредственно на платформе фокуса Несмита. Уже после ввода БТА в эксплуатацию две дифракционные решетки ОЗСП были дополнены решетками с углами блеска  $8^\circ5'$ ,  $12^\circ7'$  и  $25^\circ2'$ . Расширение набора углов блеска позволило регистрировать на камере  $F = 604 \text{ мм}$  спектры с максимальной эффективностью в любом диапазоне видимой и ближней ИК областей спектра. Плотность нарезки дополнительных решеток всюду составляет  $600 \text{ штр./мм}$ , размер заштрихованной области  $200 \times 300 \text{ мм}$ . Таким образом, сечение коллимированного пучка с диаметром центральной тени  $77 \text{ мм}$  использовалось менее чем на  $87\%$  при геометрической светосиле камер  $F:11.6$  и  $F:2.3$ . Камера  $F = 604 \text{ мм}$  оказалась основным рабочим инструментом, на котором в конце 70-х—начале 80-х были выполнены спектроскопические обзоры звезд до  $10^m$  в скоплениях и группах [14] и спектрополяриметрические наблюдения до  $8^m$  [15]. По количеству исследованных объектов эти обзоры в течение четверти века оставались непревзойденными. Пример спектра, полученного на камере  $F = 604 \text{ мм}$ , приведен на рис. 6.

Приемы подготовки и калибровки фотографического материала для ОЗСП изложены в работе [16]. Для позиционных обмеров спектрограмм использовался осциллоскопический компаратор [17], запись спектров в шкале интенсивностей осуществлялась на реконструированном микрофотометре (использован в [18]).

Во второй половине 70-х ОЗСП был дополнен светосильной камерой  $F:1.2$  ( $F = 300 \text{ мм}$ , диаметр асферического зеркала  $500 \text{ мм}$ , световой размер коррекционных пластин  $420 \times 210 \text{ мм}$ , световой размер полевой линзы  $62 \times 14 \text{ мм}$ ). Эксплуатация этой камеры оказалась нетривиальным делом: при выборе одного из пяти рабочих поддиапазонов длин волн требовалось установить одну из четырех сменных коррекционных пластин Шмидта, центрируя ее с высокой точностью, а также изменить угол наклона кассетодержателя, на котором укреплена полеспрямляющая линза. Основным эксплуатационным недостатком камеры  $F = 300 \text{ мм}$  являлась необходимость совмещения главных осей зеркала и сменных коррекционных пластин с точностью не хуже  $0.2 \text{ мм}$ , иначе качество спектра ухудшалось

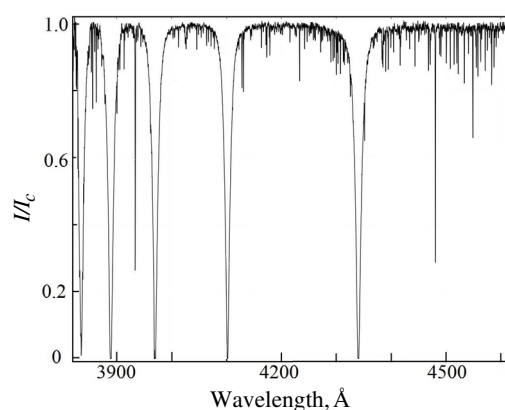


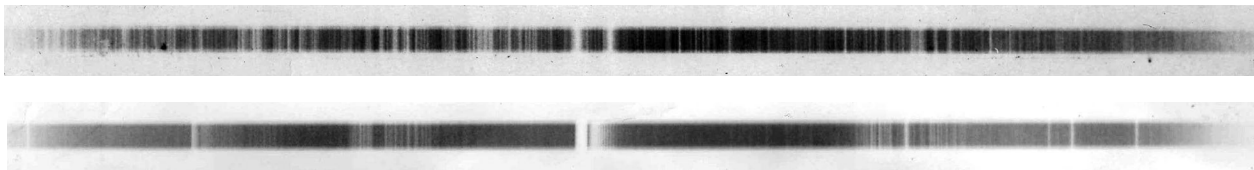
Рис. 6. Фрагмент записи фотографической спектрограммы, полученной на камере  $F = 604 \text{ мм}$  в 3-м порядке дифракции, решетка  $25^\circ 10'$ . Ордината — остаточные интенсивности, абсцисса — длина волны ( $\text{\AA}$ ).

вследствие ошибки коллимации, пропорциональной квадрату светосилы. Понятно, что в течение ночи можно было наблюдать только в одном из поддиапазонов. На рис. 7 приведены образцы изображений спектров, полученных на камере  $F = 300 \text{ мм}$ .

Несмотря на проблемы, возникающие при работе камеры  $F = 300 \text{ мм}$  с внутренним фокусом, обсерватория подготовила задание на разработку второй светосильной камеры  $F = 300 \text{ мм}$ , но уже с внешним фокусом. Камеру предполагалось использовать с одной пластиной Шмидта, но с набором сменных многолинзовых корректоров, устанавливаемых в сходящемся пучке непосредственно перед светоприемником. Изображение спектра предполагалось строить на фотокатоде ЭОПа диаметром  $40 \text{ мм}$ , это условие определило повышенную величину центрального экранирования. Учитывая опыт работы со светосильной камерой, имеющей внутренний фокус [19], удалось изменить техническое задание, и на ЛОМО в начале 90-х для ОЗСП была разработана и изготовлена камера пониженной светосилы ( $F:2.3$ ) также с полем диаметром  $40 \text{ мм}$ . С использованием этой камеры в 1997 г. был построен эшелле спектрограф НЭС с большим диаметром коллимированного пучка [20].

Ввод в эксплуатацию на БТА системы счета фотонов, адаптированной к другим спектрографам с умеренным разрешением, сделал фотографические наблюдения с камерой  $F = 300 \text{ мм}$  ОЗСП заведомо неконкурентоспособными.

Известно, что интерферометр Фабри—Перо (ИФП) превосходит дифракционный спектрограф по величине произведения спектрального разрешения на светосилу по потоку [21]. Рабочий порядок ИФП с высоким номером можно выделить при



**Рис. 7.** Изображения спектров, полученных на короткофокусной камере  $F = 300$  мм. Вверху: диапазон 3000–3850 Å, в центре линии Ni и K Ca II; внизу: диапазон 6500–8800 Å, в центре теллурическая полоса 7600 Å.

помощи дифракционного спектрографа. При одноканальной фотоэлектрической регистрации процесс перестройки интерферометра, размещенного на входе спектрографа, следует сопровождать согласованным перемещением выходной щели вдоль спектра. Этот метод, опробованный в [22], был применен на 2.5-метровом [23] и 5-метровом [24] телескопах. В этих экспериментах перестройка ИФП осуществлялась путем изменения давления воздуха. На 2.6-метровом телескопе КрАО для измерения круговой поляризации спектрограф фокуса куда был оснащен электрооптическим модулятором [25]. Затем в работе [26] был предложен метод измерения продольной составляющей магнитного поля, сочетающий интерферометрическое сканирование спектра с электрооптической модуляцией. На базе длиннофокусной камеры  $F = 3013$  мм был построен фотоэлектрический магнитометр с интерферометром Фабри–Перо [27], позволяющий работать с полностью раскрытой входной щелью (до 5"). Для точной дозировки давления в камере ИФП использовался вспомогательный интерферометр, контролируемый лазером [28]. Поиски магнитных полей у ярких звезд осуществлялись с точностью до 10–15 Гс [29].

В начале 80-х возможности фотографических наблюдений на длиннофокусной камере были расширены [30], в частности, за счет отказа от схемы скрещенной дисперсии, с целью использования всего комплекта дифракционных решеток, изготовленных для светосильных камер  $F = 604$  мм и  $F = 300$  мм. Переход к однопорядковым вариантам наблюдений открыл возможность использования (в некоторых вариантах) наборов фотопластинок разного сорта, укладываемых в соответствующие секции кассетной части. Предпринимались попытки повышения эффективности ОЗСП и за счет применения резателя (рассекателя) изображения оригинальной конструкции [31]. Всего было изготовлено четыре резателя изображений, по два для работы с камерами  $F = 3013$  мм и  $F = 604$  мм в синем и красном диапазонах на каждой камере. При сохранении спектрального разрешения резатели обеспечивали выигрыш по свету (относительно классической щели) в 3.5–4.5 раза [32]. Эффективность использования ОЗСП с резателями изоб-

ражений зависела от уровня работ по оцифровке фотопластинок, где, к сожалению, обсерватория так и не вышла на устойчивые технологии. Это же обстоятельство повлияло на использование варианта регистрации спектра на камере  $F = 3013$  мм по штатной схеме, т.е. сразу в четырех порядках, когда сканирование фотопластинки вдоль каждого порядка должно было осуществляться по криволинейной траектории с учетом переменного наклона щели. Криволинейность спектра звезды, серьезно усложняющая позиционную обработку, была заложена и в схемы наблюдений со светосильными камерами, т.к. в средней части фотопластинки, вблизи ее оси, предполагалось размещать полосы непрерывного спектра калибровки, зарегистрированного через ступенчатый ослабитель. При таком использовании формата пластинки спектр звезды и линейчатые спектры сравнения оказывались внеосевыми и, следовательно, криволинейными, причем каждая полоска спектра имела разную кривизну. Этот недостаток был дополнен еще одной ошибкой проектирования ОЗСП: канал спектрофотометрической калибровки (16 и 15 на рис. 1) был встроен в центральную часть коллимированного пучка, т.е. в тень, формируемую кабиной первичного фокуса БТА. Поэтому в светосильных камерах с центральным экранированием (обеспечиваемым кассетной частью) происходило искажение соотношения интенсивностей, задаваемого ступенчатым ослабителем. Кроме того, линзовая оптика канала была неахроматичной, т.е. для каждого поддиапозона и каждой экспозиции требовалась специальная настройка канала калибровки (выбор нейтральных и цветных фильтров, подфокусировка). По совокупности перечисленных недостатков канал спектрофотометрической калибровки на ОЗСП не использовался, калибровка осуществлялась на лабораторных спектрографах.

О точности измерения фотометрических характеристик линий по фотографическим спектрограммам можно судить по следующим работам: каталог эквивалентных ширин линий металлов [33], атлас спектра [34], каталог профилей водородных линий [35] и каталог эквивалентных ширин линий гелия [36].

История и результаты исследований точности измерения доплеровских смещений по фотографи-



ческим спектрам, получаемым на ОЗСП, изложены в [11, 37], здесь только напомним основные выводы. Точность измерения положений линий на длиннофокусной камере  $F = 3013$  мм ограничивается конструктивными особенностями механической схемы ОЗСП, и при длительных экспозициях спектральное разрешение снижается. По этой причине использование менискового корректора на длиннофокусной камере и цилиндрической линзы, установленной после щели, представлялось избыточным [30]. Точность измерения положений линий на светосильной камере  $F = 604$  мм определяется преимущественно точностью однозначного удержания изображения звезды на щели спектрографа, причем не только в течение экспозиции, но и от экспозиции к экспозиции. Значительное количество фотографических спектров было получено с анализатором круговой поляризации с целью измерения относительных смещений магниточувствительных линий, поэтому в соответствующих программах наблюдений вопрос системы лучевых скоростей ОЗСП не являлся центральным. Если же изучается микропеременность интенсивностей и положений узких линий, как, например, в работах [38, 39], то на первый план выходит влияние низкочастотных колебаний центра изображений звезды на щели, проявляющееся преимущественно на коротких экспозициях. Поэтому в задаче повышения точности измерения лучевых скоростей решающим шагом явилось оснащение спектрографов фокуса Несмит-2 локальным корректором положения изображения звезды [40], компенсирующим низкочастотные колебания.

Проницающая способность ОЗСП в фотографическом варианте была теоретически оценена еще в [41]; первые наблюдения показали, что оценки завышены приблизительно на  $1^m$ . Позже в результате ввода в строй локального корректора в фокусе Несмита (ЛКН) относительная проницающая способность спектрографов увеличилась почти на  $1^m$  [40]. Таким образом, было подтверждено наше предположение, что расхождение теории и практики объясняется в основном колебаниями центра изображения звезды, не ожидаемыми при теоретических оценках 1970 г., т.е. до ввода БТА в эксплуатацию.

Фотографический период эксплуатации ОЗСП БТА позволил выявить принципиальные ограничения в различных наблюдательных программах: нестабильность оптико-механической конструкции на временах порядка часа и нестабильность освещенности входной щели на временах «секунды–минута». Ряд усовершенствований позволил увеличить потенциальную проницающую способность ОЗСП более чем на  $1^m$ , однако это не касалось вариантов спектрополяриметрических наблюдений.

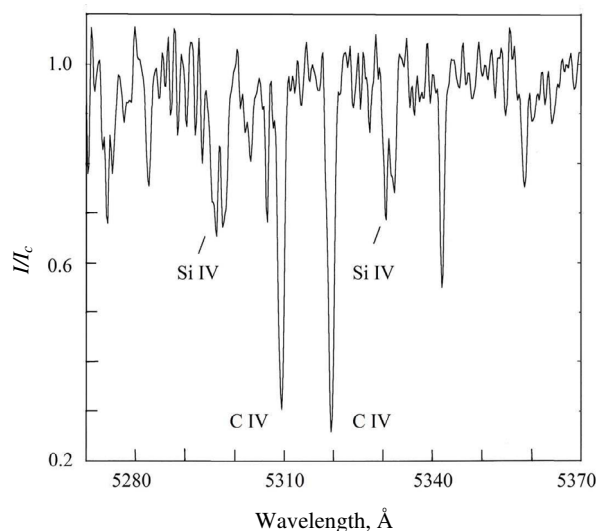


Рис. 8. Фрагмент спектра квазара S 50014+81 ( $V = 16^m 5$ ). Абсорбционные дублеты C IV  $\lambda_0 = 1548$  и  $1550 \text{ \AA}$  с  $z_{\text{abs}} = 2.429$  и Si IV  $\lambda_0 = 1393$  и  $1402 \text{ \AA}$  с  $z_{\text{abs}} = 2.800\text{--}2.801$ , линии последнего имеют многокомпонентный профиль [47].

### 3. ЭТАПЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ОЗСП В 1990–2010 ГОДАХ

После успешного применения двумерных систем счета фотонов [42] и матриц ПЗС [43] в первом поколении эшелле-спектрографов БТА [44, 45] была начата адаптация камер ОЗСП для использования новых светоприемников [46]. Предварительно были выполнены работы по дополнительной светоизоляции трех этажей объема ОЗСП. В 1990 г. на длиннофокусной камере  $F = 3013$  мм ОЗСП использовалась матрица ПЗС с механизмом поверхностного переноса заряда, а в 1991 г. на реконструированной камере  $F = 604$  мм при помощи двумерного счетчика фотонов (КН-11) были зарегистрированы избранные фрагменты спектров ярких квазаров. Испытания на ОЗСП матрицы ПЗС ( $520 \times 580$  элементов, размер пиксела  $24 \text{ мкм}$ ) с объемным каналом переноса заряда и виртуальной фазой были начаты в 1992 г., а затем, в 1993 г., начались регулярные наблюдения. Результаты наблюдений 1994 г. [47] перевели ОЗСП в категорию спектрографов, пригодных и для изучения слабых точечных объектов. На рис. 8 приведен фрагмент фотометрического разреза спектра квазара, зарегистрированного на ОЗСП с матрицей ПЗС.

Период реконструкции ОЗСП в 1990–1994 гг. оказался наиболее сложным, т.к., согласно расписанию работы БТА, камеру  $F = 604$  мм, адаптированную к применению счетчика фотонов или матрицы ПЗС, неоднократно приходилось возвращать в состояние, необходимое для получения фо-

тографических спектров. Регулярное использование камеры  $F = 604$  мм с матрицами ПЗС было начато только в 1995 г. ( $520 \times 580$  элементов, размер пиксела 24 мкм) и продолжено в январе 1996 г. ( $1040 \times 1160$  элементов, размер пиксела 16 мкм), в октябре 2002 г. ( $2048 \times 2048$  элементов, размер пиксела 13.5 мкм) и в апреле 2010 г. ( $4600 \times 2048$  элементов, размер пиксела 13.5 мкм). Серия этих фотоприемных систем разработана в Лаборатории перспективных разработок САО (историю см. в [48]).

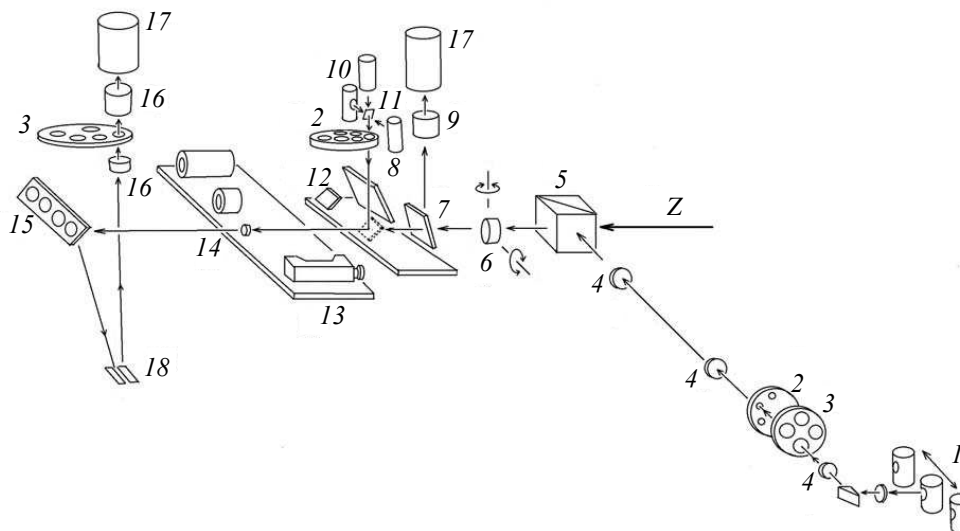
Дифракционные решетки с заштрихованной областью  $200 \times 300$  мм, изготовленные в ГОИ в первой половине 70-х, не перехватывали весь коллимированный пучок диаметром 258 мм. При работе в третьем и четвертом порядках дифракции решетки были перезаполнены и вдоль длинной стороны заштрихованной области. Учитывая возросшие технологические возможности лаборатории дифракционных решеток ГОИ, в конце 80-х была выполнена программа дооснащения БТА крупногабаритными дифракционными решетками. В частности, в ГОИ для ОЗСП БТА был изготовлен комплект дифракционных решеток с размерами заштрихованной области  $320 \times 360$  мм, с которых затем были сняты реплики. Для снижения веса сменных дифракционных решеток в боковых гранях ситалловых заготовок (толщина граней 60 мм) были предварительно сделаны сквозные цилиндрические каналы диаметром 35 мм, по шесть каналов в каждой грани. Переход на новые дифракционные решетки означал для нас разработку и изготовление новых оправ, а также полную реконструкцию узла крепления сменных дифракционных решеток, общего для светосильных камер. Смена дифракционных решеток выполняется в дневное время при подготовке спектрографа к наблюдениям по определенной программе.

Параллельно с реконструкцией диспергирующего узла были переоборудованы светосильные камеры, первоначальная оптико-механическая конструкция которых не предусматривала полное использование коллимированного пучка. Вместо классической схемы «ломаный Шмидт» (наклонное плоское зеркало с центральным отверстием, устанавливаемое между коррекционной пластиной и сферическим зеркалом) мы используем плоское зеркало в сходящемся пучке (требования к качеству такого зеркала повышены). Такое решение сохраняет положение массивных элементов камеры в схеме ОЗСП и позволяет провести последовательную смену светоприемников (сначала использовался счетчик фотонов, затем матрицы ПЗС с увеличивающимся числом элементов), изменяя только размеры плоского зеркала, устанавливаемого в сходящемся пучке. Начиная с формата ПЗС  $2048 \times 2048$  элементов в

камере  $F = 604$  мм требуется применение полеспрямляющей линзы (Пиаци-Смита). Если при первой реконструкции камера  $F = 604$  мм была оснащена ломающим зеркалом, виньетирующим только 8% центрального пучка (при расчете учтено центральное экранирование главного зеркала кабиной первичного фокуса), то при работе с матрицей ПЗС  $2048 \times 4710$  элементов величина центрального экранирования возросла до 14%. Величина центрального экранирования в камере  $F = 300$  мм составляет 20%, что значительно ниже, чем в классическом решении «ломаный Шмидт» для данного относительного отверстия ( $F: 1.16$ ). Такие характеристики достигнуты благодаря минимальному выносу фокальной поверхности из сечения пучков, прошедших через коррекционную пластину. В обеих камерах используются асферические корректоры из плавленого кварца, это делает ОЗСП ценным инструментом для работы в наземном УФ-диапазоне (об особенностях спектроскопии в УФ см. в [49]). Для обеспечения высокого качества спектров предусмотрена работа камеры  $F = 604$  мм при двух значениях расстояния шмидтовского корректора от сферического зеркала (для диапазонов  $\lambda < 5500 \text{ \AA}$  и  $\lambda > 5500 \text{ \AA}$ ). Увеличение размеров и качества дифракционных решеток и реконструкция камеры  $F = 604$  мм привели к выигрышу по потоку в полтора раза. Отметим, что оптические расчеты камер были выполнены для решеток  $200 \times 300$  мм, но камеры удалось отъюстировать так, что использование всей площади коллимированного пучка (с решетками  $320 \times 360$  мм) не ухудшает качество спектров.

При первой реконструкции ОЗСП [30] была полностью удалена прежняя предщелевая часть, новая предщелевая часть [50] обслуживает, кроме ОЗСП, два эшелле-спектрографа: НЭС [20] и РЫСЬ [51, 52]. Схема общей предщелевой части приведена на рис. 9.

В состав предщелевой части входит кварцевая плоскопараллельная пластина, управляемые наклонники которой позволяют смещать центр изображения звезды на  $\pm 3''$  относительно центра щели. Кроме подсмотра щели для измерения координат центра изображения звезды может использоваться подсмотр поля, изображение на который подается от тонкой прозрачной плоскопараллельной пластины, вводимой в пучок вместо зеркала подсмотра поля. Для понижения влияния атмосферной дисперсии на работу локального корректора положения звезды [40] в канале подсмотра щели (деккера) установлена турель, содержащая светофильтры ПС-11, СЗС-21, ЖС-16, ОС-14 и КС-15. Вводом одного из этих фильтров осуществляется центровка (на щель или деккер) изображения звезды в



**Рис. 9.** Схема предщелевой части. Обозначения: 1 — сменные источники света искусственной звезды, 2 — турель диафрагм, 3 — турель светофильтров, 4 — оптика искусственной звезды, 5 — полупрозрачный куб, 6 — плоскопараллельная пластина локального корректора, 7 — прозрачная пластина подсмотра поля, 8 — зеркало подсмотра поля, 9 — оптика подсмотра поля, 10 — лампы канала спектра сравнения, 11 — оптика канала спектра сравнения, 12 — плоское зеркало канала спектра сравнения, 13 — блок сменных предщелевых устройств, 14 — линза, изменяющая масштаб на щели (т.е. диаметр коллимированного пучка), 15 — узел плоского зеркала и светоделителей, 16 — оптика подсмотра щели, 17 — телевизионные подсмотры, 18 — щель ОЗСП,  $Z$  — ось « $Z$ » телескопа.

том диапазоне длин волн, в котором производится регистрация спектра. Вне предщелевой части установлен блок искусственной звезды, оптический переборс которого выполнен в виде полупрозрачного куба. Если этот куб ввести в пучок света, собранного телескопом, то можно контролировать характер одновременного заполнения коллиматора излучением наблюдаемой звезды и искусственной звезды (калибровки). При помощи этого устройства были обнаружены ошибки юстировки оптики вторичного фокуса БТА.

В попытках снижения потерь на входе ОЗСП всего было разработано четыре типа резателей изображения. Это уже упоминавшийся резатель «щель с зеркальной крышей» [31], оптоволоконный резатель [53], двойной резатель Боуэна—Вальравена [53] и резатель, состоящий из пакета тонких призм [53]. В отличие от резателей, применяемых в эшелле-спектрографах [54, 55], на ОЗСП из-за однопорядкового (или двухпорядкового, см. ниже) формата спектра нет серьезных ограничений на число срезов. Резатель изображения устанавливается вместо щели (18 на рис. 9).

Число одновременно регистрируемых элементов спектра может быть увеличено вдвое путем применения составной порядкоразделительной призмы прямого хода (призмы Амичи). Разделитель второго и третьего порядков дифракционной

решетки с углом блеска  $24^\circ 7'$  представляет собой призму, составленную из трех призм: двух из легкого крона (К8), ограничивающих третью из флинта (ТФ7). Толщина составной призмы в центральной части равна 24 мм, призма размещена на расстоянии 2 м после щели (17 на рис. 1). Применение призмы Амичи в расходящемся пучке приводит к тому, что красный участок спектра (второй порядок) расфокусирован относительно синего (третий порядок) всего на 0.2 пиксела по ширине спектральной линии. С применением призмы Амичи общая длина регистрируемого участка спектра увеличивается до 1400 Å.

Дифракционная решетка с углом блеска  $24^\circ 7'$  может работать во втором, третьем и четвертом порядках. В качестве порядкоразделяющих фильтров могут быть использованы дихроичные светоделители, установленные в предщелевой части (5 на рис. 9). Предпочтительнее для выделения синего диапазона использовать фильтр СЗС-21 с просветленными поверхностями, для красного диапазона — фильтр ЖС-18.

Основные характеристики схемы ОЗСП в вариантах использования камер  $F = 604$  мм и  $F = 300$  мм даны в таблице 1. Заметим, что некоторые конструктивные параметры, приведенные в работе [7], не соответствуют реальным.



Таблица 1. Основные параметры схемы ОЗСП

Параметр	Значение			
Угол излома пучка на оси «Z»	65°			
Коллиматор				
Фокусное расстояние, мм	7928.7			
Световой диаметр, мм	310			
Угол наклона оси	3°			
Угол между осями коллиматора и камеры	45°			
Камеры				
Фокус, мм	604	300		
Диаметр зеркала, мм	700	500		
Диаметр корректора, мм	405	405		
Длина плоского зеркала, мм	120	160		
Дифракционные решетки				
Расстояние до корректора, мм	500			
Плотность штрихов, штр./мм	600			
Размер рабочей области, мм <sup>2</sup>	320 × 360			
Угол блеска	8°0	15°5	24°7	24°7
Рабочий порядок	I	II	II	III
Рекомендуемый диапазон, нм	430–650	310–560	560–900	400–490
Средняя обратная линейная дисперсия, Å/мм				
с камерой $F = 604$ мм	26.1	13.2	13.2	8.8
с камерой $F = 300$ мм	52.2	26.4	26.4	17.5

#### 4. ОЗСП В КАЧЕСТВЕ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА

Относительно низкая позиционная стабильность спектров, получаемых на ОЗСП, повлияла на выработку определенного круга наблюдательных программ, малочувствительных к этому недостатку. Еще в фотографическую эпоху такими программами стали измерение круговой поляризации в линиях, чувствительных к продольному магнитному полю в атмосфере звезды, а также все программы, где измерялись не положения линий, а их эквивалентные ширины. В 90-х программы измерения эквивалентных ширин и профилей линий были перенесены на эшельные

спектрографы [20, 51, 56], программы относительных измерений зеемановских сдвигов линий были оставлены на ОЗСП (подробнее см. [57]). В последние годы использование ОЗСП в варианте наблюдений с камерой  $F = 604$  мм заявляется в программный комитет (КТБТ) исключительно для измерений магнитных полей звезд разных типов. Это позволяет развивать и поддерживать в первую очередь те возможности прибора, которые критичны для спектрополяриметрии. ОЗСП может использоваться с одним из трех анализаторов поляризации.

I. Анализатор [58] представляет собой два ромба Френеля, между которыми вклеен блок кристалла

исландского шпата (рис. 10). Анализатор располагается до штатной щели спектрографа и может дистанционно вводиться в пучок света от звезды. Величина разведения пучков с разным знаком круговой поляризации соответствует  $6''.5$ . При изображениях хуже  $4''$ , сопровождаемых колебаниями изображения звезды на щели, изображения двух полосок спектра перекрываются. Подчеркнем, что локальный корректор способен компенсировать колебания как единичного, так и раздвоенного изображения звезды. Анализатор используется с конца 70-х, может применяться с призмой Амичи, но отличается низким пропусканием в коротковолновой области спектра (см. рис. 2 в [55] и рис. 11).

II. Анализатор с лучеразводящей пластиной Савара (двойной блок из исландского шпата) и суперахроматической фазовой пластиной [59]. Фазовая пластина расположена до деккера спектрографа, который устанавливается вместо штатной щели. Фазовая пластина сменная, может быть четвертьволновой для измерений зеемановского сдвига или полуволновой для измерений степени линейной поляризации в спектральных линиях. Главную ось фазовой пластины можно дистанционно поворачивать на  $90^\circ$  или  $45^\circ$ . Пластина Савара расположена после деккера, который ограничивает высоту спектра пятью угловыми секундами. В отличие от анализатора на ромбах Френеля зеемановские компоненты спектра в фокальной поверхности спектрографа не перекрываются, если угловые размеры изображения звезды становятся больше, чем  $5''$ . Анализатор используется с мая 2000 г., его параметры разведения компонент спектра согласованы с параметрами призмного разделителя двух порядков. На рис. 12 приведен фрагмент спектра звезды HD 116656, полученный с анализатором с пластиной Савара в режиме накопления и циклического переноса электронного изображения на ПЗС  $2048 \times 2048$  [60]. Синхронно с электронным сдвигом спектра поперек дисперсии четвертьволновая фазовая пластина устанавливалась в положения  $0^\circ$  и  $90^\circ$ .

III. Анализатор с дихроичным поляризующим светоделителем и двойным резателем изображения [61] (рис. 13). В этом анализаторе фазовая пластинка расположена до диафрагмы, имеющей размер  $5''$ . После диафрагмы установлены дихроичная поляризующая лучеразводящая призма и двойной резатель изображений, формирующий по семь срезов на каждую поляризацию. После резателя свет поступает на щель, в результате в фокальной поверхности камеры формируется 14 изображений спектра звезды. Анализатор используется с мая 2002 г., большое число срезов исключает его сочетание с призмным разделителем порядков.

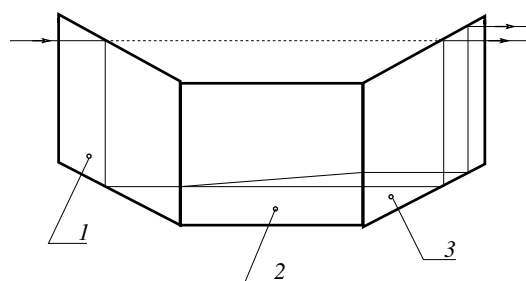


Рис. 10. Анализатор круговой поляризации на ромбах Френеля [58]. Обозначения: 1, 3 — ромбы Френеля, 2 — исландский шпат.

### 5. ОЦЕНКИ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЗСП

С целью оценки относительной эффективности вариантов для каждой решетки и набора углов падения были измерены потоки в центре поля камеры  $F = 604$  мм. Источником спектра служила лампа накаливания (1 на рис. 9), оснащенная выравнивающим светофильтром. В таблице 2 приведены результаты измерений относительного пропускания дифракционных решеток с камерой  $F = 604$  мм.

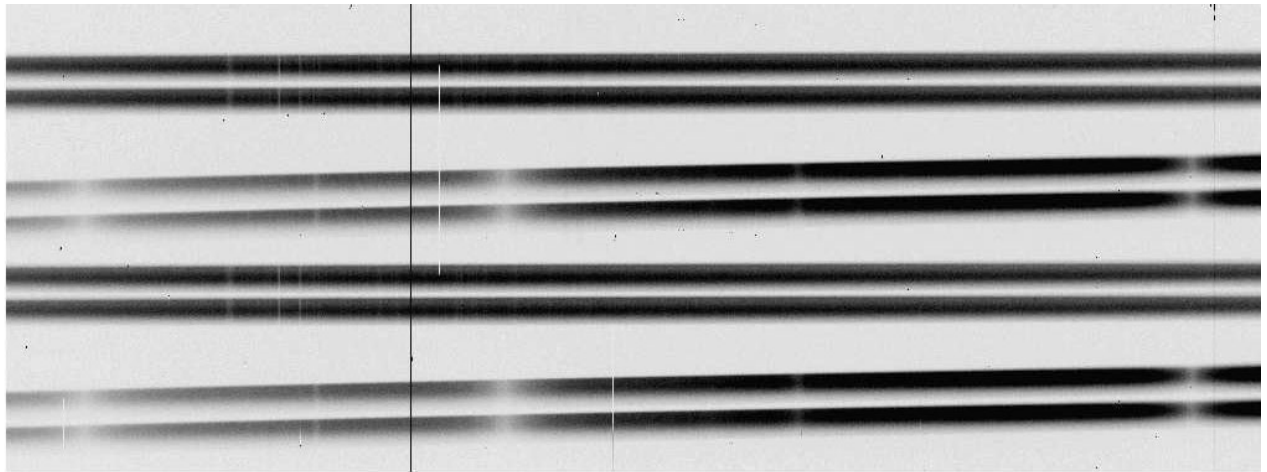
При получении данных, приведенных в табли-

Таблица 2. Сравнение относительного пропускания дифракционных решеток ОЗСП (углы блеска  $8^\circ 0$ ,  $15^\circ 5$ ,  $24^\circ 7$ , рабочие порядки I и II) в избранных вариантах наблюдений с камерой  $F = 604$  мм

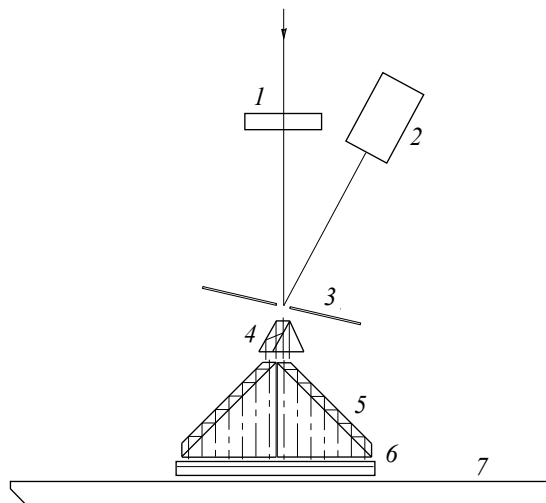
Длина волны, Å	Относительное пропускание			Длина волны, Å	Относительное пропускание		
	$8^\circ 0$ I	$15^\circ 5$ II	$24^\circ 7$ II		$8^\circ 0$ I	$15^\circ 5$ II	$24^\circ 7$ II
3600	0.60			6000	0.84	0.58	0.71
3800	0.67			6200	0.83	0.54	0.76
4000	0.73	0.81		6400	0.81	0.51	0.80
4200	0.78	0.80		6600	0.79	0.47	0.82
4400	0.82	0.79		6800	0.77	0.44	0.82
4600	0.84	0.77		7000	0.75		0.81
4800	0.85	0.75	0.23	7200	0.74		0.80
5000	0.86	0.72	0.32	7400	0.72		0.79
5200	0.87	0.69	0.40	7600	0.70		0.78
5400	0.87	0.67	0.49	7800	0.68		
5600	0.86	0.64	0.58	8000	0.65		
5800	0.85	0.61	0.65				



**Рис. 11.** Изображение спектра звезды HD 3369, полученное на ОЗСП с анализатором [58] и призмой Амичи в качестве разделителя порядков. Коротковолновый участок спектра вверху.



**Рис. 12.** Спектрограмма HD 116656, полученная с анализатором на пластине Савара [59] и разделителем порядков.



**Рис. 13.** Схема анализатора с двойным резателем изображений [61]. Обозначения: 1 — фазовая пластинка  $\lambda/4$ , 2 — телевизионный подсмотр, 3 — диафрагма, 4 — дихроический поляризатор, 5 — двойной резатель, 6 — щель ОЗСП, 7 — платформа.

це 2, исключено влияние спектральной чувствительности светоприемника и распределения энергии в спектре источника калибровки, и данные таблицы 2 можно рассматривать как информацию

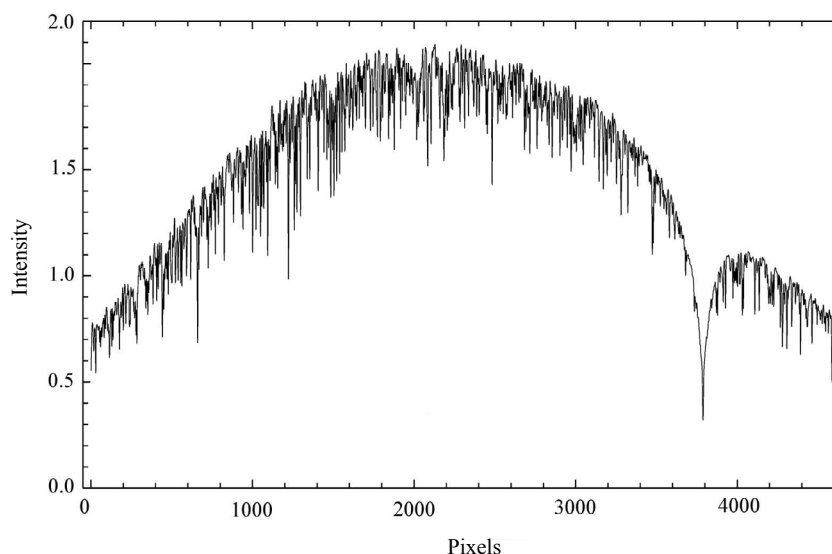
о концентрации энергии в избранных спектральных порядках с учетом геометрии использования решетки. В таблице 3 приведена оценка пропускания ( $q$ ) системы «телескоп—спектрограф» без учета потерь на щели [46], но с учетом работ по увеличению отражающей способности второго и третьего зеркал схемы Несмита. Для главного зеркала телескопа использованы данные измерений, выполненных в начале 2001 г. Учитывалось, что концентрация света в рабочем порядке дифракционной решетки дана в долях отраженного света.

В работе [7] приведена величина светопропускания для спектрографа ( $q \approx 0.6$ ) с камерами  $F = 604$  мм и  $F = 300$  мм, вычисленная без учета потерь на дифракционной решетке и потерь на зеркалах БТА. Теоретическая оценка пропускания  $q \approx 0.2$ , приведенная в [11], ближе к нашей оценке.

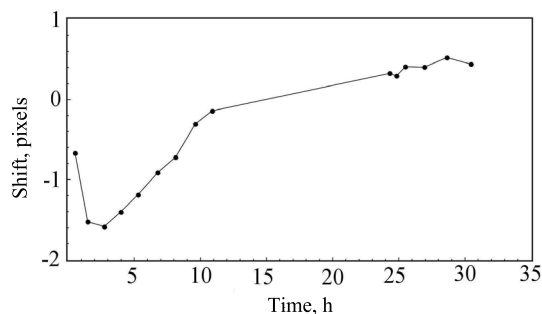
Полная эффективность системы «телескоп—спектрограф—светоприемник» оценивалась по наблюдениям звезды  $\gamma$  Equ ( $V = 4^m 7$ ,  $Sp = F0$ ). На рис. 14 приведен участок спектра (с центром приблизительно на  $4600 \text{ \AA}$ ), полученный в ночь 23/24 октября 2012 г. с анализатором круговой поляризации и резателем изображения. Спектральное разрешение  $0.28 \text{ \AA}$  ( $R = 16430$ ), время экспозиции составило 300 с.

Из выражения

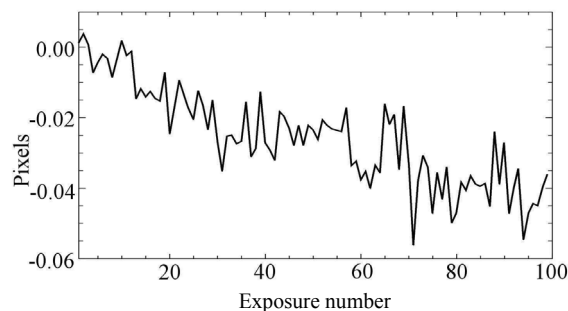
$$10^3 \times (2.2 \times 10^5) \times 300 \times 0.01 \times E = (2.04 \times 10^6) / 0.12,$$



**Рис. 14.** Фрагмент спектра  $\gamma$  Eri. Абсцисса — номер пиксела, ордината — отсчеты интенсивности  $I \times 10^6$ . Падение интенсивности на краях фрагмента обусловлено в основном виньетированием на оптике камеры.



**Рис. 15.** Нестабильность положения спектра, измененная вдоль дисперсии [62]. Абсцисса — время в часах, ордината — смещение спектра в долях пиксела.



**Рис. 16.** Разность смещений спектров на первом и четырнадцатом срезах (ордината, в долях пиксела), зарегистрированных через анализатор поляризации, в зависимости от номера экспозиции (абсцисса).

где последовательно слева до знака равенства: поток звезды нулевой величины, площадь зеркала в  $\text{см}^2$ , время экспозиции, коэффициент, соответствующий звездной величине  $4^m$ , полная эффективность; справа: число зарегистрированных носителей на столбце ПЗС-приемника и обратная линейная дисперсия; — получаем полную эффективность:  $E = 2.6\%$ .

При пересчете на варианты работы с камерой  $F = 300$  мм следует учесть изменение масштаба (вдвое) вдоль и поперек дисперсии (фактор 4) и увеличение ширины нормальной щели (вдвое). Таким образом, для грубой оценки, пренебрегая различием в центральном экранировании на ломающих зеркалах, соответствующие значения потока для камеры  $F = 604$  мм следует умножить на 8. Без учета потерь на щели выигрыш по потоку камеры  $F = 300$  мм относительно камеры  $F = 604$  мм составит только 4 раза.

## 6. НЕСТАБИЛЬНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ОЗСП

Нестабильность оптико-механической конструкции ОЗСП являлась предметом исследований [11] с момента ввода БТА в эксплуатацию. Обобщение результатов исследований и мер по снижению (или учету) нестабильностей можно найти в [37]. В работе [62] приведены результаты новых измерений, выполненных после замены светоприемника на камере  $F = 604$  мм. На рис. 15 приведены величины смещений спектра на интервале около полутора суток. Такие смещения можно учитывать, используя спектр калибровки.

В задачах дифференциальной спектрополяриметрии более существенными являются относительные сдвиги спектров, зарегистрированных через анализатор. На рис. 16 приведена разность смещений таких спектров в зависимости от номера экспозиции (продолжительность экспозиции и

**Таблица 3.** К оценке пропускания ( $q$ ) ОЗСП [46]

Оптический элемент	$q$
Оптика БТА	
Главное зеркало	0.70
Гипербола	0.90
Диагональное зеркало	0.90
Предшелевая часть	
Пластина корректора	0.90
Зеркало (светоделитель)	0.80 (0.95)
Оптика спектрографа	
Коллиматор	0.80
Дифракционная решетка	$0.80 \times 0.65$
Камера $F = 604$ мм	
Корректор Шмидта	0.90
Сферическое зеркало	0.80
Ломающее зеркало	0.80
Центральное экранирование	0.86
Полеспрямляющая линза	0.90
Защитное стекло криостата	0.90
Итого	0.068

считывания составляла 1 и 0.3 мин соответственно). Такие смещения свидетельствуют о том, что конструкция ОЗСП вместе со светоприемником испытывают деформации не только в плоскости рис. 1, т.е. в главной плоскости спектрографа.

## 7. СТАТИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОЗСП

Долю времени, выделенного для использования ОЗСП относительно всех спектроскопических работ за первые 20 лет работы БТА, можно найти в [63]. Рассмотрим статистику использования ОЗСП с различными светоприемниками. В таблице 4 приведено число календарных ночей, распределенных программным комитетом для наблюдений на ОЗСП. Работа спектрографа в технические и резервные ночи, а также в программах, дублирующих основные, в таблице 4 не учтена.

Итого на фотографическую регистрацию выделено 1013 ночей, на фотоэлектрический магнитометр — 156, на двумерный счетчик фотонов — 15,

для наблюдений с координатно-чувствительным детектором (камера  $F = 300$  мм) — 10, для наблюдений с матрицами ПЗС различного формата — 608 ночей. Всего для наблюдений на ОЗСП выделено 1802 ночи, т.е. 13.3% календарного времени.

Из таблицы 2 работы [63] и таблицы 4 данной работы следует, что в отсутствие других спектрографов высокого разрешения (планетный спектрограф [5] в задачах спектроскопии звезд практически не использовался из-за его низкой широкоспектральности) ОЗСП использовался до двух–трех месяцев в году, при этом число запрашиваемых ночей в среднем вдвое превышало число выделенных. С вводом в эксплуатацию на БТА первых эшелле-спектрографов высокого разрешения в 1990 г. доля использования ОЗСП сократилась приблизительно вдвое, оставаясь достаточно высокой, чтобы оправдывать расходы на эксплуатацию и совершенствование спектрографа. Заметим, что стоимость ОЗСП определяется в основном стоимостью длиннофокусной камеры, но подавляющая доля наблюдений выполнена с камерой  $F = 604$  мм. В таблице 5 приведено число спектрограмм [64], полученных на ОЗСП после оснащения спектрографа матрицами ПЗС.

## 8. ВЫВОДЫ

К числу принципиально неустранимых недостатков ОЗСП отнесем нежесткость его вертикальной монтировки. Основные элементы спектрографа — щель, коллиматор, диспергирующие узлы, камеры — расположены на пилонах различной формы и длины, соединенных массивной конструкцией, несущей подшипник оси «Z» (рис. 1). Поэтому наблюдательные программы, требующие высокой позиционной точности спектров, предпочтительнее выполнять на эшелле-спектрографах НЭС и РЫСЬ, смонтированных горизонтально на балконе фокуса Несмит-2.

Как следует из таблицы 1 работы [63], массовый перевод методов спектроскопии внегалактических объектов на двумерные системы счета фотонов состоялся на БТА примерно в 1985 г. А для фотографических наблюдений на ОЗСП после 1985 г. было выделено еще почти 300 ночей. Причина объяснима: при верхней границе скорости счета фотонов не более 0.5 события на канал в секунду для накопления спектра с отношением сигнал/шум около 50 требовалось время экспозиции, значительно превышающее время, в течение которого электромагнитную систему фокусировки многокаскадного ЭОПа на подвижной платформе БТА можно было считать стабильной. Мировая практика показывает, что двумерные системы счета фотонов для спектроскопии высокого разрешения

**Таблица 4.** Число ночей, выделенное для наблюдений на ОЗСП. Обозначения: «фото» — регистрация на фотопластинки, «магн.» — магнитометр, «счет.» — двумерный счетчик фотонов, «ПЗС» — матрицы ПЗС, «КЧД» — координатно-чувствительный детектор

Год	Тип приемника					Всего	Год	Тип приемника					Всего
	фото	магн.	счет.	ПЗС	КЧД			фото	магн.	счет.	ПЗС	КЧД	
1977	54					54	1995				20		20
1978	65					65	1996				31		31
1979*	39					39	1997				50		50
1980	85	13				98	1998				38		38
1981	114					114	1999				30		30
1982	98	11				109	2000				24	5	29
1983	94	9				103	2001				28	5	33
1984	107	12				119	2002				25		25
1985	57	12				69	2003				37		37
1986	70	27				97	2004				33		33
1987	69	9				78	2005				31		31
1988	48	14				62	2006				28		28
1989	50	8				58	2007				26		26
1990	13	11		9		33	2008				23		23
1991	45	12	4			61	2009				21		21
1992	5	11				16	2010				29		29
1993		7	5	11		23	2011				26		41
1994			6	17		23	2012				30		30

\* Неполный год эксплуатации БТА (замена главного зеркала летом 1979 г.).

успешно применялись только в неподвижном фокусе куде (см., например, [65]). После прекращения поступлений в САО фотоэмульсий фирмы Kodak предпринимались попытки перехода на отечественные фотоэмульсии (упоминание об участии САО в таких работах можно найти в [66]). Предложения (в 1989 г.) о необходимости временной остановки фотографических наблюдений на ОЗСП с целью реконструкции спектрографа под новые светоприемники не были поддержаны. В итоге полный перевод ОЗСП на регулярное применение современных светоприемников запоздал лет на пять и состоялся уже после постройки первых эшелле-спектрографов высокого разрешения.

Две особенности ОЗСП — большой диаметр коллимированного пучка и встроенность спектрографа в несущую конструкцию БТА — обеспечили популярность прибора при минимуме эксплуата-

**Таблица 5.** Число спектров  $N$ , полученных на ОЗСП с матрицами ПЗС по различным наблюдательным программам

Год	$N$	Год	$N$	Год	$N$	Год	$N$
1994	39	1999	339	2004	640	2009	690
1995	189	2000	274	2005	455	2010	802
1996	302	2001	374	2006	103	2011	658
1997	300	2002	375	2007	714	2012	1042
1998	282	2003	1071	2008	917	2013	541

ционных расходов. За тридцать семь лет эксплуатации ОЗСП (общее выделенное время составило около пяти лет), удалось сохранить основные элементы спектрографа, поддерживая его характери-



стики и развивая прибор до современного уровня. Анализ расписаний наблюдений показывает (см. также [63]), что ОЗСП пока остается самым доступным спектральным прибором на БТА. ОЗСП использовался и в качестве резервного прибора при отказах другой стационарной или навесной аппаратуры БТА. В обзоре [67] упомянуты многие научные программы, выполненные с использованием ОЗСП. Представления о вкладе ОЗСП в программы современной спектродоляриметрии магнитных пекулярных звезд можно получить из работы [68]. Из перспективных программ, не связанных непосредственно с исследованием поверхностных магнитных полей, отметим задачу спектродоляриметрии холодных сверхгигантов (в т.ч. мирид) с высоким спектральным разрешением.

В целом, несмотря на ряд конструктивных просчетов, ОЗСП оказался самым долгоживущим спектральным прибором из числа разработанных для БТА отечественной промышленностью. Кроме изготовления дифракционных решеток, вся работа по реконструкции ОЗСП опиралась на профессиональные и технологические возможности САО. Подчеркнем, что программу реконструкции мы выполнили без выведения ОЗСП из графика плановых наблюдений, но соблюдение этого условия затянуло сроки перехода на новые светоприемники и дифракционные решетки увеличенных размеров.

В результате реконструкции ОЗСП число оптических поверхностей оказалось минимальным для спектрографа, стационарно установленного на БТА. Кроме очевидных резервов в проникающей способности, связанных с применением высокоэффективных оптических покрытий для избранных элементов схемы ОЗСП, отметим еще одно преимущество системы с большим диаметром коллимированного пучка. В коллимированном пучке диаметром 258 мм диаметр тени кабины первичного фокуса составляет 77 мм, поэтому существует принципиальная возможность разработки или приобретения для ОЗСП светоприемника, встроенного в эту тень и размещенного внутри камеры (см., например, рис. 2 в работе [69]). Такое решение экономит потери за счет исключения одной отражающей поверхности с большими френелевскими потерями (ломающее зеркало в сходящемся пучке) и может понизить потери на центральном экранировании, неизбежные в схеме «ломаный Шмидт», работающей со светоприемником большого формата.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работы по реконструкции ОЗСП и поддержке основных эксплуатационных характеристик спектрографа финансировались в рамках государственной поддержки центров коллективного

пользования и уникальных стендов и установок. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073). Работа В. Е. Панчука поддержана грантами РФФИ 12-07-00369 и 13-02-00029. Авторы признательны Е. Л. Ченцову и Ю. В. Глаголевскому за комментарии по исследованиям ОЗСП [11], выполненным в 1975 г. Выражаем благодарность всем астрономам, опубликовавшим свои результаты наблюдений на ОЗСП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. К. Иоаннисиани, *Оптико-механич. промышл.* **4**, 37 (1970).
2. Н. Н. Михельсон, в *150 лет Пулковской обсерватории*, Ред. В. К. Абалакин (Наука, Ленинград, 1989), сс. 257–276.
3. В. П. Линник, в *Новая техника в астрономии*, Ред. О. А. Мельников (Изд. АН СССР, Москва, Ленинград, 1963), № 1, сс. 176–179.
4. И. М. Копылов, в *И. М. Копылов — полвека в астрофизике*, Ред. Ю. Ю. Балега, В. Г. Ключкова (Шанс, Москва, 2003), сс. 8–16.
5. О. Н. Гусев, Н. Г. Зандин, М. В. Лобачев, *Оптико-механич. промышл.* **12**, 63 (1976).
6. Н. Г. Зандин, О. Н. Гусев, И. В. Пейсахсон, *Оптико-механич. промышл.* **6**, 20 (1977).
7. А. С. Васильев, А. М. Евзеров, М. В. Лобачев, И. В. Пейсахсон, *Оптико-механич. промышл.* **2**, 31 (1977).
8. I. S. Bowen. *Astrophys. J.* **116**, 1 (1952).
9. И. В. Пейсахсон, *Оптика спектральных приборов* (Машиностроение, Ленинград, 1970).
10. V. E. Panchuk and V. L. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 233, (2011).
11. В. С. Рылов, Ю. В. Глаголевский, Ю. В. Сухарев, Е. Л. Ченцов, *Научно-технический отчет № 12* (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1976).
12. E. H. Richardson, *J. Roy. Astron. Soc. Canada* **62**, 313 (1968).
13. E. H. Richardson, G. A. Brealey, and R. Dancey, *Publ. Dominion Astrophys. Obs. Victoria* **14**, 1 (1971).
14. V. G. Klochkova and I. M. Kopylov, *IAU Coll.*, No. 90, 159 (1986).
15. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Klochkova, and I. M. Kopylov, *IAU Coll. No. 90*, 29 (1986).
16. В. Е. Панчук, *Сообщения Спец. астрофиз. obs.*, № 40, 13 (1984).
17. Ю. Ф. Антропов, в *Новая техника в астрономии*, Ред. Н. Н. Михельсон (Изд. АН СССР, Москва, Ленинград, 1972), № 4, с. 75.
18. В. Г. Ключкова, *Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук* (Тарту, 1985).

19. В. Е. Панчук, З. У. Шагошева, Научно-технический отчет № 99 (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1982).
20. V. Panchuk, V. Klochkova, M. Yushkin, and I. Najdenov, *J. Opt. Technology* **76**, 87 (2009).
21. P. Jacquinet, *J. Opt. Soc. America* **44**, 761 (1954).
22. J. E. Geake and W.L. Wilcock, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **117**, 380 (1957).
23. A. H. Jr. Vaughan and G. Münch, *Astron. J.* **71**, 184 (1966).
24. A. H. Jr. Vaughan, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **5**, 139 (1967).
25. А. Б. Северный, В. М. Кувшинов, Н. С. Никулин, *Изв. Крымской астрофиз. obs.* **50**, 3 (1974).
26. Ю. В. Глаголевский, В. С. Рылов, П. В. Щеглов, Г. А. Чунтонов, в *Новая техника в астрономии*, Ред. Н. Н. Михельсон (Изд. АН СССР, Москва, Ленинград, 1975), № 5, с. 7.
27. Ю. В. Глаголевский, Г. А. Чунтонов, И. Д. Найденов и др., *Сообщения Спец. астрофиз. obs.*, № 25, 5 (1979).
28. И. Д. Найденов, Г. А. Чунтонов, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **8**, 139 (1976).
29. Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк, И. Д. Найденов, В. Г. Штоль, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **27**, 34 (1989).
30. Э. Б. Гажур, И. Д. Найденов, В. Е. Панчук, Е. И. Перепелицын, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **23**, 105 (1986).
31. В. Л. Афанасьев, Э. Б. Гажур, В. Е. Панчук, *Авт. свидет. № 1236325; Бюлл. Открытия, изобретения*, № 21, 172 (1986).
32. И. Ф. Бикмаев, Э. Б. Гажур, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **32**, 181 (1990).
33. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, О. В. Федорова, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **29**, 84 (1990).
34. T. Kirper and V. Klochkova, *An Atlas of the Spectrum of Aldebaran  $\lambda\lambda$  4000–6720 Å* (Valgus, Tallinn, 1987).
35. В. Г. Клочкова, *Сообщения Спец. астрофиз. obs.*, № 66, 5 (1991).
36. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, *Сообщения Спец. астрофиз. obs.*, № 54, 5 (1987).
37. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 386 (2008).
38. Н. С. Полосухина, К. К. Чуваев, В. П. Маланушенко, *Изв. Крымской астрофиз. obs.* **64**, 37 (1981).
39. V. D. Vuchkov, *Sov. Astron. Lett.* **13**, 325 (1987).
40. А. А. Иванов, В. Е. Панчук, В. С. Шергин, *Препринт № 155*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 2001).
41. В. С. Рылов, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **2**, 121 (1970).
42. В. Л. Афанасьев, Ю. Ю. Балег, М. А. Грудзинский и др., *Техника средств связи, Сер. Техника телевидения*, № 5, 13 (1987).
43. А. Н. Борисенко, С. В. Маркелов, В. П. Рядченко, *Препринт № 76*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1991).
44. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, *Препринт № 70*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1991).
45. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and V. P. Ryadchenko, *Sov. Astron. Lett.* **17**, 274 (1991).
46. В. Е. Панчук, *Препринт № 154*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 2001).
47. D. A. Varshalovich, V. E. Panchuk, and A. V. Ivanchik, *Astronomy Letters* **22**, 6 (1996).
48. Ю. Ю. Балег, С. В. Маркелов, в *Специальная астрофизическая обсерватория. 40 лет*, Ред. Ю. Ю. Балег (КАДО, Геленджик, 2006), сс. 68–76.
49. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and M. V. Yakorov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 392 (2009).
50. В. Е. Панчук, Н. А. Викульев, И. Д. Найденов, *Препринт № 138*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1999).
51. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, G. A. Galasutdinov, et al. *Astronomy Letters* **19**, 431 (1993).
52. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, И. Д. Найденов и др., *Препринт № 139*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1999).
53. G. A. Chountonov and E. I. Perepelitsin, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2000), p. 255–257.
54. В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, И. Д. Найденов, *Препринт № 179*, (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 2003).
55. I. D. Najdenov, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **62**, 296 (2007).
56. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al. *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127, (1998).
57. Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк, в *Специальная астрофизическая обсерватория Российской Академии наук. 40 лет*, Ред. Ю. Ю. Балег (КАДО, Геленджик, 2006), сс. 149–169.
58. И. Д. Найденов, Г. А. Чунтонов, *Сообщения Спец. астрофиз. obs.*, № 16, 63 (1976).
59. Г. А. Чунтонов, в *Методы спектроскопии в современной астрофизике*, Ред. Л. И. Машонкина, М. Е. Сачков (Янус-К, Москва, 2007), сс. 336–349.
60. G. A. Chountonov, V. A. Murzin, N. G. Ivashchenko, and I. V. Afanasieva, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2000), pp. 249–251.
61. G. A. Chountonov, in *Proc. Int. Conf. on Magnetic Stars*, Ed. by Yu. Glagolevskij, D. O. Kudryavtsev, and I. I. Romanyuk (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2004) pp. 286–291.
62. G. A. Chountonov and I. D. Najdenov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 106 (2009).
63. V. E. Panchuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 65 (1998).
64. И. И. Романюк (частное сообщение).

65. D. D. Walker and F. Diego, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 355 (1985).
66. T. A. Birulya, D. K. Mikhailov, and P. V. Sheglov, **71**, 57 (1993).
67. V. G. Klochkova, *Astrophysical Bulletin* **67**, 385 (2012).
68. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, V. G. Elkin, and E. Paunzen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 1804 (2006).
69. В. Е. Панчук, *Сообщения Спец. астрофиз. обс.*, № 56, 25 (1987).

## **Main Stellar Spectrograph of the 6-Meter Telescope. Analysis, Reconstruction, and Operation**

**V. E. Panchuk, G. A. Chuntsov, and I. D. Naidenov**

The Main Stellar Spectrograph (MSS) of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory was developed in the early 1970s and has been in permanent operation since 1975. This instrument has been successfully kept operational for a long time by equipping it with modern detectors and significantly upgrading its optical layout. In this paper we present the main parameters of the optomechanical layout of the MSS, the design features of auxiliary devices, operational experience and statistics of the use of the instrument with various detectors, and the characteristics of the corresponding observational techniques.

Keywords: *instrumentation: spectrographs*