

УДК 520.84, 520.2.01

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА БТА МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

© 2020 В. Г. Клочкова^{1*}, Ю. В. Шелдакова², В. В. Власюк¹, А. В. Кудряшов²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Институт динамики геосфер РАН, Москва, 119334 Россия

Поступила в редакцию 7 августа 2020 года; после доработки 16 сентября 2020 года;
принята к публикации 16 сентября 2020 года

Кратко обсуждаются те этапы создания и развития методов спектроскопии высокого разрешения на 6-м телескопе БТА, которые имеют отношение к обозначенной проблеме. Рассматривается возможность многократного повышения эффективности спектроскопии звезд за счет применения современных разработок в области адаптивной оптики. На первом этапе планируется выполнить работы, связанные с контролем и коррекцией изображения по центральной звезде. Этот этап естественно начать на спектрографе, имеющем максимально высокое спектральное разрешение, где относительно яркая исследуемая звезда может служить опорной в методе адаптивной оптики.

Ключевые слова: *техника: спектроскопия — инструменты: адаптивная оптика*

1. ВВЕДЕНИЕ

6-м телескоп БТА является одним из немногих телескопов большого диаметра, на котором наблюдения с использованием методов и средств адаптивной оптики не проводятся. За 45-летний период эксплуатации телескопа выполнен большой объем работ по совершенствованию существовавших и созданию новых методов спектроскопических наблюдений. К настоящему времени сложилась ситуация, когда принципиальные резервы повышения эффективности наблюдений с высоким спектральным разрешением практически исчерпаны, если оставаться в классе дифракционных спектральных приборов и отечественных возможностей их развития. Попытки совершенствования главной оптики БТА также пока не привели к заметному выигрышу. Поэтому дальнейшее развитие техники наблюдений звезд с высоким спектральным разрешением мы связываем в первую очередь с применением методов адаптивной оптики. На первом этапе необходимо проанализировать уже сложившееся положение (место установки телескопа, характеристики оптико-механических конструкций телескопа и спектрографов, статистику условий наблюдений) с тем, чтобы начать работы по адаптивной оптике на существующей спектральной аппаратуре. В целом в задаче повышения эффективности спектроскопических наблюдений звезд на БТА следует рассмотреть:

- особенности оптико-механической конструкции первой альт-азимутальной системы БТА, разработанной в 60-е годы;
- статистику параметров астроклимата в месте установки БТА и особенности астроклимата башни телескопа;
- результаты исследования режимов использования оптики БТА;
- современное состояние теории и перспективных технологий адаптивной оптики (АО);
- опыт разработки и эксплуатации спектральной аппаратуры БТА;
- опыт продолжительных спектральных наблюдений на БТА;
- потребности в наблюдениях со сверхвысоким спектральным разрешением;
- перспективы создания спектральных систем высокого разрешения, изначально планируемых для работ исключительно с адаптивной оптикой.

Попытаемся охарактеризовать некоторые этапы выполненных исследований и наметить план предстоящих работ. Вначале остановимся на проблеме колебаний телескопа, затем рассмотрим информативность по атмосфере над пунктом установки БТА, кратко перечислим особенности эксплуатации оптики и башни БТА, оценим резервы приборов высокого спектрального разрешения. Затем

*E-mail: valenta@sao.ru

рассмотрим некоторые возможности повышения эффективности спектроскопических наблюдений с применением методов адаптивной оптики.

2. ТЕЛЕСКОП КАК КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Колебания положения изображения звезды имеют две составляющие, определяемые: а) конструкцией телескопа и способами управления, б) процессами в тропосфере Земли. В самом начале спектроскопических наблюдений на БТА выяснилось, что экспериментальная проникающая способность Основного звездного спектрографа (ОЗСП) (Panchuk et al. 2014, Vasilev et al. 1977) уступает теоретическим оценкам (Rylov 1970) минимум на одну звездную величину. Дело в том, что в статье Rylov (1970), как и в пионерской работе Bowen (1952), предполагалось абсолютно точное сопровождение объекта, т.е. не учитывались особенности поведения телескопов, а состоящие атмосферы характеризовались только угловыми размерами турбулентного диска звезды. В этом разделе остановимся на особенностях системы сопровождения объекта.

БТА явился первой альт-азимутальной системой, управляемой при помощи ЭЦВМ. Выбор конструкции и параметров телескопа происходил в эпоху, когда математическое моделирование основных свойств механической конструкции и системы управления еще не представлялось возможным. Создаваемые в то время технологии производства и средств контроля оптики определили габариты и конфигурацию конструкции телескопа; современные альт-азимутальные монтировки больших телескопов имеют более приземистые пропорции. Подбор параметров и проверка автоматизированной системы управления (АСУ) БТА были проведены экспериментально, на масштабированном (М 1:10) макете (Vyatskin et al. 1971). Средняя ошибка наведения составила $44''$. Было показано, что без коррекции программного ведения БТА может работать около одной минуты, за это время положение объекта смещается на $1''$. Напомним, что в проектном задании АСУ БТА записано: точность наведения не хуже $\pm 20''$, а накопленная ошибка ведения не должна превышать $5''$ за 10 минут экспозиции. В работе Vilenchik et al. (1972) сделан вывод, что при условии оснащения БТА фотоэлектрическими и телевизионными системами коррекции положения инструмента с добротностями по скорости порядка $1-3 \text{ с}^{-1}$ качество программного ведения следует считать удовлетворительным. Анализ ошибок макета БТА (астрономических, инструментальных и ошибок цифровой АСУ) позволил сделать Vilenchik et al. (1972) вывод о хорошем согласии теории и эксперимента.

Понятно, что макет не давал представлений о таких инструментальных ошибках будущей конструкции большого телескопа, как ошибка гнугтия трубы, ошибка коллимации, ошибка вертикальной оси монтировки, а также геометрические допуски на сборку конструкции массой в сотни тонн. Но для темы данной статьи важно другое обстоятельство: макет, выполненный в $1/10$ оригинала с диаметром зеркала $D = 60 \text{ см}$, обладал совершенно иным набором собственных частот, чем реальная конструкция БТА.

Технические средства, включенные в состав поисково-гидирующей системы БТА (Malarev 1977), обрабатывались заранее на телескопах меньшего диаметра с экваториальной монтировкой. В схеме общего гида БТА с ломаной оптической осью удалось совместить функции поиска объекта и сопровождения (гидирования) объекта во вращающемся поле. Сигналы рассогласования координат, выработанные поисково-гидирующей системой, подавались на систему управления приводами БТА. Компенсация дифференциальных гнугтий между телескопом и гидом осуществлялась отклоняющей пластиной в малом поле гида, управляемой оператором АСУ, или с рабочего места астронома, находящегося в одном из фокусов телескопа. Таким образом, программному управлению отводилась роль «грубого» ведения, а точное сопровождение с ошибкой не более $0''2$, было возложено на гидирующую систему (Malarev 1977). Предполагалось, что вмешательство в работу гидирующей системы будет происходить только между режимами наведения и сопровождения объекта. Общий гид БТА был исследован и дорабатывался на этапе опытной эксплуатации телескопа в 1975–1976 гг. и впоследствии был признан неработоспособным. В плановых наблюдениях астрономы пользовались возможностями ручной коррекции рассогласований между реальным и необходимым положениями объекта в поле зрения телескопа.

Спектрограф ОЗСП (Panchuk et al. 2014), размещенный в фокусе Нэсмит-2, был оснащен местным фотогидом, принцип действия которого был основан на использовании полудискового механического модулятора с фотоэлектрическим умножителем (ФЭУ). Этот вариант гидирования по центральной звезде астрономы использовали до 1980 г. По мнению исследователей звездного магнетизма считалось, что работа местного фотогида вносит инструментальные ошибки в измерения поляризации. Поэтому при реконструкции ОЗСП Gazhug et al. (1986) был изготовлен механизм ввода/вывода плоскопараллельной пластины фотогида из пучка в фокусе Нэсмит-2 (относительное отверстие 1:30.74). В итоге астрономы полностью перешли на режим ручной коррекции, воздей-

ствуя на приводы телескопа при фиксированном наборе скоростей коррекции.

Квазипериодические колебания изображения звезды на щели спектрографа были обнаружены уже в первый год наблюдений. В результате ручной коррекции положения звезды (через систему приводов телескопа) возбуждались медленно затухающие колебания, а действия начинающего наблюдателя даже раскачивали телескоп. «Оцифровать» эти впечатления не удавалось, т.к. первые пятнадцать лет работы БТА спектрограф ОЗСП не был оснащен телевизионным подсмотром положения звезды на щели. Позже при спеклинтерферометрических наблюдениях в первичном фокусе (Valega et al. 1990) были выявлены квазипериодические смещения центров изображений звезд с амплитудой $0''3-0''4$ в диапазоне частот $0.7-0.9$ Гц. Программное движение телескопа при этом не корректировалось. Таким образом, вопрос о колебаниях телескопа разделился на две части: о колебаниях, возбуждаемых сменой режимов (программное ведение и коррекция), и колебаниях, возбуждаемых какими-то другими процессами, когда телескоп находится в режиме программного сопровождения объекта без коррекции.

После ввода в эксплуатацию системы «Квант» (Afanasiev et al. 1987) появилась возможность дистанционного контроля положения изображения объекта с помощью телевизионных систем счета фотонов (модули КН-15). Предположения, что пребывание астронома на подвижной части телескопа может возбуждать колебания, были наконец сняты. После оснащения ОЗСП телевизионным подсмотром щели (1992 г.) удалось объективно изучить характеристики наведения и программного сопровождения объекта (Snezhko 2006). В частности, было установлено, что внеконтурная подвижная часть телескопа (не охваченный обратной связью колебательный контур трубы и подпружиненных червячных передач) вносит дополнительные ошибки и обеспечивает колебания звезды относительно расчетного значения, формируемого ЭВМ АСУ. Доминирующие гармоники колебаний находятся на частотах $0.8-1$ Гц и 0.4 Гц для осей азимута A и зенитного расстояния Z соответственно. Различие этих частот свидетельствует об аппаратной (а не атмосферной) природе колебаний. При минимальной скорости коррекции движения телескопа возникают колебания с амплитудой до $1''$, время затухания колебаний составляет 25 секунд. При увеличении скорости коррекции эффект усиливается. При смене режимов управления (наведение, сопровождение, коррекция положения) БТА значительную часть времени находился в переходных состояниях, также вызывающих колебания и снижающих ресурс механической конструкции. В дальнейшем был выполнен анализ динамики

телескопа, включающий цифровое и полуфизическое моделирование АСУ (Snezhko 2006).

В 1994 г. на БТА был испытан макет контура демпфирования колебаний на оси A . Было показано, что время затухания колебаний может быть снижено в 5–6 раз, а точность ручной коррекции может быть увеличена. В 1996 г. агрегаты системы маслопитания подшипников оси Z были перенесены с опорно-поворотной части (ОПЧ) БТА в подвальное помещение, на фундамент, не связанный с фундаментом ОПЧ телескопа¹. Таким образом, с подвижной части конструкции телескопа был удален агрегат, работа которого могла приводить к возбуждению колебаний телескопа. Дальнейшие попытки решить проблему низкочастотных колебаний телескопа путем введения дополнительных контуров демпфирования завершились получением патента на полезную модель (Ermakov et al.). Даже простое сравнение геометрических пропорций подвижной части конструкции БТА и любого современного крупного телескопа на альт-азимутальной монтировке (общая высота подвижной части БТА больше, а его опорная база меньше, чем у новых телескопов) наводит на мысль о том, что у конструкции БТА может существовать набор собственных частот, переменный с зенитным расстоянием.

Опыт многолетних наблюдений, проводимых астрономами при различных состояниях модернизируемой АСУ БТА позволил предложить альтернативное решение — вернуться к проверенной идее фотогида по центральной звезде как устройства менее инерционного, чем конструкция БТА (массой 620 тонн). При разработке первого локального корректора фокуса Нэсмита (ЛКН) (Ivanov et al. 2001) сотрудниками Отдела информатики и Лаборатории астроспектроскопии были использованы возможности современной элементной базы (панорамные приемники, быстрые процессоры), а также опыт создания и эксплуатации АСУ БТА на новой аппаратурно-алгоритмической основе². Локальный корректор работает по периферийной части изображения звезды, спроецированного на входное окно резателя изображений (Naidenov et al. 2007). Только в результате использования ЛКН подтвердилось предположение, что расхождение теоретических и экспериментальных оценок проникающей способности ОЗСП БТА, отмеченное в начале этого раздела, связано с особенностями режима сопровождения объекта.

В процессе модернизации PFES (Panchuk et al. 2017b; 1997) — эшелле-спектрографа первичного фокуса (ПФ) БТА — был разработан и испытан локальный корректор первичного фокуса (ЛКПФ)

¹<https://www.sao.ru/hq/sekhta/Maslo/maslo.html>

²https://www.sao.ru/hq/vsher/manuals/bta_control

(Уаковов 2006). При испытаниях ЛКПФ выяснилось, что амплитуда колебаний центра звезды относительно среднего положения превышает $1''$, среднеквадратичное отклонение составляет $0''.43$. Это означает, что при спектроскопических наблюдениях центр изображения звезды более 30% времени экспозиции находится за пределами входной щели спектрографа PFES. Спектры мощности, рассчитанные по зарегистрированным смещениям центра изображения звезды, различаются по двум координатам, что свидетельствует о преобладании колебаний, возникающих в системе телескопа. По одной координате, измеренной на светоприемнике, выделяются колебания на частоте 0.65 Гц, по другой — на частотах 0.88 и 0.65 Гц. Работа первой модели ЛКПФ позволяла стабилизировать колебания центра изображения в пределах $\pm 0''.1$.

Считаем, что проблема компенсации низкочастотных колебаний телескопа была решена в первом приближении. Итак, телескоп БТА, полученный спектроскопистами в состоянии, сложном для выполнения продолжительных режимов накопления сигнала, к настоящему времени находится в состоянии, приемлемом для постановки экспериментов по адаптивной оптике.

3. АТМОСФЕРА В МЕСТЕ УСТАНОВКИ БТА

В середине XX века в астроклиматических представлениях отечественных астрономов преобладала концепция Данжона—Кудэ (Danjon and Couder 1940), согласно которой основной вклад в нестабильность атмосферы дают слои, расположенные на высоте $h = 3\text{--}3.5$ км. Практическим доказательством признания этой концепции являлись, например, экспедиции Сектора астроботаники АН Казахской ССР по равнинам и предгорьям Средней Азии (Kuchеров 1953). Еще до принятия решения о конкретных размерах большого оптического телескопа, начиная с 1954 г., Пулковская обсерватория (ГАО АН СССР) организовала экспедиционные исследования с целью выбора места установки большого телескопа. Астроклиматические наблюдения по единой методике, разработанной в ГАО, производились в ряде пунктов южных республик и областей (Средняя Азия, Памир, Южное Поволжье, Северный Кавказ), а также на Кисловодской горной станции ГАО, где наблюдения велись не в экспедиционном режиме, а более регулярно. Проводилась оценка качества дифракционной картины в шкале Данжона—Кудэ, а также измерения амплитуды дрожания фотографических следов звездных изображений, выполняемые по результатам наблюдений на специально разработанной серии телескопов АЗТ-7 ($D = 20$ см) и АЗТ-9 ($D = 14$ см). В некоторые летние сезоны наблюдения производились

одновременно десятью экспедициями; всего на территории СССР было обследовано около 20 пунктов (Darghiya 1985).

Если в работе Panchuk and Afanas'ev (2011) внимание акцентировано на недостаточной статистике исследований района установки БТА, выполненных до решения о пункте установки, в начале 1962 г. (см. статью Balega and Klochkova (2003)), то здесь мы попытаемся оценить пригодность тех астроклиматических исследований, которые были продолжены после определения пункта установки (долгота $41^\circ 26' 30''$, широта $+43^\circ 39' 12''$, $h = 2080$ м над уровнем моря), на северном отроге горы Семиродники. Подчеркнем, что в Зеленчукской экспедиции ГАО АН СССР в 1960–1961 гг. исследовались семь пунктов района установки БТА, что позволило оценить связь параметра дрожаний изображений звезд и качества изображений от высоты пункта наблюдений (Vasilyev and Jakovleva 1970). За исключением пункта «Зеленчукская» ($h = 930$ м над уровнем моря), экспедиции проводились преимущественно в мае–октябре в течение 25–50 ночей в каждом пункте.

Наиболее продолжительные ряды наблюдений (с телескопом АЗТ-7), покрывающие все сезоны года, получены для пункта «Звездный» (май 1961 г.—август 1966 г.) (Vasilyev and Nelyubin 1968). При анализе этих данных выяснилось, что закон, по которому значение угла турбулентности t_z приводится к зениту ($z = 0^\circ$), должен быть пересмотрен. Вместо $t_z = t_0 \times \sec z$, как это было предложено Danjon and Couder (1940), следует использовать $t_z = t_0 + k \times \operatorname{tg} z$ (см. работу Vasilyev and Nelubin (1970a)). Повторная обработка всех наблюдений, выполненных на пункте «Звездный», позволила выявить сезонные вариации среднего угла турбулентности, зависимость последнего от азимута, наиболее благоприятное время наблюдений по срокам. Если в статье Vasilyev and Jakovleva (1970) сделан вывод, что наименьшие дрожания наблюдаются в середине ночи, то из работы Vasilyev and Nelubin (1970a) следует, что в большинстве случаев среднее значение угла турбулентности уменьшается в утренний срок, что впоследствии подтвердилось мнением наблюдателей БТА об улучшении качества изображений к утру (разумеется, в ночи, устойчивые по метеорологическим характеристикам). Дальнейшие попытки установить связь качества звездных изображений от метеорологических характеристик приземного слоя атмосферы (температура, давление, влажность, ветер) были предприняты Vasilyev and Nelubin (1970b). Для аппроксимации сезонных изменений среднего значения угла турбулентности (уменьшение t_0 в 1.5 раза в летне-осенний период (см. рис. 3 в работе Vasilyev and Nelubin (1970b)))

удалось подобрать комбинацию значений среднемесячных приземных характеристик. Однако при рассмотрении вопроса о прогнозировании качества звездных изображений (Vasilyev and Nelubin 1971) оказалось, что для района установки БТА не существует уверенной корреляции качества звездных изображений с каждой из метеорологических характеристик в отдельности.

Итак, исследования района установки БТА, выполненные по пулковской программе в духе концепции Данжона—Кудэ, выявили ряд эффектов, не соответствующих классическим представлениям. Во-первых, зависимость среднего угла турбулентности от высоты пункта обнаружена уже для высот от 600 до 2200 м над уровнем моря. Во-вторых, показана роль приземных слоев атмосферы. Хронология поисков места для установки БТА не позволяет нам согласиться с растиражированным мнением, что альт-азимутальная монтировка БТА позволила сэкономить несколько лет, т.к. поиски места продолжались тогда, когда телескоп уже строили. В действительности интенсивные исследования астроклимата в районе установки БТА выполнялись уже после принятия решения о пункте установки.

Первые годы работы БТА сопровождалась серьезной критикой места установки телескопа, причем эта критика была основана не на сравнении представительной статистики по различным пунктам (такой статистики не существовало), а на концепции отдельной изолированной вершины (Shcheglov 1968). По сравнению с концепцией Данжона—Кудэ новая астроклиматическая концепция представляла другую крайность — считалось, что в ухудшении качества изображения основную роль играет тонкий слой приземной инверсии высотой около 20–30 м. Идеальным решением представлялась довольно экзотическая конструкция башни телескопа (см. рис. 8 в работе Efremov et al. (1975)), каким-то образом водруженная на скальный выступ. В 70-х годах оказалось, что установка астрономических телескопов на вершинах Ла Силья ($h = 2400$ м над уровнем моря) и Мауна Кеа ($h = 4200$ м над уровнем моря) в башнях, возвышающихся над основной массой приземных оптических неоднородностей, не привела к ожидаемому принципиальному улучшению качества изображения. Первые непосредственные измерения оптически активной температурной турбулентности в так называемой свободной атмосфере (Bufton 1973) показали, что высоко расположенные атмосферные слои также могут вносить значительный вклад в искажения астрономического изображения.

Можем ли мы сегодня использовать результаты наблюдений пулковских астрономов, полученные в тяжелых экспедиционных условиях? Прежде всего

следует напомнить, что наиболее продолжительные ряды наблюдений, выполненные на пункте «Звездный», не относятся к пункту установки БТА. Пункт «Звездный» ($h = 2280$ м над уровнем моря) находится на хребте Ужум, соединяющимся с юго-восточным склоном горы Семиродники узкой перемычкой (см. рис. 3 в работе Panchuk and Afanas'ev (2011)). «Звездный» расположен над крутым изгибом долины реки Маруха и подвержен воздействию южных ветров, приходящих со стороны Марухских перевалов в системе Главного Кавказского хребта (ГКХ). Место, где установлен БТА, отстоит от пункта «Звездный» на расстоянии около 5 км, находится на северном склоне горы Семиродники и подвержено влиянию преимущественно западных ветров, приходящих со склонов хребта Абишира-Ахуба, отделенного долинами от системы ГКХ. Поэтому корреляция качества изображения и скорости приземного ветра, подобная обнаруженной Abramenko et al. (1969), если и будет установлена для БТА (а основания для этого у наблюдателей имеются), не имеет отношения к пункту «Звездный», находящемуся в иных орографических условиях. Таким образом, интерес могут представлять только среднемесячные характеристики астроклимата в пункте «Звездный» как измеренные в свободной атмосфере.

При поисках мест установки телескопа одной из важнейших характеристик астроклимата является число ясных ночей. Эта величина обычно оценивалась по баллу облачности с использованием архивов ближайших метеостанций. Метеонаблюдения выполняются в определенные моменты суток (сроки), большая часть которых приходится на дневное время. Кроме того, метеостанции находятся в населенных пунктах, т.е. на значительном удалении (в т.ч. и по высоте) от исследуемых пунктов. Поэтому метод оценки ясного ночного времени по архивам метеостанций вызывает у астрономов определенный скепсис. Для места установки БТА ($h = 2080$ м над уровнем моря) были опубликованы оценки минимального числа ясных ночных часов в год $N_{\min} = 830$ (Novikova 1968), затем $N_{\min} = 635$ (Shcheglov 1980), полученные по архивам метеостанций «Зеленчукская» ($h = 970$ м над уровнем моря) и «Архыз» ($h = 1450$ м над уровнем моря; метеоданные за 1933–1941 и 1944–1950 гг. для котловины, окруженной хребтами). В первые годы наблюдений на БТА статистические данные о двух важнейших характеристиках астроклимата (качество изображений и число рабочих часов) собирались астрономами-наблюдателями для научно-технических отчетов группы «Астроклимат». Качество изображений, оцениваемое визуально (относительно ширины щели спектрографа), отмечалось в карточках, заполняемых на наблюдения каждого объекта. Общий анализ этих данных не

проводился. После внедрения телевизионных под-смотров (с возможностью регулировки контраста) объективность оценок качества изображений не возросла. Эти обстоятельства, наряду с тенденцией 70–80-х годов пропагандировать альтернативные астропункты в Средней Азии и на Памире, повлияли, по нашему мнению, на отсутствие публикаций по астроклиматическим характеристикам места установки БТА.

Характеристики качества изображений, измеряемые в единой шкале, появились только после создания архива ASPID³ универсального прибора SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005). На этот прибор в период с 1994 по 2010 гг. было распределено более 36% календарных ночей, поэтому данные архива использованы Panchuk and Afanas'ev (2011) для первых статистически значимых оценок качества изображения на БТА. Анализ этих данных на более протяженном интервале эксплуатации прибора планируется продолжить. Отметим, что использование архива ASPID дает заниженную оценку числа наблюдательных часов и завышенную оценку качества изображений для БТА в целом, т.к. спектроскопические наблюдения с высоким разрешением, выполняемые на других приборах, проводятся и при худших характеристиках астроклимата.

Как медианное ($1''.53$), так и среднее ($1''.67$) за 16 лет качество изображений на БТА превышает среднегодовую величину ($1''.23$), полученную в работе Leushin et al. (1975) путем пересчета результатов наблюдений, выполненных на двухлучевом приборе (ДЛП, см. работу Stock and Keller (1960)) к 6-м диаметру зеркала. Такое расхождение может быть объяснено тем, что в методике пересчета данных с ДЛП не учитывалось влияние неоднородностей, характерный размер которых превышает базу ДЛП (215 см). Эти неоднородности, которые для ДЛП можно рассматривать в приближении наклонов волнового фронта, вызывают синхронные смещения изображений в каналах прибора.

Второй причиной расхождений может являться микроклимат башни БТА. Практика спектроскопических наблюдений показывает, что в течение ночи происходит выхолаживание подкупольного пространства башни и конструкции телескопа, поэтому в начале наблюдений положение фокуса корректируется чаще. В первые годы работы БТА проводились эксперименты по синхронным измерениям качества изображений, регистрируемых на двух телескопах АЗТ-7, установленных в башне и вне башни БТА. Это позволило бы сравнивать результаты экспедиционных наблюдений с наблюдениями на большом зеркале, а также оценить

влияние башни. Результаты этих исследований не опубликованы. С 1993 г. в публикуемых отчетах обсерватории фигурируют две величины: число часов, зафиксированное в журнале службы эксплуатации (АСУ БТА), N_{ab} , и число часов по отчетам астрономов-наблюдателей, N_{obs} . По данным АСУ, в период с 1993 по 2017 гг. среднее количество наблюдательного времени составляет $N_a = 1580$ часов в год, что вдвое превосходит оценки, полученные по данным метеостанций. Заметим, что среднее количество наблюдательного времени на БТА ненамного (на 100 часов) уступает фактическому количеству наблюдательного времени на обсерватории Санглок (1678 часов, см. таблицу 3 в работе Shcheglov (1980)).

Измерения вертикальных профилей структурной характеристики флуктуаций температуры C_T^2 в слое от 34 до 680 м проводились вблизи БТА в течение восьми ночей (Kallistratova et al. 1985). Затем по методике, упомянутой в статьях Giguayov et al. (1983), Kallistratova (1980), определялись структурная характеристика флуктуаций показателя преломления C_n^2 и турбулентный оптический фактор.

Результаты исследований прозрачности ночной и дневной атмосферы над БТА опубликованы еще в 70-е годы (Bergner et al. 1978, Kartasheva and Chunakova 1978). В принципе, данные о прозрачности ночной атмосферы в широких фотометрических полосах можно извлечь из архивов наблюдений, но такое статистическое исследование не проводилось. Что касается спектрофотометрических измерений прозрачности, то на БТА они затруднены из-за отсутствия компенсаторов атмосферной дисперсии и могут выполняться лишь как вспомогательные к основной программе (см., например, проект спектрофотометра Panchuk et al. (2015a)). На сегодняшний день мы не располагаем данными, позволяющими разделить вклады аэрозольной и молекулярной компонент в оптические характеристики ночной атмосферы над БТА.

Приземные метеорологические характеристики за период 1977–1983 гг. можно найти в отчетах группы «Астроклимат» Отдела научно-технических проблем (ОНТП) БТА. С 2004 г. на Верхней научной площадке (ВНП) работает система автоматического сбора метеопараметров⁴. Метеомачта расположена вблизи башни БТА с западной стороны оптимальным образом с учетом розы ветров. К сожалению, в цифровом архиве системы сбора метеопараметров содержатся данные, усредненные за 15-минутные интервалы регистрации. Данные о метеопараметрах за период 1984–2003 гг. централизованно не собирались, их

³<http://alcor.sao.ru/db/aspid/about.html>

⁴<http://tb.sao.ru/tcs/main.html>

можно найти только в журналах отдельных групп наблюдателей.

Отношение к телескопу БТА в среде астрономов СССР было неоднозначным. Сегодня объективную оценку можно получить только на основании публикаций того времени. Реальный вклад астрономов других учреждений в развитие работ на БТА можно оценить по распределению наблюдательных программ и степени последующего опубликования результатов (см., например, попытку такого анализа, предпринятую Panchuk (1998)). Что касается проблем астроклимата БТА, то здесь просматривается практика умолчания, причем со стороны признанных специалистов. Например, в статьях Efremov et al. (1975), Novikov and Shcheglov (1973) читатель не найдет упоминаний ни о проекте БТА, ни о характеристиках места установки телескопа. Дальнейшее развитие астроклиматических методов и совершенствование эмпирических представлений о турбулентной атмосфере (см., например, исследования Gur'yanov et al. (1992), Sarazin and Roddier (1990), Tokovinin (2002a; b)) практически не отразилось на работах, выполняемых в САО. Специалистами по физике атмосферы были проведены отдельные разовые эксперименты (Gubkin et al. 1983, Kallistratova et al. 1985, Nosov et al. 2018), не завершившиеся методическими рекомендациями для астрономов, работающих на БТА. Статистически значимой информации, накопленной для БТА современными методами исследования атмосферы, не существует. Утеряна уникальная возможность многолетнего и всепогодного тестирования новых астроклиматических методов, применяемых параллельно с работой большого телескопа.

4. ЭКСПЛУАТАЦИЯ «МЕДЛЕННОЙ» ОПТИКИ БТА

В данном разделе кратко остановимся лишь на тех проблемах, которые могут быть решены (полностью или частично) средствами адаптивной оптики в сочетании с уже имеющимися разработками. Главное зеркало (ГЗ) БТА изготовлено из боросиликатного стекла с температурным коэффициентом линейного расширения $\alpha_L = 5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Низкий коэффициент теплопроводности стекла приводит к тому, что в объеме «толстого» зеркала (соотношение диаметра к толщине 10:1 «по Максудову» (Maksutov 1979)), охлаждаемом (нагреваемом) преимущественно через рабочую поверхность, развиваются медленные вариации температуры. Эти два обстоятельства и формируют проблему управления тепловым режимом ГЗ. В проекте БТА надежды возлагались на систему охлаждения подкупольного пространства. Однако мощность установки охлаждения подкупольного пространства оказалась недостаточной, а потери

холода в протяженных подводных каналах — значительными (Snezhko 1998). Неожиданными для проектировщиков оказались и большие суточные перепады температуры воздуха. Кроме того, система труб, вмонтированных в охлаждаемый пол, создавала температурные неоднородности уже на уровне пола подкупольного пространства. Поэтому от эксплуатации установки охлаждения подкупольного пространства пришлось отказаться. Отдельную проблему составляло поступление тепла от маслопровода подшипника оси Z, проходящего через объем ОЗСП (Panchuk et al. 2014), настолько значительное, что изменения в механической конфигурации ОЗСП, вызываемые прогревом опоры оси Z, были обнаружены спектроскопически (подробнее см. в работе Klochkova et al. (2008)). После реконструкции системы маслопитания подшипников и перехода на сезонные низкотемпературные сорта масла поступление тепла в объем ОЗСП при работающем телескопе практически прекратилось. В сочетании с реконструкцией обшивки объема ОЗСП удалось увеличить тепловую инерционность конструкции спектрографа практически до полусуток, т.е. быстрые изменения температуры подкупольного пространства, зачастую сопровождающие начало и завершение наблюдений, отражаются на тепловом режиме ОЗСП уже в дневное время.

Если проблему теплового режима спектрографов высокого разрешения удалось решить, то проблема теплового режима ГЗ БТА принципиально остается. Результаты температурного мониторинга системы «атмосфера—башня—зеркало» показывают, что характерное время смены метеорологической ситуации, определяемое барическими процессами, сравнимо с характерным временем реакции ГЗ на резкие изменения температуры (именуемые «тепловыми ударами» независимо от знака). Кроме того, действия по пассивному охлаждению подкупольного пространства через открытое забрало башни не всегда возможны по метеоусловиям (осадки, сильный ветер). Если учесть и эксплуатационные ограничения на телескоп (открывать забрало разрешено при скорости ветра менее 10 м с^{-1} и при разности температур «воздух—ГЗ» менее 10°C), приходим к выводу, что процесс подготовки зеркала к предстоящей ночной температуре является как конструктивным, так и ритуальным.

Опыт многолетних спектральных наблюдений в оптической схеме Нэсмита, выполнявшихся одним из авторов (ВГК) с коллегами, показал, что при хорошем качестве изображений и атмосферных условиях наблюдаются деформации формы рабочей поверхности ГЗ, проявляющиеся в развороте стрелки астигматизма при переходе через отсчет

оптимального фокуса. Кроме того, в течение ночи наблюдается (и корректируется астрономом) дрейф фокуса. Существует естественное предположение, что изменения формы ГЗ определяются разностью температур воздуха и ГЗ. Emelianov (2015) рассмотрел факторы, влияющие на возникновение микротурбулентностей в призеркальном слое воздуха и внутри подкупольного пространства, исследованы изменения фокусного расстояния телескопа (в ПФ) с температурой элементов конструкции БТА и изменение качества изображения из-за температурных градиентов в объеме главного зеркала БТА. Но для измерения вариаций температуры, которые уже могут влиять на форму поверхности, требуется использовать датчики с точностью лучше, чем 0.1°C (Emelianov 2018). При размещении термодатчиков в отверстиях разгрузок появилась возможность мониторинга температурных градиентов по зеркалу. Исследование формы рабочей поверхности ГЗ традиционно выполнялось методом Гартмана как при аттестации первого и второго главных зеркал БТА Snezhko (1980a; b), так и при попытках коррекции формы поверхности ГЗ⁵. Однако для изучения связей между температурной картой ГЗ и формой рабочей поверхности набор статистики потребует больших затрат наблюдательного времени БТА.

5. СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА БТА

Первые этапы работ по адаптивной оптике можно начать с работ по яркому точечному объекту. В этом случае оптимальным вариантом наблюдений является спектроскопия высокого разрешения — метод, используемый для исследования относительно ярких звезд. Основные этапы работ по технике спектроскопии высокого разрешения на БТА опубликованы Panchuk and Klochko (2006; 2018). Результаты исследований по одной из тем САО, для которой высокое спектральное разрешение критично, суммированы Klochko (2006; 2018). Поэтому ниже остановимся только на спектрографе НЭС (Panchuk et al. 2009), в течение 22 лет обеспечивающем на БТА максимальное значение спектрального разрешения. По научной продуктивности, реалистичной программе развития, а также в отсутствие альтернативных проектов, перекрывающих достигнутые параметры, этот спектрограф считаем наиболее пригодным для реконструкции под применение методов адаптивной оптики на БТА.

⁵<https://www.sao.ru/Doc-k8/Events/2018/MirrorChronicle/index.html>

Одной из методических проблем астрономической спектроскопии является увеличение точности измерения параметров спектральных линий. Panchuk et al. (2019b) показали, что при этом наиболее экономичным является не увеличение времени экспозиции t , а увеличение спектрального разрешения $R = \lambda/\Delta\lambda$. Проблема увеличения спектрального разрешения на телескопах большого диаметра определяется соотношением $R = 2d \operatorname{tg} \Theta_b / sD$, справедливым для автоколлимационного использования дифракционной решетки. Здесь d — диаметр коллимированного пучка спектрографа, Θ_b — угол блеска основной дифракционной решетки (эшелле), s — угловые размеры входной щели, D — диаметр зеркала телескопа. С 1998 г. на БТА работает Нэмитовский Эшелле Спектрограф (НЭС, $d = 235$ мм, $\operatorname{tg} \Theta_b = 2$), обеспечивающий разрешение вплоть до $R = 75000$ (Panchuk et al. 2009). Panchuk et al. (2017a) показали, что у НЭС имеются резервы по R , по светосиле по потоку L и по числу одновременно регистрируемых элементов спектра N . Программа реализации этих резервов (замена дифракционных узлов и резателей изображения, увеличение d) выполняется, в т.ч. и с учетом возможностей, которые могут быть предоставлены современным состоянием методов адаптивной оптики. Аргументируем выбранное направление развития, делая простейшие оценки.

Технологические пределы увеличения d уже достигнуты. С момента ввода в эксплуатацию и до начала наблюдений на спектрографе ESPRESSO (Spanò et al. 2010) НЭС в течение 20 лет занимал второе место в мире по величине d , уступая спектрографу HIRES (Vogt et al. 1994) 10-м телескопа Keck ($d = 300$ мм). В результате модернизации НЭС можно увеличить d до 270 мм (Panchuk et al. 2009). Переход на дифракционную решетку с увеличенным углом блеска (от $\operatorname{tg} \Theta_b = 2$ к $\operatorname{tg} \Theta_b = 4$) требует применения схемы белого зрачка, но соответствующая реконструкция не согласуется с габаритами платформы фокуса Нэсмита-2. Итак, в формуле $R = 2d \operatorname{tg} \Theta_b / sD$ в применении к задаче увеличения эффективности спектрографа НЭС не остается свободных параметров, если угловой размер ширины щели s уже согласован с линейным разрешением приемника.

Сделаем первую оценку возможности увеличения эффективности НЭС методами адаптивной оптики. Формально принимая величину двухпиксельного разрешения 0.03 мм, при факторе широкощельности (отношение фокусных расстояний коллиматора и камеры) для НЭС, равным 12, получим ширину нормальной щели 0.36 мм. При относительном отверстии 1:30.74 (в единственной реализованной опции фокуса Нэсмита БТА, детали

см. в работе Lobachev and Yakukhnova (1977)) масштаб изображения составляет $1''12$ в 1 мм. Таким образом, работая с нормальной щелью, при среднем качестве изображений $1''67$ (Panchuk and Afanas'ev 2011) мы можем использовать менее четверти света, собранного телескопом. Для снижения потерь света на щели, обеспечивающей максимальное значение R , спектрограф НЭС оснащен оригинальными резателями звездного изображения (Naidenov et al. 2007), устанавливаемыми вместо щели. Пример изображения эшелле-спектра, полученного с резателем, формирующим по три изображения каждого спектрального порядка (каждый высотой $2''$), приведен на рис. 1. Видно, что выигрыш в светосиле по потоку L за счет суммирования трех изображений каждого порядка приводит к потере числа одновременно регистрируемых элементов спектра N (на площадке приемника мы можем разместить меньшее число спектральных порядков).

Итак, первый очевидный выигрыш, который мы получим от уменьшения угловых размеров изображения звезды, могут обеспечить методы коррекции турбулентных изображений звезд. Например, если угловые размеры изображения звезды удастся уменьшить втрое, то полученный выигрыш в светосиле по потоку L приблизительно эквивалентен эффекту от применения резателя на три среза по некорректируемому (т.е. без применения АО) изображению звезды.

Для иллюстрации второго возможного выигрыша приведен рис. 2, где представлен спектр, полученный в наземном УФ-диапазоне. Так как в коротковолновом диапазоне размещение порядков более плотное, здесь с основной решеткой скрещенной дисперсии (300 штр./мм, 1-й порядок) можно работать без резателя изображений (каждый спектральный порядок изображен однократно).

Анализ изображений, подобных рис. 2, показал, что при уменьшении углового размера изображения звезды втрое расстояния между изображениями соседних порядков (темные полосы на рис. 2) увеличатся. Появится возможность применения другой решетки скрещенной дисперсии с меньшей величиной угловой дисперсии. Например, замена решетки с плотностью нарезки 300 штр./мм на решетку 150 штр./мм (обе работают в первом порядке) приведет к двукратному увеличению числа одновременно регистрируемых порядков. Это означает, что число одновременно регистрируемых элементов спектра N удвоится. Последнее обеспечивает двукратный выигрыш по времени регистрации увеличенного вдвое диапазона. Для дифракционного спектрографа произведение спектрального разрешения R на светосилу по потоку L является инвариантом. В простейшем случае

при фиксированных параметрах спектрографа и телескопа инвариантом является произведение $R s$. Поэтому сравнение эффективности спектрографов данного класса (или одного и того же спектрографа в различных вариантах наблюдений, см. <https://www.sao.ru/hq/Komitet/circBTA.pdf>) удобно проводить в составляющих потенциального качества $Q = LRN$ (Klochkova and Panchuk 1991, Meaburn 1976). Например, если, желая сохранить предельно высокое (для конкретного спектрографа) спектральное разрешение R , увеличение светосилы по потоку L обеспечиваем применением резателя изображений, то неизбежно теряем в N за счет уменьшения числа одновременно регистрируемых порядков эшелле-спектра.

Детальные исследования влияния различных технических решений на повышение эффективности наблюдений можно провести на численной модели спектрографа скрещенной дисперсии (Yushkin et al. 2016). Устойчивое развитие характеристик НЭС позволяет рассматривать спектрограф как средство наземной поддержки таких российских космических проектов, как «Спектр-РГ» (Schwope and eROSITA Collaboration 2019) (по источникам, относительно ярким в оптическом диапазоне) и «Спектр-УФ» (Sachkov et al. 2014). Кроме того, за счет увеличенного спектрального диапазона от 300 нм до 1000 нм НЭС может использоваться в различных программах исследования экзопланет и родительских звезд (Panchuk et al. 2020). Проблемы повышения доплеровской точности НЭС (Panchuk et al. 2019a; 2015b) с учетом преимуществ, предоставляемых адаптивной оптикой, мы планируем обсудить в отдельной работе.

6. АДАПТИВНАЯ ОПТИКА В СПЕКТРОСКОПИИ НА БТА

Задача частичной компенсации оптических aberrаций, вызываемых атмосферной турбулентностью и другими эффектами, может быть решена методами адаптивной оптики (АО). Толчком для развития адаптивной оптики послужили идеи Г. Бэбкока и В. П. Линника, выполненные в середине XX века (Babcock 1953; 1958, Linnik 1957). В первую очередь авторы обращали внимание на коррекцию наклонов волнового фронта, поэтому в категорию первых адаптивных систем можно зачислить как работы по автоматическому гидированию (Babcock 1948, Babcock et al. 1956), так и работу по бесщелевому спектрографу с интерференционными маркерами (Linnik 1959). В качестве управляемых оптических элементов рассматривались масляная пленка переменной толщины (Babcock 1953) или сегментированное зеркало (Linnik 1957). Первый отечественный



Рис. 1. Эшелле-спектр объекта CI Cam, полученный на НЭС БТА с резателем изображения (ширина среза $0''4$). Формат матрицы ПЗС 2048×2048 элементов, диапазон длин волн $4500\text{--}6000 \text{ \AA}$. Яркие детали: в верхней части кадра эмиссионная линия He I $\lambda = 5875.6 \text{ \AA}$, в нижней — эмиссия H β бальмеровской серии водорода, $\lambda = 4861.3 \text{ \AA}$. П-образная форма эмиссий интерпретирована Miroshnichenko et al. (2002).

телескоп АСТ-1200 с управляемым сегментированным зеркалом вступил в строй в 1978 г. (Basov et al. 1979), являясь частью отечественного проекта создания гигантского телескопа диаметром 25 м (Gvozdev et al. 1973). В 1977 г. под редакцией Д. Фрида опубликован тематический сборник статей по адаптивной оптике (Fried 1977); в отечественной литературе материалы сборника с дополнениями появились позже (Adaptivnaya optika 1980). Отметим важные монографии Hardy (1998), Roddier (1999), Shanin (2013), Taranenko and Shanin (1990).

Сегодня при создании любого широкоапертурного телескопа адаптивная система обязательно является составной частью проекта. Кроме того, реконструкции подвергаются телескопы, построенные до эпохи применения адаптивной оптики в астрономии. Например, многозеркальный телескоп ММТ (Beckers et al. 1981, Beckers and Woolf 1979), реконструированный затем в телескоп с тонким монолитным управляемым главным зеркалом (Martin

et al. 1998), в 2003 г. получил гибкое вторичное зеркало (Francois 2003).

При разработке 8-м телескопов VLT ESO⁶ был использован опыт создания и эксплуатации 3.5-м телескопа новой технологии — NTT ESO (Tarengi and Wilson 1989), первого телескопа с активным тонким зеркалом. На телескопах ESO в настоящее время используется около шести различных систем адаптивной оптики (Biasi et al. 2012) (см. также <https://www.eso.org/sci/facilities/develop/ao/sys.html>).

В данной статье мы не ставим цель упомянуть большинство существующих адаптивных систем, перечислим только некоторые. Адаптивные системы различной конструкции работают на 10-м телескопах Keck (Wizinowich et al. 2003), на 8-м телескопах Subaru (Guyon et al. 2014), Gemini (Esposito et al. 2010), LBT (Guerra et al. 2014),

⁶The VLT White Book (2010), https://www.eso.org/public/products/books/book_0004/



Рис. 2. Эшелле-спектр звезды спектрального класса G. Формат матрицы ПЗС 2048 × 2048 элементов, диапазон длин волн 2950–4450 Å. В средней части и выше центра кадра видны широкие абсорбции однократно ионизованного кальция (H Ca II $\lambda = 3968.5$ Å и K Ca II $\lambda = 3933.7$ Å). Высота каждого спектрального порядка определяется качеством изображения звезды и качеством гидирования.

на 5-м телескопе Hale (Dekany et al. 2011). Обзорный спектроскопический телескоп LAMOST (Cui 2009) оснащен системой активной оптики (Su and Cui 2009). Адаптивные системы работают и на нескольких телескопах среднего диаметра. Для большого телескопа с сегментированным зеркалом (GTC) разработаны адаптивные системы с использованием как естественной, так и искусственной опорной звезды (Reyes García-Talavera et al. 2016).

Продолжительное применение адаптивной оптики (например, в ESO соответствующие эксперименты и наблюдения продолжаются уже более 20 лет) привело к формированию новых астрофизических направлений, некоторые результаты которых можно найти в работе Davies and Kasper (2012). В ряде экспериментов достижения адаптивной оптики конкурируют с возможностями внеатмосферных наблюдений.

Строящийся 30-м телескоп (TMT) конструктивно основан на применении адаптивной оптики (Boyer and Ellerbroek 2016). В целом на

больших телескопах, оснащенных системами АО первого и второго поколений, наступает время экспериментов с увеличенным полем (Sivo et al. 2019). Высокая производительность экстремальных АО-систем приведет к улучшениям на длинах волн видимого диапазона, но только в пределах нескольких угловых секунд вокруг относительно ярких звезд. В настоящее время практически все телескопы, работающие с применением адаптивной оптики, используют два активных зеркала, методику фазового сопряжения, и управляются они стандартными компьютерными рабочими станциями. Это обеспечивает эффективную работу только в условиях достаточно хорошего астроклимата. БТА является одним из немногих больших телескопов, установленных в районе со средними характеристиками астроклимата. Перечисленные выше проблемы эксплуатации телескопа частично решены. Не исключено, что существуют и другие решения этих проблем. Например, квазистационарные аберрации, связанные с неидеальной работой разгрузок ГЗ или возникающие вследствие

температурных градиентов в объеме зеркала, можно изучать и корректировать при помощи квазистационарных и низкочастотных контуров адаптивной системы. В простейшем случае для компенсации аберраций, возникших в результате прохождения света через турбулентную среду, можно использовать деформируемое или сегментированное зеркало (Kolchinskii 1957, Roddier 1999). При этом турбулентность рассматривается как фазовый экран, параметры которого измеряются при помощи датчика волнового фронта, и на основании полученных данных вычисляются напряжения, которые необходимо подать на электроды корректора волнового фронта для компенсации аберраций фазового экрана. Достичь лучших результатов позволяет использование каскада адаптивных систем. При этом каждая адаптивная система используется в определенных целях: часть зеркал может служить для компенсации крупномасштабных медленно меняющихся аберраций, другие зеркала компенсируют мелкомасштабные аберрации, возникающие при прохождении через турбулентную атмосферу, кроме того, могут использоваться зеркала для стабилизации положения пучка. В среднем адаптивные системы дают выигрыш в угловом разрешении на один порядок, но для оценок эффективности спектроскопии высокого разрешения мы принимали более скромные величины.

7. ПРОГРАММА РАБОТ

Программа работ включает в себя разработку многоконтурной адаптивной оптической системы и адаптацию этой системы для режима спектроскопии высокого разрешения на БТА. В этом режиме опорной является звезда, наблюдаемая на спектрографе НЭС. Один из контуров будет отвечать за компенсацию квазистатических аберраций основного зеркала телескопа, возникающих как вследствие изменения температуры ГЗ, так и в результате эволюций телескопа (изменений азимута и зенитного расстояния). Другой контур будет отвечать за коррекцию общих наклонов излучения, приходящего от опорной звезды. Заключительный каскад адаптивных зеркал будет применяться для компенсации крупно- и мелкомасштабных аберраций, вызванных атмосферными явлениями.

На первом этапе планируется выполнить следующие работы подготовительного характера:

- Анализ архивов наблюдений 1976–1992 гг. (статистика числа ночей/часов, оценки качества изображений). Различие методов набора статистики.
- Сравнение качества изображений и скорости приземного ветра.

- Исследование колебаний телескопа в отсутствие приземного ветра и коррекции (к проблеме низкочастотных волн плотности в атмосфере, см. работы Kolchinskii (1957; 1965)).
- Анализ вклада аэрозольной компоненты в прозрачность. Связь характеристик турбулентности с параметром влагосодержания (см. работу Bergner et al. (1978)).
- Исследование астроклимата башни БТА. Выработка дальнейших рекомендаций по изоляции подкупольного пространства от тепловыделяющих помещений.
- Сравнение качества изображений на БТА и на 1-м телескопе при наблюдениях, выполняемых одновременно (в одну и ту же ночь).
- Анализ потерь наблюдательного времени по ограничениям на эксплуатацию БТА (ветер, перепады температуры). Анализ эффективности методов охлаждения.
- Высокочастотный мониторинг звездных изображений и зрачка телескопа (в фокусе Нэсмита уже начат).
- Связь температурных характеристик БТА и положения фокуса Нэсмита.
- Разработка схемы установки АО и необходимой реконструкции расположения спектрографов в Нэсмит-2. Численное моделирование спектрографа НЭС в режимах применения адаптивной оптики и перезаполнения зрачка спектрографа.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа многолетнего опыта эксплуатации телескопа БТА, спектроскопических наблюдений с высоким разрешением, разработки систем адаптивной оптики предложена программа первого этапа работ по увеличению эффективности спектроскопии звезд с высоким разрешением.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа В. Г. Клочковой и Ю. В. Шелдаковой выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 20-19-00597. Работа В. В. Власюка поддержана в рамках проекта № 13.1902.21.0039. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. A. Abramenko, A. V. Bagrov, Y. F. Nikitin, et al., *Astronomicheskij Tsirkulyar*, № 518, 4 (1969).
2. *Adaptivnaya optika*, Ed. by E. A. Vitrichenko (Mir, Moscow, 1980) [in Russian].
3. V. L. Afanasiev, Y. Y. Balega, M. A. Grudzinsky, et al., *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika televideniya*, № 3, 13 (1987).
4. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
5. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **107**, 73 (1948).
6. H. W. Babcock, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **65** (386), 229 (1953).
7. H. W. Babcock, B. H. Rule, and J. S. Fassero, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **68** (402), 256 (1956).
8. H. W. Babcock, *J. Opt. Soc. Am.* **48**, 500 (1958).
9. I. I. Balega, Y. Y. Balega, V. A. Vasyuk, and V. G. Orlov, *Bull. Special Astrophysics Observatory* **29**, 65 (1990).
10. N. G. Basov, N. A. Dimov, M. I. Gvozdev, et al., in *Proc. Symp. on Multiple Mirror Telescope at the Mount Hopkins Observatory, Arizona, 1979*, Ed. by T. C. Weekes, p. 185 (1979) (SAO Special Report, № 385).
11. J. M. Beckers, B. L. Ulich, R. R. Shannon, et al., in *Telescopes for the 1980s* (Annual Reviews, Inc., Palo Alto, USA, 1981), pp. 63–128.
12. J. M. Beckers and N. J. Woolf, *J. Opt. Soc. Am.* **69**, 1436 (1979).
13. I. K. Bergner, A. V. Krat, M. A. Pogodin, et al., *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **10**, 52 (1978).
14. R. Biasi, M. Andrighettoni, G. Angerer, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8447**, 84472G (2012).
15. I. S. Bowen, *Astrophys. J.* **116**, 1 (1952).
16. C. Boyer and B. Ellerbroek, *SPIE Conf. Proc.* **9909**, 990908 (2016).
17. J. L. Bufton, *Applied Optics* **12**, 1785 (1973).
18. X. Cui, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **41**, 473 (2009).
19. A. Danjon and A. Couder, *Sov. Astron.* **17**, 77 (1940).
20. S. P. Darchiya, *Ob astronomicheskome klimate SSSR* (Nauka, Moskva, 1985) [in Russian].
21. R. Davies and M. Kasper, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 305 (2012).
22. R. Dekany, J. Roberts, R. Burruss, et al., in *Proc. Second Int. Conf. on Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, Victoria, 2011*, <http://ao4e1t2.lesia.obspm.fr>, p. 4 (2011).
23. I. N. Efremov, S. B. Novikov, and P. V. Shcheglov, *Soviet Physics Uspekhi* **18**, pp. 151–160 (1975).
24. E. V. Emelianov, *Astrophysical Bulletin* **70** (3), 362 (2015).
25. E. V. Emelianov, Technical Report № 38, SAO RAS (Special Astrophysical Observatory RAS, 2018) [in Russian].
26. B. M. Ermakov, O. V. Krivosheev, Y. M. Mametjev, et al., Patent № RU 7 G01B9/06.
27. S. Esposito, A. Riccardi, F. Quirós-Pacheco, et al., *Applied Optics* **49** (31), G174 (2010).
28. P. W. Francois, B. Guido, L.-H. Michael, et al, *SPIE Conf. Proc.* **5169**, 17 (2003).
29. D. L. Fried, *J. Opt. Soc. Am.* **77**, (3), 207 (1977).
30. E. B. Gazhur, I. D. Najdenov, V. E. Panchuk, and E. I. Perepelitsin, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **23**, 105 (1986).
31. S. M. Gubkin, O. N. Emaleev, V. P. Lukin, et al., *Sov. Astron.* **27**, 456 (1983).
32. J. C. Guerra, A. Otarola, G. Brusa, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9148**, 914869 (2014).
33. A. E. Guryanov, M. A. Kallistratova, G. A. Karyukin, and I. V. Petenko, *Astronomicheskij Tsirkulyar*, № 1283, 3 (1983).
34. A. E. Gur'yanov, M. A. Kallistratova, A. S. Kutyrev, et al., *Astron. and Astrophys.* **262** (1), 373 (1992).
35. O. Guyon, Y. Hayano, M. Tamura, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9148**, 91481R (2014).
36. M. I. Gvozdev, N. A. Dimov, N. L. Zhernokleev, et al., *Soviet Physics Uspekhi* **16**, 943 (1973).
37. J. W. Hardy, *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (Oxford University Press, Oxford (1998).
38. A. A. Ivanov, V. E. Panchuk, and V. S. Shergin, Preprint № 155, SAO RAS (Special Astrophysical Observatory RAS, 2001), pp. 1–19 [in Russian].
39. M. A. Kallistratova, *Astronomicheskij Tsirkulyar*, № 1124, 4 (1980).
40. M. A. Kallistratova, G. A. Karyukin, I. V. Petenko, et al., *Astronomicheskij Tsirkulyar*, № 1388, 5 (1985).
41. T. A. Kartasheva and N. M. Chunakova, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **10**, 44 (1978).
42. V. G. Klochkova, in *Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences: 40 years: Anniversary edition*, Ed. by Yu. Yu. Balega (Nizhnij Arkhyz, 2006), pp. 107–148 [in Russian].
43. V. G. Klochkova, in *Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences: 50 years: Anniversary edition*, Ed. by V. V. Vlasjuk, (Nizhnij Arkhyz, 2018), pp. 144–165 [in Russian].
44. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Bull. Special Astrophysics Observatory* **33**, 3 (1991).
45. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Astrophysical Bulletin* **63** (4), 386 (2008).
46. I. G. Kolchinskii, *Sov. Astron.* **1**, 624 (1957).
47. I. G. Kolchinskii, *Optical Instability of the Earth's Atmosphere* (Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1966); Translated from the Russian *Opticheskaya neustoiichivost' zemnoi atmosfery*, Ed. by N. I. Kucherov (Nauka, Moskva–Leningrad, 1965).
48. I. M. Kopylov —half a century in astrophysics, Ed. by Yu. Yu. Balega and V. G. Klochkova (Special Astrophysical Observatory of the USSR Academy of Sciences, N. Arkhyz, 2003), pp. 17–36.

49. N. I. Kucherov, *Trudy Sektora astrobotaniki AN KazSSR* **1**, 73 (1953). [in Russian].
50. V. V. Leushin, N. F. Nelyubin, V. B. Nebelitskij, and S. B. Novikov, *Astronomicheskij Tsirkulyar*, № 866, 6 (1975).
51. V. P. Linnik, *Optics and Spectroscopy* **3**, 401 (1957).
52. V. P. Linnik, *Soviet Physics Doklady* **4**, 10 (1959).
53. M. V. Lobachev and L. E. Yakukhnova, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **9**, 99 (1977).
54. D. D. Maksutov, *Astronomicheskaja optika*, 2nd ed. (Leningrad, Nauka, 1979) [in Russian].
55. V. A. Malarev, *Optiko-Mekhanicheskaja Promyshlennost* **44**, 32 (1977).
56. H. M. Martin, R. G. Allen, J. R. P. Angel, et al., *SPIE Conf. Proc.* **3352**, pp. 194–204 (1998).
57. J. Meaburn, *Detection and Spectrometry of Faint Light*, (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland/Boston-USA, 1976) (Astrophysics and Space Sciences Library, **56**).
58. A. S. Miroschnichenko, V. G. Klochkova, K. S. Bjorkman, and V. E. Panchuk, *Astron. and Astrophys.* **390**, 627 (2002).
59. I. D. Naidenov, V. E. Panchuk, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **62** (3), 296 (2007).
60. V. V. Nosov, V. P. Lukin, E. V. Nosov, et al., *Optika Atmosfery i Okeana* **31** (8), pp. 616–627 (2018) [in Russian].
61. S. B. Novikov and P. V. Shcheglov, *Priroda* **11**, 36 (1973) [in Russian].
62. G. V. Novikova, *Astronomicheskii Tsirkulyar*, № 482, 9 (1968).
63. V. Panchuk, Y. Verich, V. Klochkova, et al., *ASP Conf. Ser.* **494**, 337 (2015a).
64. V. E. Panchuk, *Bull. Special Astrophysics Observatory* **44**, 65 (1998).
65. V. E. Panchuk and V. L. Afanas'ev, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 233 (2011).
66. V. E. Panchuk, Yu. Yu. Balega, V. G. Klochkova, and M. E. Sachkov, *Physics—Uspekhi*, **190**, 562 (2020).
67. V. E. Panchuk and V. G. Klochkova, in *Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences: 40 years: Anniversary edition*, Ed. by Yu. Yu. Balega (Nizhnij Arkhyz, 2006), pp. 32–67 [in Russian].
68. V. E. Panchuk and V. G. Klochkova, in *Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences: 50 years: Anniversary edition*, Ed. by V. V. Vlasyuk (Nizhnij Arkhyz, 2018), pp. 49–70 [in Russian].
69. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Naidenov, *J. Optical Technology* **61**, (9), 820 (2009).
70. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
71. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. E. Sachkov, *ASP Conf. Ser.* **518**, 213 (2019a).
72. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. E. Sachkov, and M. V. Yushkin, *Solar System Research* **49** (6), 420 (2015b).
73. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017a).
74. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., *Izv. Vuzov. Priborostroenie* **60** (1), pp. 53–62 (2017b). [in Russian].
75. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., *INASAN Science Reports* **4**, 122 (2019b).
76. V. E. Panchuk, I. D. Naidenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Special Astrophysics Observatory* **44**, 127 (1997).
77. M. Reyes García-Talavera, V. J. S. Béjar, J. C. López, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9909**, 99091C (2016).
78. F. Roddier, *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1999).
79. V. S. Rylov, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **2**, 121 (1970).
80. M. Sachkov, B. Shustov, and A. I. Gómez de Castro, *SPIE Conf. Proc.* **9144**, 914402 (2014).
81. M. Sarazin and F. Roddier, *Astron. and Astrophys.* **227** (1), 294 (1990).
82. A. Schwoppe and eROSITA Collab., in *Proc. Conf. on Compact White Dwarf Binaries, Yerevan, Armenia, 2019*, Ed. by G. H. Tovmassian and B. T. Gansicke, p. 49 (2019).
83. O. I. Shanin, *Adaptive optical tilt correction systems. Resonant adaptive optics* (Tekhnosfera, Moscow, 2013) [in Russian].
84. P. V. Shcheglov, *Earth and the Universe* **4**, 49 (1968). [in Russian].
85. P. V. Shcheglov, *Problems of optical astronomy* (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
86. G. Sivo, J. Blakeslee, J. Lotz, et al., *Bull. Amer. Astron. Soc.* **51**, 258 (2019).
87. L. I. Snezhko, *Sov. Astron.* **24**, 498 (1980a).
88. L. I. Snezhko, *Soviet Astronomy Letters* **6**, 349 (1980b).
89. L. I. Snezhko, *Bull. Special Astrophysics Observatory* **45**, 39 (1998).
90. L. I. Snezhko, https://www.sao.ru/hq/sekhta/40_SAO/Snezhko.htm (2006).
91. P. Spanò, D. Mégevand, J. M. Herreros, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7735**, 77350K (2010).
92. J. Stock and G. Keller, in *Stars and Stellar Systems, Vol. 1: Telescopes*, Ed. by G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst (Univ. Chicago Press, Chicago, 1960), p. 138.
93. D.-Q. Su and X.-Q. Cui, *Chinese J. Astronomy and Astrophysics* **4**, 1 (2009).
94. V. G. Taranenko and O. I. Shanin, *Adaptive Optics*, (Moscow Izdat. Radio i svyuzas, Moscow, 1990) [in Russian].
95. M. Tarenghi and R. N. Wilson, in *Proc. Meet. on Active telescope systems, Orlando, USA, 1989* (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, 1989), pp. 12–74.
96. A. Tokovinin, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114** (800), 1156 (2002a).
97. A. Tokovinin, *Applied Optics* **41** (6), 957 (2002b).
98. O. B. Vasilyev and N. F. Nelyubin, *Commun. Spec. Astrophys. Obs. RAS*, № 1 (1968).

99. O. B. Vasilyev and N. N. Jakovleva, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii* **1**, 100 (1970).
100. A. S. Vasilev, A. M. Evzerov, M. V. Lobachev, and I. V. Peisakhson, *Optiko-Mekhanicheskaiia Promyshlennost* **44**, 31 (1977).
101. O. B. Vasilyev and N. F. Nelubin, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii* **3**, 26 (1971).
102. O. B. Vasilyev and N. F. Nelubin, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii* **1**, 125 (1970a).
103. O. B. Vasilyev and N. F. Nelubin, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii* **2**, 185 (1970b).
104. S. M. Vilenchik, Y. B. Vyatskin, A. S. Najshul, and E. M. Neplokhov, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii* **4**, 192 (1972).
105. S. S. Vogt, S. L. Allen, B. C. Bigelow, et al., *SPIE Conf. Proc.* **2198**, 362 (1994).
106. Y. B. Vyatskin, A. S. Naishul, and E. M. Neplokhov, *Astrofizicheskie Issledovaniia. Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoi Observatorii* **3**, 20 (1971).
107. P. L. Wizinowich, D. Le Mignant, J. Stomski, et al., *SPIE Conf. Proc.* **4839**, pp.9–20 (2003).
108. M. V. Yakopov, *Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (Taganrog Radiotechnical Univ., Taganrog, 2006)* [in Russian].
109. M. V. Yushkin, T. A. Fatkhullin, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **71** (3), 343 (2016).

Improving the Efficiency of High-Resolution Spectroscopy on the 6-m Telescope Using Adaptive Optics Techniques

V. G. Klochkova¹, Yu. V. Sheldakova², V. V. Vlasyuk¹, and A. V. Kudryashov²

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

We briefly discuss the stages of the development of high-resolution spectroscopy methods used with the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, which are related to the problem considered. We consider the possibility of the multiple increase of the stellar spectroscopy efficiency as a result of application of state-of-the-art solutions in the field of adaptive optics. At the first stage, we plan to perform tasks involving the image control and correction based on the central star. This stage should be naturally started with a spectrograph with the highest spectral resolution where the relatively bright star studied can serve as the reference source in the method of adaptive optics.

Keywords: *techniques: spectroscopic—instrumentation: adaptive optics*