

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
(САО РАН)

УДК 520; 523.3; 523.9; 524
№ АААА-А18-118012590110-5



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
по проекту «ОБОЛОЧКИ ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ -
СВЯЗЬ С МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДОЙ» программы ОФН-17 «Межзвездная и
межгалактическая среда: активные и протяженные объекты»
(Заключительный)

Отчет принят на заседании ученого совета САО РАН 26 декабря 2017 года
(протокол №359).

Нижний Архыз
2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

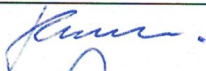
Руководитель темы



В.Е. Панчук (Введение, Заключение,
раздел 1)

гл.н.с., д.ф-м.н.

Исполнители темы

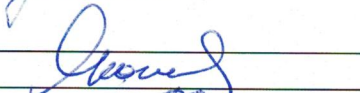



В.Г. Ключкова

Зав. лаб., д.ф-м.н.

ст.н.с, к.т.н.

ст. инж.

(раздел 1)
Г.В.Якопов (раздел 1)

Ю.Б.Верич (раздел 1)

Нормоконтролер



Ш.А.Узденова

РЕФЕРАТ

Отчет 20 с., 14 рис., 1 прил.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ, НАБЛЮДЕНИЯ С ВЫСОКИМ И СРЕДНИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Цель работы – создание и развитие средств долговременного спектроскопического мониторинга долгопериодических переменных звезд, спектроскопические наблюдения, анализ спектров.

В рамках темы разработаны приборы для спектроскопического мониторинга звезд типа Миры Кита (далее - мирид), с высоким и средним спектральным разрешением. Разработан и изготовлен подвешной эшелле спектрограф для телескопа диаметром 1 метр, спектральное разрешение $R=30000$. Разработан и изготовлен спектрофотометр для 70-см гида БГА, спектральное разрешение $R=3000$. Использование подвешного эшелле спектрографа существенно расширит возможности регулярных спектроскопических наблюдений как мирид, так и других переменных звезд на 1-метровом телескопе. Использование спектрофотометра гида БГА позволит проводить абсолютную калибровку распределения энергии в эмиссионно-абсорбционных спектрах. В спектрах мирид, по наблюдениям на БГА, обнаружены новые эффекты: движение вещества околозвездных оболочек и уширение эмиссионных линий бальмеровской серии водорода.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	7
1. Средства спектроскопического мониторинга мирид	7
1.1 Нэсмитовский эшелле спектрограф БТА.....	7
1.2. Эшельный спектрофотометр гида БТА.....	11
1.3. Эшельный спектрограф фокуса R-C телескопа диаметром 1 метр.....	13
2. Обнаружение деталей околозвездных оболочек мирид.....	15
3. Исследование эффектов искажения бальмеровского декремента	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	19
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	20
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БТА – Большой Телескоп Азимутальный с 6-м главным зеркалом

САО – Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН

НЭС – эшелльный спектрограф в фокусе Нэсмита 6-м телескопа

ОЗСП – Основной звездный спектрограф 6-м телескопа

матрица ПЗС – матрица приборов с зарядовой связью

R – безразмерная величина спектрального разрешения

λ – длина волны, в Å (ангстремах)

фокус R-C – фокус Ричи-Кретьена

САЕС — Кассегреновский эшелле спектрограф 1-м телескопа

AGB — асимптотическая ветвь гигантов

post-AGB — после асимптотической ветви гигантов

ВВЕДЕНИЕ

В течение двух десятилетий на БТА выполняется программа спектроскопии звезд, находящихся на эволюционной стадии post-AGB (Клочкова В.Г.). При переходе от стадии AGB к стадии post-AGB изменяется характер ядерной энергетики звезды и, следовательно, характер потери массы. На снимках туманностей, окружающих некоторые объекты post-AGB, видны следы потерь массы, произошедших на стадии AGB. В течение последних нескольких лет одним из развитий программы исследования post-AGB -звезд является спектроскопия мирид — долгопериодических пульсирующих звезд, находящихся на предшествующей эволюционной стадии — AGB. Упомянутые программы выполняются на спектрографе НЭС, разработанном в свое время В. Е. Панчуком. Наблюдая мириды на НЭС БТА (с величиной спектрального разрешения $R=70000$), мы впервые обнаружили отдельные слои оболочек (в шкале лучевых скоростей). Кроме того, наблюдаются изменения этих спектральных структур во времени.

Для более плотного покрытия спектрами кривых блеска избранных мирид, необходимо наблюдать чаще. Многопрограммный статус БТА не позволяет проводить регулярный мониторинг мирид. Поэтому было принято решение разработать эшелле спектрограф (CAES) для 1-метрового телескопа, что позволит более регулярно выполнять яркую часть программы наблюдений. К настоящему времени CAES изготовлен и испытан в лаборатории.

Существующая уже около 100 лет проблема формирования эмиссионных линий бальмеровской серии водорода в спектрах мирид, - до сих пор не решена. Для проверки моделей высвечивания необходимо знать потоки в эмиссионных линиях, а для определения абсолютных потоков необходимо выполнить спектрофотометрическую привязку, желательно одновременно со спектроскопией высокого разрешения. С этой целью разработан спектрофотометр, который планируется использовать на 70-см гиде БТА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Средства спектроскопического мониторинга мирид

Наблюдательные исследования долгопериодических переменных звезд – задача, неподходящая для характерного времени продолжительности гранта или программы. Это задача, неподходящая и для многопрограммного телескопа БТА, получение времени на котором, и составление расписания – подчиняются меняющимся правилам и плохо сформулированным принципам. Если сюда добавить еще и погодный фактор, станет ясно, что за подобную задачу браться вообще не следует. В основную часть программы наблюдений были включены мириды, незаходящие для места работы телескопов САО. Второй принцип – получать регулярно 2-3 ночи в полугодие, выполняется за счет условия, по которому ответственный за метод наблюдений должен получать наблюдательное время для поддержки и развития соответствующего прибора. Таким образом, за несколько лет удалось собрать коллекцию спектров мирид для разных фаз кривой изменения блеска.

1.1.Нэсмитовский эшелле спектрограф БТА

Программа спектроскопического мониторинга мирид ориентирована на использование НЭС БТА – прибора, реализующего спектральное разрешение, достаточное для работы с отдельными вращательными переходами молекулярных спектров. Использование телескопа большого диаметра позволяет получать спектры высокого разрешения у мирид, находящихся в минимуме блеска. Несомненным достоинством является использование крупноформатной матрицы ПЗС, заимствуемой на время наблюдений со спектрографа ОЗСП. На рис.1 и рис.2 показаны изображения спектров одного и того же объекта, полученных вблизи максимума и вблизи минимума блеска, соответственно.

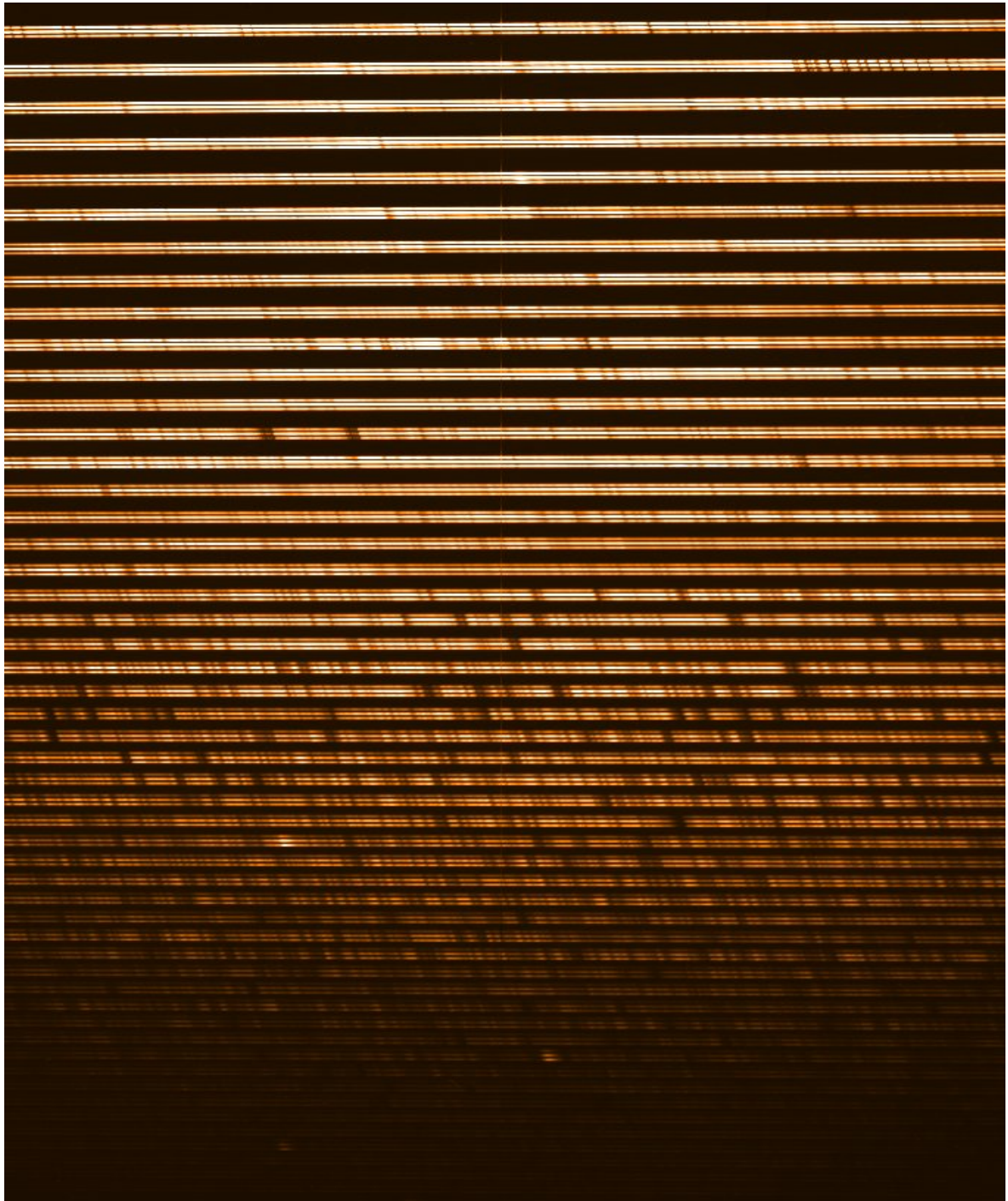


Рис.1. Спектр мириды вблизи максимума блеска. В нижней части кадра следует обратить внимание на ширину эмиссионных линий водорода.

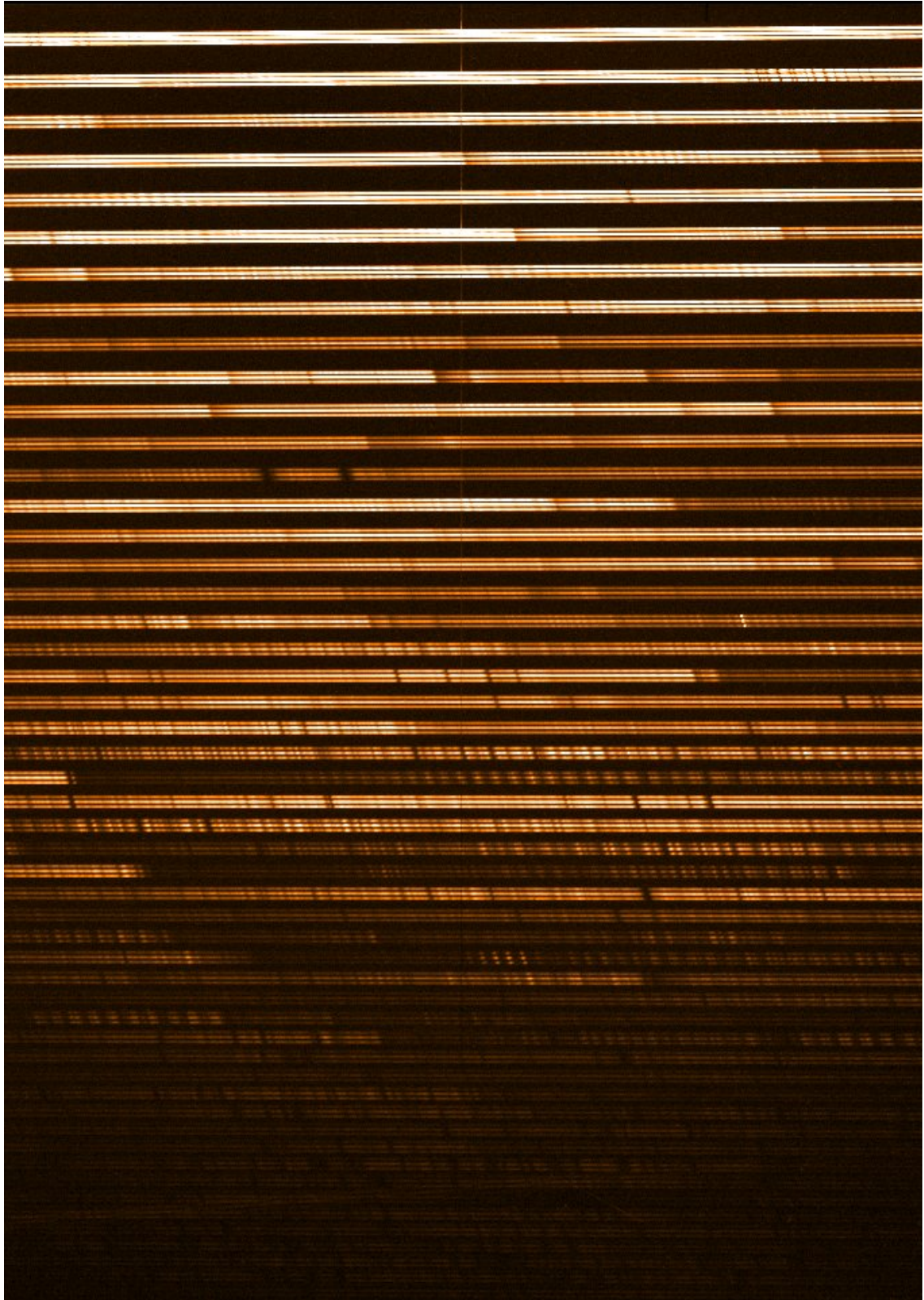


Рис.2. Спектр мириды вблизи минимума блеска. Видны канты систем колебательных полос и вращательная структура. Яркая линия, наблюдаемая в 18-м порядке сверху, – линия ионосферного происхождения $\lambda=5577\text{\AA}$, наличие этой линии свидетельствует о том, что объект действительно слабый (слабее 12-й величины).

1.2. Эшелельный спектрофотометр гида БГА

При наблюдениях с высоким разрешением на телескопе большого диаметра – не всё изображение звезды попадает в щель (или деккер) спектрографа. На рис.3 приведены изображения: звезды, искаженное эффектом атмосферной дисперсии (слева), и звезды, наблюдаемой в зените. Напомним, что в альт-азимутальной системе поле зрения вращается, так что при различных координатах объекта в горизонтальной системе – в щель будут попадать те или иные участки диспергированного изображения.

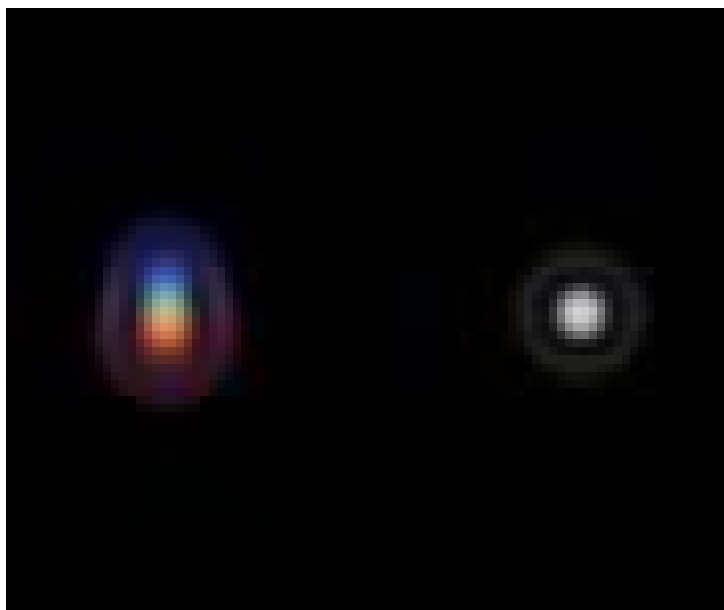


Рис.3. Численная модель изображения звезды в зените (справа), и на значительном зенитном расстоянии – слева.

Следовательно, на спектрах высокого разрешения мы можем измерять только интенсивность эмиссионной линии относительно близлежащего континуума (если таковой не искажен молекулярным поглощением). Для того, чтобы измерить относительные (и тем более, абсолютные) потоки в нескольких линиях бальмеровского спектра, необходимо, чтобы всё изображение звезды, искаженное атмосферной дисперсией, «провалилось» в деккер спектрографа. Естественно, что при этом спектральное разрешение понизится, минимум на порядок. Нами была предложена, разработана и изготовлена схема спектрофотометра, основанного на использовании оптики 70-сантиметрового общего гида БГА (рис.4-6).

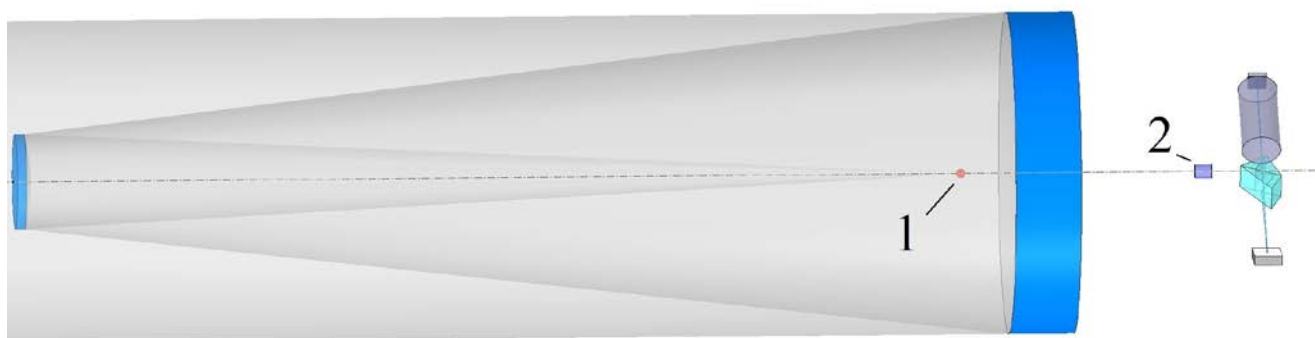


Рис.4. Оптика общего гйда БТА и эшельного спектрофотометра. Обозначения: 1 – положение фокуса двухзеркальной схемы, без линзового корректора, 2 – линзовый коллиматор спектрофотометра.

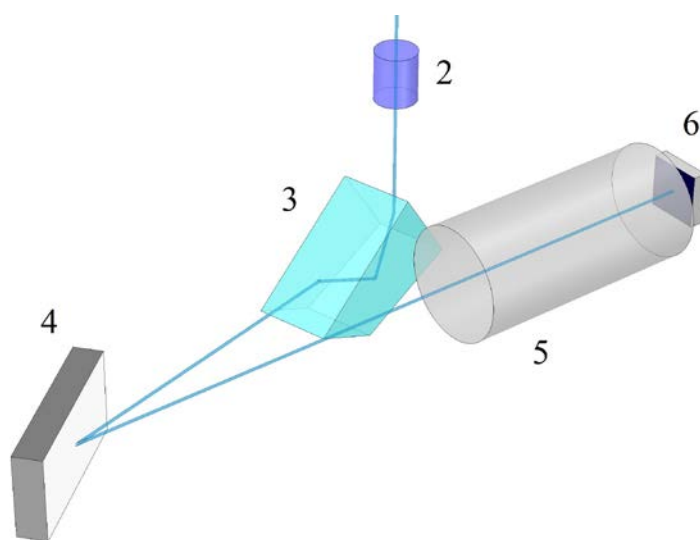


Рис.5. Оптика спектрофотометра. Обозначения: 2 – линзовый коллиматор, 3 – призма Аббе, 4 – эшелле, 5 – объектив камеры, 6 – площадка светоприемника.



Рис.6. Элементы конструкции спектрофотометра. Обозначения: 1 – верхняя часть трубы коллиматора, крепится к нижней части узла деккера, 2 – объектив коллиматора, 3 – входная грань призмы Аббе, 4 – выходная грань призмы Аббе, 5 – эшелле, 6 – объектив камеры, 7÷10 – канал подзора звезды изнутри спектрофотометра, 11 – фланец крепления ПЗС-приемника спектрофотометра.

Спектрофотометр планируется использовать в то время, когда на БТА выполняются наблюдения мирид с высоким спектральным разрешением. Для устранения рассогласования каналов в оптическую часть общего гида следует ввести автономный корректор положения звезды на деккере спектрофотометра, с последующей передачей гидирования в схеме подзора после деккера (позиции 8-10 на рис.6).

1.3. Эшелельный спектрограф фокуса R-C телескопа диаметром 1 метр

Для регулярных спектроскопических наблюдений мирид спроектирован и изготовлен эшелельный спектрограф CAES, предназначенный для использования в фокусе Кассегрена, или в фокусе Ричи-Кретьена телескопов диаметром 0.6 м и 1.0 м соответственно. Схема спектрографа приведена на рис.7, представление о конструктивном исполнении можно получить на рис.8.

Спектрограф CAES испытан в лаборатории. Система подзора щели испытана на 1-метровом телескопе.

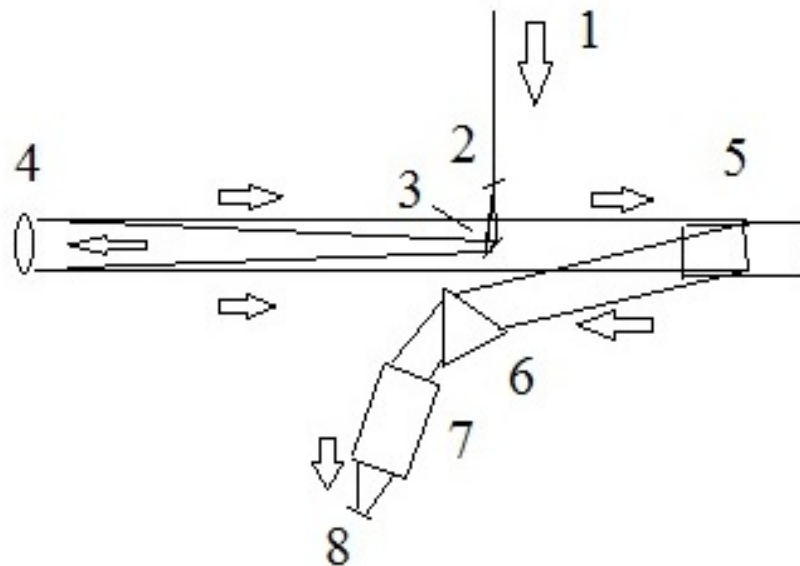


Рис.7. Схема CAES. Обозначения: 1 — ход лучей от вторичного зеркала телескопа, 2 — щель, 3 и 4 — зеркала коллиматора, 5 — эшелле, 6 — призма скрещенной дисперсии, 7 — объектив камеры, 8 — плоскость светоприемника.

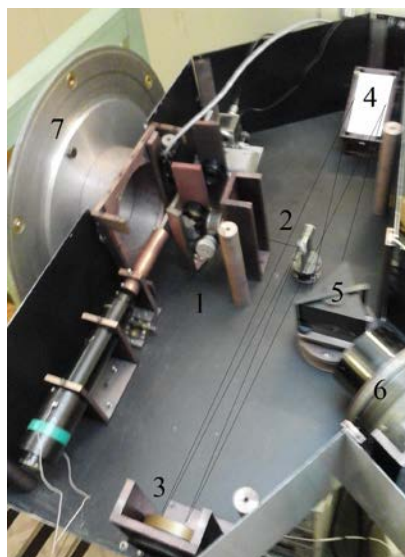


Рис.8. Основные оптические элементы спектрографа CAES. Обозначения: 1 - узел щели, 2 - узел плоского (диагонального) зеркала, 3 - узел коллиматора, 4 - узел эшелле, 5 - узел призмы, 6 - объектив камеры, 7 - фланец, посредством которого спектрограф крепится к посадочному фланцу телескопа. Тонкими линиями показан ход лучей "щель - диагональное зеркало - коллиматор - эшелле - призма - камера".

2. Обнаружение деталей околозвездных оболочек мирид

На рис.9 приведены фрагменты спектров мириды для двух фаз фотометрической кривой. Видно, что при ослабленном поглощении в колебательно-вращательной полосе (2;1) электронной системы γ' молекулы TiO (верхний спектр) в ядрах абсорбций натрия наблюдаем узкие детали. Ширина деталей меньше, чем ширина вращательных линий спектра TiO (видны на нижнем спектре, слева). Узкие линии натрия не могут формироваться в атмосфере, где формируются широкие линии окиси титана. Все детали в ядре одной линии NaI повторяются в ядре другой. Мы считаем, что обнаружены околозвездные оболочки, отошедшие от звезды на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB). На нижнем спектре профили резонансного дублета натрия похожи, но различия существуют. Различия объясняем дополнительным блендированием линиями молекулярного спектра, усиленными по сравнению с верхним спектром.

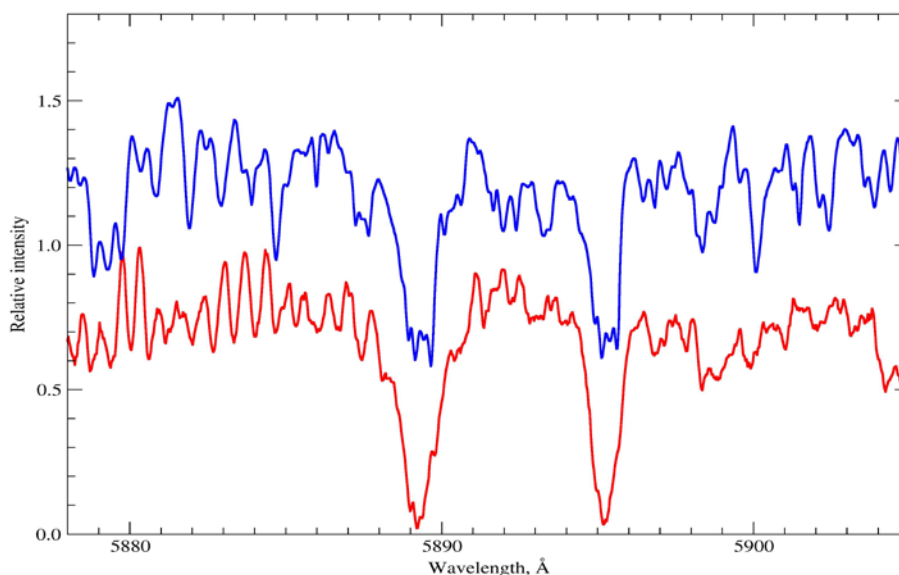


Рис.9. Область спектра в районе резонансного дублета нейтрального натрия для двух фаз кривой изменения блеска.

3. Исследование эффектов искажения бальмеровского декремента

Одним из объектов исследования является мирида R Cam, спектр которой классифицируется как S2.8e÷S8.7e. В атмосферах S-звезд отношение числа ядер углерода и кислорода близко к единице. В этом случае все атомы С и О связаны в молекуле СО (имеющей высокий потенциал диссоциации), на формирование других оксидов недостает кислорода, а на формирование углеродосодержащих молекул недостает свободного углерода. Таким образом, в атмосферах звезд класса S (определенной температуры) должно содержаться существенно меньше молекул окиси титана (TiO), чем у звезд класса М данной температуры, и практически не наблюдаются молекулы углерода (C_2), циана (CN), характерные для звезд класса С данной температуры. У звезд класса М линия Na в эмиссии практически не наблюдается, т.к. в данном спектральном интервале

излучение сильно поглощается молекулами TiO. У звезд класса C эмиссионная линия H-альфа видна, т.к. попадает в интервал между полосами молекулы циана. Но более высокие линии бальмеровской серии подавлены поглощением в полосах системы Свана молекулы C₂. Поэтому для задачи изучения поведения бальмеровского декремента ни M, ни C-звезды не являются оптимальными. Мы считаем атмосферы S-звезд наиболее прозрачными для данного интервала эффективных температур, что позволяет наблюдать динамику спектральных деталей в расширенном интервале фаз кривой изменения блеска.

На рис.10 приведены фотометрические разрезы спектрального порядка, содержащего эмиссионную линию H α . Спектры упорядочены не по фазам, а по мере усиления эмиссии. Видно, что максимум эмиссии приходится на минимум развития поглощения в молекулярной полосе. Поэтому основным фактором изменения интенсивности эмиссии предположительно можно считать изменение интенсивности молекулярной полосы.

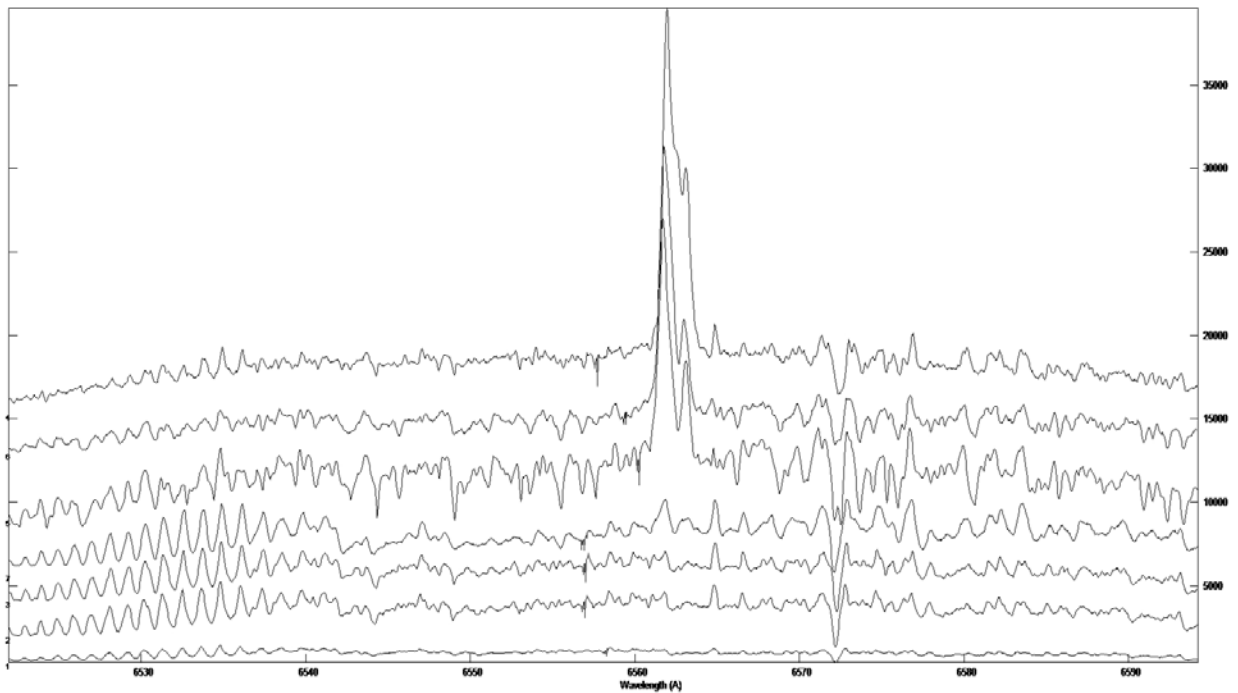


Рис.10. Мирида R Cam. Фотометрические разрезы спектрального порядка $\lambda\lambda$ 6522÷6595Å. Разрезы сдвинуты по ординате на одну и ту же величину. Частокол абсорбций слева внизу - вращательная структура колебательной полосы (5;3) электронной системы γ' молекулы TiO.

На рис.11-14 приведены по два фотометрических разреза для фрагментов (в области линий бальмеровской серии) спектров, полученных вблизи максимума (синим) и минимума (красным) блеска.

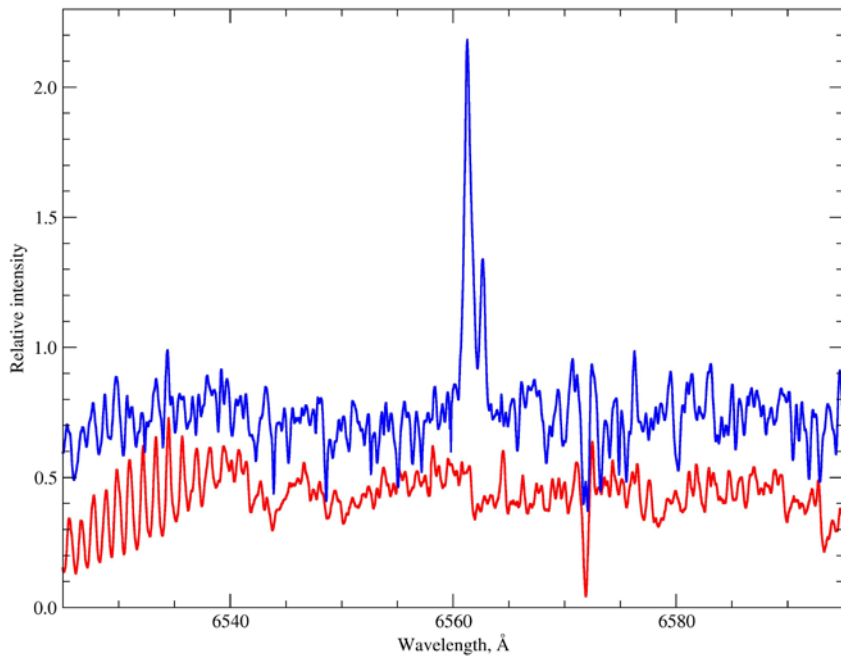


Рис.11. Область в окрестностях H α .

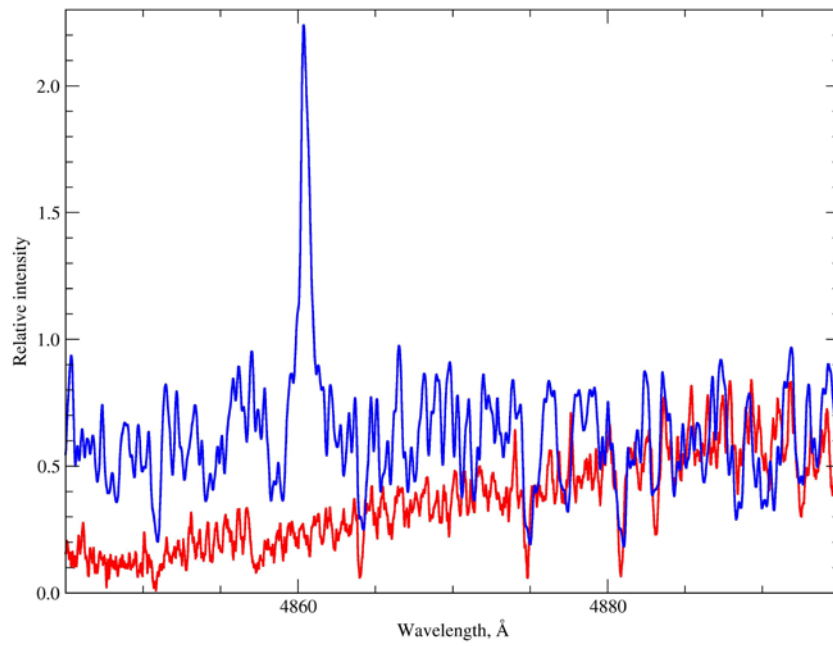


Рис.12. Область в окрестностях H β .

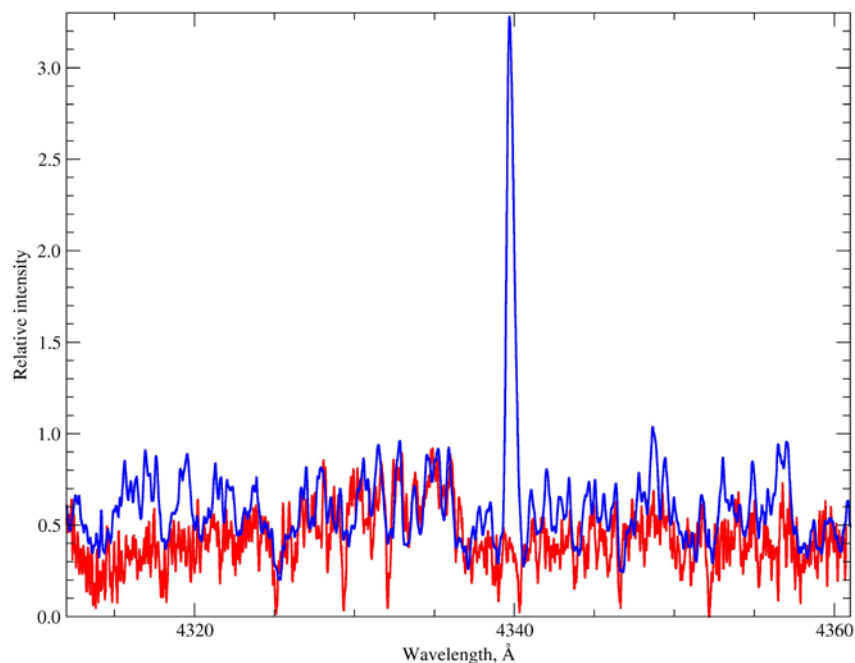


Рис.13. Область в окрестностях $H\gamma$.

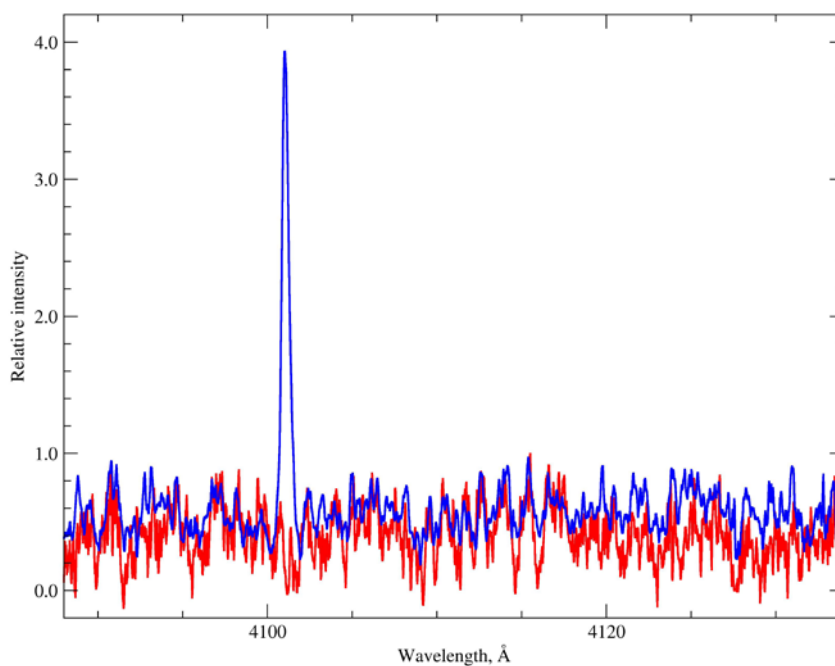


Рис.14. Область в окрестностях $H\delta$.

Из рис.11-14 можно сделать следующие выводы:

А) линии бальмеровской серии имеют заметную ширину. Эффектами штарковского уширения или рассеяния на электронах эту ширину не объяснить – для первого объяснения недостает (на несколько порядков) величины газового давления, во втором случае – недостает свободных

электронов (при низких температурах электроны поставляются только щелочными металлами). Ширину эмиссий можно объяснить только специфическими движениями облаков газа.

Б) Если в области $H\gamma$ еще просматривается влияние молекулярной полосы, которая может подавлять интенсивность эмиссии в минимуме блеска, то для линии $H\delta$ такое объяснение исключено. Наши расчеты коэффициента молекулярного поглощения показывают, что при переходе от области 4340\AA к области 4100\AA коэффициент поглощения на окиси титана снижается на два порядка. Следовательно, исчезновение эмиссионной линии $H\delta$ в минимуме блеска связано не с возрастанием молекулярного поглощения, а собственно с исчезновением эмиссии.

Приходим к выводу, что в минимуме блеска эмиссионный бальмеровский спектр не формируется. Анализ всей совокупности спектров позволяет уточнить, на каких фазах кривой изменения блеска эмиссия возникает, и на каких – исчезает. Сделать это можно по линии $H\delta$, в окрестностях которой молекулярное поглощение несущественное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен многолетний спектроскопический мониторинг избранных мирид. Эти объекты слабые, и ранее спектроскопически не исследованы. Обнаружены проявления околозвездных оболочек, сбрасываемых на стадии асимптотической ветви гигантов. Линии, формирующиеся в оболочках, намного уже линий, формирующихся в атмосферах. Наблюдаются изменения формы этих линий со временем.

Разработан комплекс спектральных приборов, позволяющих уменьшить скважность спектроскопического мониторинга и провести абсолютную спектрофотометрию бальмеровского декремента. Все результаты являются новыми. Реализованные технические решения представляют патентную ценность, поэтому не опубликованы до завершения патентного поиска.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ
МЕРОПРИЯТИЯ

1. Panchuk V.E., Verich Y.B., Klochkova V.G., Sachkov M.E., Yakopov G.V., Emelianov E.V., Yushkin M.V. Cassegrain Echelle Spectrograph // Stars: from Collapse to Collapse: Proc. of a Conf. held at Spec. Astrophys. Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 3-7 Oct. 2016 / Balega Yu. Yu. et al. (ed.). — San Francisco, 2017. — P. 559-561. — (ASP Conf. Ser.; Vol. 510).;