

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*  
*УДК 524.31.01-355*

**СЕНДЗИКАС Евгений Гедиминович**

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДАЛЕКО ПРОЭВОЛЮЦИОНИРОВАВШИХ ЗВЕЗД**

(01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия)

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Нижний Архыз – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки  
Специальной астрофизической обсерватории  
Российской Академии Наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующая лабораторией астроспектроскопии САО РАН

**Клочкова Валентина Георгиевна**

**Официальные оппоненты:**

- доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экспериментальной астрономии физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова” **Расторгуев Алексей Сергеевич**
- кандидат физико-математических наук, доцент, Институт физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования “Казанский (Приволжский) федеральный университет” **Шиманский Владислав Владимирович**

**Ведущая организация:** НИИ физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования “Южный федеральный университет”

Защита состоится 19 октября 2018 г. в 09:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 002.203.01  
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

## Общая характеристика работы

Оптическая спектроскопия звезд на продвинутых стадиях эволюции является актуальным направлением астрофизических исследований. Детальное исследование post-AGB кандидатов (звезд, прошедших стадию асимптотической ветви гигантов, далее – AGB) началось в 90-е годы XX века, после отождествления галактических ИК-источников, зарегистрированных аппаратурой спутника IRAS. Первые списки отождествленных кандидатов были опубликованы в обзоре Квока [1], который привел и основные критерии, позволяющие отнести звезду к стадии post-AGB. Основным признаком принадлежности звезды к стадии post-AGB является сочетание высокой светимости с наличием избытка инфракрасного потока.

На стадии post-AGB наблюдаются далеко проэволюционировавшие звезды малых и промежуточных масс, с исходными массами на главной последовательности не более  $8 \div 9 M_{\odot}$ . На предшествующей AGB-стадии эти звезды наблюдаются в виде холодных (их эффективная температура  $T_{\text{eff}} \approx 3000 - 5000 \text{ K}$ ) красных сверхгигантов. После истощения гелия в ядре AGB-звезды с исходной массой в интервале  $2 \div 4 M_{\odot}$ , образуется вырожденное углеродно-кислородное ядро, окруженное энергетически активными (попеременно) слоями горения гелия и водорода. Большую часть времени энерговыделение обеспечивает водородный слой, однако, по мере присоединения продуктов горения водорода к гелиевому слою, в последнем происходит кратковременное возгорание гелия. Данная конфигурация внутреннего строения звезды неустойчива, теория предсказывает достаточно эффективное перемешивание и вынос (за счет проникающей конвекции) в атмосферу звезды тяжелых металлов, синтезированных в ядерных реакциях, сопровождающих указанные процессы энерговыделения (см обзор [2] и ссылки в нем). В этой фазе, завершая свою эволюцию за счет термоядерных реакций, звезда за короткое (в эволюционной временной шкале) время теряет до 40-80% своей массы. Таким образом, именно post-AGB звезды являются основными поставщиками в межзвездную среду тяжелых металлов s-процесса.

Первые успешные результаты спектроскопии post-AGB кандидатов на 6-м телескопе БТА были опубликованы в 1995 г. [3]. В течение двух последующих десятилетий выполнялось систематическое исследование спектров сверхгигантов с большими избытками ИК-излучения (вследствие сброса вещества вокруг звезды образуется оптически толстая оболочка и звезда ослабевает на несколько величин). Программа включает выборку звезд на стадии асимптотической ветви гигантов и post-AGB, а также некоторые родственные звезды с неясным эволюционным статусом [4]. Исходной целью программы было определение фундаментальных параметров исследуемых звезд и поиск аномалий химического состава их атмосфер, связанных с синтезом химических элементов на предшествующих стадиях эволюции. По мере выполнения программы обнаружены новые проблемы и задачи в спектроскопии звезд с большими избытками ИК-потока. Выявлена неоднородность исходной выборки сверхгигантов с избытками ИК-излучения, поэтому в рамках программы исследуются близкие по

проявлениям, но более массивные звезды высокой светимости (гипергиганты, сверхгиганты с феноменом В[e]).

Принципиальным моментом исследования является изучение кинематической картины в атмосферах центральных звезд этих объектов, теряющих массу за счет мощного ветра, что создает расширяющуюся околозвездную газопылевую оболочку сложной структуры. В последние наблюдательные сезоны основным аспектом программы является определение эволюционного статуса звезд, а также детальное изучение поля скоростей в атмосфере звезды и околозвездных структурах. Ведется поиск закономерностей между фундаментальными параметрами звезд, наличием проявлений звездного нуклеосинтеза и особенностями морфологии и химического состава оболочек. Для выявления вероятной двойственности, пульсационной неустойчивости, а также для изучения переменности процесса истечения вещества выполняется спектральный мониторинг избранных объектов, нацеленный на изучение переменности спектра и картины лучевых скоростей.

Такое расширение задачи потребовало проведения для каждого изучаемого объекта многократных спектральных наблюдений с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн. Существенная часть кандидатов в post-AGB демонстрирует переменность лучевой скорости  $V_r$  с характерным временем процесса в несколько сотен дней, что может говорить в пользу их двойственности. Однако далеко не всегда характер переменности  $V_r$  согласуется с гипотезой двойственности. Например, для некоторых объектов наблюдаются периодические (и квазипериодические) изменения  $V_r$ , явно обусловленные пульсациями. Пульсационная неустойчивость присуща многим объектам на post-AGB-стадии, это следует уже из факта их расположения в полосе неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Картина переменности  $V_r$ , обусловленная двойственностью, зачастую осложнена и дифференциальными движениями в протяженных атмосферах изучаемых объектов.

Основной проблемой в изучении каждого объекта программы является определение его фундаментальных параметров (светимость и эффективная температура) и содержания большого набора химических элементов. Сочетание этих параметров дает возможность зафиксировать эволюционную стадию звезды и сопоставить выявленные особенности химического состава с ожидаемыми для данной стадии эволюции звезды той или иной массы.

## Актуальность темы

Исследуемая выборка post-AGB и AGB кандидатов включает ряд звезд, расположенных на высоких галактических широтах, часть объектов в предшествующих публикациях отнесена к стадии post-AGB. Проблема существования звезд высокой светимости на высоких широтах Галактики была известна еще до появления результатов миссии IRAS как проблема звезд типа UU Her. В 80-е г.г. этим странным объектам уделялось много внимания, что было связано с внутренним противоречием изначального представления о них, как о классических

сверхгигантах, пребывающих на столь высоких широтах Галактики. В последующие десятилетия, после отождествления объектов IRAS, выборка сверхгигантов, находящихся далеко вне плоскости Галактики существенно расширилась. Имея возможность получить высококачественные спектры довольно слабых звезд с околозвездными оболочками, мы сосредоточились на проведении спектроскопического мониторинга двух переменных объектов, расположенных вне плоскости Галактики: центральной звезды ИК-источника IRAS 01005+7910, спектральная переменность которой была обнаружена по наблюдениям на БТА [5] и переменной V534 Lyr.

Подчеркнем, что программа мониторинга сверхгигантов различной природы является предельной для спектроскопии высокого спектрального разрешения даже на самых крупных телескопах. С наблюдательной точки зрения задача усложняется необходимостью многократных наблюдений переменных объектов, а также высокими требованиями к стабильности аппаратуры и, в частности, к высокой точности позиционных измерений.

## Цели и задачи исследования

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Проведение на 6-метровом телескопе с эшелле спектрографом НЭС [6] многолетнего мониторинга двух звезд с высоким спектральным разрешением. Позиционные и спектрофотометрические измерения данных в рамках единого методического подхода.
2. Определение спектрального класса и светимости переменной центральной звезды ИК-источника IRAS 01005+7910, анализ кинематического состояния ее атмосферы и оболочки, изучение временных изменений, обусловленных пульсациями, нестабильным ветром и истечением протяженной атмосферы. Для оценки расстояния до объекта необходимо детальное изучение межзвездных деталей в спектре звезды.
3. Проведение спектрального мониторинга и детальное изучение параметров высокоширотной переменной звезды V534 Lyr с неясным эволюционным статусом. Определение основных параметров звезды, расчет химического состава атмосферы. Анализ кинематического состояния атмосферы и оболочки, а также поиск временных изменений и причин этой переменности. Оценка пространственного положения объекта и расстояния до него. Фиксация эволюционного статуса объекта.
4. Создание сравнительного спектрального атласа в широком диапазоне длин волн для трех А-сверхгигантов принципиально различающихся масс.

## Научная новизна работы

Научная новизна работы обеспечена тем, что в работе используются новые спектральные данные, полученные с высоким спектральным разрешением с помощью эшеллевого спектро-

графа НЭС 6-м телескопа БТА, в том числе и уникальные данные многолетнего спектрального мониторинга двух звезд, которые позволяют изучить картину кинематики на различных уровнях в атмосфере звезды и в околозвездной оболочке, а также поведение поля скоростей со временем.

1. Благодаря многолетнему мониторингу ИК-источника IRAS 01005 +7910 рассмотрена переменность профилей спектральных деталей и картины лучевой скорости. Впервые сделан вывод о начале ионизации околозвездной оболочки и близости стадии планетарной туманности. Впервые зафиксированы низкая скорость ветра (в интервале  $27 \div 74$  км/с для разных моментов наблюдений) и большая интенсивность длинноволновой эмиссии (превышение уровня континуума до 7 раз). Впервые отождествлены все части пятикомпонентного профиля D-линий NaI. Два длинноволновых компонента являются межзвездными, формирующимися в Местном рукаве Галактики. Наличие компонента  $V_r = -65.3$  км/с, возникающего в межзвездной среде рукава Персея, позволяет рассматривать  $d = 2.5$  кпк как нижнюю оценку расстояния до IRAS 01005. Слабый компонент,  $V_r = -52.2$  км/с, формируется в межзвездной среде около рукава Персея. Самый коротковолновый компонент,  $V_r = -72.5$  км/с, может формироваться в околозвездной оболочке, расширяющейся с типичной для post-AGB скоростью  $V_{\text{exp}} \approx 22$  км/с.

2. Впервые изготовлен атлас спектров A-сверхгигантов с уникальным сочетанием высокой точности и широкого диапазона длин волн.

3. Для высокоширотной переменной V534 Lyr обнаружен неизвестный ранее для этой звезды спектральный феномен: раздвоение профилей избранных абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений. Для всех моментов, когда раздвоение присутствует в спектре, оно достигает больших значений:  $\Delta V_r = 20 \div 50$  км/с. Совокупность наблюдаемых особенностей V534 Lyr: вероятное наличие пульсаций в глубоких слоях атмосферы, наблюдаемое в отдельные моменты раздвоение профилей абсорбций металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, пониженная металличность, тип и переменность эмиссионно-абсорбционного профиля H $\alpha$  и H $\beta$  – позволяет отнести звезду к пульсирующим звездам II-го типа населения, которые находятся в полосе неустойчивости вблизи горизонтальной ветви (HB). В целом сделан вывод о полном несоответствии принадлежности V534 Lyr к стадии post-AGB, фигурирующего в ранее опубликованных статьях.

## Научная, методическая и практическая значимость работы

1. Для выполнения поставленной задачи на 6-метровом телескопе БТА в сочетании с эшелъным спектрографом НЭС получена коллекция высококачественных спектров двух малоизученных звезд.

2. В работе показано, что сочетание многолетнего спектрального мониторинга высокого разрешения с численным моделированием звездных атмосфер наиболее успешно решает ряд задач для звёзд промежуточных масс, а именно:

- 2.1. надежное определение фундаментальных параметров звезды и фиксация эволюционного статуса;
- 2.2. детальное определение содержания химических элементов в атмосфере пекулярных сверхгигантов;
- 2.3. анализ кинематического состояния атмосферы и оболочки, а также временных изменений, обусловленных пульсациями, ветром, истечением протяженных атмосфер.

3. Особую значимость имеет создание атласа спектров А–сверхгигантов, существенно различающихся по массе и стадии эволюции. Наблюдаемые свойства этих звезд также принципиально различаются, что обеспечивает актуальность сравнения их оптических спектров. Большой диапазон и высокая точность атласа может использоваться для моделирования спектров А–звёзд и для отождествления линий в спектрах звёзд близкого спектрального класса.

4. Полученный в работе наблюдательный материал и результаты могут быть использованы в астрономических организациях, занимающихся изучением переменных звезд (в России – это ГАИШ МГУ, ИНАСАН, КрАО и др).

## Положения, выносимые на защиту

1. Для центральной звезды ИК–источника IRAS 01005+7910 определены спектральный класс  $B1.5 \pm 0.3$ , класс светимости Ib, отождествлены сотни абсорбционных и эмиссионных спектральных деталей, определены параметры переменности их профилей и лучевой скорости. Отождествлены запрещенные эмиссии [N II] и [S II], наличие которых указывает на близость фазы планетарной туманности, по положению стабильных профилей запрещенных эмиссий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II] определена системная скорость IRAS 01005+7910  $V_{\text{sys}} = -50.5$  км/с.

2. Определение основных параметров для высокоширотной переменной V534 Lyr: температура  $T_{\text{eff}} \approx 10500$  К, ускорение силы тяжести  $\lg g = 2.5$  и измененный в ходе ее эволюции химический состав с большими избытками гелия и азота.

3. Обнаружение у V534 Lyr малоамплитудной переменности  $V_r$  по линиям с высоким потенциалом возбуждения, определение системной скорости  $V_{\text{sys}} \approx -125$  км/с ( $V_{\text{lsr}} \approx -105$  км/с). Обнаружение неизвестного ранее для этой звезды спектрального феномена: раздвоения на величину  $\Delta V_r = 20 \div 50$  км/с профилей избранных абсорбций с низкими потенциалами возбуждения в отдельные моменты наблюдений.

4. Вывод о несоответствии принадлежности V534 Lyr к стадии post-AGB. Ее классификация как пульсирующей звезды II-го типа населения в полосе неустойчивости вблизи горизонталь-

ной ветви.

5. Атлас спектров в интервале длин волн 3920–6720 Å для трех A–сверхгигантов с различным эволюционным статусом: массивный сверхгигант  $\alpha$  Cyg, пекулярный сверхгигант с околозвездным диском 3 Pup и post-AGB звезда BD +48° 1220.

## Достоверность

Достоверность опубликованных результатов обусловлена использованием однородной коллекции высококачественных спектральных данных, полученных на 6-метровом телескопе в сочетании с эшелльным спектрографом. Все спектры обработаны с применением общепризнанных методов и программ. Анализ спектров выполнен методом моделей атмосфер с использованием сетки моделей Куруча, широко известных и ранее протестированных. Все результаты опубликованы в рецензируемых журналах.

## Публикации по теме диссертации

1. Klochkova, V.G. **Spectral Variability of the IR Source IRAS 01005+7910 optical component** / V.G. Klochkova, E.L. Chentsov, V.E. Panchuk, E.G. Sendzikas, M.V. Yushkin // *Astrophysical Bulletin*. - 2014. - V.69. - P. 439-453. arXiv:1410.7879
2. Klochkova, V.G. **Spectral atlas of A-type supergiants** / V.G. Klochkova, E.G. Sendzikas, E.L. Chentsov // *Astrophysical Bulletin*. - 2015. - V. 70. - P. 89-108. arXiv:1502.01444
3. Sendzikas, E.G. **Interstellar and circumstellar medium in the direction to IR source IRAS 01005+7910** / E.G. Sendzikas // *Astrophysical Bulletin*. - 2016. - V. 71. - P. 75-81. 2016.
4. Sendzikas, E.G. **A Spectroscopic Study of the High-Latitude Far Evolved Star V534 Lyr** / E.G. Sendzikas, E.L. Chentsov // *Astronomical Society of the Pacific, Conference Series*. - 2017. - V. 510. - P. 196. arXiv:1612.04946
5. Klochkova, V.G. **On the evolutionary stage of high-latitude variable V534 Lyr** / V.G. Klochkova, E.G. Sendzikas, E.L. Chentsov // *Astrophysical Bulletin*. - 2018. - V. 73. - P. 54-68. arXiv:1802.06615

## Личный вклад автора

В приведенных выше работах личный вклад автора равен вкладу других соавторов. Автор участвовал в проведении наблюдений на 6-метровом телескопе, проводил первичную обработку двумерных эшелле кадров данных со спектрографа НЭС с помощью эшелльного пакета MIDAS (контекст ECHELLE), а также позиционные и спектрофотометрические измерения в одномерных экстрагированных спектрах, с помощью пакета DECH20t; определял параметры



моделей звёздных атмосфер, расчеты моделей атмосфер и содержаний химических элементов выполнены с помощью пакета WIDTH9 [7], расчет синтетических спектров выполнен программой SynthV [8] (эти программы основаны на моделях Куруца [9] и адаптированы к среде OS Linux); принимал участие в обсуждении и формулировке результатов, в подготовке статей.

## Апробация результатов работы

проведена на конференциях:

1. V Пулковская молодёжная конференция, Санкт-Петербург, Пулково, 9-11 июня 2014 года.
2. Конкурс-конференция научных, научно-технических и научно-популярных работ, САО РАН, 6 февраля 2015 года.
3. Конкурс-конференция научных, научно-технических и научно-популярных работ, САО РАН, 5 февраля 2016 года.
4. Международная астрономическая конференция “Физика звёзд: от коллапса до коллапса”, САО РАН, 3-7 октября 2016 года.

на семинарах:

1. Семинар кафедры “Физики космоса”, ЮФУ, 24 ноября 2017 года.
2. Астрофизический семинар САО РАН, 29 марта 2018 года.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 4-х глав, Заключения, списка литературы и Приложения. Текст содержит 114 страниц, 26 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 174 наименования.

Во **Введении** обсуждается актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость работы, формулируются основные результаты, выносимые на защиту, а также приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертации с указанием личного вклада автора в совместных публикациях.

**Первая глава** содержит расширенное введение в обсуждаемые в диссертации задачи. Раздел 1.1 описывает эволюцию звёзд промежуточных масс от стадии AGB к стадии PN. В нём кратко изложена история исследования звезд на этих стадиях. Кратко излагается общепринятая современная концепция эволюции звёзд промежуточных масс в зависимости от начальных параметров, определяющим из которых служит исходная масса звезды. Раздел 1.2 описывает возможные типы переменности звёзд на данной эволюционной стадии и причины их возникновения. Переменность может быть вызвана двойственностью или пульсациями атмосферы звезды, вследствие падения вещества на звезду, сброса вещества или прохождения ударных волн. Картина переменности может осложняться сочетанием сразу

нескольких причин. В разделе 1.3 рассмотрена проблема “спектроскопической мимикрии” и приводятся несколько убедительных примеров, когда спектры post-AGB объектов маскируются под спектры гипергигантов. Раздел 1.4 посвящён исследованию химического состава post-AGB звёзд, изучению процессов нуклеосинтеза на стадии AGB, перемешивания и выноса свежесинтезированного вещества в атмосферу звезды, а затем и в околозвёздную оболочку с последующим обогащением межзвёздной среды. В разделе 1.5 описаны особенности химического состава пульсирующих сверхгигантов, проходящих стадию post-AGB. Принято считать, что пульсирующие сверхгиганты типа RV Tau проходят эволюционную фазу после AGB (Гинголд, 1985 [10]). Уяснение роли пульсаций в процессе перемешивания и выноса переработанного вещества служит дополнительным стимулом для изучения детального химического состава сверхгигантов типа RV Tau. Однако пока о химическом составе этих объектов известно очень немного для того, чтобы сделать определенные выводы. Пульсирующие звезды данного типа имеют необычные фотометрические и спектроскопические свойства, отличающие этот класс объектов от родственных виргинид (звезды типа W Vir) и полуправильных переменных сверхгигантов. Главная особенность достаточно стабильных периодических пульсаций звезд RV Tau – наличие двух минимумов на фазовой кривой блеска. По своим свойствам звезды типа RV Tau с минимальными светимостью (массой) и периодами (менее 20 дней) постепенно переходят в виргиниды. Отдельно рассмотрена проблема сверхгигантов типа UU Her. Сверхгиганты типа UU Her расположены на высоких галактических широтах и имеют пространственные скорости, типичные для населения гало. Эти объекты могут быть как молодыми массивными звездами, недавно оказавшимися на высоких широтах, так и старыми маломассивными звездами, продвинувшимися в ходе эволюции до стадии post-AGB. В разделе 1.6 кратко показаны последние результаты исследований, проведенных на основе спектроскопии высокого разрешения на БТА. Определены параметры и химический состав атмосфер для нескольких десятков звезд с избытками ИК-потока. Для семи звезд были найдены эволюционные изменения химического состава (большие избытки элементов s-процесса или hot-bottom процесса) [4, 11]. На основе репрезентативной выборки звезд в статьях [4, 11] сформирована выборка post-AGB звезд с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами s-процесса, и с обогащенными углеродом околозвёздными оболочками. Анализ свойств этой подвыборки привел к выводу о взаимосвязи peculiarity профилей линий (наличие эмиссионного компонента в D-линиях дублета Na I, характер молекулярных деталей, асимметрия линий, разрешенные или запрещенные эмиссии металлов, формирующиеся в оболочках, расщепление профилей сильных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня) с кинематическими и химическими свойствами околозвёздной оболочки и с типом ее морфологии [4].

**Вторая глава** описывает основные методы, с помощью которых осуществлялись наблюдения и обработка полученных спектров, а также алгоритмы, использованные для анализа

данных, определения фундаментальных параметров звезд и расчета содержаний химических элементов. В разделе 2.1 описан процесс наблюдения на 6-метровом телескопе в сочетании с эшелльным спектрографом НЭС и инструментальные эффекты матрицы ПЗС. Раздел 2.2 посвящён первичной обработке изображений эшелле-спектров с использованием контекста Echelle пакета MIDAS. На этом этапе выполнялась экстракция одномерных спектров из полученных в наблюдениях двумерных ПЗС-изображений и калибровка спектров по длинам волн. В разделе 2.3 детально представлены процедуры позиционных и спектрофотометрических измерений одномерных спектров с помощью программы современной версии Dech20t, разработанной Г.А. Галазутдиновым. Раздел 2.4 посвящён созданному нами атласу А-сверхгигантов. Для каждой звезды данные  $r(\lambda)$  отдельных эшелльных порядков были соединены в единый массив, в виде изображения спектров и таблицы отождествлений и результатов измерений остаточной интенсивности и лучевой скорости для всех линий. В разделе 2.5 излагается стандартная методика, с помощью которой нами определялись основные параметры звёзд, выполнялись расчеты моделей звездных атмосфер и расчеты синтетических спектров.

В **третьей главе** представлено исследование многочисленных спектров слабой в оптическом диапазоне звезды - оптического компонента ИК-источника IRAS 01005+7910. Раздел 3.1 знакомит нас с объектом IRAS 01005+7910, с историей его исследования и с его особенностями. Переменность спектра центральной звезды этого источника впервые обнаружена на БТА [5]. Объект расположен высоко над плоскостью Галактики, его широта  $b = 16^\circ 6'$ . В оптическом диапазоне объект отождествлен с пекулярным В-сверхгигантом,  $B = 11^m.5$ ,  $V = 11^m.2$ . Положение источника на диаграмме цветов IRAS согласуется со стадией post-AGB. В разделе 3.2 кратко описываются наблюдения объекта, использованные инструменты и методики обработки многочисленных спектров. В работе использованы 23 спектра высокого разрешения ( $R = 60\,000$ ), полученные с эшелле спектрографом НЭС [6] 6-м телескопа БТА в период с 2002 по 2013 г.г. В разделе 3.3 приведены результаты: по слабым симметричным абсорбциям определен спектральный класс звезды, исследованы изменения профилей большинства линий со временем, изучены причины этих изменений, рассмотрены пульсации объекта и возможность его двойственности, а также подробно изучены межзвёздные линии, присутствующие в спектре объекта IRAS 01005+7910. Различия лучевой скорости  $V_r$  по ядрам линий,  $\approx 34$  км/с, частично вызваны деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад  $V_r$  по крыльям линий меньше,  $\approx 23$  км/с, и может быть следствием пульсаций или/и скрытой двойственности звезды. Деформации профилей абсорбционно-эмиссионных линий могут быть связаны с изменениями их абсорбционных (фотосферных) составляющих, с вариациями геометрии и кинематики в основании ветра. Наш материал позволяет утверждать, что за 2 суток изменения достигают уверенно измеряемой величины деформации профилей. Линии  $\text{Na}$  имеют ветровые профили типа P Cug III. Показано, что отклонения ветра

от сферической симметрии невелики. Зафиксированы низкая скорость ветра (в интервале  $27 \div 74$  км/с для разных моментов наблюдений) и большая интенсивность длинноволновой эмиссии (превышение уровня континуума до 7 раз). В разделе 3.4 подводятся итоги исследования оптического компонента ИК-источника IRAS 01005+7910 и приводятся выводы.

**В четвёртой главе** подведены итоги многолетнего мониторинга высокоширотной переменной V534 Lyr. Оптическая спектроскопия звезды проводилась неоднократно, однако, эволюционный статус звезды до сих пор не был фиксирован [12]. В разделе 4.1 излагается история предшествующих исследований этого объекта и обосновывается необходимость проведения спектрального мониторинга для надёжного определения фундаментальных параметров звезды и последующей фиксации ее эволюционного статуса. В разделе 4.2 представлены основные результаты: изучены особенности спектров V534 Lyr, подробно исследованы лучевые скорости и профили всех присутствующих в спектре линий, их временная переменность, сделана оценка светимости и удалённости звезды, определены основные параметры звезды и химический состав. Отметим, что для спектра V534 Lyr характерно усиление линий нейтрального гелия He I при существенном ослаблении линий железа. Обнаружен неизвестный ранее для этой звезды спектральный феномен: раздвоение профилей избранных абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений. Для всех моментов, когда раздвоение присутствует в спектре, оно достигает больших значений:  $\Delta V_r = 20 \div 50$  км/с. Последнее явление связано преимущественно с верхними слоями атмосферы. Это видно, например, из того, что абсорбции Fe II низкого возбуждения (3.2 eV) в спектрах 6.04.2010, 1.06.2010 и 12.10.2013 раздвоены, а формирующиеся глубже абсорбции высокого возбуждения (10.2 eV) остаются одиночными в эти даты. Раздел 4.3 посвящён сравнению полученных результатов с подобными работами других авторов. Совокупность наблюдаемых особенностей V534 Lyr: наличие пульсаций в глубоких слоях атмосферы, пониженная металличность, тип и переменность эмиссионно-абсорбционного профиля H $\alpha$  – позволяет предположить, что звезда относится к пульсирующим звездам II-го типа населения, которые находятся в полосе нестабильности выше HB и эволюционируют к AGB. В зависимости от массы, а следовательно, и от периода пульсаций, это может быть звезда типа BL Her или W Vir. Прямым указанием на статус пульсирующей звезды служат особенности оптического спектра: двухпиковый эмиссионный и переменный во времени профиль линий H $\alpha$ , H $\beta$ , наличие в отдельные моменты наблюдений раздвоения абсорбций и наличие градиента скорости в атмосфере, зарегистрированное 13.06.2017. Здесь полезно обратить внимание на исследование химического состава выборки из 19 переменных звезд II-го типа населения [13], основанных на спектроскопии высокого разрешения. Причем авторы отметили использование для расчетов содержаний химических элементов только тех спектров, в которых отсутствовали признаки расщепления (или асимметрии) абсорбций или эмиссии в линиях серии Бальмера. Авторы [13] сделали вывод о принципиальном различии химического состава звезд типа BL Her или W Vir: в атмосферах звезд типа BL Her содер-

жание Na выше, чем у звезд W Vir. Этот вывод дает нам основание отнести исследуемую звезду V534 Lyr скорее к виргинидам: в спектрах V534 Lyr нам не удалось обнаружить ни одну из линий Na I, ожидаемых в случае избытка этого элемента в атмосфере. В разделе 4.4 подводятся итоги исследования, формулируются выводы.

В **Заключении** формулируются основные выводы диссертации.

## Литература

- [1] Kwok, S. Proto-planetary nebulae / S. Kwok // Annual Review of Astron and Astrophys. - 1993. - V. 31. - P. 63-92.
- [2] Herwig, F. Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars/ F. Herwig // Annual Review of Astron and Astrophys. - 2005. - V. 43. - P. 435-479.
- [3] Klochkova, V.G. Spectroscopy of F supergiants with infrared excess / V.G. Klochkova // Monthly Notices of the RAS. - 1995. - V. 272. - P. 710-716.
- [4] Klochkova, V.G. Circumstellar envelope manifestations in the optical spectra of evolved stars / V.G. Klochkova // Astrophysical Bulletin. - 2014. - V. 69. - P. 279-295.
- [5] Discovery of spectral variation in the optical counterpart of IRAS 01005+7910 / V.G. Klochkova, M.V. Yushkin, A.S. Miroschnichenko, V.E. Panchuk, K.S. Bjorkman // Astronomy and Astrophysics. - 2002. - V. 392. - P. 143-150.
- [6] Панчук, В.Е. Эшелле спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА / В.Е. Панчук, В.Г. Ключкова, М.В. Юшкин // Астрономический журнал. - 2017. - Т. 94. - №9 - С. 808-818.
- [7] Kurucz, R.L. ATLAS12, SYNTHE, ATLAS9, WIDTH9, et cetera / R.L. Kurucz // Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi. - 2005. - V. 8. - P. 14-24.
- [8] Tsymbal, V. STARSF: A Software System For the Analysis of the Spectra of Normal Stars / V. Tsymbal // M.A.S.S., Model Atmospheres and Spectrum Synthesis. - 1996. - V. 108. - P. 198.
- [9] Kurucz, R.L. ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid / R.L. Kurucz // ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. Kurucz CD-ROM No. 13. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory. - 1993. - V. 13.

- [10] Gingold, R.A. The evolutionary status of Type II Cepheids / R.A. Gingold // Mem. Societa Astronomica Italiana. - 1985. - V. 56. - P. 169-191.
- [11] Ключкова, В.Г. Обнаружение тяжелых металлов в околозвездных оболочках PostAGB-звезд / В.Г. Ключкова, В.Е. Панчук // Астрономический журнал. - 2016. - Т. 93. - №3 - С. 308-320.
- [12] Giridhar, S. Chemical composition of evolved stars of high galactic latitude / S. Giridhar, A. Arellano Ferro // Astronomy and Astrophysics. - 2005. - V. 443. - P. 297-308.
- [13] Maas, T. The Chemical Compositions of the Type II Cepheids-The BL Herculis and W Virginis Variables / T. Maas, S. Giridhar, D.L. Lambert // Astrophysical Journal. - 2007. - V. 666. - P. 378-392.