

УДК 524.3:520.22-33/54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКИ И ЭВОЛЮЦИИ ЗВЁЗД НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ БТА

© 2012 В. Г. Клочкова\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 января 2012 года; принята в печать 5 сентября 2012 года

С 1978 г. на 6-метровом телескопе БТА выполнен большой объем наблюдений звёзд, как с использованием штатной аппаратуры, так и с помощью вновь созданных приборов. В обзоре представлена ретроспектива результатов выполненных на БТА избранных программ, направленных на изучение физики и эволюции одиночных и кратных звёзд различных масс.

Ключевые слова: *звёзды: эволюция—звёзды: двойные—звёзды: двойные: тесные—звёзды: двойные: симбиотические—звёзды: AGB и пост-AGB—звёзды: с эмиссионными линиями, Be—звёзды: сверхгиганты—звёзды: переменные—звёзды: переменные: S Doradus—звёзды: переменные: цефеиды—звёзды: химически пекулярные—звёзды: магнитное поле—Галактика: химический состав—Галактика: шаровые скопления—астрономические базы данных: атласы*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема эволюции звезд является одной из фундаментальных в астрофизике. Наиболее существенные, теоретические и экспериментальные, результаты в понимании эволюции звезд разных масс были получены только в последние 50 лет. Известно, что еще в середине прошлого XX-го века неверно толковалось даже положение звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела: принято было считать, что в ходе эволюции звезда интенсивно теряет массу и ее положение на диаграмме смещается вдоль линии главной последовательности (ГП) к менее массивным звездам. 60–70-е годы были временем успешных космических проектов, которые поставили информацию о небесных объектах в рентгеновском, гамма- и УФ-диапазонах (UHURU, IUE, обсерватории “Коперник” и “Эйнштейн”) и тем самым обеспечили бум в исследованиях физики и эволюции звезд. В 70–80-е годы были опубликованы пионерские теоретические работы Ибена с эволюционными треками для маломассивных [1] и массивных [2] звезд, затем расчеты Пачинского [3, 4].

Естественно, что с вводом в практику наблюдений крупнейшего на планете 6-метрового телескопа БТА изучение звездной эволюции в 70–80-е годы явилось приоритетной тематикой. Если посмотреть расписания наблюдений на БТА в первое десятилетие после его ввода в штатную эксплуатацию, то видно, что значительная доля времени выделялась на следующие программы: спектроскопия

оптических компонентов рентгеновских двойных, магнитные поля звезд, спектроскопия кандидатов в звезды типа S Dog и сверхгигантов в поле Галактики, спектроскопия сверхгигантов в составе рассеянных скоплений, спектроскопия химически пекулярных звезд в группировках разного возраста, спектроскопия катаклизмических переменных, спекл-интерферометрия двойных и кратных систем.

подавляющая часть программ по звездной тематике на БТА были новыми. Необходимо подчеркнуть, что научным руководителем большинства из них был доктор физ.-мат. наук И. М. Копылов, первый директор САО (1966–1985 гг.). Малая доля первых программ на БТА была продолжением исследований, проводимых ранее на других телескопах и перенесенными их авторами на большой телескоп для привлечения слабых объектов и для получения более качественных наблюдательных данных. К примеру, одной из таких долговременных задач является спектроскопия массивных сверхгигантов, в 70-е годы наблюдения по этой программе проводились Е. Л. Ченцовым на 2.6-метровом телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории.

Не имея возможности здесь подробно представить методы наблюдений, лишь перечислим основные приборы и приведем соответствующие литературные ссылки. Период спектроскопии на Основном звездном спектрографе (ОЗСП) [5] с регистрацией на фотопластинки занял около 10 лет. Для изучения слабых звезд (до  $19^m$ ) использовался спектрограф первичного фокуса СП 160 [6]

\*E-mail: valenta@sao.ru

с малозумящим ЭОП М9ЩВ [7]. Этот вариант наблюдений обеспечивал спектральное разрешение  $2\text{--}4 \text{ \AA}$  в одновременно регистрируемой области  $1000\text{--}2000 \text{ \AA}$ . С 1985 г. сотрудникам Отдела физики и эволюции звезд САО пришлось заняться разработкой спектральной аппаратуры среднего и высокого разрешения, ориентированной на использование фотоэлектрических приемников излучения. В звездной спектроскопии недолгий период использовался эшелле-спектрограф умеренного разрешения ЗЕБРА ( $R = 3000$ ) с двумерным счетчиком фотонов [8], что позволяло регистрировать спектр в диапазоне  $3200\text{--}7000 \text{ \AA}$  звезд до  $18^m$  величины включительно. Переход в 1990 г. на созданные сотрудниками Лаборатории астроспектроскопии САО эшелльные спектрографы [9–12], оснащенные матрицами ПЗС, серьезно расширил возможности по выполнению научных программ, начатых фотографическими методами, и позволил приступить к наблюдениям объектов, недоступных ранее.

В 80-е годы прошлого века подавляющая доля наблюдений слабых звезд выполнялась со сканером, который представлял собой спектрограф СП124 [13], оснащенный 1000-канальным телевизионным счетчиком фотонов [14, 15]. Сканер обеспечивал спектроскопию объектов с умеренным разрешением в широком диапазоне длин волн. С начала 2000 г. наблюдения слабых объектов, в частности звезд в других галактиках, выполняются с многорежимным прибором SCORPIO, разработанным в САО В. Л. Афанасьевым [16].

Ниже рассмотрим основные результаты, полученные на БТА по избранным программам.

## 2. ДВОЙНЫЕ И ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Изучение двойных (и кратных) звезд представляет особый интерес, поскольку значительная доля (не менее половины) звезд в Галактике входят в состав кратных систем. Формирование и последующая эволюция звезды в составе тесной двойной системы (ТДС) существенно отличается от этих процессов для одиночной звезды. На БТА исследовались несколько типов ТДС, которые мы рассмотрим на примерах конкретных объектов.

### 2.1. Оптический компонент рентгеновского источника Cyg X-1

Мы уже отмечали, что в 80-е годы XX-го века астрономам стали доступны результаты внеатмосферных экспериментов в УФ и рентгеновском диапазонах длин волн. Естественно, что одной из основных программ по “звездной” тематике

на крупнейших оптических телескопах был спектральный мониторинг оптических компонентов рентгеновских источников и газовых потоков в ТДС. Наиболее популярным объектом стал массивный сверхгигант HDE 226868 в системе Cyg X-1. Эта система включает горячий сверхгигант (звездная величина  $V = 8^m9$ ) и невидимый компонент массой более  $6 M_{\odot}$ .

Целью группы И. М. Копылова было определение фундаментальных параметров сверхгиганта в системе Cyg X-1. В рамках этой задачи на ОЗСП БТА была получена обширная коллекция спектрограмм, проведено отождествление спектральных линий, получены массивы данных по лучевым скоростям, измеренным по различным спектральным деталям. Получены следующие основные результаты: спектральный класс сверхгиганта O9.7 Iab, его масса  $M = 37.6 M_{\odot}$ , темп потери массы  $\dot{M} = 1.5 \div 2 \times 10^{-6} M_{\odot}$  [17, 18]. Помимо параметров сверхгиганта, на основе анализа временного изменения линии He II  $\lambda 4686 \text{ \AA}$  была сделана оценка массы релятивистской звезды — более  $6 M_{\odot}$  [17]. Современные оценки массы невидимого компонента находятся в интервале  $8.7 \div 29 M_{\odot}$  (см. [19] и ссылки в этой работе).

### 2.2. Микровязар SS 433 и родственные объекты

Объект SS 433, открытый в 1978 г. [20], отождествлен с массивной тесной двойной системой V1343 Aql с орбитальным периодом  $P \approx 13^d$ . Объект SS 433 известен прежде всего тем, что его оптический спектр содержит стационарные эмиссии H, He с профилями типа P Cyg и их сильно смещенные компоненты. Самая мощная линия в спектре — эмиссия H $\alpha$ , ее эквивалентная ширина  $W$  может достигать  $1000 \text{ \AA}$ . Брюс Маргон с соавторами [21, 22] уже в статьях 1979 г., по результатам спектроскопии на 4-м телескопе обсерватории Китт Пик, обнаружили основную пекулярность спектра — наличие сильно (до  $1000 \text{ \AA}$ ) смещенных эмиссий H I, He I и др., формирующихся в релятивистских струях. В выступлении на заседании Американского астрономического общества эти авторы доложили об определении орбитального ( $P = 13^d1$ ) и прецессионного ( $P = 164^d0$ ) периодов в системе SS 433 и скорости истечения вещества в джетах  $0.27c$  [23].

Довольно скоро стало понятно, что SS 433 — редкий случай ТДС: в системе наблюдается постоянная аккреция вещества в сверхкритическом режиме (приблизительно  $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$  [24]) на релятивистский компонент системы, вследствие чего образуются диск и два очень узких коллимированных джета, содержащие холодный газ  $T \approx 10^4 \text{ K}$ ,

движущийся с релятивистскими скоростями, около  $79\,000 \text{ км/с} = 0.26c$ . Помимо этих рекордных скоростей истечения газа, SS 433 демонстрирует целый набор рекордов: высокое покраснение,  $A_v \approx 8^m$ , высокая светимость  $L_{\text{bol}} = 10^{40} \text{ эрг/с}$ , большой избыток ИК излучения при максимуме излучения в УФ-диапазоне и т.д. (см. обзор [25] и соответствующие ссылки).

В 80-е годы XX века одной из самых крупных программ на БТА был мониторинг SS 433 с 1000-канальным телевизионным спектрофотометром (сканер),  $\Delta\lambda \approx 4 \text{ \AA}$ . Руководитель программы — И. М. Копылов [26, 27]. Основной задачей было изучение переменности спектральных деталей с фазой орбитального  $P \approx 13^d$ , прецессионного  $P \approx 162^d$  и нутационного  $P \approx 6^d$  периодов. Изучено поведение во времени параметров ( $W$ ,  $V_r$ ) релятивистских линий H I, He I. Сделаны оценки параметров струй. Авторы высказали предположение, что причиной обнаруженной ими переменности параметров компонентов релятивистских линий является переменность темпа потери вещества в струях. Сделана оценка скважности газа в струях  $q = 10^{-4} \div 3 \times 10^{-3}$ , длины струи и угла ее раствора  $\theta \approx 5^\circ$ .

В последующие годы полученный И. М. Копыловым с соавторами обширный спектральный материал был использован и расширен С. Н. Фабрикой с соавторами для исследования орбитальной и прецессионной переменности [28], структуры аккреционного диска, а также геометрических и кинематических параметров струй [29].

За прошедшие многолетние наблюдения SS 433 многое стало понятно в этой системе, но не решен окончательно основной вопрос — какова все же природа и масса компактного объекта в системе. Современные оценки, основанные на спектральных данных телескопов Gemini и Subaru [30, 31], дают следующие *верхние* пределы на массу звезды-донора  $M_{\text{opt}} = 12.4 M_\odot$ , компактного объекта  $M_X = 4.3 \pm 1.5 M_\odot$ , что позволяет предполагать присутствие в системе маломассивной черной дыры. Как подчеркивают авторы работы [32], объект SS 433, помимо уже известных уникальных свойств, демонстрирует и еще одно, выявленное в процессе 28-летних наблюдений, — постоянство сложной кинематической картины.

С 1999 г. объект SS 433 относят к малочисленному семейству микроквazarов и считают прототипом этого семейства. Микроквazarы — рентгеновские двойные с компактным компаньоном (нейтронная звезда или черная дыра звездной массы) и релятивистскими джетами, демонстрирующие в меньшем масштабе морфологию, свойственную квазарам. Энергетика процессов на много порядков ниже той, что присуща истинным квазарам.

В последнее десятилетие на БТА выполняется спектроскопия объектов, связанных с так называемыми ультраяркими рентгеновскими источниками (ULX). Светимость этих объектов не вполне ясной природы близка к пределу Эддингтона для черной дыры звездной массы (примерно  $10^{39} \text{ эрг/с}$ , что на 2–3 порядка выше рентгеновской светимости SS 433). На мультиспектральном спектрографе MPFS [33] и фокальном редукторе SCORPIO [16] получены спектры туманностей, ассоциированных с ULX [34]. Изучение физических условий в туманностях позволяет сделать выводы и о свойствах центральной звезды. Анализ совокупности данных для этих объектов указывает на то, что часть ULX могут быть объектами, родственными SS 433.

### 2.3. Симбиотические звезды

Симбиотические звезды выделены Мерриллом [35] как объекты, спектры которых являются комбинацией двух спектров: спектра высокого возбуждения, формирующегося в горячей туманности, и спектра холодной звезды. В настоящее время симбиотические звезды относят к тесным взаимодействующим двойным системам, в составе которых имеется теряющий вещество холодный гигант и горячий компактный объект, ионизирующий вещество ветровой компоненты.

SN Cyg, являющаяся прототипом этой разновидности двойных систем, долгое время считалась одиночной звездой и даже являлась стандартом для спектрального класса M6 III в системе Моргана-Кинана. Позже, после вспышки в 1963 г. [36] стало понятно, что SN Cyg — это двойная звезда, включающая холодный гигант M7 и аккрецирующий белый карлик. Более детальные сведения об объекте см. в работе [37]. Траектория сложной кривой блеска системы SN Cyg указывает на вероятные пульсации гиганта и активность горячего компонента.

Осенью 2004 г. на БТА были получены спеклинтерферометрические изображения системы SN Cyg с дифракционным пределом телескопа ( $0''.02$ ), в результате чего система была впервые разрешена на компоненты. Детали наблюдений представлены в работе [38]. Расстояние между компонентами составляет  $\rho = 42 \pm 2 \text{ mas}$ . Данная оценка расстояния хорошо согласуется с параметрами спектроскопической орбиты.

Симбиотические звезды не были популярными объектами исследований на БТА. Помимо спеклинтерферометрических данных для SN Cyg, были проведены спектральные наблюдения симбиотической системы MWC 560, включающей холодный гигант M4–6 III и горячий карлик B5–A0. Спектры получены с эшелльным спектрографом “Рысь” [10] для изготовления детального спектрального атласа [39].

### 2.4. Бариевые звезды

Среди двойных систем известна популяция красных гигантов с пекулярным химическим составом, называемых бариевыми звездами (Ba-звезды). Атмосферы этих гигантов обогащены углеродом и тяжелыми металлами, синтезированными за счет *s*-процесса. Очевидно, что ключом к пониманию особенностей химсостава является двойственность. В 80-е годы на ОЗСП была выполнена спектроскопия нескольких десятков Ba-звезд, методом моделей атмосфер определены их фундаментальные параметры и детальный химический состав от Li до Ba. Эти данные позволили уточнить эволюционный статус объектов. Сделан вывод об экспоненциальном распределении нейтронных экспозиций, который характерен для AGB-звезд, и об аккреции в двойной системе как основном механизме формирования пекулярного химсостава [40, 41].

Позже аналогичная программа исследования групп пекулярных гигантов базировалась на наблюдениях со спектрографом НЭС. Химический состав классических [42] и умеренных [43] Ba-звезд изучен в сопоставлении с таковым у нормальных красных гигантов. Высокая точность спектральных данных, использование параллаксов Hipparcos для определения светимости звезды обеспечили высокую точность параметров и содержаний.

Центральным результатом является вывод о том, что только двойственность или масса не определяют особенности распространенности химических элементов в атмосферах красных гигантов; величина избытков тяжелых металлов *s*-процесса зависит от сочетания параметров (масса, металличность и других параметров двойной системы) [44].

### 2.5. Поиск двойных в окрестности Солнца

Изучение кратных непроэволюционировавших звезд дает сведения для восстановления процессов звездообразования и последующей эволюции химического состава галактических населений. На БТА систематический поиск кратных систем ведется методом спекл-интерферометрии, предложенным в 70-е годы Лабейри [45]. Суть метода составляет регистрация коротких изображений (сотые доли секунды) объекта в узких фильтрах. Конструкция спекл-интерферометра БТА за несколько десятилетий изменялась от первой версии с регистрацией на кинокамеру до современного устройства с интерференционными фильтрами и регистрацией на ПЗС с электронным усилением сигнала [46]. Изображение звезды записывается 20 раз в секунду, из последующего анализа среднего спектра мощности серии изображений звезды

определяются относительные положения компонентов систем и их относительный блеск.

Примером исследований методом спекл-интерферометрии может служить программа наблюдений маломассивных кратных систем из каталога Hipparcos, проведенная на БТА в последнее десятилетие [47, 48]. На основе полученных в ходе многолетней программы данных измерены взаимные расстояния и разность блеска компонентов, а для 12 двойных систем с быстрым орбитальным движением вычислены параметры орбит, массы и светимости компонентов.

Одной из последних завершенных программ на БТА был поиск кратных систем среди малометаллических звезд в поле Галактики. Актуальность задачи обусловлена тем, что среди малометаллических звезд число известных двойных (и тем более кратных) систем ограничено. Выполнены спекл-интерферометрические наблюдения свыше 200 субкарликов с металличностью  $[Fe/H] < -1$ . Основные результаты, полученные по этой программе опубликованы в работе [49]. Один из выводов работы — найденное отношение одиночных, двойных и тройных систем: 147:64:9. Кроме того, разделена и одна четверная система, G 89-14 [50], все компоненты которой имеют массы существенно ниже массы Солнца.

## 3. ЗВЕЗДЫ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ

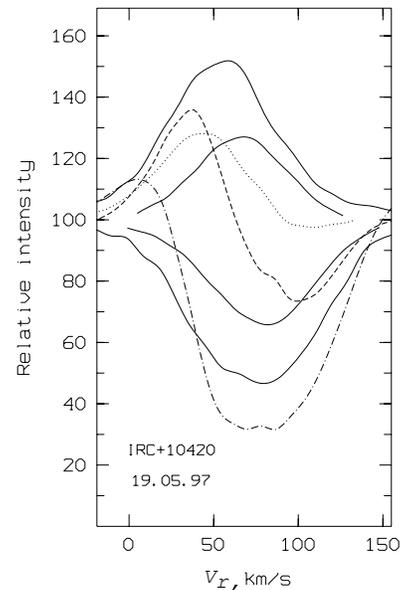
Верхняя часть диаграммы Герцшпрунга-Рессела заселена разнообразными проэволюционировавшими звездами: звезды типа S Dog (LBV), являющиеся наиболее массивными проэволюционировавшими звездами вблизи эддингтоновского предела стабильности; желтые и красные гипергиганты; звезды с V[e]-феноменом; пекулярные сверхгиганты с большими ИК избытками, связанные с протопланетарными туманностями (PPN), а также непроклассифицированные объекты с близкими признаками. Все вышеперечисленные группы представляют плохо изученные стадии эволюции массивных (и относительно массивных) звезд и, как правило, окружены несферическими (зачастую биполярными) околос звездными структурами с джетами. Для определения фундаментальных параметров звезд, их химического состава, структуры и кинематики околос звездной среды необходимы спектроскопия и спектрополяриметрия высокого разрешения с высоким отношением сигнала к шуму в широком спектральном диапазоне. Одним из основных направлений исследования является поиск проявлений вероятной двойственности объектов.

Сложной и нерешенной проблемой для звезд высокой светимости является спектральная мимикрия, заключающаяся в совпадении спектральных характеристик красных сверхгигантов, потомков массивных звезд с исходными массами более  $8-10 M_{\odot}$ , с одной стороны, и post-AGB звезд с исходными массами в интервале  $3-8 M_{\odot}$ , с другой. Проблема спектральной мимикрии была сформулирована в результате предшествующего многолетнего исследования звезд высокой светимости в диапазоне малых и средних масс. Большинство этих редких объектов сильно удалены от нас и, следовательно, слабы. Кроме того, их излучение значительно поглощается веществом в околозвездных оболочках. Таким образом, чтобы определить фундаментальные параметры объектов, исследовать их структуру, историю и механизмы потери вещества, требуются высококачественные наблюдения различными способами на самых крупных телескопах. Невозможно охватить все результаты, полученные на БТА для звезд высокой светимости, поэтому ниже остановимся на результатах для нескольких репрезентативных объектов.

### 3.1. Мониторинг желтого гипергиганта V1302 Aql = IRC +10420

Желтые гипергиганты, встречающиеся крайне редко из-за кратковременности данной стадии эволюции, считаются вероятными предшественниками сверхновых типа SN IIp (или SN Ib, c) в зависимости от исходной массы и темпа ее потери. Несмотря на малочисленность, массивные звезды, благодаря высокому темпу потери вещества, являются поставщиками в межзвездную среду существенной доли пыли и вещества, переработанного в ходе эволюции.

Желтый гипергигант V1302 Aql, отождествляемый с ярчайшим ИК источником IRC +10420, является одним из самых загадочных звездобразных объектов северного неба. Его уникальные свойства заслуживают того, чтобы остановиться на них подробнее. В 1892 г., т.е. за три года до появления в нем эмиссий, оптический спектр IRC +10420 напоминал спектр  $\eta$  Carinae (cF5). Интерес к объекту был подогрев обнаружением мазерного излучения OH — до этого наиболее горячие мазерные источники классифицировались как звезды спектрального класса M3. Между 1972 и 1986 гг. у объекта развилась сильная эмиссия в  $H\alpha$  [51, 52]. Спектральный мониторинг V1302 Aql выполняется на БТА с начала 90-х годов прошлого века [53, 54]. В оптическом спектре V1302 Aql преобладают эмиссионные и абсорбционные линии ионов металлов Fe II, Ti II, Sc II, Cr II, эмиссионные линии Fe I и абсорбционные линии Ni I, O I и Si II. Некоторые эмиссионные детали отождествляются



**Рис. 1.** Профили линий в спектре V1302 Aql [55]. Сверху вниз: эмиссии Fe II (40)  $\lambda$  6432 Å и [Fe II] 14F  $\lambda$  7155 Å; эмиссионно-абсорбционные Fe II (74)  $\lambda$  6456 Å (штриховая линия), Fe II (74)  $\lambda$  6416 Å (пунктирная) и Fe II (42)  $\lambda$  5169 Å (штрихпунктирная); абсорбции Ni I (3)  $\lambda$  7468 Å и Si II (2)  $\lambda$  6347 Å. Здесь и на последующих рисунках уровень континуума принят за 100.

с запрещенными линиями [Fe II], [Ca II] и [O I]. Профили линий ионов металлов очень разнообразны, от практически симметричных эмиссий, до обратных профилей типа P Cyg и абсорбционных профилей с двумя эмиссионными компонентами (см. Рис. 1). Линии Ni I, O I и Si II имеют почти симметричные абсорбционные профили (средние части профилей этих линий смещены в среднем на 5 км/с в красную сторону относительно положения минимумов профилей). Водородные линии  $H\alpha$  и  $H\beta$  имеют сложный двухпиковый профиль, интенсивность в обращенных друг к другу крыльях эмиссионных компонентов падает быстрее, чем во внешних крыльях, следовательно, эти компоненты разделены абсорбцией. Из сравнения профилей водородных линий в оптическом спектре V1302 Aql в разные моменты наблюдений следует, что с течением времени интенсивности обеих компонент линии  $H\alpha$  растут монотонно; интенсивность красносмещенной компоненты линии  $H\beta$  также растет монотонно, в то время как интенсивность синесмещенной компоненты колеблется около среднего значения [54].

Анализ массивов лучевых скоростей, измеренных по линиям различной природы, позволил обнаружить корреляцию между силами осцилляторов

и скоростями как эмиссионных, так и абсорбционных линий, что может быть следствием различной оптической толщины оболочки в разных линиях [54]. Оценки системной скорости IRC +10420 были выполнены по наблюдениям линий мазерного излучения молекулы OH [56] и профилям линий молекулы CO. В недавнем радиообзоре Млечного Пути в линиях излучения молекулы CO [57] показано, что максимальная лучевая скорость молекулярных облаков в направлении IRC +10420 составляет  $75 \pm 2$  км/с, эта величина хорошо согласуется с системной скоростью IRC +10420. Данное значение системной скорости дает расстояние до IRC +10420 примерно 5 кпк [54], что согласуется с оценкой расстояния в [58], учитывающей измерения величины межзвездной поляризации. Светимость, соответствующая такому удалению объекта, с учетом величины межзвездного поглощения  $A_v = 7^m$ ,  $L \approx 5 \times 10^5 L_\odot$ , ( $M_{bol} = -9^m5$ ). Эта величина совпадает с оценкой светимости V1302 Aql по спектральным критериям:  $M_{bol} = -9^m5 \pm 0^m4$  [54]. Обладая столь высокой светимостью, порядка  $10^6 L_\odot$ , объект попадает на эволюционный трек, рассчитанный для звезд с массами 20–40  $M_\odot$  [59]. Данная оценка светимости положена в основу гипотезы относительно природы звезды — V1302 Aql находится на переходной стадии между фазами OH/IR-сверхгиганта и Вольфа-Райе. На этом участке диаграммы Г-Р звезды эволюционируют крайне быстро, и V1302 Aql представляет редкую возможность наблюдать указанную стадию эволюции массивных звезд.

Еще одной уникальной особенностью V1302 Aql является быстрый разогрев фотосферы [54]. В 1972 г. ее спектральный класс был G0–F8 [60], что соответствует температуре 5700–6000 К. По спектрам 1995 г. Клочкова и др. [53] методом моделей атмосфер определили температуру 8500 К. Оценки спектрального класса в 2000 г. соответствуют температуре 9200 К [54]. С учетом наблюдений Хэмфрис и др. [60], получаем вывод, что менее чем за четверть века температура фотосферы звезды увеличилась более чем на 3000 К, около 120 градусов/год. При современном темпе роста температуры за год через 100–150 лет объект может достигнуть стадии Вольфа-Райе.

Трудно объяснимой особенностью оптического спектра V1302 Aql является красное смещение абсорбционных линий, по результатам наблюдений на БТА [54] оно составляет 15–20 км/с. Причем, по спектрам БТА, как и в более ранней работе Оудмайера [61], значимое изменение лучевой скорости с длиной волны не обнаружено. Оудмайер [61] предположил, что красное смещение абсорбций происходит из-за выпадения вещества на поверхность звезды. Такая гипотеза согласуется с

наблюдаемой формой профилей линий типа обратного P Cygni. Заметим, что, если такое выпадение происходит под пылевой оболочкой, то рассеяние на расширяющейся пылевой оболочке должно приводить как к красному смещению эмиссионных компонент линий, так и к еще большему смещению абсорбционных компонент, чего не наблюдаем.

Анализ совокупности полученных данных позволяет утверждать, что остаются две возможности интерпретации феномена IRC +10420. Первая возможность основана на гипотезе многократного рассеяния излучения в оптически толстой расширяющейся пылевой оболочке [51, 62]. В рамках этой гипотезы трудно объяснить соотношение интенсивностей синесмещенных и красносмещенных эмиссионных компонент бальмеровских линий. Вторая возможность базируется на модели вращающегося диска и внешних (по отношению к диску) областей, поляризующих оптическое и ИК излучение [58]. Двухкомпонентная модель оболочки объекта подтверждается моделированием распределения энергии (SED) с учетом данных спеклинтерферометрии [63]. Авторы работы [63] пришли к выводу, что наилучшее согласие SED из наблюдений и моделирования достигается в случае двухкомпонентной оболочки с различающимися плотностью и температурой каждого компонента. Авторы предположили, что такого рода структура возникла в двух эпизодах звездного ветра, различающихся темпом потери вещества. В недавней работе [64] сделаны следующие оценки темпа потери вещества:  $\dot{M} \approx 9 \times 10^{-4}$  и  $7 \times 10^{-4} M_\odot/\text{год}$  для внутренней и внешней оболочки, соответственно.

### 3.2. Горячие сверхгиганты и кандидаты в LBV

Исследования горячих сверхгигантов и кандидатов в LBV в Галактике велись на БТА наиболее активно в последнее десятилетие, когда состоялся переход от обычных спектрографов к эшелльным спектрографам со скрещенной дисперсией в сочетании с матрицами ПЗС. Основной спектральный материал получен с помощью всех модификаций приборов, последовательно разработанных в Лаборатории астроспектроскопии САО, — от первого спектрографа высокого разрешения “Рысь” [10] до наиболее совершенного спектрографа НЭС [12]. Преимущества эшелле спектроскопии с ПЗС проявились не только в привлечении новых, более слабых объектов, но и в расширении спектрального диапазона и охвате измерениями большего числа слабых линий.

К настоящему времени исследованиями охвачены все известные белые гипергиганты Галактики, для которых с эшелльными спектрографами БТА могут быть получены спектры высокого разрешения. Среди массивных проэволюционировавших

звезд (с исходными массами, не превышающими некоторого предела — по разным расчетам от 20 до 40  $M_{\odot}$ ) особое внимание привлекают голубые переменные высокой светимости, LBV. Изменения их блеска, цвета и спектра вызваны нерегулярными выбросами вещества, делающими ветер медленным и оптически толстым в континууме. При постоянстве болометрической светимости амплитуда изменения визуального блеска обычно составляет  $0^m5 \div 2^m$ . Амплитуда растет со светимостью: в максимуме блеска LBV концентрируются на диаграмме Г-Р в вертикальной полосе с эффективной температурой в интервале  $T_{\text{eff}} \approx 7000 \div 9000$  К, а в минимуме блеска — в наклонной полосе неустойчивости между 12 000 и 30 000 К. В случае с LBV мы имеем дело со звездами на пределе возможности существования объектов как равновесных образований, что делает их хорошими лабораториями для изучения физики и динамики звездных атмосфер и ветров. В их протяженных и хорошо структурированных атмосферах такие феномены, как турбулентия, градиенты поля скоростей, выражены гораздо сильнее, чем у обычных горячих звезд меньшей массы.

В ходе выполнения программы получены следующие основные результаты: прямые спектроскопические свидетельства пульсаций сверхгигантов, а также одновременного присутствия в их атмосферах восходящих и нисходящих потоков газа, обнаружена несферичность и нестационарность ветров сверх- и гипергигантов, сделан вывод об упрощении их пространственно-кинематических характеристик с ростом светимости, а также сделан вывод о существовании у белых гипергигантов регулярных выбросов оболочек или сгустков вещества [65].

Отметим особо результаты анализа долговременных, почти 30-летних, наблюдений сверхгиганта  $\beta$  Ori — ключевого объекта в исследованиях поля скоростей в атмосферах белых сверхгигантов. Для него наиболее надежно определена скорость центра массы звезды, что позволило разрешить дилемму, возникшую еще в фотографическую эпоху: что мы наблюдаем — нестационарное расширение атмосферы по всей доступной наблюдениям глубине или расширение верхних слоев в сочетании с колебаниями нижних? Первоначально, на основе фотографического спектрального материала, был сделан вывод о нестационарном, но радиально симметричном расширении атмосферы  $\beta$  Ori с возрастающей наружу скоростью. Но появившаяся возможность фиксации формы профилей и ее изменений со временем привела к отказу от представления о температурной однородности поверхности звезды и о сферически-симметричном ветре. Таким образом, получено прямое свидетельство реализации второго варианта [65, 66]. Чтобы объяснить наблюдаемую асимметрию линий, пульсационные

движения в слоях их формирования дополнены системой восходящих и нисходящих потоков.

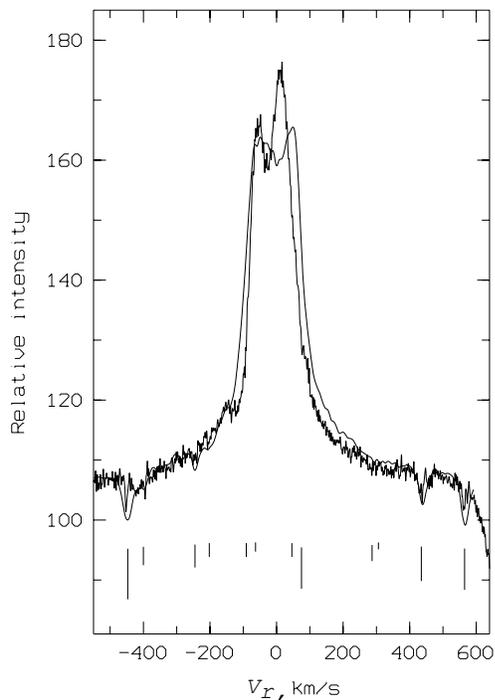
Сопоставление накопленных данных о ветрах белых гипергигантов говорит об упрощении их геометрии и кинематики с ростом светимости. Нарастание со светимостью темпа потери вещества сопровождается снижением скорости ветра и обеспечивается за счет увеличения его плотности.

### 3.3. Кандидаты в LBV в составе звездных ассоциаций

Массивные быстро эволюционирующие объекты, такие как LBV или звезды типа Вольфа-Райе, крайне редко встречаются в группировках. В этом отношении вне конкуренции звездная ассоциация Cyg OB2, возраст которой несколько миллионов лет. Для кандидата в LBV, звезды № 12 в составе этой ассоциации, отождествляемой с ИК источником IRAS 20308+4104, спектры высокого разрешения впервые были получены на БТА [67]. По ним проведено детальное отождествление линий, и с использованием нестандартных критериев, базирующихся на линиях красной области спектра, выполнена количественная спектральная классификация (в 2001–2003 гг. спектральный класс  $B4.9 \pm \pm 0.4$ ), измерены лучевые скорости.

Анализ картины лучевых скоростей указывает на наличие градиента лучевой скорости в атмосфере, обусловленного падением вещества на звезду. В мощной эмиссии  $H\alpha$  выделены: широкие томсоновские крылья, простирающиеся по крайней мере до 1000 км/с; переменная во времени абсорбция в ядре, свидетельствующая о неоднородности звездного ветра; слабая синесмещенная абсорбция типа P Cyg. Инверсии интенсивности в верхней части профиля  $H\alpha$  (Рис. 2) свидетельствуют о том, что ветер звезды № 12 неоднороден: кроме быстрой фракции в нем содержится вещество, почти неподвижное относительно звезды или даже падающее на нее. Такого рода сочетание, отмечавшееся у некоторых LBV в фазе максимального блеска, заставляет отказаться от сферически-симметричной модели ветра.

Список кандидатов в LBV Галактики пополнен новыми объектами: HD 168607 и HD 168625 часто относят к белым гипергигантам, но вместе с тем они имеют отчетливые признаки LBV [68]. Получены убедительные спектроскопические свидетельства того, что гипергигант HD 168607 (B9 Ia-0) может считаться LBV, самой малоамплитудной на сегодняшний день. При поярчении на  $0^m2$  ее спектральный класс становится чуть более поздним, изменяется с B9 на A0. Интерес к этой паре звезд усиливается их принадлежностью к одной звездной группировке (ассоциации Ser OB1) и близость на небе: HD 168607 и HD 168625 отстоят друг от



**Рис. 2.** Профиль  $H\alpha$  в спектре Cyg OB2-12 для двух дат наблюдений. Вертикальными штрихами указано положение теллурических линий  $H_2O$ . Длина штриха пропорциональна глубине линии [67].

друга всего на угловую минуту. Новые спектроскопические данные также указывают на связь этих гипергигантов с комплексом М 17 и повышают вероятность того, что они образуют физическую пару. HD 168625 причислена к LBV исключительно благодаря окружающей ее газовой-пылевой оболочке, оставшейся от предшествующей фазы эруптивной активности. Сегодня ни фотометрия, ни спектроскопия не выявляют у самой звезды признаков LBV, ее переменность не превышает среднего уровня переменности белого гипергиганта.

Ветры предельно ярких гипергигантов двухкомпонентны: наряду с расширяющейся сферически симметричной фракцией в них есть вещество, неподвижное относительно звезды или даже падающее на нее. Из сопоставления профилей  $H\alpha$  в спектрах сверхгигантов и гипергигантов сделан вывод об упрощении геометрии и кинематики ветра с ростом светимости [65]. Предельная скорость истечения, зафиксированная по абсорбции  $H\alpha$ , и темп потери массы соотносятся следующим образом: 200 км/с и  $0.7 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$  для 6 Cas [69], 150 км/с и  $4 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$  для звезды № 12 из ассоциации Cyg OB2 [70], 50 км/с и  $5 \times 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$  для V1302 Aql [71].

### 3.4. Звезды с $B[e]$ -феноменом

$B[e]$ -звезды представляют собой группу звезд спектрального класса В, особенностями которой является присутствие эмиссионных линий в спектре (включая запрещенные) наряду с сильными избытками излучения в ближнем ИК континууме (1–5 мкм). Впервые 65 таких объектов в Млечном Пути были выделены Алленом и Свингсом [72], которые отметили связь присутствия запрещенных линий и ИК избытков. В течение двух десятилетий на БТА выполнялась спектроскопия высокого разрешения выборки  $B[e]$ -звезд с сильными избытками излучения в ближнем ИК континууме. Результаты представлены в обширной серии статей автора программы А. С. Мирошниченко с соавторами и суммированы в статье [73]. Подавляющая часть оптических спектров высокого разрешения получена с эшелльным спектрографом НЭС [12].

На диаграмме показателей цвета в системе спутника IRAS  $B[e]$ -звезды занимают необычное положение. Многолетнее комплексное исследование звезд этой группы привело к выводу, что это достаточно проэволюционировавшие объекты, большая часть которых является взаимодействующими двойными системами, что объясняет присутствие большого количества околозвездной материи [73]. Сильный избыток излучения в ближнем ИК диапазоне ( $\Delta\lambda = 2\text{--}10$  мкм) в сочетании с резким падением ИК потока (см. типичное распределение энергии на Рис. 1 в работе [74]) в сторону более длинных волн накладывает ограничения на возможный эволюционный статус объекта. Например, исключается стадия эволюции до ГП, так как у таких объектов распределение энергии в ИК диапазоне более плоское и по мере эволюции к ГП горячая пыль, излучающая в ближнем ИК диапазоне, диссипирует ранее холодной пыли. У объектов на стадии после асимптотической ветви гигантов пылевые оболочки образуются на предыдущей стадии эволюции и пыль в них имеет температуры ниже приблизительно 100 К. Во-вторых, светимость  $B[e]$ -звезд близка к верхней границе, возможной для планетарных туманностей.

Довольно большая группа  $B[e]$ -звезд имеет исключительно сильные эмиссионные спектры. Хорошим примером может служить спектр звезды AS 160, фрагменты которого приведены на Рис. 2 в работе [74].  $B[e]$ -звезды AS 78 и MWC 657, спектроскопия и фотометрия которых осуществлена большим коллективом наблюдателей на нескольких обсерваториях [75], при светимости в 100 раз меньшей, чем у голубых гипергигантов, не уступают им в темпе потери массы. Предполагается, что мощный ветер инициирован наличием у обеих звезд спутников. Так же, как у гипергигантов, в их спектрах эмиссионные и эмиссионно-абсорбционные

линии H I, Fe II и др. сочетаются с абсорбциями He I. Но у AS 78 линия H $\alpha$ , имеющая типичный для гипергиганта P Cyg-профиль, интенсивнее и шире, чем у самого прототипа, P Cygni, ее абсорбционный компонент простирается до  $-500$  км/с.

В результате выполнения программы А. С. Мирошниченко выделена новая группа звезд типа FS CMa, содержащая около 40 объектов [73] и являющаяся одной из немногих групп звезд ранних спектральных классов, показывающих признаки присутствия околозвездной пыли в оболочках. Большинство их наблюдаемых свойств может объясняться переносом вещества в двойной системе. Однако, маломассивные компоненты трудно обнаружить из-за большой разности блеска компонентов и влияния околозвездного газа, вуалирующего фотосферные линии обоих компонентов системы.

В программу исследований входит и несколько малоизученных звезд с ИК избытками, сведения об эволюционном статусе которых противоречивы. Наши данные позволили приблизиться к решению этого вопроса для нескольких объектов. Для определения эволюционного статуса горячей звезды, ассоциируемой с ИК источником IRAS 00470 + 6429, и имеющей параметры, близкие к таковым у маломассивных сверхгигантов на стадии post-AGB, в 2003–2008 гг. проведена серия фотометрических и спектральных наблюдений с использованием телескопов нескольких обсерваторий. Оптический спектр звезды является эмиссионным с V[e]-феноменом, большинство линий имеют профиль типа P Cyg. Выявлена переменность блеска звезды и переменность профилей спектральных деталей [76]. Совокупность результатов позволяет предположить, что звезда является двойной системой, первичный компонент которой является звездой B2–B3 высокой светимости, а вторичный компонент — холодной звездой. В целом, сделан вывод, что звезда с большей вероятностью является членом ассоциации Cas OB7, на расстоянии около 2 кпк от Солнца, и относится к массивным звездам типа FS CMa, а не протопланетарным туманностям [76].

Еще одним примером горячей звезды с неясным эволюционным статусом является переменная V645 Cyg. В кооперации с астрономами из пяти разных стран завершено комплексное исследование (спектроскопия высокого и низкого разрешения, ИК фотометрия, спекл-интерферометрия) переменной звезды V645 Cyg, отождествляемой с ярким ИК источником. Для изучения спектральной переменности звезды использованы данные БТА + НЭС и CFHT + ESPaDOnS. Примеры вариаций профилей линий H I, а также пекулярность профилей запрещенных линий [O I], [S II] приведены на Рис. 3 и 5 в работе [77]. Сочетание полученных результатов указывает на то, что V645 Cyg

является далекой ( $d \approx 4.2$  крс) массивной и очень молодой В-звездой высокой светимости, излучение которой недавно проявилось из геометрически тонкого и оптически толстого околозвездного кокона. Метод спекл-интерферометрии впервые разрешил V645 Cyg на компоненты, угловой диаметр компактного компонента составляет около  $0''.014$ .

*Ве-звезда Хербига HD 200775 в фазе активности 2001 г.* С помощью спектрографов высокого разрешения на телескопах России, США и Украины в 2000–2002 гг. выполнена кооперативная программа наблюдений Ве-звезды Хербига HD 200775, у которой в 2001 г. наблюдалась очередная фаза активности [78]. Переменность профиля H $\alpha$  в спектре HD 200775 подобна той, что наблюдалась в предыдущей ее активной фазе в 1997 г., но появилась особенность у абсорбционной компоненты H $\alpha$ . Профили фотосферных абсорбций переменны, что, видимо, объясняется влиянием слабых эмиссий, формирующихся в околозвездной газовой оболочке. В целом, строго периодичное изменение асимметричного профиля H $\alpha$  и фотосферных линий, а также их положений получает объяснение в рамках модели звезды с газовой оболочкой в составе двойной системы (эксцентриситет орбиты  $e = 0.3$ ). В предположении, что масса и радиус более массивной звезды соответствуют этим параметрам В2-звезды на ГП ( $10 M_{\odot}$  и  $10 R_{\odot}$ ), получено расстояние между компонентами около  $1000 R_{\odot}$  и масса второго компонента около  $3.5 M_{\odot}$ .

*Рентгеновский транзиент CI Cam.* CI Cam — В-звезда с эмиссионным спектром, обладающая всеми характеристиками сверхгигантов с V[e]-феноменом. На БТА спектральные наблюдения CI Cam выполнялись в различных наблюдательных модах: с умеренным разрешением на спектрографе СП 124 со счетчиком фотонов (сканер) [79], эти результаты использованы в коллективной публикации [80]; с высоким спектральным разрешением с эшелльным спектрографом НЭС [81]. Особый интерес к этому объекту появился в апреле 1998 г., после мощной вспышки во всех диапазонах длин волн, включая рентген. Вспышка сопровождалась ростом оптического блеска на  $2^m$ – $3^m$  и синхротронного радиоизлучения [82], а также многократным ростом интенсивности эмиссий в оптическом спектре. Через три года после вспышки спектр вернулся в довспышечное состояние.

Несмотря на то, что CI Cam сейчас является наиболее изученным объектом в классе рентгеновских двойных с V[e]-феноменом, до сих пор неизвестно расстояние до объекта (опубликованные оценки отличаются на порядок), неясны масса и природа компактного компаньона (нейтронная звезда, белый карлик или черная дыра), непонятен в деталях и механизм вспышки [83]. Есть разноречивой

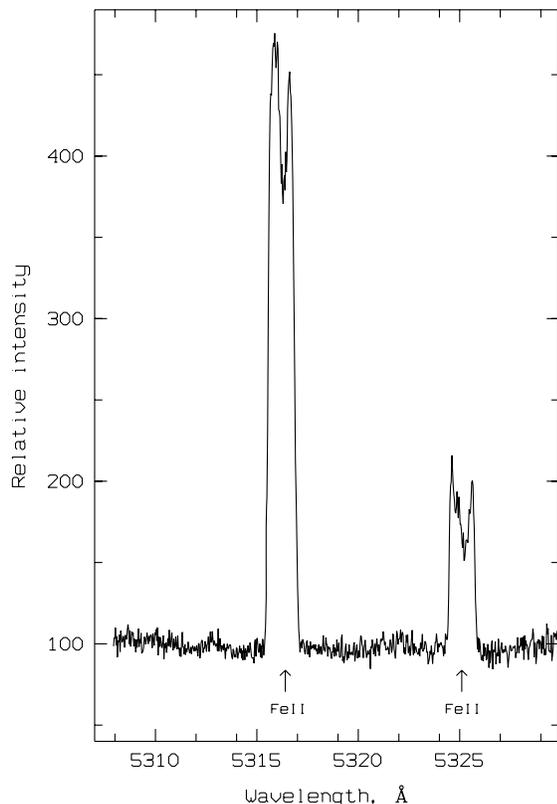


Рис. 3. Фрагмент спектра CI Cam, зарегистрированного на БТА + НЭС 24 февраля 2002 г.

даже в спектральной классификации: авторы статьи [80], исходя из характеристик спектра, получили для главного компонента III–IV класс светимости, что соответствует массе не более  $7 M_{\odot}$ . Однако, динамические параметры системы приводят к следующим параметрам ее компонентов: масса видимого компонента более  $12 M_{\odot}$ , масса невидимого — в 46 раз меньше. Выход из этого противоречия — в предположении о продвинутой стадии эволюции главного компонента. Масса компактного компонента ниже предела Чандрасекара, т.е., он скорее всего является белым карликом. Причиной вспышки может быть сверхкритическая аккреция на компактный компаньон или же термоядерный взрыв на поверхности белого карлика. Ранее авторы [81, 82] пришли к выводу, что особенности спектра и оценка светимости позволяют рассматривать яркий компонент CI Cam как В[e]-сверхгигант со светимостью  $L \approx 10^4 \div 10^5 L_{\odot}$ .

Детальная спектроскопия CI Cam на БТА со спектрографом НЭС указывает на полное отсутствие линий поглощения в спектре [81]. Кроме того, за счет высокого спектрального разрешения впервые обнаружена многокомпонентная структура профилей оболочечных эмиссий (Рис. 3), что

обусловлено стратифицированной структурой оболочки. Отсутствие абсорбционного компонента даже у  $H\alpha$  и многокомпонентные профили эмиссий указывают на присутствие диска, наклоненного к лучу зрения [81]. Недавно в наблюдениях с высоким спектральным разрешением в ИК диапазоне был обнаружен наклонный пылевой диск, окружающий CI Cam [84].

#### 4. ЗВЕЗДЫ, ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИЕ ПОСЛЕ AGB

На кратковременной эволюционной стадии PPN наблюдаются звезды промежуточных масс (их исходная масса находится в интервале  $3\text{--}8 M_{\odot}$ ), которые эволюционируют от стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) к стадии планетарной туманности. Эволюция звезд от стадии AGB до планетарной туманности (PN) до сих пор остается не совсем понятной. Это касается механизмов и особенностей сброса вещества AGB-звездами, сложной морфологии оболочек PPN и PN. Роль двойственности также мало изучена, поскольку выявление компаньона для PPN со сложной картиной поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды является трудоемкой задачей.

Данные, полученные в ходе изучения PPN, позволяют изучать потерю вещества за счет звездного ветра, а также предоставляют уникальную возможность изучать результаты звездного нуклеосинтеза, процессов перемешивания и выноса в поверхностные слои продуктов ядерных реакций в предшествующих стадиях эволюции звезды.

Эволюция звезд на стадии post-AGB происходит быстро, с характерным временем, равным приблизительно  $10^2 \div 10^3$  лет. Наблюдаемая у нескольких PPN вековая переменность основных параметров стимулирует проведение спектрального мониторинга наиболее вероятных PPN-кандидатов. В частности, по наблюдательным данным 6-м телескопа найдена спектральная переменность оптических компонентов источников IRAS 01005 + 7910 [85], IRAS 05040 + 4820 [86], IRAS 20572 + 4919 [87] и обнаружен тренд эффективной температуры у звезды HD 161796 = IRAS 17436 + 5003 [88].

Программа спектроскопического исследования кандидатов в протопланетарные туманности является долговременной — выполняется на БТА с 1994 г., получен большой массив данных, результаты их анализа приведены в многочисленных публикациях. Объекты программы были выделены по наличию мощного избытка ИК потока. Для значительной доли объектов программы эволюционный статус неясен. Для многих объектов отсутствуют какие-либо наблюдательные данные в видимом

диапазоне длин волн, зачастую отсутствуют фотометрические данные.

Целью проекта было изучение фундаментальной проблемы — ядерного синтеза химических элементов в недрах звезд малых и средних масс, а также анализ поля скоростей этих звезд с протяженными и истекающими атмосферами. Объекты программы — пекулярные сверхгиганты, наблюдаемые предположительно на стадии перехода от звезды к планетарной туманности. Выборка включает свыше 100 звезд спектральных классов В÷К с большим избытком ИК потока, обусловленным их газопылевыми оболочками. По мере выполнения программы список объектов расширился за счет новых отождествлений в оптике звезд высокой светимости с ИК избытком и неопределенным эволюционным статусом. На основании изученной на БТА выборки кандидатов в PPN и опубликованных данных, можно говорить о неоднородности их химического состава. Избыток элементов *s*-процесса, как следствия предшествующей эволюции звезды, к настоящему времени обнаружен для семи объектов по наблюдениям на БТА и примерно для такого же числа звезд в наблюдениях на других инструментах. В 1997 г. на основе наблюдений на БТА Клочковой [89], одновременно с группой европейских исследователей, сделан вывод о взаимосвязи наличия эмиссии вблизи 21 мкм в ИК спектре звезд на стадии PPN с избытком тяжелых металлов в их атмосферах. Этот результат — один из наиболее цитируемых (но не объясненный) в картине проявлений звездного нуклеосинтеза на стадиях AGB и post-AGB. Высказано предположение о зависимости между наличием избытка элементов *s*-процесса и детальной эволюцией вблизи стадии AGB, что, в свою очередь, определяется исходной массой звезды, поскольку именно масса влияет на пульсационную активность и скорость потери вещества. Интересно, что у post-AGB звезды AFGL 2688, ассоциируемой с биполярной туманностью Egg, были найдены большие избытки CNO-элементов при довольно скромном избытке тяжелых ядер [90].

Изучение структуры биполярной протопланетарной туманности AFGL 2688 (Egg nebula) проведено по материалам спектроскопических (эшелле-спектрограф НЭС, разрешение  $R = 75\,000$ ) и спектрополяриметрических (эшельный спектрограф PFES в поляриметрической моде,  $R = 15\,000$ ) наблюдений на 6-м телескопе [91]. Спектрополяриметрия AFGL 2688 выполнена с разрешением, в 50 раз превосходящим данные, опубликованные другими авторами. Разделены детали фотосферного и околозвездного происхождения в оптическом спектре. Показано, что абсорбции в спектре центральной звезды поляризованы в той же степени, что и непрерывный спектр ее фотосферы: среднее

значение поляризации в континууме и в фотосферных линиях  $P = 52\%$  в области 5000–6600 Å (см. Рис. 2 и 5 в статье [91]). В спектре оболочки выделены семь эмиссионных полос системы Свана молекулы  $C_2$ , эмиссионные компоненты резонансного дублета Na I, узкая компонента линии H $\alpha$ . Степень поляризации для эмиссионных деталей, формирующихся в оболочке, незначительна. Показана применимость механизма резонансной флуоресценции для возбуждения спектра  $C_2$ . Сделан вывод о низкой плотности лепестков туманности. На основании совокупности данных поляриметрии и спектрополяриметрии с высоким спектральным разрешением, фотометрии и поляриметрии с высоким угловым разрешением, — предложена новая схема строения туманности. Поляриметрию с высоким спектральным разрешением можно использовать как одно из средств выявления газопылевых оболочек вокруг PPN, наблюдаемых наземными средствами с относительно низким угловым разрешением.

#### 4.1. Спектроскопический мониторинг избранных PPN-кандидатов

В спектре PPN сосуществуют спектры центральной звезды и околозвездной оболочки, а также межзвездные детали. Спектр центральной звезды, помимо абсорбций, содержит сложные абсорбционно-эмиссионные профили линий водорода типа P Cyg или обратного P Cyg. Основная цель мониторинга — выявление пекулярности и вероятной переменности спектра, изучение временного поведения поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды. Для большинства объектов программы спектры высокого разрешения получены впервые, новым также является продолжительный спектроскопический мониторинг ряда объектов. Последнее позволяет выявить вековые изменения параметров атмосфер и разделить объекты, находящиеся на post-AGB и маскирующиеся под эту стадию [53, 54, 92]. Другим достоинством многолетнего мониторинга является возможность выявления малоамплитудных изменений лучевых скоростей, указывающих на спектральную двойственность. Ниже остановимся лишь на наиболее новых и интересных результатах, полученных в ходе мониторинга.

Для ряда объектов обнаружены признаки сложного динамического состояния атмосферы и оболочки (различные спектральные линии указывают на нерегулярные движения вещества, как от звезды, так и, одновременно, к звезде). Исследованы механизмы свечения околозвездных газопылевых оболочек и сделаны оценки параметров пылевой компоненты [90, 91].

В составе оболочек также обнаружены тяжелые элементы [93], этот результат может послужить для изучения связи особенностей внутреннего строения звезды со свойствами околозвездных оболочек. На большой выборке исследованных нами объектов установлено, что стадия, на которой происходит изменение режима перемешивания подфотосферных слоев и изменение свойств холодной газопылевой околозвездной оболочки, является кратковременной и редко наблюдаемой. По молекулярным спектрам околозвездной оболочки и оптическим спектрам центральной звезды впервые обнаружены признаки резкого изменения содержания легких элементов в атмосфере и околозвездной оболочке объекта AFGL 2688. Звезда, будучи углеродной на стадии AGB, превратилась на стадии post-AGB в F-сверхгигант с повышенным содержанием азота и кислорода [94]. Разнообразие эмиссионно-абсорбционных спектров объектов на стадии post-AGB усиливается эффектами ориентации околозвездного пылевого тора, поглощением и экранированием излучения центрального объекта. В связи с этим спектроскопическое определение фундаментальных параметров звезды является единственно надежным.

Для нескольких PPN переменность спектров обнаружена впервые, по наблюдениям на БТА. Примером является выявленная [86] переменность спектра post-AGB звезды SAO 40039, отождествляемой с ИК источником IRAS 05040+4810. Профили всех линий в спектре SAO 40039, как абсорбций, так и эмиссий, переменны. Причем тип профиля линий изменяется на противоположный в течение нескольких дней. Переменна и лучевая скорость. Столь бурная переменность, вероятно, обусловлена структурными перестройками в атмосфере центральной звезды и в околозвездной оболочке.

В ряде случаев получены доказательства присутствия вторичного компонента, однако, все известные двойные среди post-AGB относятся к типу SB1, что затрудняет определение типа компаньона. Характер переменности лучевой скорости  $V_r$  не всегда согласуется с гипотезой двойственности — наблюдаются периодические (и квазипериодические) изменения  $V_r$ , явно обусловленные пульсациями. Пульсационная нестабильность присуща многим объектам на post-AGB стадии, что согласуется с теоретическими расчетами картины пульсаций для звезд, эволюционирующих от AGB к PN [95]. Переменность  $V_r$ , обусловленная пульсациями, может сочетаться с дифференциальными движениями в протяженных атмосферах PPN. Характерной является переменность HD 56126 = IRAS 07134 + 1005, одной из немногих post-AGB звезд, в атмосфере которых обнаружены продукты 3-го перемешивания [96]. Из

сравнения опубликованных значений лучевой скорости HD 56126 с результатами 6-м телескопа была заподозрена переменность лучевой скорости [96]. Позже [97] за счет многократных высококачественных наблюдений со спектрографом НЭС была обнаружена переменная во времени стратификация скорости в атмосфере. Интересны результаты [98] исследования кинематической картины в атмосфере и околозвездной оболочке звезды V510 Pup с очень высоким темпом потери массы ( $10^{-4.7} M_{\odot}/\text{год}$ ). Большие дифференциальные сдвиги (до 100 км/с) линий и их компонентов указывают на градиент скорости в тех слоях атмосферы V510 Pup, где эти линии образуются, а множество P Cyg-профилей — на расширение атмосферы ( $V_{\text{exp}} = 42$  км/с, предельная скорость ветра 240 км/с).

*Аномальный желтый сверхгигант QY Sge (IRAS 20056 + 1834)* относится к типу полуправильных переменных с неясным эволюционным статусом, что стимулировало проведение спектрального мониторинга звезды [99] на 6-м телескопе. Самая интенсивная и пекулярная деталь в ее спектре — профиль D-линий Na I, содержащий узкий и широкий эмиссионные компоненты (Рис. 4). Широкая эмиссия прослеживается от  $-170$  до  $+120$  км/с, в центральной части она прорезана абсорбцией, которая в свою очередь разделена надвое узким (16 км/с) эмиссионным пиком. В качестве системной скорости принято значение  $V_{\text{sys}} = -21.1$  км/с, соответствующее положению узкой эмиссии Na I. Положение эмиссионных деталей D-линий Na I неизменно, что указывает на их формирование в областях, внешних по отношению к фотосфере сверхгиганта. Выявлены дифференциальные сдвиги линий, около 10 км/с (Рис. 5). Эмиссия в линии  $H\alpha$  слабее, чем в D-линиях Na I, она почти полностью заливает фотосферную абсорбцию. Абсорбционные линии в спектре QY Sge имеют значительную ширину  $\text{FWHM} \approx 45$  км/с. Методом моделей атмосфер определены эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 6250$  К, ускорение силы тяжести  $\log g = 2.0$ , микротурбулентная скорость  $V_t = 4.5$  км/с и химический состав звезды, значительно отличающийся от солнечного. В целом, наблюдаемые свойства QY Sge пока не дают оснований для включения этой звезды в группу звезд типа R CrB или RV Tau.

*Переменная звезда V2324 Cyg*, отождествляемая с ИК источником IRAS 20572 + 4919 на основании наблюдаемого избытка ИК излучения и спектральных особенностей, считается отличным кандидатом в протопланетарные туманности [100].

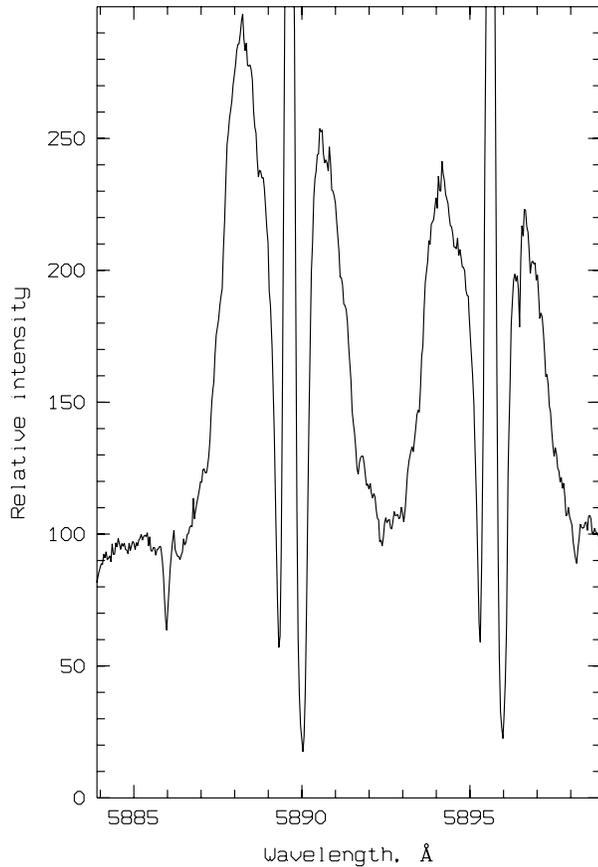


Рис. 4. D-линии дублета Na I в спектре QY Sge.

Со спектрографом НЭС впервые выполнен спектральный мониторинг (1995–2006 гг.) этой малоизученной переменной звезды ( $V = 11^m63$ ), в результате чего определены спектральный класс F0 III, скорость вращения звезды  $v \sin i = 69$  км/с и изучены спектральные особенности [87]. Линии нейтрального водорода и D-линии Na I в спектре имеют сложный профиль типа P Cyg. В спектрах не были обнаружены ни временная переменность  $V_r$ , ни систематический ход лучевой скорости  $V_r$  с глубиной линии. Среднее значение гелиоцентрической лучевой скорости  $V_r = -16.80$  км/с. Скорости по ядрам абсорбционных компонентов ветровых линий H $\alpha$  и Na I колеблются от  $-140$  до  $-225$  км/с (а скорости расширения соответствующих слоев — примерно от 120 до 210 км/с). Максимальная скорость расширения получена по синему компоненту расщепленной абсорбции H $\alpha$ : 450 км/с. Методом моделей атмосфер определены  $T_{\text{eff}} = 7500$  К,  $\log g = 2.0$ ,  $V_t = 6.0$  км/с и солнечная металличность. Основной особенностью химического состава звезды является избыток лития и

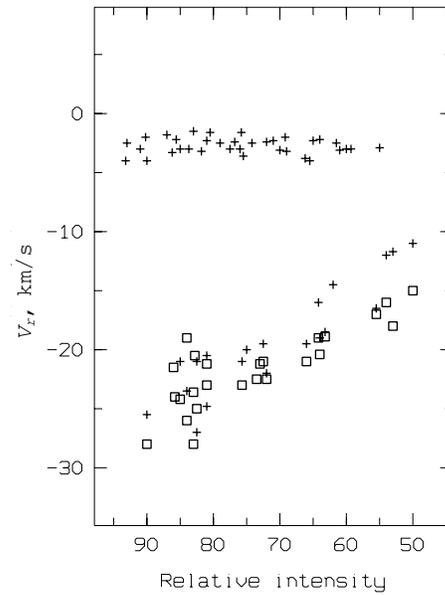
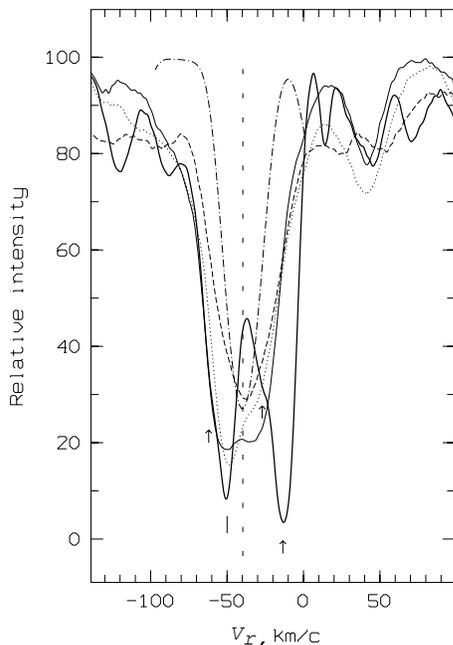


Рис. 5. Зависимости гелиоцентрической скорости от остаточной интенсивности линии в спектрах QY Sge (вверху 2003 г., внизу — 2004 г.) Крестиками нанесены скорости  $V_r$  по центру тяжести линий, квадратиками — по ядрам линий [99].

натрия. Принадлежность V2324 Cyg к post-AGB звездам авторами [87] поставлена под сомнение.

Холодная переменная звезда V354 Lac, отождествляемая с инфракрасным источником IRAS 22272 + 5435, является одним из наиболее интересных кандидатов в PPN. Распределение энергии V354 Lac имеет типичный для PPN двухпиковый характер. Причем, полная энергия, излучаемая звездой в видимом диапазоне длин волн и излучаемая околозвездной оболочкой в ИК диапазоне, практически одинаковы. V354 Lac была одним из первых PPN-кандидатов с деталью на 21 мкм в ИК спектре, в атмосферах которых по спектрам БТА + НЭС обнаружены большие избытки углерода и элементов s-процесса [96, 101]. Позже по оптическим спектрам V354 Lac, полученным с более высоким разрешением на 6-м телескопе в 2001–2008 гг., впервые обнаружено расщепление самых сильных абсорбций, имеющих потенциалы возбуждения нижнего уровня ниже 1 eV [102, 103]. На Рис. 6, где представлены профили избранных линий в спектре V354 Lac, двухкомпонентная структура профиля линии Ba II 6141 Å сопоставлена с аналогичной структурой линии Na D1. Определены основные параметры,  $T_{\text{eff}} = 5650$  К,  $\log g = 0.2$ ,  $V_t = 5.0$  км/с и содержание 22 химических элементов в атмосфере звезды. Выявленные ранее сверхизбытки содержания химических элементов s-процесса (Ba, La, Ce, Nd) в атмосфере звезды частично



**Рис. 6.** Профили избранных линий в спектре V354 Lac. Сплошная жирная линия — Na D I, сплошная тонкая и пунктирная — Ba II  $\lambda 6141 \text{ \AA}$  за две даты, штриховая — Na  $\alpha$ . Штрих-пунктирная — теоретический профиль Na D. Вертикальной штриховой линией отмечена системная скорость. Стрелками на наблюдаемом профиле Na D отмечено положение межзвездных компонентов, вертикальным баром — положение околозвездного компонента [102].

обусловлены расщеплением сильных линий ионов этих металлов. Особенности спектра в интервале, содержащем линию лития Li I  $\lambda 6707 \text{ \AA}$ , получили естественное объяснение при учете только избытка ионов тяжелых металлов Ce II, Sm II. Наилучшее согласие наблюдений с синтетическим спектром достигнуто при следующих содержаниях элементов:  $\epsilon(\text{Li I}) = 2.0$ ,  $\epsilon(\text{Ce II}) = 3.2$ ,  $\epsilon(\text{Sm II}) = 2.7$ . Анализ кинематической картины показывает, что коротковолновые компоненты расщепленных абсорбций формируются в мощной газопылевой оболочке звезды (Рис. 6).

В результате многократных наблюдений с высоким спектральным разрешением в 1998–2008 гг. изучено поведение во времени профилей спектральных деталей и поля скоростей в атмосфере и околозвездной оболочке *post-AGB* звезды V448 Lac [104]. Подобно спектрам звезды V354 Lac, в спектрах V448 Lac обнаружены асимметрия и временная переменность профилей сильнейших абсорбций с потенциалом возбуждения нижнего уровня  $\chi_{\text{low}} < 1 \text{ eV}$ , что проявляется прежде всего на профилях резонансных линий Ba II, Y II, La II, Si II. Пекулярность профилей может быть объяснена суперпозицией звездных

абсорбций и оболочечных эмиссий. Впервые в спектре V448 Lac выявлена эмиссия в полосе системы Свана (0, 1)  $\lambda 5635 \text{ \AA}$  молекулы  $\text{C}_2$ . По ядру Na  $\alpha$  найдена переменность лучевой скорости с амплитудой около 8 км/с. Переменность средней скорости по слабым линиям металлов с меньшей амплитудой около 1–2 км/с может быть проявлением пульсаций атмосферы. Выявлены дифференциальные сдвиги линий, достигающие в различные даты значений от 0 до 8 км/с. Положение молекулярного спектра стабильно во времени, что указывает на постоянство скорости расширения околозвездной оболочки, фиксируемой по линиям  $\text{C}_2$  и Na I:  $V_{\text{exp}} = 15.2 \text{ км/с}$ .

Полуправильные переменные V448 Lac и V354 Lac, в спектрах которых обнаружены аномалии профилей сильнейших абсорбций, имеют близкие фундаментальные параметры, близкие спектральный класс и класс светимости. Обе звезды имеют большие ИК избытки, а в ИК спектрах обеих звезд имеется эмиссия на длине волны  $\lambda = 21 \text{ мкм}$ . Сопоставление химического состава, определенного ранее для V448 Lac в работе [105], а для V354 Lac в работе [102], также указывает на подобие особенностей: в их атмосферах, обедненных железом, обнаружены большие избытки углерода и тяжелых металлов. Отметим, что для маломассивных сверхгигантов на стадии *post-AGB* влияние околозвездной оболочки на формирование профилей линий с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня долгое время было известно лишь для D-линий резонансного дублета натрия Na I.

*BD -6°1178 — оптический компонент ИК источника IRAS 05238-0626*, считается вероятным кандидатом в PPN на основании наблюдаемого избытка излучения в области 12–60 мкм и с учетом положения на диаграмме ИК цветов. По спектрам высокого спектрального разрешения, полученным с эшелле спектрографом НЭС, впервые обнаружена спектральная двойственность (SB2) звезды. Компоненты имеют близкие спектральные классы и классы светимости F5 IV–III и F3 V. Профили линий нейтрального водорода имеют сложные профили с эмиссионным компонентом. Для четырех моментов наблюдений в 2004–2005 гг. измерена гелиоцентрическая лучевая скорость обоих компонентов. Скорости вращения обеих звезд близки: 24 и 19 км/с. Не подтверждена классификация BD -6°1178 как сверхгиганта на стадии перехода к планетарной туманности. Вероятно, BD -6°1178 является молодой звездой до ГП, не исключено ее членство в подгруппе 1c ассоциации Ori OB1 [106].

Приведенные выше примеры исследований по программе спектроскопии кандидатов в PPN хорошо иллюстрируют один из основных выводов о неоднородности исходной выборки PPN. Выборка, сформированная на основе ИК фотометрии и спектроскопии низкого спектрального разрешения, помимо PPN, включает молодые звезды, как одиночные до ИГП, так и двойные вблизи ГП. Здесь уместно напомнить, что и гипергигант V1302 Aql = IRC+10420, которому был посвящен Раздел 2.1, долгое время считался PPN-кандидатом [107].

#### 4.2. Спектроскопическая “мимикрия”

Из предыдущего раздела видно, насколько сложным является отделение звезд средних и малых масс, находящихся на стадии post-AGB, от массивных звезд, на определенных этапах эволюции демонстрирующих близкие спектральные свойства. Проблема такой спектроскопической “мимикрии” состоит в том, что спектры звезд, различающихся по массе и стадии эволюции, оказываются похожими, а иногда и трудно различимыми. При известной неопределенности в оценках расстояний в Галактике за гипергигант может быть принят — по его спектру — объект более низкой светимости с мощным ветром. Это касается именно гипергигантов с их пекулярными и разнообразными спектрами. Сверхгиганты населения I вполне уверенно идентифицируются по их однотипным спектрам. Определение эволюционного статуса звезды заставляет находить и сопоставлять разнообразные параметры: положение в Галактике, светимость, распределение энергии в спектре, особенности химического состава, картину лучевых скоростей в атмосфере.

Из одиночных звезд наиболее близки к гипергигантам и LBV — не только по спектрам, но и по эволюционному возрасту, строению и кинематике оболочек — протопланетарные туманности (post-AGB-звезды). Высокоширотный мало-массивный сверхгигант UU Her [92] по вариациям лучевой скорости (около 15 км/с) и профилю  $H\alpha$  со слабыми эмиссиями на обоих крыльях может быть сопоставлен с белыми сверхгигантами типа HD 21389. Более интересна биполярная протопланетарная туманность, отождествленная с уникальной переменной V510 Pup. Светимость звезды едва достигает уровня светимости сверхгиганта, но звезда при этом обладает ветром, параметры которого — скорость, плотность, темп потери вещества — не уступают таковым для гипергигантов, и, естественно, имеет спектр, подобный спектрам таких гипергигантов, как HD 168607 и HD 160529. Профили  $H\alpha$ ,  $H\beta$ , а также многочисленных линий ионов металлов, — эмиссионно-абсорбционные

типа P Cug. В отличие от рассмотренных случаев двойных систем, скорости расширения умеренные — фиксируемые по ядрам абсорбций, они не превышают 40 км/с, а по протяженным коротковолновым крыльям наиболее сильных линий, Na I, Fe II, скорость достигает 200 км/с. Основная особенность спектра V510 Pup, позволяющая отличить его от спектров указанных гипергигантов, — аномально сильные абсорбции Y II и других элементов s-процесса, а также околос звездные полосы  $C_2$  системы Свана [98].

Очевидно, что решение проблемы спектральной “мимикрии” для звезд высокой светимости потребует многочисленных дополнительных наблюдений и анализа совокупности их параметров и спектральных особенностей.

## 5. ПЕРЕМЕННЫЕ И ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ЗВЕЗДЫ

### 5.1. Цефеиды

Еще в эпоху фотографической спектроскопии стало ясно, что регулярный спектроскопический мониторинг переменных звезд на БТА проводить практически невозможно, поскольку принципы распределения времени на телескопе плохо сочетаются с вероятностью повторяемости ясного неба. Поэтому в исследованиях переменных звезд был сделан акцент на изучение химического состава. Для большинства объектов такие исследования выполнены впервые [108–111]. Вторым приемлемым направлением исследований пульсирующих звезд на БТА является спектроскопия на коротких временах (минуты, часы), т.е. изучение малоамплитудных изменений лучевой скорости. К примеру, на БТА методом быстрой спектроскопии в течение 2.7 часа с эшелльным спектрографом PFES исследовано временное поведение профилей линий в спектре горячей ( $S_p = 09.5 V$ ) звезды HD 93521 [112]. На основании анализа массивов  $V_r$  авторы [112] предположили, что наблюдаемая переменность профилей He II и H I обусловлена нерадиальными атмосферными пульсациями, картина которых для самых сильных линий осложнена влиянием быстрого звездного ветра. Позже данный вывод был развит на основе существенно более длительных рядов наблюдений [113].

Для Полярной звезды, ближайшей к нам цефеиды, в последнее десятилетие появились вопросы, касающиеся моды ее пульсаций, конкретного эволюционного статуса, переменности параметров. С использованием спектрографов 6-м телескопа, 2.1-м телескопа обсерватории McDonald и 1-м телескопа обсерватории Ritter, получены 35 ПЗС-спектров Полярной. Для каждого момента наблюдений методом моделей атмосфер определены фундаментальные параметры

звезды и химический состав атмосферы [111]. Сопоставление всей совокупности параметров, включая ранее опубликованные данные, приводит к выводу о существовании регулярных и спорадических изменений температуры. Амплитуда переменности составляет примерно 250 К, а период около 25–30 лет, что близко к величине орбитального периода  $P = 29.9\text{--}30.5$  лет. Обнаруженные особенности химического состава ( $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.07$ ,  $[\text{C}/\text{H}] = -0.17$ ,  $[\text{N}/\text{H}] = +0.42$ ,  $[\text{O}/\text{H}] = -0.03$ ) согласуются с представлениями о третьем (или даже пятом) пересечении полосы неустойчивости. Положение Полярной на диаграмме  $M_v\text{--}T_{\text{eff}}$  подтверждает предположение о пульсациях в первом обороте.

На БТА впервые получены и проанализированы [114] спектры высокого разрешения В-компонента Полярной, находящегося на угловом расстоянии  $18''$  от главной звезды системы (звезда BD +88° 007, Sp=F3 V,  $V = 8^{\text{m}}60$ ). Лучевая скорость В-компонента меняется в интервале от  $-16.6$  до  $-18.9$  км/с, что близко к системной скорости  $V_{\text{sys}} = -15.9$  км/с. Скорость вращения  $v \sin i = 110$  км/с,  $T_{\text{eff}} = 6900$  К,  $\log g = 4.3$ ,  $V_t = 2.5$  км/с. Получены следующие параметры: светимость  $3.9 L_{\odot}$ , абсолютная величина  $M_v = +3^{\text{m}}3$ , расстояние  $d = 109.5$  пк, масса  $1.39 M_{\odot}$ . Сделан вывод о том, что химический состав В-компонента совпадает с таковым у самой Полярной, но содержание С, Na, Mg у компонента ближе к солнечным, в отличие от проэволюционировавшей Полярной. Эти результаты по исследованию оптического спектра компонента Полярной нашли признание у специалистов по пульсирующим переменным.

Ниже, в Разделе 7, будут кратко представлены результаты спектральных наблюдений выборки классических цефеид, предпринятые на БТА для изучения особенностей химического состава диска Галактики.

### 5.2. Звезды типа RV Tau

По спектрам высокого спектрального разрешения, полученным с эшелле спектрографами БТА, исследована выборка пульсирующих звезд типа RV Tau [115], которые по совокупности параметров (высокая абсолютная светимость, наличие газопылевых оболочек, проявляющихся в существенных избытках ИК потока) принадлежат стадии post-AGB. При этом впервые определен химический состав самой звезды RV Tau, прототипа данного класса переменных звезд. Основной вывод заключается в том, что изученная к настоящему времени выборка звезд типа RV Tau неоднородна по типу населения в Галактике. Например, для

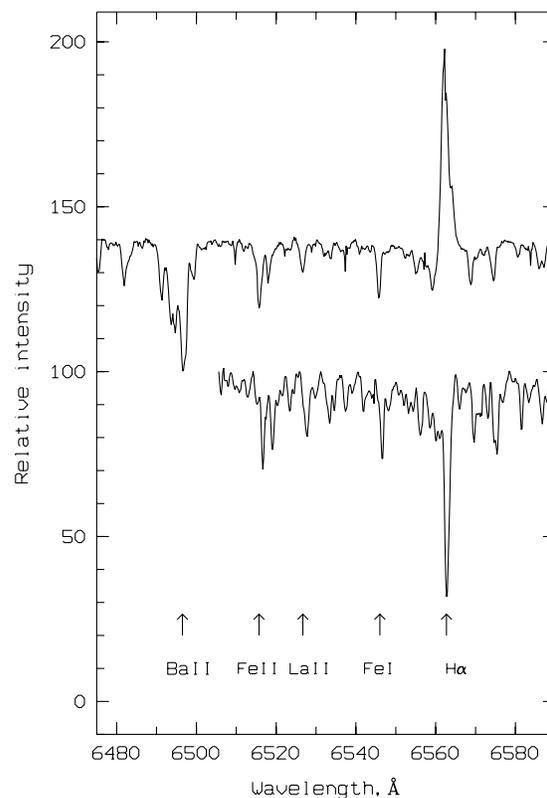
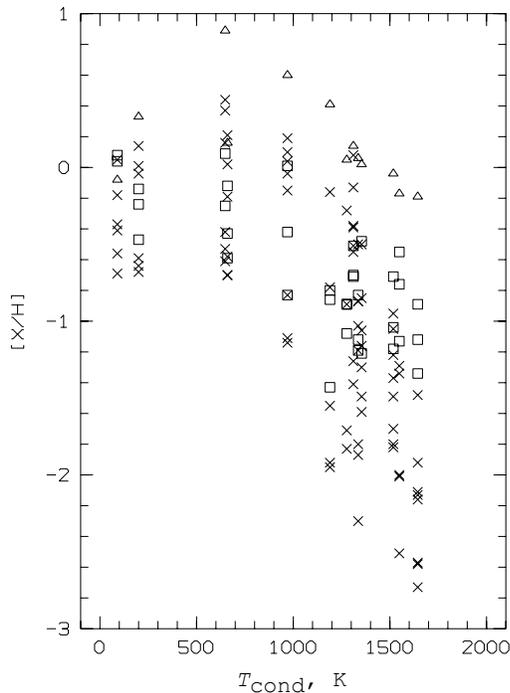


Рис. 7. Область спектра RV Тау вблизи линии  $H_{\alpha}$  для двух моментов наблюдений: сверху фаза  $\phi = 0.26$ , внизу —  $\phi = 0.76$  [115].

звезды RV Тау получено солнечное содержание элементов группы железа, дефицит углерода и элементов s-процесса, что указывает на принадлежность объекта скорее к галактическому диску. Элементом модельного анализа является и сравнение наблюдаемого и теоретического спектров в широком диапазоне длин волн. На Рис. 7 показан фрагмент спектра RV Тау с линией  $H_{\alpha}$  для моментов наблюдений.

В то же время металличность и картина распространенности химических элементов в целом, полученная для AC Her, указывает на принадлежность этой звезды к объектам гало, а также на эффективность процессов селективной сепарации в околозвездной оболочке. Известно, что химический состав атмосфер звезд с газопылевыми оболочками существенным образом меняется в ходе селективного фракционирования химических элементов. Содержание химического элемента в атмосфере зависит от температуры конденсации его атомов на пылинках оболочки,  $T_{\text{cond}}$ , вследствие чего содержание Fe, Mg, Si, Ca может быть существенно понижено, в то время как элементы CNO-группы, S, и даже Zn, принадлежащий группе железа, име-



**Рис. 8.** Дифференциальное содержание химических элементов  $[X/H]$  в атмосферах звезд типа RV Tau в зависимости от температуры конденсации элемента  $T_{\text{cond}}$ . Открытые символы — данные Клочковой и Панчука [115] для RV Tau, AC Her, U Mon и AI CMi. Крестики — данные из [116–118] для других звезд типа RV Tau.

ют нормальные содержания. Рис. 8 иллюстрирует данный факт.

Предложено качественное объяснение правильных изменений блеска пульсирующих звезд типа RV Tau как проявление суммы блеска атмосферы и оболочки, физические условия в которых изменяются несинхронно. Мы считаем, что, интерпретируя поведение фотометрических характеристик блеска, эквивалентных ширин и лучевых скоростей, следует иметь ввиду влияние спектра оболочки на все эти характеристики. Несинхронность (или разное запаздывание реакции оболочки на изменения в атмосфере) можно попытаться объяснить протяженностью оболочки и процессами конденсации. Формирование пыли в атмосфере и внешней оболочке должно приводить к ослаблению фотосферного излучения в оптическом диапазоне и переизлучению энергии в ИК диапазоне. Поэтому в видимом участке спектра отношение вкладов от оболочки и атмосферы регулируется тремя факторами: изменением эффективной температуры атмосферы, что приводит к изменению интенсивности атмосферных и оболочечных абсорбций, уходом части атомов металлов в твердую фазу (вследствие чего интегральное по-

глощение в линиях как атмосферы, так и оболочки может снижаться) и пылевым поглощением.

### 5.3. Звезды типа R CrB и родственные объекты

Звезды типа R CrB — это F–G сверхгиганты с избытками ИК потока, атмосферы которых обеднены водородом. Этот тип звезд обладает уникальным свойством — специфическим изменением блеска, что обусловлено эпизодами выброса пыли. Более детально свойства звезд типа R CrB представлены в обзоре [119], свойства самой звезды R CrB см. в [120]. Для изучения звезд типа R CrB на БТА в ходе долговременной программы Т. Киппера выполняется мониторинг звезды прототипа R CrB [121], для которой в двух фазах получены спектры высокого спектрального разрешения: первый — в 2003 г. на нисходящей ветви кривой блеска, он понизился до  $12^m$ , второй — в процессе поярчания звезды до  $7^{m5}$ . Описаны типичные для этого типа звезд узкие и широкие эмиссии и измерены соответствующие лучевые скорости. Как видно из Рис. 7 в работе [121], вблизи минимума блеска полоса системы Свана C2(0,0) наблюдается в эмиссии, вблизи максимума — в абсорбции. Несколько вращательных линий красной системы CN(5, 1) и низковозбужденные линии FeI обнаружены в абсорбции. Изучена сложная кинематическая картина в протяженной атмосфере и околзвездной оболочке звезды.

Параметры атмосферы звезды Z UMi [122], принадлежащей к типу звезд R CrB,  $T_{\text{eff}} = 5250$  K и  $\log g = 0.5$ , позволяют отнести звезду к самым холодным звездам этого класса. Подтвержден дефицит водорода, получен значительный дефицит железа,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.85$ . Кроме того, обнаружен большой избыток лития:  $[\text{Li}/\text{Fe}] = +1.9$ .

Среди далеко проэволюционировавших звезд выделена небольшая группа HdC-звезд, для которых характерен *большой дефицит водорода*. К настоящему времени в группу HdC-звезд входят пять горячих углеродных звезд с сильно выраженным дефицитом водорода. HdC-звезды не имеют ни глубоких минимумов блеска, ни теплых пылевых оболочек, характерных для родственной группы — звезд типа R CrB. На БТА со спектрографом НЭС получены спектры высокого разрешения для нескольких HdC-объектов: KS Per, XX Cam, Z UMi и  $\nu$  Sgr. Киппер и Клочкова [123] определили фундаментальные параметры  $T_{\text{eff}} = 9500$  K и  $\log g = 2.0$  и детальный химический состав видимого компонента двойной звезды KS Per, проэволюционировавшего настолько далеко, что водород в его атмосфере почти полностью замещен гелием: методом синтетических спектров определены  $[\text{H}/\text{He}] = 3 \times 10^{-5}$  и металличность

$[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8$  dex. Очень большой избыток азота  $[\text{N}/\text{Fe}] = +1.4$  dex при дефиците углерода и кислорода соответствуют ожидаемым величинам для звезды на заключительных стадиях эволюции.

По спектрам, полученным с высоким отношением  $S/N > 250$ , определены фундаментальные параметры ( $T_{\text{eff}} = 7250$  K,  $\log g = 0.8$ ) и детальный химический состав HdC-звезды XX Cam [124]. Из-за большого дефицита водорода для анализа спектра XX Cam потребовался расчет специальной (содержание водорода на восемь порядков ниже нормы и отношение  $[\text{C}/\text{He}] = 0.01$ ) модели атмосферы, при этом учтены дополнительные источники поглощения (молекулы CO, CN, C<sub>2</sub>). В итоге подтверждено очень низкое содержание водорода (эквивалентная ширина H $\alpha$  в несколько раз меньше, чем линии Ti I  $\lambda$  6562.3 Å). Избытки Li и элементов s-процесса не обнаружены.

Недавно опубликованы [125] результаты изучения химического состава и динамического состояния атмосферы  $\nu$  Sgr, самой горячей HdC-звезды ( $T_{\text{eff}} = 12\,300$  K). Выявлен ожидаемый избыток азота  $[\text{N}/\text{Fe}] \approx +1.0$  dex и очень большие избытки тяжелых металлов Sr, Y, Ba. В спектре отождествлены запрещенные и разрешенные эмиссии, формирующиеся в околос звездном диске.

Выполнен анализ спектров высокого разрешения [126] проэволюционировавшей звезды RU Cam, относящейся к цефеидам II-го типа населения. Для двух моментов спектральных наблюдений на БТА+НЭС измерена лучевая скорость  $V_r = -21.7 \pm 0.8$  и  $-23.1 \pm 1.0$  км/с. Зависимость скорости от глубины формирования линии в атмосфере не выявлена. Оба спектра содержат пекулярную деталь — эмиссионный компонент D-линий Na I, положение которого согласуется с лучевой скоростью по линиям металлов. Определены параметры  $T_{\text{eff}} = 5250$  K и  $\log g = 1.0$ . Дефицит водорода, ожидаемый согласно более ранним публикациям, не подтвержден. Металличность незначительно отличается от солнечной:  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.37$ . Найдены очень большие избытки углерода,  $[\text{C}/\text{Fe}] = +0.98$ , и азота,  $[\text{N}/\text{Fe}] = +0.60$ . Отношение  $\text{C}/\text{O} > 1$ , а изотопный состав углерода  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 4.5$ . Кроме того, выявлен значительный избыток натрия,  $[\text{Na}/\text{Fe}] = +0.55$ .

#### 5.4. “Вновь рожденные” звезды: V4334 Sgr, FG Sge, V838 Mon

Явление очень поздней вспышки гелия (Very Late Thermal Pulse) представляет собой вспышку в обогащенном гелием слое планетарной туманности, в результате чего центральная звезда возвращается к стадии AGB. Звезды, прошедшие

VLTP, получили название “вновь рожденные (born again)”. Процесс VLTP удается наблюдать крайне редко. Теоретические сценарии указывают на вероятность такого события 1 раз в 10–20 лет и даже в столетие [127]. До вспышки объекта Сакураи к этому типу звезд относили лишь две: FG Sge и V605 Aql [128]. Объект Сакураи (V4334 Sgr) вспыхнул в феврале 1996 г., а в июле 1996 г. на БТА были получены первые спектры высокого спектрального разрешения этого пекулярного объекта, который за 2 года поярчал примерно на  $4^{\text{m}}5$  [129]. За это время его температура снизилась примерно с 8000 до 6000 K, а светимость возросла [129]. По спектрам БТА Киппер и Клочкова [130] определили фундаментальные параметры и детальный химический состав. Дефицит водорода третьего порядка по сравнению с атмосферой Солнца, большие избытки CNO и тяжелых металлов s-процесса подтверждают предположение о том, что объект Сакураи пережил финальную слоевую гелиевую вспышку. Эти широко цитируемые результаты [130] добавили объект к ограниченной выборке звезд на редко наблюдаемой и далеко продвинутой стадии эволюции.

##### 5.4.1. Мониторинг звезды FG Sge

Спектральный мониторинг быстро эволюционирующей звезды FG Sge начат на БТА после перехода звезды в 1992 г. в состояние чередующихся глубоких минимумов блеска. Подобный режим переменности блеска характерен для звезд типа R CrB. В 1993 г. по эшелле спектрам, полученным за 2 недели до минимума блеска, Т. и М. Киппер [131] определили фундаментальные параметры, рассчитали содержания 18 химических элементов и впервые обнаружили в спектре молекулярные детали — полосы Свана молекулы C<sub>2</sub>.

Обнаружение объекта Сакураи стимулировало проведение спектрального мониторинга FG Sge [132, 133]. В июне и июле 1998 г. на БТА с помощью эшелле-спектрографа PFES были впервые получены спектры высокого разрешения FG Sge в состоянии экстремально глубокого минимума блеска — видимый блеск звезды в момент наблюдений был  $V \approx 15^{\text{m}}$  [132]. Как видно из Рис. 9, спектр звезды в данном состоянии радикально отличается от спектра в спокойном состоянии: отсутствуют многочисленные абсорбции, но наблюдаются сильные эмиссии, отождествленные с линиями низкого возбуждения нейтральных и ионизованных атомов железа, редкоземельных элементов и щелочных металлов. Лучевая скорость, измеренная по линиям этих элементов, совпадает со значением скорости звезды, найденной ранее по абсорбционному спектру звезды в максимуме блеска [131]. В спектрах присутствуют сильные эмиссионные полосы системы Свана

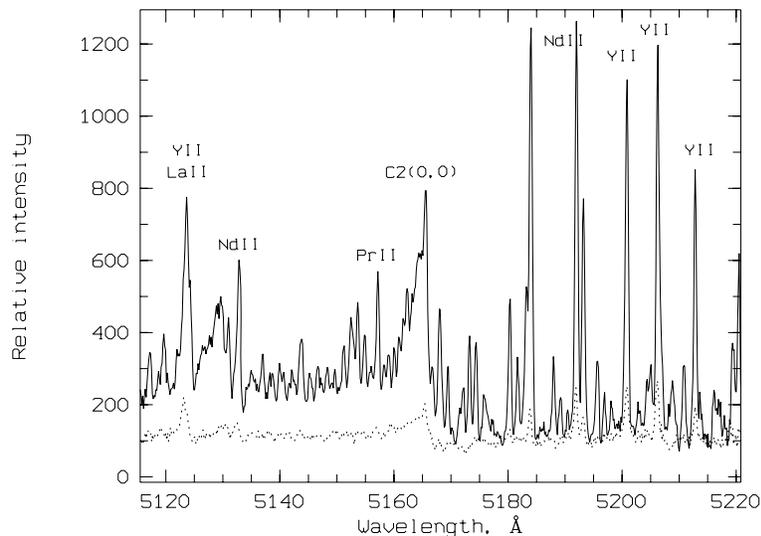


Рис. 9. Фрагменты спектров FG Sge, полученных в минимуме блеска летом 1998 г. ( $V \approx 15^m$ ): 19 июня (сплошная линия) и 11 июля (точки). Указано отождествление избранных деталей [132].

молекулы  $C_2$ , причем значение лучевой скорости, измеренной по головам полос, также совпадает со значением скорости звезды по абсорбционному спектру. В спектрах отождествлены двухкомпонентные линии туманности, окружающей звезду, что позволило измерить скорость расширения туманности: около 33 км/с. Самые мощные и широкие (около 180 км/с) спектральные детали принадлежат дублетам натрия Na I и калия K I. Ширина эмиссионных компонентов этих дублетов указывает на большую дисперсию скоростей в околозвездной оболочке.

Наиболее впечатляющими во всем оптическом спектре FG Sge в минимуме являются мощные эмиссионные линии дублета натрия Na I D, состоящие из набора узких и высокоскоростных (180 км/с) компонентов. Аналогичную сложную структуру имеет и профиль линий дублета K I,  $\lambda = 7664.9$  и  $7699.0$  Å. В целом спектр FG Sge в минимуме блеска напоминает спектр V854 Cep в минимуме блеска, звезды типа R CrB.

#### 5.4.2. Пекулярная переменная V838 Mon = Nova Mon 2002

В 2002 г. наблюдалась мощная вспышка (примерно на  $7^m$ ) звезды V838 Mon, довыспешечное состояние которой неизвестно. Первые спектры высокого разрешения V838 Mon были получены на БТА вблизи максимума блеска звезды, за сутки до второй вспышки. Результаты представлены в коллективной публикации [134], обобщающей анализ данных спектроскопии высокого разрешения и спектрального мониторинга с низким разрешением. В максимуме блеска V838 Mon демонстрировала

спектр F-сверхгиганта. Большинство линий металлов в спектре имели профили типа P Cyg. Однако большой спектральный интервал, зарегистрированный с эшелным спектрографом NES, позволил найти достаточное для определения химического состава количество неискаженных эмиссиями абсорбций. Химический состав звезды оказался близок солнечному (металличность  $[Fe/H] = -0.4$ ), за исключением избыточного содержания Li, Ba, La (довольно странное сочетание элементов). Анализ спектральных данных методом моделей атмосфер указывает на очень высокую светимость звезды ( $\log g = -1.5$ ) и развитую турбулентность в атмосфере: микротурбулентная скорость  $V_t = 12$  км/с. Высокое спектральное разрешение позволило детально проанализировать профили линий Na I и диффузных полос DIB, формирующихся в межзвездной среде. Картина лучевых скоростей межзвездных деталей привела к величине “кинематического” расстояния  $d \geq 4$  кпс. Величина межзвездного покраснения, соответствующая интенсивности DIBs, указывает расстояние  $d \geq 3.1$  кпс [134]. В целом, результаты не подтвердили сценарий поздней He-вспышки, подобно той, что наблюдается в случаях FG Sge или объекта Sakurai.

После максимума температура звезды быстро снизилась до состояния L-сверхгиганта. Вскоре звезда стала невидимой в оптике и наблюдалась лишь в ИК диапазоне. Наблюдения объекта после спада видимого блеска выявили вторичный горячий (B3 V) компонент. Спектральные наблюдения сильно ослабленного объекта V838 Mon выполнялись на БТА с низким спектральным разрешением [135]. Спектр с высоким разрешением получен в 2005 г. с телескопом Кеск [136] и спектрографом

HIRES. Спектр V838 Моп в этой поздней фазе представляет собой сумму спектров горячего компонента, В3 V, и L-сверхгиганта,  $T_{\text{eff}} = 3200$  К, в спектре которого усилились эмиссии молекул.

Природа V838 Моп и ее вспышки остается неясной. Высказано несколько предположений о статусе V838 Моп и причине ее вспышки: необычная новая, “вновь рожденная” AGB-звезда, катаклизмическая переменная, гигант, поглотивший несколько своих планет — звездный мержинг (см. детали и ссылки в [137]). Выбор реального варианта осложнен тем, что неизвестно расстояние до звезды (опубликованные оценки различаются на порядок), а следовательно, и ее светимость. Быстрый характер изменений спектра и блеска V838 Моп, а также полученный химсостав не сочетаются с гипотезой VLTP для объекта на стадии post-AGB, предложенной в работе [138]. Отсутствие небулярной фазы не согласуется со сценарием вспышки классической новой. Большой избыток быстро разрушающегося лития является аргументом в пользу предположения о молодости системы [134]. Горанский и Барсукова, выполняющие систематический мониторинг V838 Моп, предполагают, что до вспышки объект представлял собой систему из двух звезд В3 V [139]. Наибольшему набору наблюдаемых свойств V838 Моп соответствует звездный мержинг [137], в котором участвовали очень молодая маломассивная звезда до ГП и звезда на ГП с массой около  $8 M_{\odot}$ . Эту гипотезу подтверждает и недавнее обнаружение в окрестностях V838 Моп рентгеновского источника [140]. Совокупность наблюдаемых свойств столь необычна, что в литературе становится привычным упоминание нового типа звезд — типа V838 Моп, предложенного Тылендой и Соке-ром [137].

Завершим на этом рассмотрение результатов, полученных на БТА для далеко проэволюционировавших и двойных звезд, и перейдем к звездам, наблюдаемым вблизи главной последовательности (ГП). Непроэволюционировавшие звезды успешно используются в качестве зондов для изучения эволюции таких физических явлений, как звездный магнетизм, химический состав звездных населений Галактики и т. п.

## 6. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД

### 6.1. Поиск магнитных звезд

Звезды в диапазоне масс  $2-10 M_{\odot}$  на ГП имеют конвективное ядро и радиативную оболочку. Факт наличия магнитных полей у этих звезд на ГП хорошо известен: около 10% В–А-звезд на ГП имеют магнитные поля  $B_e = 0.1 \div 20$  кГс. Современные методы позволяют измерять поля

до 10 Гс. В настоящее время известны примерно 500 звезд ГП с полями в основном несколько сотен гаусс, а малая доля имеет сильные поля, несколько килогаусс.  $10 \div 20\%$  белых карликов, далеких потомков звезд в этом же интервале масс, имеют поля от до  $2 \times 10^6$  Гс [141]. Валявин и Фабрика [142] на основе компиляции данных получили диапазон поверхностных полей белых карликов  $B_s = 10^7 \div 10^{9.7}$  Гс и нашли эволюционные эффекты. А что на других эволюционных фазах? Недавние результаты спектрополяриметрических измерений магнитных полей у звезд до ГП показали наличие крупномасштабных полей,  $1 \div 1.4$  кГс у звезд Ae–Be Хербига [143, 144]. Долгое время считалось, что на фазе Хаяши реликтовое поле диссипирует, однако современные расчеты показывают, что длительность фазы Хаяши у звезд с массой более  $3 M_{\odot}$  сокращается до нуля, поэтому реликтовое поле может пережить эту фазу.

В последние годы магнитные поля обнаружены у ряда массивных сверхгигантов. Примерами являются звезды HD 191612 [145] и  $\zeta$  Ori A (O9.7) с полем около 100 Гс [146]. Деление звезд ГП в диапазоне  $2 \div 10 M_{\odot}$  на магнитные и немагнитные размывается по мере улучшения точности измерения поля. Недавно было измерено слабое поле,  $B_e = 0.6 \pm 0.3$  Гс у классической нормальной А-звезды Vega ( $\alpha$  Lyr) [147].

Магнитные звезды по сравнению с нормальными звездами тех же масс имеют аномалии в спектрах и очень медленно вращаются, их скорости вращения  $v \sin i \leq 100$  км/с (см., например, [148]). Однако известны и нарушения этих канонов. К примеру, у звезды HR 7355, вращающейся с периодом  $P_{\text{rot}} = 0^{\text{d}}.5$  ( $v \sin i = 300$  км/с), недавно обнаружено сильное магнитное поле порядка 15 кГс [149].

Магнитные химически пекулярные звезды ГП имеют поля дипольной структуры и спектры, содержащие узкие абсорбции, что обеспечивает высокую точность измерения величины поля по эффекту Зеемана. На 6-м телескопе получен обширный наблюдательный материал — несколько тысяч спектров, обнаружено около 120 новых магнитных CP-звезд. Основной прибор — ОЗСП, изначально с фотографической регистрацией, и с матрицей ПЗС в настоящее время. С 2000 г. используется и НЭС в сочетании с матрицей ПЗС. Основные наблюдательные задачи остались, по сути, прежними: поиск новых объектов по критерию присутствия депрессии в континууме вблизи  $\lambda 5200 \text{ \AA}$ ; долговременный мониторинг избранных магнитных звезд с сильными полями и узкими спектральными линиями; изучение структуры магнитного поля для избранных звезд, включая и поиск радиального градиента поля; изучение проявлений эволюции

магнитных полей. Методика наблюдений, детали обработки данных и результаты по этим направлениям детально рассмотрены в недавнем обзоре И. И. Романиюка [150–152], мы же для полноты нашего рассмотрения результатов “звездных” программ на БТА лишь кратко затронем некоторые аспекты данной проблематики.

Поиск новых магнитных CP-звезд ведется на БТА систематически. В Лаборатории исследований звездного магнетизма предложены эффективные критерии отбора кандидатов для наблюдений, и более 3/4 из них оказались реальными магнитными звездами. За три года было обнаружено около 50 новых магнитных CP-звезд, что больше, чем на всех остальных телескопах мира, вместе взятых.

На основании наблюдений на БТА и литературных данных с высокой надежностью показано, что химически пекулярные звезды с сильными депрессиями в распределении энергии в континууме имеют в среднем в два раза большие магнитные поля и в три раза большие периоды вращения, чем звезды со слабыми депрессиями. Это является дополнительным доказательством того, что медленное вращение звезды является важным фактором, способствующим возникновению феномена магнитных химически пекулярных звезд [153].

Исследована выборка магнитных CP-звезд, имеющих слабое, менее 100 Гс, магнитное поле. Оказалось, что несмотря на слабость магнитного поля, особенности их химсостава такие же, как и у звезд с сильным полем. Оказалось, что слабوماгнитные звезды вращаются так же медленно, как и звезды с сильным полем. Сделан вывод, что магнитное поле не является единственным и определяющим фактором, приводящим к химическим аномалиям. По-видимому, таким фактором может быть медленное вращение, при котором атмосфера становится достаточно стабильной для возникновения диффузии химических элементов под действием гравитации и лучевого давления [154].

Получены предварительные данные о структуре магнитного поля уникальной магнитной звезды HD 45583. Фазовые зависимости магнитного поля хорошо описываются при предположении, что внутри звезды находятся два магнитных диполя, расположенных на противоположных сторонах относительно центра звезды. Положительные монополи оказываются ближе к поверхности, а отрицательные — ближе к центру. По этой причине на поверхности звезды оказываются два положительных магнитных полюса и отсутствуют отрицательные полюса. Вследствие крайней необычности такой конфигурации необходимо повторить наблюдения и уточнить изменение поля с фазой вращения [155].

Выяснилось, что HD 45583 выделяется не только величиной магнитного поля, но и типом переменности поля. В работе [156] для объяснения наличия

вторичного минимума предложены две гипотезы: пятенный характер распределения химических элементов на поверхности звезды или сложная структура поля. В рамках модели наклонного ротатора в простейшем варианте структура поля может быть объяснена в виде комбинации сильно нецентрального диполя (с центром, смещенным на 0.6 радиуса от центра звезды и величиной поля на полюсах — около 17 кГс) и соосного с ним октуполя (величина поля на полюсах которого достигает 45 кГс). Усредненное по всей видимой поверхности поле оценено по расщеплению зеемановских компонент нескольких линий ( $B_s = 34$  кГс). Интересно, что звезда является членом скопления NGC 2232, возраст которого оценивается в  $3 \times 10^6$  лет. Других магнитных звезд в этом скоплении до настоящего времени не обнаружено [155].

### 6.2. Радиальный градиент магнитного поля

Несмотря на то, что толщина атмосферы звезды ГП невелика, всего несколько тысяч километров, продолжается поиск радиального градиента магнитного поля. Даже в случае самой простой геометрии поля (в конфигурации поля преобладает дипольная компонента), задача осложняется неопределенностью шкалы высот в звездной атмосфере и неоднородностью распределения химических элементов по поверхности звезды. В течение многих лет основным объектом данной наблюдательной программы на 6-м телескопе является CP-звезда  $\alpha^2$  CVn [157]. Ввод в практику наблюдений эшелюнного спектрографа НЭС с кварцевой камерой предоставил уникальную возможность определить величину магнитного поля по абсорбциям до и после бальмеровского скачка и оценить таким образом величину градиента. Методические аспекты, а также свежие результаты, полученные для этой звезды, обобщены в статье Романиюка и др. [158].

### 6.3. Химически пекулярные звезды в составе звездных группировок

В течение 1978–1984 гг. была выполнена спектроскопия 120 химически пекулярных (CP) звезд, входящих в состав 10 группировок разного возраста (см. [148, 159] и ссылки в этих работах). Чтобы оценить средние характеристики спектра, для каждого объекта было получено, в среднем, по 5 спектрограмм с обратной линейной дисперсией  $9 \text{ \AA}/\text{мм}$ . В результате впервые на достоверной статистике был сделан вывод о независимости степени пекулярности звезд от возраста на стадии эволюции в пределах ГП. Впервые был сделан вывод об отсутствии потери углового момента пекулярными звездами в процессе эволюции от линии нулевого

возраста в пределах ГП [148]. Было выдвинуто предположение о том, что химические аномалии, замедленное вращение СР-звезд возникают до выхода звезд на исходную ГП [159]. Объем обзора остается непревзойденным более четверти века.

#### 6.4. Происхождение и эволюция магнитных полей звезд ГП

Отдельной задачей было накопление наблюдательных данных для поиска проявлений эволюции магнитного поля звезд. Долгое время оставались неясными механизм генерации магнитного поля у СР-звезд (динамо или реликтовое поле), а также его последующая эволюция. Оптимальным подходом решения этих вопросов является измерения магнитных полей звезд в составе звездных скоплений, что позволяет достаточно надежно фиксировать возраст изучаемых звезд. В 1978–1983 г.г. на БТА + ОЗСП были получены 120 зеемановских спектрограмм и измерены эффективные магнитные поля  $\langle B_e \rangle$  у 19 химически пекулярных звезд в скоплениях и звездных ассоциациях. Помимо этих данных, к анализу были привлечены опубликованные измерения для магнитных звезд в скоплениях. В целом, анализ базировался на данных для 68 звезд в 10 группировках разного возраста [160]. Основные результаты состоят в следующем: впервые были получены наблюдательные доказательства того, что магнитные поля возникают у звезд до их прихода на ГП, таким образом получены аргументы в пользу реликтового механизма происхождения магнитного поля СР-звезд. Отмечено изменение магнитного поля в интервале возрастов группировок, различающихся на три порядка [160], но результат не был статистически значимым из-за значительной дисперсии величины поля у звезд, принадлежащих одному скоплению. Впервые был сделан вывод о зависимости средних значений магнитного поля  $\langle B_e \rangle$  от массы звезды: было показано, что  $\langle B_e \rangle$  у звезд с массами более  $5 M_\odot$  систематически, примерно в два раза, превышает  $\langle B_e \rangle$  у менее массивных звезд. Этот вывод свидетельствовал в пользу реликтового происхождения поля.

В настоящее время на современных спектрографах крупнейших телескопов мира, включая и БТА, продолжается поиск проявлений эволюции магнитного поля звезд ГП. Кудрявцев и Романюк [161], на основе выборки магнитных звезд с большой величиной депрессии на  $\lambda 5200 \text{ \AA}$ , пришли к выводу, что в случае наиболее массивных СР-звезд (He, Si) вероятно снижение величины эффективного поля  $\langle B_e \rangle$  по мере продвижения звезды от исходной ГП к ее границе. Однако этот возрастной эффект отсутствует у более холодных Sr-Cr-Eu магнитных звезд.

Основной проблемой в изучении проявлении эволюции звезд является невысокая точность определения их возраста. Ошибка в оценке возраста для одиночной звезды в поле Галактики средней массы может достигать 100%. Именно по этой причине поиск эволюционных проявлений переносится на звезды в составе звездных группировок (скопления, ассоциации, движущиеся потоки). Ландстрит с большой группой соавторов [162, 163] в исследовании большой выборки (около ста) магнитных звезд, членов рассеянных скоплений, особое внимание в анализе уделили определению фундаментальных параметров и возраста. В результате этим авторам удалось определить возрасты скоплений с точностью около 0.1 dex. Однако выводы этих авторов относительно эволюции магнитного поля принципиально не отличаются от более ранних публикаций. Ландстрит и др. заключили, что у маломассивных звезд с массой ( $M < 2 \div 3 M_\odot$ ) среднее квадратичное значение поверхностного поля  $B_s$  в ходе эволюции на ГП диссипирует с большой постоянной времени, около  $250 \times 10^6$  лет. Отметим, что указанные временные константы сравнимы с продолжительностью жизни этих звезд в полосе ГП. У более массивных звезд ( $M > 4 \div 5 M_\odot$ ) процесс диссипации поля идет быстрее, с постоянной затухания около  $15 \times 10^6$  лет. В работе [163] сделан вывод о сохранении полного магнитного потока в ходе эволюции в пределах ГП. Следует заметить, что в анализе эволюционных эффектов в работах [162, 163] не уделено внимания существенному моменту, а именно наличию дисперсии поля у звезд, принадлежащих одному скоплению.

Интересным аспектом в проблеме магнетизма звезд является изучение их двойственности. Обнаружение двойных магнитных звезд может иметь значение для решения проблем возникновения и эволюции магнитных полей. На БТА первые результаты по этой давней программе получены с использованием метода интерферометрии [164].

## 7. ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЛАКТИКИ

### 7.1. Радиальный градиент металличности в Галактике

Сведения о содержаниях химических элементов, синтезируемых за счет разных процессов нуклеосинтеза, необходимы для восстановления истории процесса звездообразования и функции масс на разных фазах эволюции Галактики. Для изучения наблюдаемых особенностей химического состава диска Галактики (наличие радиального градиента, зависимость химического состава от возраста, однородность диска, величина дисперсии

химического состава) на ОЗСП БТА были получены спектры 66 непроэволюционировавших А–F звезд в составе 8 группировок диска [165, 166]. Их гелиоцентрические расстояния  $R \leq 1.5$  кпк, диапазон возрастов  $2 \times 10^6 \div 4 \times 10^9$  лет. Итогом исследований явился вывод о химической однородности диска и об отсутствии существенных возрастных изменений содержания железа, элементов  $\alpha$ -процесса и тяжелых ядер  $s$ -процесса в Галактическом диске в течение последних 4 млрд. лет, что свидетельствует о низкой эффективности процессов обогащения вещества диска элементами группы железа и ядрами, синтезируемыми в  $\alpha$ - и  $s$ -процессах [167].

К определению радиального градиента химического состава были привлечены 17 цефеид I-го типа населения в интервале расстояний  $R_G = 8.8 \div 11$  кпк [168]. Возрасты цефеид заключены в узком интервале значений, поскольку фаза пульсационной нестабильности — сравнительно краткий промежуток процесса эволюции массивных звезд. Получено значение градиента содержания железа  $d \log(\text{Fe})/dR = -0.058$  кпк $^{-1}$ .

Затронутые в 1980-е годы на БТА задачи исследования эволюции химического состава населения Галактики остаются актуальными, но теперь, спустя 30 лет, наблюдения проводятся на современных эшелельных спектрографах с ПЗС-приемниками на крупнейших телескопах планеты. В частности, исследование градиента химического состава по цефеидам, начатое на БТА в работе [168] по фотографическим данным, было успешно продолжено Андриевским и др. [169] с привлечением спектров БТА, но уже по наблюдениям с ПЗС. В последнее десятилетие химический состав более удаленных от Солнца цефеид интенсивно изучается на других крупных телескопах [170, 171]. В настоящее время общепринятым является вывод о нелинейном поведении металличности на различных  $R_G$ . На зависимости  $[\text{Fe}/\text{H}] - R_G$  наблюдаются изломы, что говорит о многомодовом характере распределения металличности в диске [171]. Наш более ранний вывод о плоском поведении металличности в интервале расстояний  $R_G = 8.8 \div 11$  кпк [168] подтвержден для расстояний  $R_G = 7 \div 9$  кпк [171].

Задача изучения эволюции химического состава галактического диска по звездам в скоплениях в теперешнюю эпоху наблюдений с эшелельными спектрографами в сочетании с ПЗС-приемниками выполняется в более широком диапазоне возрастов, расстояний, металличности, а также с применением современных моделей звездных атмосфер и с учетом не-ЛТР эффектов в заселенностях атомных уровней. Например, в работе [172] получены спектральные данные для гигантов в скоплениях в диапазоне галактоцентрических расстояний

$R_G = 7.5 \div 22$  кпк, что позволило выявить более тонкие эффекты на поведении содержаний элементов.

Одним из широко цитируемых результатов, полученных по эшелельным спектрам БТА, является работа [173], посвященная содержаниям кислорода в атмосферах звезд гало. Расширив исследуемую звездную выборку за счет привлечения опубликованных спектральных данных, авторы [173] рассчитали содержания кислорода по линиям триплета O I  $\lambda 7773 \text{ \AA}$  с учетом эффектов отклонения от локального термодинамического равновесия. Обнаружен линейный рост содержаний кислорода по мере снижения металличности звезды.

## 7.2. Звезды в шаровых скоплениях

*Спектроскопия виргиниды V1 (K307) в шаровом скоплении M12* является продолжением исследования на БТА звезд на кратковременной эволюционной стадии перехода от AGB к планетарной туманности. Основной целью является изучение особенностей химического состава объектов, прошедших последовательную смену источников энерговыделения, перемешивание и вынос вещества из слоев с измененным химическим составом на поверхность. Далеко проэволюционировавшие переменные звезды на стадии после AGB в составе шаровых скоплений представляют особый интерес, поскольку, благодаря принадлежности к скоплению, их эволюционная стадия и светимость фиксируются надежнее, чем для переменных звезд в поле Галактики. Однако, принадлежность исследуемой звезды к системе шаровых скоплений усложняет процесс наблюдений с высоким спектральным разрешением из-за большой удаленности этих объектов от Солнца.

ПЗС-спектры высокого разрешения виргиниды V1 (K307) в составе шарового скопления M12 и ее соседки K307b ( $m = 14^m$ , расстояние от виргиниды менее  $1''$ ) получены со спектрографом PFES и проанализированы методом моделей атмосфер [174]. Основной особенностью спектра K307 являются сложные абсорбционно-эмиссионные профили линий нейтрального водорода  $\text{H}\beta$  и  $\text{H}\alpha$ , а также эмиссия в линии нейтрального гелия  $\text{He I } \lambda 5876 \text{ \AA}$ . Металличность обеих звезд  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.27$  и  $-1.22$  относительно металличности Солнца согласуется с металличностью скопления M12. Совпадение металличности виргиниды (нормированное на содержание водорода) с металличностью двух других звезд в M12, исследованных единой методикой, может трактоваться как свидетельство нормального содержания водорода в атмосфере виргиниды K307. В атмосфере виргиниды выявлено измененное содержание CNO-элементов и повышенное содержание

металлов  $s$ -процесса, что указывает на вынос на поверхность продуктов ядерных реакций.

Высокая светимость  $\log L/L_{\odot} = 2.98$ , химический состав и peculiarity спектра согласуются с эволюцией в полосе нестабильности после AGB. Картина содержаний химических элементов в атмосфере K 307b не отличается от солнечной. Значимые различия обнаружены лишь для натрия и элементов  $\alpha$ -процесса: для них среднее значение  $[X/Fe] = +0.35$ .

Картина лучевых скоростей для K 307 противоречит картине формирования сильной ударной волны. Лучевая скорость, определенная по эмиссионной линии He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$ , практически совпадает со скоростью, определенной по абсорбционным линиям металлов. Это подтверждает вывод, полученный и по спектру водорода, — область высвечивания практически покоится относительно области, формирующей абсорбционный спектр.

*Химический состав звезд в составе шаровых скоплений M10, M12 и M71.* Согласно современным представлениям теорий формирования и химической эволюции Галактики, звезды одного шарового скопления имеют общее происхождение, можно считать, что они имеют, как правило, примерно одинаковый возраст и химический состав. Исследование химического состава звезд шаровых скоплений важно, поскольку дает возможность тестировать теории собственной эволюции звезд и эволюции Галактики на ранних стадиях.

По спектрам БТА + PFES в области длин волн 4300–7900  $\text{\AA}$  определены фундаментальные параметры и содержания 19 химических элементов в атмосферах 5 звезд, принадлежащих шаровым скоплениям M 10, M 12 и M 71 [175, 176]. Распространенность кремния, кальция, элементов железного пика, меди, цинка и элементов, образующихся в процессах нейтронного захвата в исследуемых звездах данных шаровых скоплений, соответствует распространенности этих элементов в звездах гало. Содержание натрия для гигантов скопления M 10 свидетельствует о наличии различных механизмов перемешивания в звездах скопления и гало, или о различных путях обогащения легкими элементами дозвездного вещества в некоторых шаровых скоплениях и гало Галактики.

## 8. СПЕКТРАЛЬНЫЕ АТЛАСЫ

Атлас — хорошая форма обобщения и архивации наблюдательного материала (см. подробнее [177]). В графической и табличной формах сопоставлены спектры высокого разрешения, полученные в основном с помощью эшелле спектрографов в фокусе Нэсмита 6-м телескопа. Отождествлены звездные и межзвездные линии и полосы, для

большинства из них измерены центральные остаточные интенсивности и гелиоцентрические лучевые скорости.

Часто рабочий вариант атласа изготавливается по первому полученному спектру некоторого объекта, с тем, чтобы опираться на него при получении, обработке и анализе новых спектров. Но ценность атласа значительно повышается с увеличением количества включенных в него спектров, опираясь на которые удобно отождествлять линии в спектрах звезд близких спектральных классов, а также выявлять в них различные аномалии. Если атлас демонстрирует постепенное изменение спектра с температурой или светимостью, то правильность отождествления контролируется по усилению или ослаблению линий от спектра к спектру и по изменению формы их профилей. Измерение лучевых скоростей, обычно практикуемое при изготовлении атласа и нацеленное на отождествление линий и описание кинематики атмосферы звезды, также имеет метрологический выход: попутно уточняются эффективные длины волн измеряемых линий. Спектры основных объектов представлены в атласах двойко: графически как зависимости остаточной интенсивности от длины волны (собственно атлас) и таблично.

В ходе обработки данных многолетних наблюдений были созданы и опубликованы следующие спектральные атласы: атлас Альдебарана [178] основывался на фотографических спектрах, полученных с высоким спектральным разрешением на первой камере ОЗСП; атлас сверхгигантов предельно высокой светимости MWC 314 и V1302 Aql [55]; атлас горячих сверхгигантов O9.5–A1 [177]; атлас симбиотической звезды MWC 560 [39]; атлас сверхгигантов B6–A2 [179]; атлас спектров малометаллических F–G субкарликов в видимом диапазоне [180]; атлас канонической post-AGB звезды HD 56126 = IRAS 07134+1005 [181]; атлас спектров малометаллических F–G субкарликов в наземном УФ [182]; атлас спектров сверхгигантов в наземном УФ [183].

Для иллюстрации на Рис. 10 приведен фрагмент из атласа [55] для звезд высокой светимости.

## 9. И ДРУГИЕ ...

За рамками данного обзора осталось немало результатов в области астрофизики звезд, базирующихся на наблюдениях с телескопом БТА. Кратко укажем некоторые из этих программ.

- Моделирование магнитных полей классических (медленно вращающихся) магнитных звезд (см. статьи [184, 185]) и быстрых ротаторов [186], позволяющее определить положение диполя относительно оси вращения

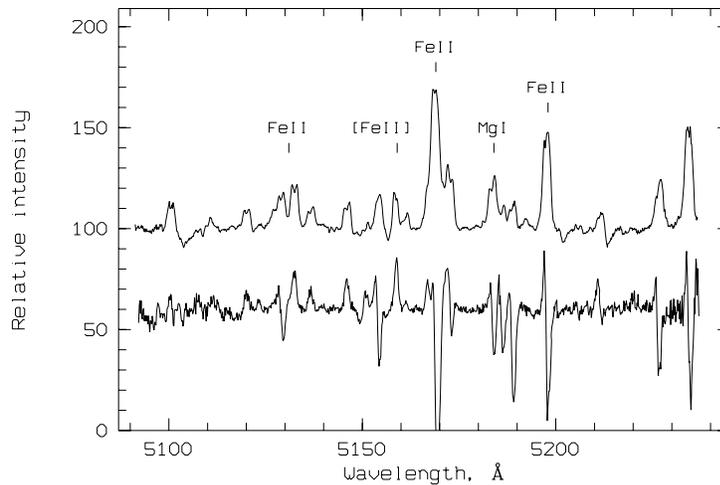


Рис. 10. Фрагмент атласа спектров звезд высокой светимости MWC 314 (вверху) и V1302 Aql (сдвинут вниз на 50 отсчетов) [55].

звезды. Основным результатом моделирования структуры поля для нескольких десятков магнитных звезд — это вывод о типичности асимметричных конфигураций.

- Химический состав звезд горизонтальной ветви в галактическом поле [187–190].
- Химический состав субкарликов в поле Галактики [191–193].
- Спектроскопия пульсирующих звезд типа W Vir, представителей старого населения. Результатом этой программы, помимо определения детального химического состава этих звезд [194–196], стала разработка удобного и широко используемого пакета программ DECH20 для обработки эшелле спектров на персональном компьютере [197].
- Поиск кандидатов в LBV в Млечном Пути и других галактиках [198–200].
- Спектроскопия катаклизмических переменных, базирующаяся на спектрографе СП 160 с малощумящим электронно-оптическим преобразователем. Результаты спектроскопии выборки, включающей карликовые новые, новоподобные и поляры, защищены в виде докторской диссертации [201]. В настоящее время на БТА с редуктором светосилы SCORPIO [16] успешно выполняется комплексное исследование родственных объектов — редко встречающихся предшественников катаклизмических переменных. Эти разделенные двойные системы, вероятно, являются переходной фазой эволюции двойной системы от состояния с общей

оболочкой к катаклизмической переменной (см. детальнее в обзоре [202]. В качестве вторичного компонента предкатаклизмические переменные содержат холодную звезду вблизи ГП, а первичным компонентом является О-В субкарлик или белый карлик. Методы исследования, основные результаты и необходимые ссылки приведены работах [203, 204].

- Спектрополяриметрия молодых (возраст  $T < 10^7$  лет) маломассивных (масса  $M \leq 2 M_{\odot}$ ) звезд типа T Tau для изучения структуры магнитного поля и поиска его переменности. Наблюдения проводятся с ОЗСП в сочетании с анализатором Зеемана [205]. В частности, для VP Tau обнаружена нестационарность поля в области формирования линии He I  $\lambda 5876 \text{ \AA}$ , что, как предполагают авторы, может быть обусловлено нестационарностью мелкомасштабного поля в активных областях.

## 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сделаем несколько замечаний общего характера, касающихся эффективности наблюдений на БТА по программам изучения физики и эволюции звезд.

В целом, большинство перечисленных в данном обзоре программ являются предельными даже для самых крупных телескопов. С наблюдательной точки зрения, задачи усложняются требованием многократных наблюдений объектов из-за их нестационарности.

Необходимо подчеркнуть, что научные программы служили стимулом для развития и совершенствования спектрального комплекса БТА, систем

обработки двумерных и одномерных спектральных данных и методов их анализа.

Исследования двойных и переменных звезд проводились эпизодически, т.к. получение спектрограмм в заранее избранные моменты времени на БТА представляется маловероятным. Успешными были программы спектрального мониторинга тех переменных звезд, характерное время изменчивости для которых составляет часы или годы. Примером может служить уже упомянутое нами исследование быстрой изменчивости профилей в спектре горячей массивной звезды HD 93521 [112]. Мониторинг объектов, период изменчивости которых составляет десятки дней, был менее эффективным из-за многопрограммного статуса телескопа. Одним из немногочисленных примеров удачного мониторинга таких объектов является SS 433, для которого в 1980–1981 гг. было составлено оптимальное расписание наблюдений и были получены спектральные данные, хорошо покрывающие орбитальный период.

Многопрограммный статус телескопа не способствовал и выполнению программ, связанных с наземным сопровождением космических экспериментов.

Следует подчеркнуть, что наиболее результативными оказались долговременные программы сотрудников САО, которые владели как методикой наблюдений на достаточно сложной аппаратуре современного эксперимента в астрофизике, так и процедурами обработки данных. Более того, именно программы сотрудников САО послужили стимулом для модернизации наблюдательных методов и создания новых наблюдательных возможностей телескопа.

Хорошим индикатором эффективности исследований является количество защищенных диссертаций. Только по направлению физики и эволюции звезд на базе наблюдательного материала БТА за три десятилетия работы телескопа защищено около десяти докторских и несколько десятков кандидатских диссертаций.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен коллективу САО РАН, который в течение 35 лет обеспечивает стабильно отличное состояние телескопа БТА, его приемного оборудования, разрабатывает и внедряет в практику современные методы наблюдений и системы обработки данных. Эффективность и слаженность работы технических и научных подразделений САО в непростых условиях функционирования обсерватории обеспечили успех многих научных программ на телескопе БТА. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-02-00319 а) и Программы

фундаментальных исследований Президиума РАН “Происхождение, строение и эволюция объектов во Вселенной”. Наблюдения на телескопе БТА выполняются при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Iben, *Astrophys. J.* **142**, 1447 (1965).
2. I. Iben, *Astrophys. J.* **143**, 516 (1966).
3. V. Paczyński, *Acta Astron.* **20**, 47 (1970).
4. V. Paczyński, *Acta Astron.* **21**, 417 (1971).
5. А. С. Васильев, А. М. Евзеров, М. В. Лобачев, И. В. Пейсахсон, *Оптико-механ. промышленность* **2**, 31 (1977).
6. Н. Г. Зандин, А. Е. Колесников, И. В. Пейсахсон, М. В. Лобачев, *Оптико-механ. промышленность* **2**, 34 (1977).
7. В. С. Рылов, В. Г. Дебур, Л. В. Гявгянен, *Известия КрАО* **67**, 171 (1983).
8. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, *Препринт САО РАН* **70** (1991).
9. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and V. P. Ryadchenko, *Sov. Astron. Lett.* **17**, 274 (1991).
10. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, G. A. Galazutdinov, et al., *Astron. Lett.* **19**, 431 (1993).
11. V. E. Panchuk, J. D. Najdenov, V. G. Klochkova, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 127 (1998).
12. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, И. Д. Найденев, *Оптический журнал* **76**, 42 (2009).
13. О. Н. Гусев, Н. Г. Зандин, М. В. Лобачев, *Оптико-мех. промышленность* **12**, 63 (1976).
14. Ю. Ю. Балегга, Р. П. Верещагина, С. В. Маркелов и др., *Астрофиз. Исслед. (Известия САО РАН)* **11**, 248 (1979).
15. С. В. Драбек, И. М. Копылов, Н. Н. Сомов, Т. А. Сомова, *Астрофиз. Исслед. (Известия САО РАН)* **22**, 64 (1986).
16. В. Л. Афанасьев, Э. Б. Гажур, С. Р. Желенков, А. В. Моисеев, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.* **58**, 90 (2005).
17. O. E. Aab, *Sov. Astron. Lett.* **9**, 315 (1983).
18. O. E. Aab, L. V. Bychkova, I. M. Kopylov, and R. N. Kumaigorodskaya, *Sov. Astron.* **28**, 90 (1984).
19. S. M. Caballero-Nieves, D. R. Gies, C. T. Bolton, et al., *Astrophys. J.* **701**, 1895 (2009).
20. D. H. Clark and P. Murdin, *Nature* **276**, 44 (1978).
21. V. Margon, S. Grandi, and H. Ford, *BAAS* **11**, 446 (1979).
22. V. Margon, H. C. Ford, J. I. Katz, et al., *Astrophys. J.* **230**, L41 (1979).
23. V. Margon, S. Grandi, R. Downes, et al., *BAAS* **11**, 671 (1979).
24. I. S. Shklovskii, *Sov. Astron.* **25**, 315 (1981).
25. S. N. Fabrika, *Astrophys. and Space Sci.* **12**, 1 (2004).
26. I. M. Kopylov, R. N. Kumaigorodskaya, N. N. Somov, et al., *Sov. Astron.* **31**, 410 (1987).

27. I. M. Kopylov, L. V. Bychkova, S. N. Fabrika, et al., *Sov. Astron. Lett.* **15**, 474 (1989).
28. S. N. Fabrika, L. V. Bychkova, and A. A. Panferov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **43**, 75 (1997).
29. S. N. Fabrika, A. A. Panferov, L. V. Bychkova, and V. Yu. Rakhimov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **43**, 95 (1997).
30. T. C. Hillwig and D. R. Gies, *Astrophys. J.* **676**, L37 (2008).
31. K. Kubota, Y. Ueda, S. N. Fabrika, et al., *Astrophys. J.* **709**, 1374 (2010).
32. V. V. Davydov, V. F. Esipov, A. M. Cherepashchuk, *Astron. Rep.* **52**, 487 (2008).
33. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in: *Stellar dynamics: from classic to modern*, Ed. by L. P. Osipkov and I. I. Nikiforov (St. Petersburg, 2001), p. 103.
34. P. K. Abolmasov, S. N. Fabrika, O. N. Sholukhova, and V. L. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **62**, 36 (2007).
35. P. W. Merrill, *Contrib. Mount Wilson Observ.* **659**, 168 (1942).
36. A. J. Deutsch, *Ann. Rep. Mt. Wilson & Palomar Obs.* **11**, 1 (1964).
37. M. Mikolajewski, J. Mikolajewska, and T. N. Khudyakova, *Astronom. and Astrophys.* **235**, 219 (1990).
38. J. Mikolajewska, Yu. Balega, K.-H. Hofmann, and G. Weigelt, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **403**, L21 (2010).
39. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and G. A. Mal'kova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **43**, 18 (1997).
40. Л. Зач, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, *Астрофиз. Исслед. (Известия САО РАН)* **33**, 29 (1991).
41. Л. Зач, *Письма в АЖ* **17**, 613 (1991).
42. L.I. Antipova, A. A. Boyarchuk A. A., Yu. V. Pakhomov, and V. E. Panchuk, *Astron. Rep.* **80**, 704 (2003).
43. A. A. Boyarchuk, Yu. V. Pakhomov, L. I. Antipova, and M. E. Boyarchuk, *Astron. Rep.* **46**, 819 (2002).
44. L. I. Antipova, A. A. Boyarchuk, Yu. V. Pakhomov, and V. E. Panchuk, *Astron. Rep.* **48**, 597 (2004).
45. A. Labeyrie, *Astronom. and Astrophys.* **6**, 85 (1970).
46. A. F. Maksimov, Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, et al. *Astrophysical Bulletin* **64**, 296 (2009).
47. I. I. Balega, Y. Y. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astronom. and Astrophys.* **448**, 703 (2006).
48. E. V. Malogolovets, Y. Y. Balega, D. A. Rastegaev, et al. *Astrophysical Bulletin* **62**, 131 (2007).
49. D. A. Rastegaev, Yu. Yu. Balega, A. F. Maksimov, et al., *Astrophysical Bulletin* **63**, 278 (2008).
50. D. A. Rastegaev, *Astron. Lett.* **35**, 466 (2009).
51. J. D. Fix, *Astrophys. J.* **248**, 542 (1981).
52. C. E. Irvine, *IAU Circ.* **4286** (1986).
53. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **292**, 19 (1997).
54. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astron. Rep.* **46**, 139 (2002).
55. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and N. S. Tavganskaya, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 25 (1999).
56. P. T. Giguere, N. J. Woolf, and J. C. Webber, *Astrophys. J.* **207**, L195 (1976).
57. T. M. Dame, D. Hartmann, and P. Thaddeus, *Astrophys. J.* **547**, 792 (2001).
58. T. J. Jones, R. M. Humphreys, R. D. Gehrz, et al., *Astrophys. J.* **411**, 323 (1993).
59. A. Maeder and G. Meynet, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **76**, 11 (1988).
60. R. M. Humphreys, D. W. Strecker, T. L. Murdock, and F. J. Low, *Astrophys. J.* **179**, L49. (1973).
61. R. D. Oudmaijer, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **129**, 541 (1998).
62. S. Kwok, *J. Royal Astron. Soc. Canada* **70**, 49 (1976).
63. T. Blöcker, Yu. Balega, K.-H. Hoffman, et al., *Astronom. and Astrophys.* **348**, 805 (1999).
64. Dinh-V-Trung, S. Muller, J. Lim, et al., *Astrophys. J.* **697**, 409 (2009).
65. Е. Л. Ченцов, Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук (САО РАН, Нижний Архыз, 2004).
66. Е. Л. Ченцов, *Астрофиз. Исслед. (Известия САО РАН)* **8**, 128 (1976).
67. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astron. Rep.* **48**, 1005 (2004).
68. E. L. Chentsov and E. S. Gorda, *Astron. Lett.* **30**, 461 (2004).
69. R. P. Kudritzki, J. Puls, D. J. Lennon, et al., *Astronom. and Astrophys.* **350**, 970 (1999).
70. R. L. White and R. H. Becker, *Astrophys. J.* **272**, 19 (1983).
71. R. M. Humphreys, N. Smith, K. Davidson, et al., *Astronom. J.* **114**, 2778 (1997).
72. D. A. Allen and J.-P. Swings, *Astronom. and Astrophys.* **47**, 293 (1976).
73. A. S. Miroshnichenko, N. Manset, A. V. Kusakin, et al., *Astrophys. J.* **671**, 828 (2007).
74. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, and K. S. Bjorkman, *Astron. Lett.* **29**, 336 (2003).
75. A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **147**, 5 (2000).
76. A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, et al., *Astrophys. J.* **700**, 209 (2009).
77. A. S. Miroshnichenko, K.-H. Hofmann, D. Schertl, et al. *Astronom. and Astrophys.* **498**, 115 (2009).
78. M. A. Pogodin, A. S. Miroshnichenko, A. E. Tarasov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **417**, 715 (2004).
79. E. A. Barsukova, N. V. Borisov, V. P. Goranskii, et al., *Astron. Rep.* **46**, 275 (2002).
80. E. A. Barsukova, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, et al., *Astron. Rep.* **50**, 664 (2006).
81. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, K. Bjorkman, and V. E. Panchuk, *Astronom. and Astrophys.* **390**, 627 (2002).

82. R. I. Hynes, J. S. Clark, E. A. Barsukova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **392**, 991 (2002).
83. J. S. Clark, *ASP Conf. Ser.* **355**, 269 (2005).
84. N. D. Tureau, J. D. Monnier, W. A. Traub, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **398**, 1309 (2009).
85. V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, A. S. Miroshnichenko, et al., *Astronom. and Astrophys.* **392**, 143 (2002).
86. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavolzhanskaya, and V. E. Panchuk, *Astron. Rep.* **51**, 642 (2007).
87. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Astrophysical Bulletin* **63**, 112 (2008).
88. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolzhanskaya, *Astron. Lett.* **28**, 49 (2002).
89. V. G. Klochkova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 5 (1997).
90. V. G. Klochkova, R. Szczerba, and V. E. Panchuk, *Astron. Lett.* **26**, 439 (2000).
91. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and A. S. Miroshnichenko, *Astron. Rep.* **48**, 288 (2004).
92. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and E. L. Chentsov, *Astronom. and Astrophys.* **97**, 323 (1997).
93. V. G. Klochkova, *Astron. Lett.* **35**, 457 (2009).
94. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, *Препринт САО РАН* **168** (2002).
95. A. Gautschy, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **265**, 340 (1993).
96. V. G. Klochkova, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **272**, 710 (1995).
97. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astron. Rep.* **51**, 994 (2007).
98. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astron. Rep.* **48**, 301 (2004).
99. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, E. L. Chentsov, and M. V. Yushkin, *Astrophysical Bulletin* **62**, 217 (2007).
100. T. M. Gledhill, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **356**, 883 (2005).
101. L. Zacs, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **275**, 764 (1995).
102. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolzhanskaya, *Astrophysical Bulletin* **64**, 155 (2009).
103. V. G. Klochkova, *Astron. Lett.* **35**, 457 (2009).
104. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and N. S. Tavolzhanskaya, *Astron. Rep.* **54**, 234 (2010).
105. L. Decin, H. van Winckel, C. Waelkens, and E. J. Bakker, *Astronom. and Astrophys.* **332**, 928 (1998).
106. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 272 (2008).
107. B. J. Hrivnak, S. Kwok, and K. M. Volk, *Astrophys. J.* **346**, 265 (1989).
108. I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, V. G. Klochkova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **367**, 831 (2001).
109. I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Astronom. and Astrophys.* **376**, 885 (2001).
110. I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, and V. G. Klochkova, *Astronom. and Astrophys.* **377**, 156 (2001).
111. I. A. Usenko, A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **362**, 1219 (2005).
112. A. Kh. Rzaev and V. E. Panchuk, *Astron. Rep.* **52**, 237 (2008).
113. G. Rauw, M. De Becket, H. van Winckel, et al., *Astronom. and Astrophys.* **487**, 659 (2008).
114. I. A. Usenko and V. G. Klochkova, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **387**, L1 (2008).
115. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astron. Lett.* **24**, 650 (1998).
116. S. Giridhar, N. K. Rao, and D. L. Lambert, *Astrophys. J.* **437**, 476 (1994).
117. G. Gonzalez, D. L. Lambert, and S. Giridhar, *Astrophys. J.* **479**, 427 (1997).
118. G. Gonzalez, D. L. Lambert, and S. Giridhar, *Astrophys. J.* **481**, 452 (1997).
119. G. Clayton, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **108**, 225 (1996).
120. N. K. Rao, D. L. Lambert, and M. D. Shetrone, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **370**, 941 (2006).
121. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **15**, 521 (2006).
122. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **15**, 531 (2006).
123. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **17**, 195 (2008).
124. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **14**, 215 (2005).
125. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy*, **21**, 219 (2012).
126. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **16**, 383 (2007).
127. M. M. Miller Bertolami and L. G. Althaus, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **380**, 763 (2007).
128. T. M. Lawlor and J. MacDonald, *Astrophys. J.* **583**, 913 (2003).
129. H. W. Duerbeck, S. Benetti, A. Gautschy, et al., *Astronom. J.* **114**, 1657 (1997).
130. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Astronom. and Astrophys.* **324**, L65 (1997).
131. T. Kipper and M. Kipper, *Astronom. and Astrophys.* **276**, 389 (1993).
132. T. A. Kipper and V. G. Klochkova, *IBVS* **4661**, 1 (1999).
133. T. A. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **10**, 393 (2001).
134. T. Kipper, V. G. Klochkova, K. Annuk, et al., *Astronom. and Astrophys.* **416**, 1107 (2004).
135. E. Barsukova, V. Goransky, P. Abolmasov, and S. Fabrika, *Astronomer's Telegram* **803** (2006).
136. T. Kamiński, M. Schmidt, R. Tylenda, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 33 (2008).
137. R. Tylenda and N. Soker, *Astronom. and Astrophys.* **182**, 33 (2008).
138. T. M. Lawlor, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **361**, 695 (2005).

139. V. Goransky and E. Barsukova, *Astronomer's Telegram* **1821** (2008).
140. F. Antonini, R. Jr. Montez, J. H. Kastner, et al., *BAAS* **42**, 601 (2010).
141. J. P. R. Angel, E. F. Borra, and J. D. Landstreet, *Astrophys. J. Suppl.* **45**, 457 (1981).
142. G. G. Valyavin and S. N. Fabrika, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 69 (1998).
143. E. Alecian, C. Catala, G. A. Wade, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **385**, 391 (2008).
144. E. Alecian, G. A. Wade, C. Catala, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **400**, 354 (2009).
145. J.-F. Donati, J. Babel, T. J. Harries, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **333**, 55 (2002).
146. M. E. Oksala, G. A. Wade, W. L. F. Marcolino, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **405**, L51 (2010).
147. F. Lignières, F. Petit, T. Böhm, and M. Aurière, *Astronom. and Astrophys.* **500**, L41 (2009).
148. V. G. Klochkova and I. M. Kopylov, *Sov. Astron.* **29**, 549 (1985).
149. J.-C. Bouret, J.-F. Donati, F. Martins, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **389**, 75 (2008).
150. I. I. Romanyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 64, (2005).
151. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **62**, 62, (2007).
152. I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **65**, 347, (2010).
153. Д. О. Кудрявцев, И. И. Романюк, *Известия КрАО* **103**, 109, (2007).
154. Yu. V. Glagolevskij, G. A. Chuntunov, *Astrophysics* **50**, 362 (2007).
155. Yu. V. Glagolevskij, *Astrophysics* **52**, 112 (2009).
156. E. A. Semenko, D. O. Kudryavtsev, T. A. Ryabchikova, and I. I. Romanyuk, *Astrophysical Bulletin* **63**, 128 (2008).
157. И. И. Романюк, *Астрофиз. Исслед. (Известия САО РАН)* **22**, 25, (1986).
158. I. I. Romanyuk, V. E. Panchuk, N. E. Piskunov, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **62**, 32, (2007).
159. V. G. Klochkova and I. M. Kopylov, *Sov. Astron.* **30**, 146 (1986).
160. Yu. V. Glagolevskij, V. G. Klochkova, and I. M. Kopylov, *Sov. Astron.* **31**, 188 (1987).
161. D. O. Kudryavtsev and I. I. Romanyuk, *Contrib. Astron. Observ. Skalnatè Pleso* **38**, 229 (2008).
162. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 4685 (2007).
163. J. D. Landstreet, J. Silaj, V. Andretta, et al., *Astronom. and Astrophys.* **481**, 465 (2008).
164. Yu. Yu. Balega, V. V. Dyachenko, A. F. Maksimov, et al., *Astrophysical Bulletin* **67**, 44 (2012).
165. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Sov. Astron. Lett.* **12**, 186 (1986).
166. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, *Астрофиз. Исслед. (Известия САО РАН)* **26**, 27 (1988).
167. V. G. Klochkova, T. V. Mishenina, and V. E. Panchuk, *Sov. Astron. Lett.* **15**, 135 (1989).
168. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Sov. Astron. Lett.* **17**, 229 (1991).
169. S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, R. E. Luck, et al., *Astronom. and Astrophys.* **381**, 32 (2002).
170. S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, R. E. Luck, et al., *Astronom. and Astrophys.* **392**, 491 (2002).
171. S. M. Andrievsky, R. E. Luck, P. Martin, and J.R.D. Lepine, *Astronom. and Astrophys.* **413**, 159 (2004).
172. P. Sestito, A. Bragalia, S. Randlich, et al., *Astronom. and Astrophys.* **488** 943 (2008).
173. T. V. Mishenina, S. A. Korotin, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Astronom. and Astrophys.* **353**, 978 (2000).
174. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, N. S. Tavolganskaya, and V. V. Kovtyukh, *Astron. Lett.* **29**, 748 (2003).
175. T. V. Mishenina, V. E. Panchuk, and N. N. Samus', *Astron. Rep.* **47**, 248 (2003).
176. T. V. Mishenina, A. Kucinskis, S. M. Andrievsky, et al., *Baltic Astronomy*, **18**, 193 (2009).
177. E. L. Chentsov and A. N. Sarkisian, *Astrophysical Bulletin* **62**, 257 (2007).
178. T. K. Kipper and V. G. Klochkova, *An atlas of the spectrum of Aldebaran 4000–6720 Å* (Valgus, Tallinn, 1987).
179. E. L. Chentsov, S. V. Ermakov, V. G. Klochkova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **397**, 1035 (2003).
180. V. G. Klochkova, G. Zhao, V. E. Panchuk, S. V. Ermakov, and Chin. *J. Astronom. and Astrophys.* **4**, 279, (2004).
181. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, N. S. Tavolganskaya, and M. V. Shapovalov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 162 (2007).
182. V. G. Klochkova, G. Zhao, S. V. Ermakov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **6**, 579 (2006).
183. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, T. Kipper, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 466 (2011).
184. Yu. V. Glagolevsky and E. Gerth, *Astrophysics* **51**, 242 (2008).
185. Yu. V. Glagolevsky and E. Gerth, *Astrophysical Bulletin* **65**, 164 (2010).
186. Yu. V. Glagolevsky, *Astrophysical Bulletin* **64**, 62 (2009).
187. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Sov. Astron.* **29**, 320 (1985).
188. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Sov. Astron.* **31**, 37 (1987).
189. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and G. A. Galasutdinov, in: *The Atmospheres of Early-Type Stars*, Ed. by U. Heber and C. S. Jeffery, *Lecture Notes in Physics* **401**, (Springer-Verlag, 1991) p. 247.
190. В. Г. Клочкова, Г. Ю. Таутвайшене, *Астрофиз. Исслед. (Известия САО)* **28**, 103 (1989).
191. V. G. Klochkova and V. E. Panchuk, *Astron. Rep.* **40**, 829 (1996).
192. S. V. Ermakov, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, and G. Zhao, *Astron. Rep.* **46**, 874 (2002).
193. V. G. Klochkova, T. V. Mishenina, V. E. Panchuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 28 (2011).

194. G. A. Galazutdinov and V. G. Klochkova, *Astronom. and Astrophys. Trans.* **8**, 227 (1995).
195. Г. А. Галазутдинов, *Письма в АЖ* **21**, 516 (1995).
196. G. A. Galazutdinov, *Astron. Lett.* **21**, 691 (1995).
197. Г. А. Галазутдинов, *Препринт САО РАН* **92** (1992).
198. S. Fabrika, O. Sholukhova, T. Becker, et al., *Astronom. and Astrophys.* **437**, 217 (2005).
199. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **396**, L21 (2009).
200. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Astrophysical Bulletin* **65**, 140 (2010).
201. Н. Ф. Войханская, *Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук (САО РАН, Нижний Архыз, 1991)*.
202. N. F. Vojkhanskaja, *Astrophysics* **50**, 351 (2007).
203. V. V. Shimansky, S. A. Pozdnyakova, N. V. Borisov, et al., *Astron. Lett.* **34**, 423 (2008).
204. V. V. Shimansky, S. A. Pozdnyakova, N. V. Borisov, et al., *Astrophysical Bulletin* **64**, 349 (2009).
205. G. A. Chuntunov, D. A. Smirnov, and S. A. Lamzin, *Astron. Lett.* **33**, 38 (2007).

## Study of the Physics and Evolution of Stars at the 6-m Telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences

V.G. Klochkova

Since 1978, extensive observations of stars have been performed at the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences using both standard and newly developed instruments. We give a retrospective review of the results obtained within the framework of observational programs carried out at the 6-m telescope and aimed at the study of the physics and evolution of single and multiple stars of different masses.

*Keywords: stars: evolution—stars: binary—stars: binary: close—stars: binary: symbiotic—stars: AGB and post-AGB—stars: with emission lines, Be—stars: supergiants—stars:variable—stars: variable: S Doradus—stars: variable: Cepheids—stars: chemicallypeculiar—stars: magnetic field—Galaxy: chemical composition—Galaxies: globular cluster—astronomical data bases: atlases*