

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)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Научный руководитель :
доктор физико – математических наук
Клочкова Валентина Георгиевна

Нижний Архыз – 2018

Оглавление

Введение	4
1 Некоторые результаты исследований звёзд промежуточных масс	15
1.1 Особенности эволюции звезд промежуточных масс	15
1.2 Переменность профилей линий и лучевых скоростей	17
1.3 “Спектроскопическая мимикрия”	20
1.4 Химический состав post-AGB звёзд в галактическом поле	21
1.5 Химический состав пульсирующих сверхгигантов	25
1.5.1 Загадка сверхгигантов типа UU Her	26
1.6 Результаты наблюдений post-AGB кандидатов на БТА	27
1.7 Заключение	30
2 Наблюдения и обработка	32
2.1 Инструментальные эффекты матриц ПЗС и процесс наблюдения	32
2.2 Обработка изображений эшелле-спектров в среде MIDAS	38
2.2.1 Начальная редукция изображений эшелле-спектров	39
2.2.2 Исправление нуля-пункта отсчетов	39
2.2.3 Вычитание темнового тока	40
2.2.4 Определение положения спектральных порядков на изображении	40
2.3 Исследование спектров в программе Dech20t	41
2.3.1 Континуум	41
2.3.2 Лучевые скорости	41
2.3.3 Эквивалентные ширины	42
2.4 Спектральный атлас	42
2.5 Применение метода моделей атмосфер	44
2.6 Заключение	47
3 Переменность спектра оптического компонента ИК-источника IRAS 01005+7910	48
3.1 Введение	48
3.2 Наблюдательный материал и его обработка	49
3.3 Полученные результаты	50
3.3.1 Вариации профилей линий и лучевых скоростей	50
3.3.2 К проблеме двойственности и пульсаций post-AGB звезд	61
3.3.3 Линии дублета натрия Na I и DIBs	63

3.3.4	Спектральный класс центральной звезды IRAS 01005	65
3.4	Заключение	67
4	Об эволюционном статусе высокоширотной переменной V534 Lyr	69
4.1	Введение	69
4.2	Полученные результаты	70
4.2.1	Особенности спектра V534 Lyr	70
4.2.2	Картина лучевых скоростей	74
4.2.3	Светимость и удалённость звезды	79
4.2.4	Определение параметров модели атмосферы и расчет химического состава	81
4.3	Обсуждение результатов	82
4.4	Заключение	87
	Заключение	89
	Литература	92
	Список иллюстративного материала	108
	Приложение	111

Введение

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

ослабевают 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 $V[e]$).

Принципиальным моментом исследования является изучение кинематической картины в атмосферах центральных звезд этих объектов, теряющих массу за счет мощного ветра, что создает расширяющуюся околос звездную 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 околос звездных 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 эшелювого спектрографа 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 оболочке 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 А–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 $B_{1.5} \pm 0.3$, 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 горизонтальной ветви.
5. Атлас спектров в интервале длин волн 3920–6720 Å для трех A–сверхгигантов с различным эволюционным статусом: массивный сверхгигант α 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. - 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 эшелле 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 пекулярности профилей линий (на-

личие 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 околозвездной 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, $B = 11.^m5$, $V = 11.^m2$. 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 яд-

рам линий, ≈ 34 км/с, частично вызваны деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад V_r по крыльям линий меньше, ≈ 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 $H\alpha$ имеют ветровые профили типа P Cyg 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 неустойчивости 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 содержание 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.

1. Некоторые результаты исследований звёзд промежуточных масс

1.1 Особенности эволюции звезд промежуточных масс

Звезды промежуточных масс (их исходные массы на главной последовательности в интервале $3 \div 9 M_{\odot}$, а горение гелия в их ядрах на стадии красного гиганта идет в отсутствие вырождения электронов) на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) наблюдаются в виде холодных ($T_{\text{eff}} \approx 3000 \text{ K}$) красных сверхгигантов. AGB-звезды представляют собой плотное C-O-ядро, окруженное протяженной оболочкой [14, 15]. 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 He и H. 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 Хервига 2005 г. [2] и ссылки в нем). Под s-процессом понимается синтез тяжелых ядер за счет медленной (по сравнению с β -распадом) нейтронизации ядер ^{13}C (или же ядер ^{22}Ne в случае самых массивных AGB-звезд).

В этой фазе, завершая свою эволюцию за счет термоядерных реакций, звезда за короткое (в эволюционной временной шкале) время теряет до 40-80% своей массы. Звезды на поздних стадиях, теряют богатое водородом вещество оболочки за счет двух процессов: во-первых, свеженаработанные в ходе нуклеосинтеза углерод и кислород присоединяются к вырожденному C-O ядру, во-вторых, вещество теряется за счет интенсивного ветра с поверхности звезды.

Вследствие сброса вещества вокруг звезды образуется оптически толстая оболочка и звезда перестает наблюдаться в оптике. В какой-то момент жизни AGB-звезды, внезапно, ее темп потери массы резко возрастает. В этой стадии “сверхветра” вещество теряется с темпом порядка $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ (Рензини, 1981 [16]). Это быстрое нарастание темпа потери массы

находит отражение на диаграмме ИК-цветов в виде провала между не переменными AGB-звездами, практически не имеющими ИК-избытков, и post-AGB [17]. Ван дер Вин и Хэбинг высказывают предположение, что одной из причин резкого возрастания темпа потери вещества может быть пульсационная нестабильность сверхгигантов, поскольку по обе стороны от вышеупомянутого провала существенно различаются количества переменных звезд [17]. Кроме того, в протяженных атмосферах сверх- и гипергигантов существует сложная картина турбуленции, которая обеспечивает турбулентное давление на вещество и может служить причиной потери массы с высоким темпом [18].

Когда масса водородного слоя снижается до $0.001 M_{\odot}$, ветер прекращается за время около 100 лет. Значение эффективной температуры в этот момент эволюции составляет примерно 6000 K [19, 20]. Именно этот момент принято считать началом стадии post-AGB. Далее эффективная температура продолжает расти, звезда перемещается в голубую область диаграммы HR, а оболочка отделяется от звезды, поглощение излучения звезды в ней снижается. Большую часть времени светимость звезды обусловлена горением водорода в слое. После появления в его спектре рекомбинационных линий водорода и запрещенных линий металлов объект становится легко наблюдаемым в виде планетарной туманности. По этой причине post-AGB звезды принято называть также протопланетарными туманностями, далее – PPN. Эта стадия может длиться до значений T_{eff} около 30 000 K, при которых начинается ионизация околозвездной туманности.

Сброшенное в режиме “сверхветра” вещество, поступает в околозвездную, а затем и в межзвездную, среду и обогащает ее продуктами ядерных реакций, прошедших на предшествующих этапах эволюции звезды. Именно это обогащение делает объекты на кратковременной переходной стадии от AGB к планетарной туманности предельно важными для исследований химического состава, измененного в результате процессов нуклеосинтеза в ходе эволюции данной звезды. Помимо проблемы исследования химического состава звезд на нетривиальных стадиях эволюции, самостоятельный интерес представляет и возможность изучения процессов обмена веществом между звездной атмосферой и околозвездной пылевой оболочкой, поиск механизмов, объясняющих peculiarity химического состава атмосфер звезд, окруженных пылевыми оболочками.

Важным моментом в изучении звезд вблизи стадии AGB была миссия IRAS (1983). ИК-телескоп IRAS просмотрел почти 95% всей небесной сферы, одним из результатов было выделение на высоких широтах Галактики ИК-источников, представляющие собой околозвездные оболочки с температурами от 200 до 1000 K. Особенно ценными были наблюдения 5425 объектов с ИК-спектрометром в области 7.8-23 мкм. Часть этих объектов была отождествлена со звездами высокой светимости, предположительно на эволюционной стадии post-AGB [21, 22, 23, 24]. В последующие десятилетия проводились интенсивные исследования этой выборки звезд – кандидатов для проверки их принадлежности к стадиям AGB

и post-AGB различными методами: многоцветная фотометрия, спектроскопия, спектрополяриметрия, наблюдения с высоким пространственным разрешением с помощью наземных телескопов и с помощью космического телескопа Хаббла. Лишь небольшая часть выделенных объектов доступна спектроскопическим наблюдениям с высоким спектральным разрешением. Итоги первого десятилетия исследований представлены в обзоре Квока [1], результаты, полученные в следующее десятилетие кратко изложены Квоком [25] и ван Уинкелем [26]. Результаты спектроскопии с высоким спектральным разрешением на 6-метровом телескопе опубликованы Клочковой [4, 11]. Здесь стоит упомянуть полезную Торуньскую базу данных, которая суммировала значительную часть накопленных сведений. Первая версия опубликована [27], база данных систематически пополняется и впоследствии будут опубликованы новые версии.

Самостоятельной проблемой является поиск звезд – кандидатов в post-AGB. Для отбора кандидатов успешно применяются ИК-спектроскопия и двухцветные IRAS-диаграммы (по классификации ван дер Вина, Хэбинга [17]). При этом надо иметь в виду, что газово-пылевые околозвездные оболочки, а, следовательно, и избытки ИК-излучения имеются не только у звезд, эволюционирующих в PN, но и у звезд на принципиально иных фазах эволюции: Ae/Be-звезды Хербига, звезды типа Т Тау, типа α В00, а также массивные Be-звезды и сверхгиганты. Поэтому только ИК-цвета звезд не могут служить однозначными критериями принадлежности стадиям AGB и post-AGB [28].

1.2 Переменность профилей линий и лучевых скоростей

Изучение особенностей спектров звезд вблизи стадии AGB осложняется двумя факторами: во-первых, их оптическое излучение значительно ослаблено поглощением в околозвездной оболочке, а, во-вторых, как показывают результаты опубликованных к настоящему времени статей, спектры их подвержены значительной переменности на различных временных масштабах.

Существенная часть кандидатов в post-AGB демонстрирует также переменность лучевой скорости V_r [29, 30, 31, 32] с характерным временем процесса в несколько сотен дней, что может говорить в пользу их двойственности. Действительно, для нескольких оптически ярких объектов с ИК-избытками получены убедительные доказательства орбитального движения. Например, доказана двойственность, определены элементы орбиты и предложена модель системы для высокоширотных сверхгигантов 89 Her [33, 31] и HR 4049 [34]. Ван Винкель и др. [35] показали, что звезды HR 4049, HD 44179 и HD 52961 являются спектрально-двойными с орбитальным периодом примерно 1-2 года. Эти авторы делают вывод, что все изученные кандидаты в post-AGB с экстремальным дефицитом металличности (HR 4049, HD 44179, HD 52961, HD 46703, BD 39° 4926) – двойные звезды. Наблюдаемая корреляция между двойственностью и наличием горячей пылевой оболочки [36] указывает на то, что

двойственность способствует образованию оболочки. В работе Бэккера и др. [37] по спектрам высокого разрешения HR 4049 изучена переменность сложных эмиссионно-абсорбционных профилей линий NaD и H α . Отдельные компоненты этих линий формируются или в фотосфере главной звезды или в диске, в который погружены оба компонента двойной звезды, или же в межзвездной среде. Для такого рода двойных звёзд принципиальным является определение скорости центра масс системы (для краткости далее – системная скорость) по радиоданным.

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 нестабильность присуща многим объектам на post-AGB-стадии, это следует уже из факта их расположения в полосе нестабильности на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Аналогичная переменность профилей H α наблюдается в спектрах желтых пульсирующих сверхгигантов – звезд типа RV Tau и W Vir. Для данного типа объектов переменность профилей H α объясняют прохождением ударной волны в протяженной атмосфере пульсирующей звезды [38, 39, 40, 41]. Пульсации, присущие многим post-AGB-объектам, могут способствовать потере вещества, нагревая и расширяя атмосферу. Отметим, что звезды типа RV Tau также являются объектами на стадии post-AGB, но как подчеркнул Джура [42], эти “ленивые” звезды, вероятно, наименее массивны, вследствие чего их эволюция идет медленно и они никогда не станут PN. Загадкой является наблюдаемый факт O-rich оболочек у C-rich звезд типа RV Tau [43].

Переменность H α получает естественное объяснение для post-AGB-звезд с признаками двойственности и потери массы (например, в случае HR 4049 [37]): в таких системах профиль H α меняется из-за орбитального движения в системе. Однако в случае post-AGB объектов H α меняется и для тех из них, для которых не обнаружено каких-либо признаков переменности V_r и блеска, например HD 133656 [44]. Переменность блеска позволила бы привлечь механизм ударной волны, как у звезд типа RV Tau, для которых вероятным механизмом, стимулирующим истечение вещества, является диссипация ударных волн в атмосфере. Конвекция в оболочках порождает поток механической энергии в хромосферу и корону. Давление излучения на пылинки также может обеспечить условия, необходимые для потери вещества. Для радиативного же механизма возникновения ветра, эффективного в случае горячих массивных сверхгигантов, поток излучения у post-AGB звезд недостаточен.

Картина переменности V_r , обусловленная двойственностью, зачастую осложнена дифференциальными движениями в протяженных атмосферах изучаемых объектов. Детальный анализ V_r , выполненный по спектрам высокого спектрального и временного разрешения для избранных, наиболее ярких post-AGB, позволил обнаружить дифференциальное поведение величины V_r , определенной по линиям разной степени возбуждения, формирование которых идет на различающихся глубинах в атмосфере звезды. Например, Бэккер и др. [45] в спек-

тре IRAS-источника, отождествленного с пекулярным сверхгигантом HD 101584, выявили 8 категорий спектральных линий, для которых временное поведение профилей, полуширин и сдвигов (и, следовательно, значений V_r) принципиально различается. В частности, УФ-абсорбции наиболее высокой степени возбуждения, формирующиеся в фотосфере звезды, показывают переменность V_r , обусловленную орбитальным движением в двойной системе. В то же время, линии низкого возбуждения с профилями P Cyg формируются в области звездного ветра и отражают истечение вещества. Скорость системы надежно определена по радиоэмиссиям молекул CO и OH.

Сложная динамическая картина, наблюдаемая в атмосфере объекта HD 101584, обусловлена недавним или длящимся процессом сброса вещества, а следовательно, присуща тем post-AGB с эмиссионными компонентами профиля $H\alpha$, которые имеют большие ИК-избытки (и особенно в ближнем ИК-диапазоне). Для пекулярного сверхгиганта UU Her без явного избытка ИК-потока градиент V_r в атмосфере по спектрам 6-м телескопа не был обнаружен [46], однако были выявлены осцилляции V_r с амплитудой около 15 км/сек.

Важным является исследование переменности лучевой скорости HD 56126 = IRAS 07134 +1005, одной из немногих post-AGB звезд, в атмосфере которых обнаружены продукты 3-го dredge-up [3]. HD 56126 обладает всеми признаками, ожидаемыми для объекта на стадии post-AGB, что и определяет актуальность детального изучения его оптического спектра с высоким спектральным разрешением в большом интервале длин волн. Выполнению поставленной задачи способствует то, что HD 56126 является достаточно яркой ($B = 9.11^m$, $V = 8.27^m$) и, следовательно, самой доступной для спектроскопии с высоким спектральным разрешением звездой среди обогащенных углеродом post-AGB. Из сравнения опубликованных данных по лучевой скорости IRAS 07134+1005 с результатами, полученными на 6-м телескопе, была заподозрена переменность его лучевой скорости [3]. Позже Лебре и др. [47] провели детальный спектральный мониторинг IRAS 07134+1005. На основании фурье-анализа совокупности массива данных по лучевым скоростям с привлечением данных о переменности блеска эти авторы сделали вывод о подобии динамического состояния атмосферы объекта IRAS 07134+1005 картине, присущей пульсирующим переменным типа RV Tau. Переменность $H\alpha$ они интерпретировали как результат прохождения ударной волны. Пополнив спектральные данные и привлекая фотометрические наблюдения, Лебре и др. [48] определили период радиальных пульсаций $P = 36.8$ дней. Оудмейер и Бэккер [49] по обширной коллекции спектрограмм с высоким временным разрешением и высоким отношением S/N также анализировали переменность V_r этого объекта и сделали вывод о переменности на шкале в несколько месяцев и отсутствии изменений с характерным временем минуты-часы [28].

Позже Клочкова и Ченцов [50] по наблюдениям с эшелльными спектрографами 6 м телескопа детально изучили оптический спектр этой post-AGB звезды (спектральное разрешение $R = 25\,000$ и $60\,000$, область длин волн от 4012 до 8790 Å). Эти авторы выявили сложную и

переменную форму профилей сильных линий (H I, абсорбций Fe II, Y II, Ba II и др.), формирующихся в расширяющейся атмосфере (в основании ветра) звезды. Они показали, что для изучения кинематики атмосферы необходимо измерение скоростей по отдельным деталям этих профилей. По линиям металлов и молекулярным деталям обнаружены дифференциальные сдвиги линий, достигающие значения $\Delta V_r = 15 \div 30$ км/с. В атмосфере звезды одновременно присутствуют как расширяющиеся слои, так и слои, падающие на звезду. Сопоставление данных для разных моментов наблюдений указывает на переменность со временем лучевой скорости и картины скоростей в целом. Положение молекулярного спектра стабильно во времени, что указывает на стабильную скорость расширения околозвездной оболочки HD 56126, фиксируемой по линиям C₂ и Na II.

1.3 “Спектроскопическая мимикрия”

Как было отмечено выше, в процедуре поиска и фиксации эволюционной фазы для кандидатов в post-AGB звезды необходимо иметь в виду феномен спектральной мимикрии сверхгигантов. Этот феномен состоит в том, что гипергиганты и post-AGB сверхгиганты – звезды различных масс, наблюдаемые на принципиально различающихся стадиях эволюции, имеют сходные оптические спектры и другие признаки (нестабильные протяженные атмосферы, расширяющиеся газопылевые оболочки, большие ИК-избытки). Прежде всего отметим, что несмотря на различия в массе, внутреннем строении и возрасте, звезды промежуточных масс на продвинутых стадиях эволюции имеют спектры, сходные со спектрами массивных гипергигантов. Более того, можно усмотреть аналогию и в структуре гипергигантов и post-AGB звезд: в обоих случаях объект представляет собой эволюционирующее ядро, окруженное газопылевой оболочкой, образовавшейся на предшествующих этапах эволюции. При известной неопределенности в оценках расстояний для галактических объектов, по спектру, за гипергигант может быть принята звезда более низкой светимости с достаточно мощным ветром. Проблема “спектроскопической мимикрии” касается близких по эволюционному возрасту, геометрии и кинематике оболочек звезд высокой светимости – одиночных звезд в стадии post-AGB и гипергигантов.

V510 Pup - хороший пример маломассивной post-AGB звезды, светимость которой едва достигает уровня светимости сверхгиганта, а ветер по всем параметрам - (скорость, плотность, темп потери вещества около $10\text{-}5 M_{\odot}/\text{год}$) - не уступает, а по спектроскопическим проявлениям подобен ветрам гипергигантов и LBV [51]. Примером объекта с неопределенным статусом может служить и мало изученный переменный A-сверхгигант V2324 Cyg (ИК-источник IRAS 20572+4919). Наблюдаемый избыток излучения в области 12-60 мкм и положение на диаграмме ИК-цветов позволяют считать этот объект кандидатом в молодые планетарные туманности с пылевой оболочкой. По спектрам БТА Клочковой и др. [52] методом моделей атмосфер определены $T_{\text{eff}} = 7500$ К, ускорение силы тяжести $\log g = 2.0$, микротур-

булентная скорость $V_t = 6.0$ км/сек и солнечная металличность. Неожиданной для post-AGB особенностью химического состава звезды является избыток лития и натрия. Избыток лития в атмосфере звезды невысокой светимости подсказывает альтернативную эволюционную фазу для V2324 Cyg.

Примером принципиальных разногласий в определении эволюционного статуса служат и В-сверхгигант HD 168625 (IRAS 18184–1623). Опубликованные к настоящему времени оценки расстояния до звезды находятся в интервале от 0.4 до 2.8 кпк. С одной стороны, ван Джендерен относит HD 168625 в подгруппу бывших (ныне “спящих”) LBV [53]. Ченцов и Горда рассматривают его как гипергигант спектрального класса B5.5Ia-0 с отчетливыми признаками LBV и приводят доказательства членства HD 168625 в ассоциации SerOB1 [54]. Эти авторы подчеркивают, что у HD 168625 ни спектроскопических, ни фотометрических отличий от гипергиганта B6 пока не обнаружено. Но, с другой стороны, HD 168625 окружена непосредственно наблюдаемой газовой-пылевой оболочкой и обладает пылевым ИК-избытком. Авторы [55] сочли возможным использовать параллакс из каталога Hipparcos (ESA, 1997), т.к., основываясь на специфическом распределении энергии в ИК-области спектра и на обнаруженном ими избытке азота в атмосфере звезды (при дефиците углерода), считают HD 168625 маломассивной звездой в стадии post-AGB [55]. Одно из затруднений в применении метода спектральных параллаксов к звездам самых высоких светимостей как раз и связано с тем, что их спектры бывают похожи на спектры post-AGB звезд, – с “мимикрией” последних под гипергиганты. Тригонометрические параллаксы от нее, конечно, не страдают, но для HD 168625 ошибка измерения параллакса долгое время была близка к его величине. Релиз GAIA 25.04.2018 даёт для HD 168625 $\text{parallax} = 0.621 \pm 0.06$ mas (ошибка уже на порядок меньше) $d \approx 1.6$ кпк.

Клочкова и Ченцов [56] внимательно рассмотрели проблему мимикрии и указали, что ее решение для каждого индивидуального объекта состоит прежде всего в определении эволюционного статуса, а для этого требуется найти и сопоставить разнообразные параметры: положение в Галактике, светимость, параметры ветра, распределение энергии в спектре, особенности химического состава, а также детальную картину скоростей на разных уровнях в атмосфере звезды и в ее околосредной среде.

1.4 Химический состав post-AGB звёзд в галактическом поле

Для определенных выводов о связи peculiarностей химического состава и двойственности объектов необходимы многократные спектральные наблюдения. Проблема осложнена еще и тем, что из-за явной неоднородности объектов по химическому составу важно получить его для обширной выборки объектов с тем, чтобы выявить основные тенденции и закономер-

ности. Однако сейчас точные спектральные наблюдения с высоким спектральным разрешением выполнены лишь для самых ярких объектов такого типа на эшелле-спектрографах с матрицами ПЗС крупных телескопов. Для этих объектов получена низкая металличность (в 10-100 000 раз ниже солнечной) и нестандартные соотношения содержаний химических элементов.

В ходе горения водорода в ядре и затем в слое увеличивается содержание гелия. На продвинутой стадии эволюции звезды, после стадии AGB, когда прошел процесс 3-го dredge-up, и после сброса водородной оболочки обнажились слои, обогащенные переработанным веществом, можно ожидать существенного увеличения содержания гелия. В спектрах двух хорошо изученных звезд (HR 4049, HD 44179) обнаружены линии гелия, что позволило оценить его содержание. Уилкинс и др. [57] для HD 44179, центральной звезды туманности Red Rectangle, получили содержание гелия, незначительно превышающее солнечное значение [58]. Практически солнечное (в пределах ошибок) содержание гелия получено и для предельно малометаллического объекта HR 4049. Конлон и др. [59] получили нормальное содержание гелия и для выборки горячих post-AGB-звезд с $T_{\text{eff}} \approx 11\,000\text{--}27\,000\text{ К}$. Это особенно важно, так как для такой продвинутой стадии эволюции ожидалось замещение существенной доли водорода гелием. Пока лишь один из кандидатов в post-AGB, исследованная ван Винкелем и др. [60] звезда HD 187885, имеет избыток гелия. Для большинства изученных кандидатов в post-AGB наблюдается изменение в ходе их эволюции соотношения содержаний элементов CNO-группы: отношение C/O варьируется от $C/O < 1$ до $C/O > 1$ (Лак и др., 1983 [61]; Бонд, Лак, 1987 [62]; Ламберт и др., 1988 [63]; Клочкова, 1995 [3]; Зач и др., 1995, 1996 [64, 65]; Ван Уинкел и др., 1996 [60, 44]; Ван Уинкел, 1997 [66], Клочкова и Кишпер, 2006 [67], Шахин, 2018 [68]).

Анализ поведения различных химических элементов (Fe, CNO, S, Zn, элементы s- и r-процесса) для полной выборки исследованных кандидатов в post-AGB показывает, что по химическому составу их, по-видимому, следует разделить на два типа: к первому типу относятся звезды с крайне низкой металличностью, $[Fe/H] < -4\text{dex}$, ко второму – звезды с менее выраженным дефицитом металлов. Наиболее вероятным и эффективным механизмом, создавшим аномальный химический состав в случае экстремально малометаллических (типа HR 4049 и HD 44179) изученных звезд является не нуклеосинтез, а процессы химического фракционирования элементов в оболочке. В случае одиночной post-AGB звезды газо-пылевая оболочка могла быть создана медленным звездным ветром на предшествующей AGB-фазе. Пылинки могут ускоряться наружу лучевым давлением, поглощая излучение. В то же время газ с уже измененным соотношением элементов может выпадать на поверхность, так как из-за большого расстояния от звезды до внутренней границы газо-пылевой оболочки её газовая составляющая пребывает в нейтральном состоянии, поэтому нет существенного поглощения (нет активных поглотителей – однократно ионизованных атомов металлов) оптического из-

лучения звезды.

Бонд в 1991 [69] впервые предложил сценарий селективной сепарации и последующей реаккреции для одиночной звезды, считая, что пыль формируется в ее атмосфере. Основным аргумент – зависимость содержания элемента от температуры конденсации на пылинки (Бонд, 1992 [70]). Содержание Fe, Mg, Si, Ca в атмосферах таких звезд понижено на несколько порядков, в то время как CNO, S и даже элемент группы железа Zn имеют солнечные содержания (Уилкинс и др., 1991 [57]; Уилкинс и др., 1992 [34]; Ван Уинкел и др., 1992 [71]; Уилкинс и др., 1996 [72]). Отметим, что эта картина аналогична поведению содержаний химических элементов в газовой компоненте ISM. Очевидно, что атмосфера звезды должна быть достаточно стабильной, чтобы перемешивание или звездный ветер не замывали картину распределения химических элементов. Однако есть свидетельства, что атмосферы post-AGB звезд не так стабильны: для большинства этих объектов отмечаются пульсации и истечение вещества, что проявляется в наличии переменной эмиссии в $H\alpha$ и в переменной картине поля скоростей.

С точки зрения изучения процессов нуклеосинтеза и перемешивания наиболее интересны кандидаты в post-AGB, имеющие умеренный дефицит металличности, картина распространности химических элементов в этих случаях, по-видимому, существенно не искажена процессами фракционирования. Примером может служить исследованная Ключковой и др., 2002 [73] звезда HD 331319 – оптический компонент ИК-источника IRAS 19475+3119. Металличность атмосферы звезды $[Fe/H] = -0.25$ незначительно отличается от солнечной. В спектре этой звезды высокой светимости $M_v < -8^m$ с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 7200$ К авторы [73] обнаружили линии гелия He I, что может интерпретироваться как значительный его избыток в наблюдаемых слоях атмосферы и может рассматриваться как проявление синтеза гелия в ходе предшествующей эволюции. Обнаружен большой избыток азота и кислорода: $[N/Fe] = +1.30$, $[O/Fe] = +0.64$ dex при небольшом избытке углерода. Содержание металлов s-процесса не увеличено, а скорее занижено относительно содержания железа: для иттрия и циркония $[X/Fe] = 0.68$. Содержание бария также занижено относительно содержания железа: $[Ba/Fe] = -0.47$. Более тяжелые элементы La, Ce, Nd, Eu слегка усилены по отношению к железу: для них среднее значение $[X/Fe] = +0.16$. В целом параметры звезды и распространенность химических элементов подтверждает, что она наблюдается на эволюционной стадии post-AGB. Металличность в сочетании с лучевой скоростью $V_r = -3.4$ км/сек и галактической широтой $|b| = 2.7^\circ$ объекта указывают на его принадлежность к населению диска Галактики. По положению абсорбционных полос, формирующихся в околозвездной оболочке, определена скорость расширения оболочки около 21 км/сек [28].

На основании изученной выборки кандидатов в post-AGB и опубликованных данных, можно говорить о неоднородности их химического состава. Избыток элементов s-процесса, ожидаемый для звезд на стадии post-AGB как следствие предшествующей эволюции звез-

ды и процесса третьего dredge-up, наблюдается пока крайне редко. В работах Десина и др., 1998 [74] и Клочковой, 1998 [75] сделано заключение о взаимосвязи наличия эмиссии вблизи 21 мкм в ИК-спектре звезд на стадии post-AGB и проявлений избытка тяжелых металлов в их атмосферах. Этот результат считается одним из наиболее весомых (но не объясненных) в картине проявлений звездного нуклеосинтеза на стадиях AGB, post-AGB. Ван Винкель и Рейнерс, 2000 [76] предприняли повторное исследование всех 6 известных звезд с деталью 21 мкм и, на однородном спектральном материале, они подтвердили вывод об эффективности s-процесса для этой группы звезд. В частности, эти авторы получили строгую корреляцию между величиной нейтронной экспозиции (которая оценивается из наблюдений как отношение $[hs/ls]$ избытка тяжелых ядер s-процесса к более легким) и $[s/Fe]$, а также менее выраженную антикорреляцию между величиной $[hs/ls]$ и металличностью $[Fe/H]$. Очевидна необходимость дальнейшего изучения указанных корреляций на расширенных выборках звезд.

В атмосферах бóльшей части кандидатов в post-AGB наблюдается сверхдефицит (относительно содержания железа) тяжелых ядер (Клочкова, 1995 [3]; Ван Винкель и др., 1996 [60, 44]; Клочкова, Панчук, 1996 [77]; Ван Винкель, 1997 [66]), существование которого в атмосферах маломассивных сверхгигантов на стадии post-AGB не находит пока однозначного объяснения. Лак, Бонд, 1989 [78] рассмотрели ряд физических (дефицит водорода в атмосферах; сверхионизация атомов, имеющих низкий потенциал второй ионизации) и методических (ошибки параметров) эффектов, которые могли бы объяснить наблюдаемый сверхдефицит элементов s-процесса в атмосферах маломассивных сверхгигантов. Однако ни одно из предложенных объяснений не согласуется с полной картиной химического состава для этих объектов.

По исследованиям совокупности post-AGB звезд можно сделать предположение о зависимости наличия избытка элементов s-процесса от детальной эволюции на post-AGB, что, в свою очередь, определяется первоначальной массой звезды, поскольку именно масса влияет на пульсационную активность и скорость потери вещества. Можно предположить, что с наибольшей вероятностью избыток s-процесса ожидается в атмосферах звезд, лежащих над эволюционным треком “AGB-ОН/IR” на двухцветной ИК-диаграмме. Ван дер Вин и Хэбинг, 1988 [79] обратили внимание на существование таких объектов и на их излучение вблизи 60 мкм, которое настолько мощное, что не может быть обусловлено обычной потерей вещества. Как считают ван дер Вин и Хэбинг, эти объекты прошли через “thermal pulse”, вследствие чего были подавлены пульсации и ветер. Именно в ходе “thermal pulse” могла произойти инверсия величины C/O за счет выноса на поверхность переработанного вещества, обогащенного углеродом и тяжелыми металлами. После окончания “thermal pulse” и возобновления динамических пульсаций положение звезды на диаграмме смещено из-за излучения пыли в области длин волн 40-80 мкм – звезда становится углеродной [28].

1.5 Химический состав пульсирующих сверхгигантов

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 (Лак, Бонд, 1989 [78]; Гиридэр и др., 1994 [80] и ссылки в этой работе). 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. Из факта присутствия звезд типа RV Tau в шаровых скоплениях и по кинематическим характеристикам и удаленности от плоскости Галактики их аналогов в галактическом поле следует вывод о принадлежности этих объектов к старым звездным популяциям (население II и толстый диск).

По спектрам с классификационными дисперсиями звезды типа RV Tau являются пекулярными F, G, K-сверхгигантами классов светимости Ib, II. Спектральная пекулярность обусловлена появлением в определенные фазы на фоне спектра F-K сверхгиганта сильных переменных спектральных деталей, отождествляемых с полосами молекул TiO, CN, CH, что указывает на существенную неоднородность их протяженных атмосфер. Классы светимости Ib, II для звезд типа RV Tau подтверждены с применением ИК-триплета кислорода OI, $\lambda 7773 \text{ \AA}$ (Мантегацца, 1991 [81]), эквивалентная ширина которого является хорошим критерием светимости для A, F, G-звезд. Звезды типа RV Tau в составе шаровых скоплений, очевидно, имеют массы ниже солнечной и эволюционируют к стадии планетарной туманности и белого карлика.

Звезды типа RV Tau, как правило, имеют избытки ИК-излучения, причем спектральный индекс близок к единице (Джура, 1986 [42]). При этом плотность вещества в оболочке уменьшается с расстоянием от звезды примерно как $1/r$ (Джура, 1986 [42]), что подтверждает наличие мощного (до $10\text{-}5 M_{\odot}/\text{год}$) звездного ветра в предыдущие моменты эволюции. Следует подчеркнуть, что звезды типа RV Tau удовлетворяют четырем критериям принадлежности к стадии post-AGB, сформулированным Трэмсом и др., 1993 [82]:

- спектральные признаки сверхгиганта,
- расположение вне плоскости Галактики (вне слоя толщиной 100 пк),
- наличие мощного ИК-избытка, обусловленного пылью,

- фотометрическая переменность.

Как следует, например, из низкодисперсионного спектрального обзора Уолгрена, 1992 [83], изученная им выборка звезд типа RV Тау в поле Галактики весьма разнородна по металличности: $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -0.3 до -1.7 , что может указывать на их принадлежность к галактическим населением разного возраста. Недостаток сведений о деталях химического состава звезд RV Тау не позволяет выполнить сравнительный анализ поведения различных химических элементов в случае пульсирующих звезд разных типов и стабильных сверхгигантов на близких эволюционных стадиях. Такое сравнение могло бы привести к принципиально новым выводам об особенностях эволюции звезд разных масс на ее заключительных фазах, о структуре атмосфер пульсирующих сверхгигантов, о действенности процессов перемешивания [28].

1.5.1 Загадка сверхгигантов типа UU Her

В программу спектроскопии post-AGB на БТА был включен пекулярный сверхгигант UU Her, который послужил прототипом для выделения этого типа полуправильных переменных звезд. Результаты, полученные для этого объекта и родственных ему, важны в контексте рассматриваемой в диссертации темы. Как правило, 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. Результаты для UU Her [46] не прояснили ситуацию, поскольку для этого малометаллического объекта ($[\text{Fe}/\text{H}] = -1.32$ по спектрам БТА) получен избыток только для азота, в то время как углерод и элементы s-процесса в атмосфере UU Her существенно ослаблены. Таким образом, обнаружено проявление только первого эпизода перемешивания и выноса вещества на поверхность. По совокупности свойств (высокая светимость, значение лучевой скорости, типичное для гало, картина химического состава) авторы [46] сделали вывод о принадлежности UU Her к маломассивным звездам гало, но поставили под сомнение принадлежность к post-AGB. В работе Ван Уинкела [66] изучен очень близкий UU Her по совокупности характеристик объект — сверхгигант HD 107369, имеющий высокую галактическую широту ($b = +30^\circ$) и лучевую скорость, присущую старым населением Галактики. Этот объект, будучи по ряду характеристик близок звездам на стадии post-AGB, не имеет ИК-избытка и признаков процесса 3-го dredge-up, как и UU Her.

По исследованиям совокупности post-AGB звезд обоснованным является предположение о зависимости наличия избытка элементов s-процесса от первоначальной массы звезды, поскольку именно масса влияет на пульсационную активность и скорость потери вещества. Можно предположить, что предшественник переменной UU Her имел на ГП массу ниже 2-

$2.3 M_{\odot}$. Звезда такой массы на стадии AGB имеет ядро низкой массы и не обеспечивает в ядре температуру ($T \approx 3 \cdot 10^8 \text{K}$), требуемую для реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$, которая является основным поставщиком нейтронов. Эта реакция идет в ядрах $> 0.95 M_{\odot}$. Однако надо иметь в виду, что существует альтернативный процесс: $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, который идет при более низкой температуре ($T \approx 10^8 \text{K}$), и, в принципе, может обеспечить поток нейтронов для синтеза тяжелых металлов. Гипотеза о заниженной первоначальной массе UU Her подтверждается отсутствием у этой звезды ИК-избытка, а, следовательно, и пылевой околозвездной оболочки, которая, если и сформировалась на AGB, успела рассеяться в связи с замедленной эволюцией объекта. Вероятно, что звезда относится к “ленивым” PAGB, которые согласно Шенбернеру [15] эволюционируют в 10 раз медленнее. Скорость эволюции на post-AGB определяется массой ядра, причем зависимость очень сильная: ядро, имеющее массу $0.565 M_{\odot}$, примерно в 10 раз быстрее эволюционирует, чем $0.546 M_{\odot}$!

1.6 Результаты наблюдений post-AGB кандидатов на БТА

Программа спектральных наблюдений сверхгигантов с большими ИК - избытками является частью более общего проекта спектроскопического исследования звезд на поздних стадиях эволюции, выполняемого на 6-м телескопе в течение последнего десятилетия. Цель этого проекта – сравнительный анализ деталей химического состава звездных атмосфер на последовательных фазах эволюции звезд различных масс. В результате такого сравнения можно обнаружить во внешних слоях звездных атмосфер продукты ядерных реакций, нарабатанных на предшествующих стадиях эволюции и вынесенных в поверхностные слои, что необходимо для уточнения современных представлений об эволюции звезд на продвинутых стадиях эволюции. Программа прежде всего направлена на изучение фундаментальной проблемы звездной эволюции, связанной с исследованием ядерного синтеза химических элементов в недрах звезд средних масс. Задача обнаружения аномалий химического состава звезд на эволюционных стадиях AGB и post-AGB является основным для нас направлением исследований в рамках указанной проблемы. Спектральный материал высокой точности используется, наряду с изучением химического состава, также и для детального анализа поля скоростей в атмосферах этих звезд с истечением массы, что представляет отдельную астрофизическую проблему.

Основные результаты, полученные на основе спектроскопии высокого разрешения на БТА, суммированы в ряде недавних публикаций [4, 11, 84]. Кратко отметим наиболее важные результаты этой программы. Во-первых, определены параметры и химический состав атмосфер для нескольких десятков звезд с избытками ИК-потока. Во-вторых, для семи звезд были найдены эволюционные изменения химического состава (большие избытки элементов

s-процесса или hot-bottom процесса) [85, 86, 87, 67, 52]. На основе репрезентативной выборки звезд (в статье [76]) Ключкова сформировала подвыборку post-AGB звезд с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами s-процесса, и с обогащенными углеродом околозвездными оболочками. Анализ свойств этой подвыборки привел к выводу о взаимосвязи пекулярности 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 околозвездной оболочки и с типом ее морфологии [4].

Присутствие вышеперечисленных деталей является главным отличием спектров post-AGB звезд от спектров массивных сверхгигантов. Обнаруженное расщепление на компоненты профилей сильнейших абсорбций тяжелых металлов в спектрах избранных post-AGB сверхгигантов позволило заключить, что процесс формирования структурированной околозвездной оболочки сопровождается обогащением продуктами звездного нуклеосинтеза [11]. Переменность наблюдаемых профилей абсорбционно-эмиссионной линии $H\alpha$ и линий металлов, а также наблюдаемая у нескольких объектов смена типа (абсорбция/эмиссия) полос Свана молекулы C_2 обязана изменениям параметров или структуры околозвездной оболочки. Тип профиля $H\alpha$ (чисто абсорбционный, чисто эмиссионный, типа P Cyg или инверсного P Cyg, с двумя эмиссионными компонентами в крыльях), не связан с химическим составом атмосферы центральной звезды. Основными факторами, влияющими на тип профиля $H\alpha$ и его переменность, являются темп потери вещества, скорость звездного ветра, кинематика и оптическая толщина оболочки.

Найдены неизвестные ранее в оптических спектрах звезд-AGB кандидатов, особенности. В частности, на основании наблюдений, также выполненных с эшелльным спектрографом НЭС БТА, изучены [88] особенности спектра и поля скоростей в атмосфере и оболочке холодного AGB-сверхгиганта V1027 Cyg – оптического компонента ИК-источника IRAS 20004+2955. Впервые в спектре этой звезды обнаружено расщепление ядер сильных абсорбций металлов и их ионов (Si II, Ni I, Ti I, Ti II, Sc II, Cr I, Fe I, Fe II, Ba II). Широкий профиль этих линий содержит в ядре стабильно расположенную слабую эмиссию, положение которой можно рассматривать в качестве скорости центра масс системы $V_{\text{sys}} = 5.5$ км/с. По симметричным абсорбциям малой и умеренной интенсивности выявлены слабые изменения лучевой скорости с амплитудой 5-6 км/с, обусловленные пульсациями. В спектре звезды наблюдается длинноволновое смещение профиля $H\alpha$, обусловленное искажением ядра линии. В красной области спектра отождествлены многочисленные слабые линии молекулы CN и линия KI 7696 Å, обладающая профилем типа P Cyg. Совпадение лучевой скорости, измеренной по симметричным абсорбциям металлов и по линиям CN, указывает на формирование спектра CN в атмосфере звезды. Отождествлены многочисленные межзвездные полосы, DIBs, положе-

ние которых в спектре, $V_r(\text{DIBs}) = -12.0$ км/с, соответствует скорости межзвездной среды в Локальном рукаве Галактики.

Абсолютно новые результаты получены [89] для слабой безымянной звезды, которая ассоциирована с мощным источником ИК-потока RAFGL 5081. На основании долговременного спектрального мониторинга с высоким спектральным разрешением ее оптический спектр изучен впервые. Сделаны оценки спектрального класса звезды: $S_p \approx G5 - 8 II$, и эффективной температуры $T_{\text{eff}} \approx 5400$ К. Обнаружен трудно объяснимый спектральный феномен: раздвоение профилей стационарных абсорбций средней и малой интенсивности. Стационарность абсорбций исключает возможность объяснить раздвоенность спектральной двойственностью звезды. Лучевые скорости для ветровых составляющих профилей D-линий Na I и H α достигают значений -250 км/с и -600 км/с, соответственно. Эти профили содержат узкие компоненты, количество, глубины и положения которых изменяются со временем. Переменная во времени многокомпонентная структура профилей D-линий Na I и H α указывает на неоднородность и нестабильность околозвездной оболочки RAFGL 5081. По наличию у профилей линий Na I (1) компонентов со скоростью $V_r(\text{IS}) = -65$ км/с сделан вывод о том, что RAFGL 5081 находится за рукавом Персея, т.е. не ближе 2 кпк. Отмечено, что исследованный объект ассоциирован с отражательной туманностью GN 02.44.7. Поставлена задача проведения фотометрического мониторинга для определения параметров переменности центральной звезды RAFGL 5081.

Одним из первых важных результатов был вывод о неоднородности изначальной выборки сверхгигантов с большими избытками ИК-потока. В частности, в составе исследованной на БТА выборки звезд с большими избытками ИК-потока были выявлены звезды вне ожидаемых стадий AGB и post-AGB. Оказалось, что среди звезд с большими избытками ИК-потока, помимо AGB и post-AGB звезд, присутствуют массивные звезды предельно высокой светимости с протяженными и структурированными околозвездными оболочками. Наиболее известным объектом, который много лет рассматривали, предпочтительно, как звезду на стадии post-AGB, является звезда V1302 Aql, обладающая многочисленными пекулярностями спектра. Долгое время эволюционный статус сверхгиганта V1302 Aql, ассоциированного с мощным источником ИК-излучения IRC+10420, был неясен. Совокупность наблюдаемых свойств звезды позволяла рассматривать ее или как звезду на стадии post-AGB, или же как очень массивную звезду, прошедшую стадию красного сверхгиганта. Очевидно, что в зависимости от принятого статуса, а следовательно, и светимости объекта, оценка его удаленности от наблюдателя может различаться в несколько раз. Один из решающих аргументов, подтверждающий для V1302 Aql статус массивной проэволюционировавшей звезды, был получен на основе спектральных данных 6-м телескопа, когда был впервые определен химический состав атмосферы V1302 Aql и обнаружен значительный избыток азота, что является признаком массивной звезды [90]. Обнаружение быстрого роста эффективной температуры [90, 91]

позволило предположить, что звезда быстро эволюционирует с темпом увеличения T_{eff} около 120 К за год. Этот феномен явился стимулом для продолжения спектрального мониторинга этого загадочного объекта. Последующий анализ спектров V1302 Aql за период наблюдений 1992–2014 г.г. привел к выводу о том, что желтый гипергигант вошел в фазу замедления (или прекращения) роста эффективной температуры и приблизился на диаграмме Г–Р к высокотемпературной границе Желтого Войда [92]. Здесь кстати упомянуть и звезду HD 179821, которая несколько десятилетий фигурировала в статьях в качестве post-AGB кандидата и лишь детальный анализ высококачественных данных ее многолетнего спектрального мониторинга с эшелльными спектрографами 6-м телескопа САО и 2.7-м телескопа обсерватории МакДональд (США) привели к выводу о ее принадлежности к семейству проэволюционировавших массивных звезд [93].

1.7 Заключение

В данной главе кратко рассмотрены важнейшие проблемы и факты, касающиеся эволюции звезды от AGB к планетарной туманности. Перечислены основные результаты, полученные в ходе исследования химического состава атмосфер звезд–кандидатов в post-AGB: определены параметры атмосферы и содержания химических элементов для нескольких десятков проэволюционировавших звезд; в атмосферах семи из них обнаружены избытки тяжелых металлов, ожидаемые для post-AGB; в спектрах трех таких звезд с избытками тяжелых металлов, синтезированных на стадии AGB, впервые обнаружено расщепление сильнейших абсорбций металлов. Сделан вывод о принципиальной необходимости проведения спектрального мониторинга кандидатов в post-AGB звезды для выявления спектральной переменности, уточнения картины поля скоростей в атмосферах и оболочках и определения скорости центра масс системы “звезда+оболочка”. В результате на БТА была обнаружена спектральная переменность оптического спектра нескольких звезд–кандидатов. Наглядным примером спектральной переменности может служить недавно выявленная post-AGB звезда SAO 40039, отождествляемая с источником IRAS 05040+4810. Как следует из работы Клочковой и др. [94], профили всех линий в спектре SAO 40039, как абсорбций, так и эмиссий, переменны. Переменна и лучевая скорость. Можно предполагать, что столь бурная переменность обусловлена структурными перестройками в атмосфере центральной звезды и в околосредней оболочке. Но для построения детальной картины переменности и для уяснения физических причин необходим многолетний ряд спектральных наблюдений. Это, в частности, относится и к высокоширотному сверхгиганту BOIae, отождествляемому с ИК-источником IRAS01005+7910. Как показали авторы [5], в спектре центральной звезды IRAS 01005+7910 одновременно сосуществуют сложные абсорбционно-эмиссионные профили линий гелия и водорода типа P Cyg и типа обратного P Cyg. Причем этот тип профиля данной линии может измениться на противоположный в течение нескольких дней. Эти особенности настоятельно требуют проведения

спектрального мониторинга звезды.

Следующая глава будет посвящена методике проведения спектральных наблюдений на 6-метровом телескопе в сочетании с эшелле спектрографом НЭС и обработки спектральных данных, полученных в широком интервале длин волн. В двух последующих главах будут представлены результаты спектрального мониторинга двух объектов программы: высокоширотной горячей звезды, ассоциированной с ИК-источником IRAS 01005+7910 и высокоширотной переменной V534 Lyr.

2. Наблюдения и обработка

В данной главе будут рассмотрены особенности спектральных наблюдений астрофизических объектов, выполняемых при помощи эшеллевого спектрографа NES [95]. В сочетании с ПЗС-матрицей 2048×4608 элементов, и в комбинации с резателем изображения [96], спектрограф NES обеспечивает спектральное разрешение $R \geq 60\,000$. Мы сочли необходимым описать инструментальные эффекты, присущие не только спектроскопическим наблюдениям, но и любым наблюдениям с использованием матриц ПЗС в качестве приемников излучения. В работе [97] описаны алгоритмы и программы обработки изображений эшелле-спектрограмм, полученных с резателями изображения и анализаторами поляризации. Приведенные программы успешно испытаны и на обычных (классических) эшелле-спектрах, и на спектрах, где регистрируется только один спектральный порядок.

2.1 Инструментальные эффекты матриц ПЗС и процесс наблюдения

Приёмниками излучения в современных спектрографах служат матрицы ПЗС. Работа с матрицей ПЗС сопровождается рядом инструментальных (систематических) эффектов, значимо снижающих точность спектральных измерений. Перечислим эти эффекты, см. также [97]:

- Ток смещения. В отсутствие какой-либо засветки матрицы при считывании изображения мы будем получать в среднем ненулевое значение отсчетов, этот начальный уровень сигнала носит название тока смещения (bias), причем в каждом элементе матрицы значение нулевого тока разное. Как правило величину тока смещения можно менять, обычно начальный уровень сигнала выбирают таким, чтобы выйти на линейный участок характеристической кривой приемника в области малых отсчетов. В ходе наблюдений уровень тока смещения может испытывать небольшие вариации. Для корректного вычитания “нулевого” уровня сигнала, в течение сета наблюдений (желательно для каждой ночи), получают несколько серий изображений без экспозиции (или с так называемой нулевой экспозицией). Каждая серия состоит из нескольких последовательно зарегистрированных изображений, которые затем необходимо усреднить между собой, для уменьшения влияния шумов считывания приемника. Количество серий и изобра-

жений в каждой серии определяется нестабильностью тока смещения и необходимой фотометрической точностью. Пример изображения кадра с током смещения приведен на рисунке 2.1a).

- Темновой ток. При продолжительных экспозициях, даже без засветки матрицы ПЗС, в результате считывания мы получаем сигнал, отличный от тока смещения. При любой температуре, отличной от абсолютного нуля, элементы приемника могут (с течением времени) самопроизвольно генерировать электроны. Сигнал, считываемый с матрицы ПЗС в отсутствие засветки приемника, и пропорциональный времени экспозиции, носит название темнового тока.
- Неоднородность чувствительности матрицы и неоднородность тока смещения. Различают как крупномасштабные, так и мелкомасштабные (поэлементные) неоднородности. При равномерной засветке матрицы ПЗС так называемым “плоским полем”, эффекты неоднородности чувствительности проявляются в мелкомасштабных (порядка элемента приемника) и крупномасштабных (10-100 элементов) деталях на изображении - эффект плоского поля. В спектроскопических наблюдениях для устранения влияния неоднородности чувствительности ПЗС регистрируют излучение источника непрерывного спектра, (поскольку эффекты плоского поля в общем случае зависят от длины волны). В идеальной ситуации распределение энергии у источника непрерывного спектра калибровки должно быть идентично распределению энергии у исследуемого объекта. Более критичным является условие идентичности хода лучей в спектрографе от искусственной звезды (через оптику канала калибровки), и хода лучей от исследуемого объекта (через оптику телескопа). На практике редко удается выполнить эти условия, что приводит к снижению эффективности алгоритмов удаления артефактов на спектре объекта. На изображениях спектров крупномасштабные эффекты плоского поля приводят к искажению распределения энергии в отдельных спектральных порядках, к появлению “ложных” абсорбционных линий и полос, искажению профилей широких спектральных линий. Поэлементная неоднородность чувствительности матрицы ПЗС воспринимается как шум, искажающий статистику отсчетов, и приводит к сильному отклонению от пуассоновского распределения и, в конечном итоге, не только к снижению, но и к ограничению максимально достижимого значения сигнал/шум. На некоторых матрицах ПЗС мелкомасштабные эффекты плоского поля ограничивают максимальное отношение сигнал/шум значением порядка 100, что бывает недостаточно для ряда исследовательских задач. Корректный учет эффектов плоского поля крайне сложен и предъявляет жесткие требования ко всей системе “телескоп-спектрограф-приемник” в целом. Кадр с изображением плоского поля приведен на рисунке 2.1b).
- Чувствительность матрицы к высокоэнергичным (“космическим”) частицам. Высоко-

энергичные ионы, образовавшиеся в результате столкновения космических частиц с молекулами земной атмосферы, попадая в кристалл матрицы ПЗС, выбивают большое количество электронов. Такой же эффект наблюдается в результате распада радиоактивных элементов, происходящего как в окружающей естественной среде, так и в деталях конструкции спектрографа (металлы, легированные тяжелыми элементами, имеющими широкий набор изотопов; стекла, содержащие лантаноиды; катоды ламп, покрытые соединениями урана или тория). Матрица ПЗС, как правило, регистрирует несколько сотен таких событий на всю поверхность приемника за час (вид спектра звезды со следами “космических” частиц приведен на рисунке 2.1с).

- “Косметические” дефекты. Кроме следов частиц, наблюдаются и стационарно локализованные, “врожденные” дефекты светоприемника (темные и светлые столбцы и элементы, ловушки), именуемые “косметическими” особенностями ПЗС.
- Нелинейность приемника, позиционная нестабильность приемника, интерференция в подложке матрицы ПЗС. Кристалл матрицы ПЗС состоит из нескольких слоев (Si-SiO₂-Si₃N₄-Si-Si₃N₄), с разными оптическими свойствами, и может рассматриваться как стопка очень тонких плоскопараллельных пластин. Внутри этих слоев происходит интерференция лучей, отраженными от поверхностей разделов сред. Так как степень параллельности поверхностей раздела сравнима с длиной волны, могут наблюдаться резкие колебания интенсивности на изображениях спектров, в зависимости от того, выполняется ли условие минимума или максимума интерференции. Проблема состоит и в том, что тонкие эффекты, наблюдаемые на картине интерференции от плоского поля, могут отличаться от наблюдаемых на картине спектра звезды.

Говоря о процессе спектроскопического наблюдения, мы подразумеваем не только то время, когда телескоп принимает свет от звезды, но и более объёмный процесс, который включает в себя:

- Мониторинг погоды. Погода иногда вносит существенный вклад в наблюдения или даже делает их невозможными. Приведу статистику собранную за время обучения в аспирантуре. Для наблюдений на NES мы поднимаемся на БТА. Всего у меня насчитывается 141 подъём. Из 141-й ночи, выделенных для наблюдений по различным программам, 60 ночей потеряно из-за неподходящей погоды, в большинстве случаев это высокая облачность и осадки, реже - ветер более 10 м/с, перепад температур, влажность вблизи точки росы, технические отказы аппаратуры. Сравнение статистики, собранной при непосредственном присутствии на БТА, с телевизионной системой мониторинга неба, - показывает, что на удаленном контроле метеоусловий можно потерять около 10-15% наблюдательного времени, пригодного для спектроскопии высокого разрешения. Принятие решения о наблюдениях (при изменении погоды) требует определенного личного

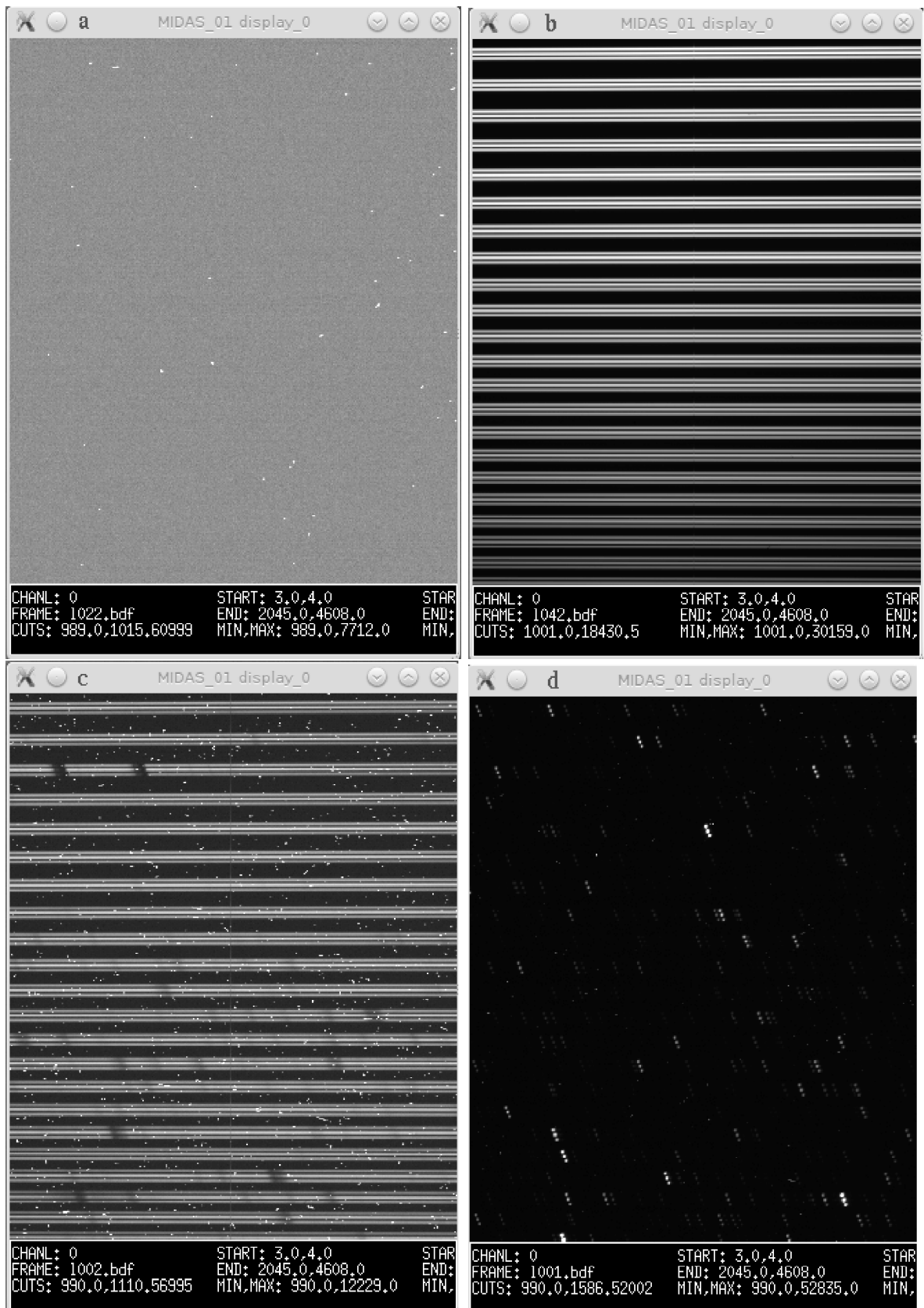


Рис. 2.1: а) Кадр тока смещения, следы космических частиц не удалены. б) Кадр плоского поля. в) Следы космических частиц на кадре спектра звезды. д) Кадр спектра Th-Ar лампы, следы космических частиц не удалены.

опыта, последнее приобретается не сразу. В соответствии с направлением западной части Главного Кавказского хребта и в силу уникального рельефа местных гор, ветер в месте установки БТА преимущественно южный и юго-западный. Когда скорость ветра достигает 8-9 м/с, и наблюдения еще формально разрешены, телескоп (и купол) разворачиваем на север и наблюдаем только северные объекты. Труба телескопа при этом не подвергается действию порывов ветра, и локальный корректор “успевает” отрабатывать малоамплитудные колебания центра изображения звезды. На такой случай в программе наблюдений всегда есть один или два “высоких” (незаходящих) объекта. По моему мнению, лучшая погода стоит осенью, зимой хоть и самые длинные ночи, но чаще поднимается сильный ветер и возможны потери ночей из-за перепадов температуры “воздух-зеркало”. Весной много осадков (особенно в мае), летом ночи самые короткие, с вечера почти всегда сохраняется дневная облачность, которая обычно опускается уже после полуночи, и для наблюдений остаётся около трёх часов. Если пригодная для наблюдений погода устанавливается за час до начала сумерек, наблюдения не начинаем (характерное время приведения телескопа и купола в рабочее состояние - “телескоп на объекте” - занимает полчаса).

- Установка и юстировка оптических элементов спектрографа. Наблюдения на БТА проводят “сетами” из нескольких ночей, в первый день сета производится больше всего работ:
 - Установка ПЗС-приёмника на спектрограф и заливка криостата. Обычно эту работу выполняет служба эксплуатации, но в трети случаев и нам приходилось устанавливать приёмник, процедура не сложная, но и не быстрая. Установленный криостат с приёмником заливается жидким азотом, последний при контакте с теплой поверхностью начинает кипеть, что, в свою очередь, затягивает время заливки. Кипящий азот постепенно охлаждает поверхности, с которыми он контактирует. Процедура заливки “горячего” приёмника занимает около трёх часов и столько же затем необходимо, чтобы собственно приёмник вышел на ”рабочую температуру“ (экспериментально подобранная температура, при которой ПЗС матрица показывает наибольшую квантовую эффективность).
 - Юстировка оптических элементов спектрографа. Из-за перепадов температуры, а также из-за вибраций конструкции БТА, элементы спектрографа могут сдвинуться друг относительно друга. За время эксплуатации спектрографа НЭС установлено, что измеримые сдвиги появляются только на мозаичной эшелле, составленной из двух массивных блоков с площадью заштрихованной поверхности $30 \times 30 \text{ см}^2$. Остальные элементы конструкции температуру ”не чувствуют”. Спектрограф NES оснащен средствами непрерывного температурного мониторинга, в лаборатории

астроспектроскопии выполнены исследования температурного поведения различных зон и элементов спектрографа. Измеримые температурные сдвиги спектра обнаружены только при уникальных перепадах температуры подкупольного пространства (20° за 12 часов), когда наблюдения заведомо невыполнимы (большой перепад температуры и ураганный ветер). Перед началом сета следует провести процедуру контроля качества изображения спектра и, если требуется, процедуру сведения в одно двух изображений, формируемых от двух половин мозаичной эшелле. В блоке деккеров выбираем калибровочную щель и регистрируем спектр сравнения (лампы полого катода, заполненной аргоном). Для работ с высоким разрешением необходимо измерять много реперных линий, поэтому катод лампы покрыт соединениями тория. Затем изменяем положение одного элемента мозаики и снова снимаем спектр, до тех пор, пока не будет найдено наилучшее взаимное положение блоков мозаики. Вышеперечисленные процедуры необходимо закончить до сумерек, чтобы не терять на это время, пригодное для калибровок отъюстированного спектрографа и наблюдений. Разработана методика юстировки мозаичной эшелле.

- Остальные процедуры. Производятся не только в первый день сета, но и при каждом наблюдении, некоторые несколько раз за ночь:
 - Открытие купола и первое наведение телескопа - это большой процесс, в котором задействована бригада специалистов: оператор АСУ, механик, электрик. Астроном-наблюдатель, принимающий решение о наблюдениях, является инициатором данного действия, передаёт координаты звезды оператору и ждёт, пока все процедуры не закончатся. После открытия и первого наведения телескоп автоматически “сопровождает” звезду. Система наведения плавно ведёт звезду, но этого недостаточно, чтобы удерживать звезду “на щели”. Дело в том, что у телескопа и системы управления имеется набор собственных частот, на которых возможно возбуждение колебаний. Кроме того, в атмосфере, кроме турбуленции, происходят волновые процессы, также приводящие к колебаниям изображения в поле зрения. Для компенсации этих эффектов разработан и используется комплекс автоматического гидирования [98, 99], увеличивающий проникающую способность наблюдений более чем на одну звездную величину. При настройке программ автоматического гидирования также следует учитывать качество изображений и другие особенности (переменная яркость фона неба, подсветка циррусов светом Луны, и проч.).
 - Далее начинаем регистрировать калибровочный спектр (Th-Ag лампа с полым катодом). Мы снимаем спектр калибровки или перед экспозицией звезды, или сразу

после, время экспозиции звезды зависит от её яркости и бывает значительным, а спектр Th-Ag снимается 5 минут, что позволяет ещё раз проверить готовность всех систем (если что-то не так, то лучше потерять пятиминутную экспозицию калибровки, чем часовую экспозицию звезды). К сожалению, из-за неустойчивой работы системы управления и сбора светоприемника, имеются потери и ”за счет приёмника”, когда кадр не считывается и накопленное изображение теряется.

- По завершении ночи наблюдений регистрируются калибровки с нулевой экспозицией (bias) и “плоские поля”.
- Днём или в ночь с плохой погодой регистрируются многочисленные экспозиции “темнового тока”.

2.2 Обработка изображений эшелле-спектров в среде MIDAS

Для обработки изображений мы используем систему MIDAS, которая представляет собой среду для разработки (development environment) программ редукции и анализа цифровых изображений. Система практически целиком написана на языках C и Fortran, распространяется в исходных кодах и устанавливается на большое количество Unix-подобных операционных систем. MIDAS имеет блочную структуру, состоит из ядра, включающего в себя графический интерфейс, интерпретатор командного языка, функции ввода-вывода данных, основные функции работы с изображениями (сложение, поворот, экстракция, вставка, интерполяция, фильтрация и т.д.) и табличными данными, пакет математических функций для аппроксимации данных; и множества контекстов для обработки тех или иных типов наблюдательных данных (спектроскопия, фотометрия и т.д.). Система также снабжена динамическими библиотеками и заголовочными файлами, позволяющими писать программы на C и Fortran с использованием функций MIDAS, что значительно ускоряет время обработки по сравнению с программами, написанными на внутреннем командном языке MIDAS. Командный язык MIDAS представляет собой скриптовый язык, позволяющий легко и быстро конструировать сценарии обработки данных из имеющихся функций, или составлять собственные сложные функции из элементарных арифметических выражений. Более подробную информацию о системе MIDAS можно получить на домашней страничке проекта [100]. На основе системы MIDAS разработан и постоянно совершенствуется комплекс программ [97], применительно к спектрографу NES, который также постоянно совершенствуется.

2.2.1 Начальная редукция изображений эшелле-спектров

Подготовка изображений включает в себя следующие действия [97]:

- Удаление “лишних” строк и столбцов, как правило, это регистры на краях ПЗС-кадра для считывания сигнала, не участвующие непосредственно в формировании изображения.
- Приведение ориентации кадра к каноническому виду, а именно, “красные” порядки должны быть вверху изображения, длина волны в порядке должна увеличиваться слева-направо.
- Удаление светлых и темных испорченных столбцов (строк) путем усреднения соседних столбцов (строк). Как правило, номера испорченных элементов матрицы ПЗС указываются в документации по светоприемнику, либо выявляют непосредственно на изображении (например, плоского поля).

2.2.2 Исправление нуля-пункта отсчетов

Для вычитания уровня нулевого тока получают дополнительные изображения с матрицы ПЗС без экспозиции или с так называемой нулевой экспозицией. Как правило, получают две серии по десять кадров, до и после наблюдений. Как отмечалось выше количество серий и кадров в каждой серии зависит от необходимого отношения сигнал/шум.

Даже при получении изображения без экспозиции, только за время считывания на матрицу ПЗС попадает несколько “космических” частиц, поэтому на кадрах с нулевым током также присутствуют их следы. Для вычитания следов космических частиц используется медианное усреднение кадров в каждой серии. Если получено несколько серий изображений с нулевыми отсчетами, то после медианного усреднения внутри каждой группы итоговые изображения усредняются между собой. В случае необходимости при сильной переменности во времени тока смещения, например, из-за переменности температуры в контроллере матрицы ПЗС, возможна интерполяция значения нулевого тока к моменту наблюдения спектра того или иного объекта. Для работы с изображениями и таблицами непосредственно в формате FITS необходимо указывать расширение. После процедуры подготовки файла `bias.bdf` с изображением нулевых отсчетов в каждом элементе приемника необходимо вычесть нулевой ток из всех изображений, включая калибровочные, в том числе и изображения с “плоским полем”, и изображения с темновым током [97].

2.2.3 Вычитание темнового тока

Процедура вычитания темнового тока аналогична процедуре вычитания уровня нулевого тока. Единственной особенностью данного этапа является зависимость величины темнового сигнала от времени экспозиции. Так же как и в случае получения кадра с нулевым током, необходимо получить серию изображений с темновым током, для уменьшения шумов считывания и устранения следов космических частиц. В идеале время экспозиции отдельного изображения темнового тока должно быть равно времени экспозиции спектра объекта. Однако, на практике в течение наблюдательной ночи время экспозиции спектров разных объектов может сильно различаться, поэтому, для получения изображений темнового тока выбирают максимальное установленное в текущую ночь время экспозиции, как правило не более часа. Далее при вычитании из спектров объектов значение темнового тока корректируют для приведения к одинаковому времени экспозиции для того или иного изображения спектра.

Положение осложняется если темновой ток матрицы ПЗС испытывает сильную временную переменность, связанную с изменением температуры кристалла (“чипа”). Такая ситуация может быть в случае охлаждения ПЗС при помощи элементов Пельтье, что обеспечивает лишь стабильную разность наружной температуры и температуры “чипа”. В этом случае строится зависимость темнового тока матрицы ПЗС от температуры (наружной или кристалла, если есть соответствующие температурные датчики) и при вычитании значение темнового тока интерполируется (экстраполируется) на момент получения спектра того или иного объекта.

В астрофизических наблюдениях во всем мире, в том числе и в САО, используются ПЗС-системы охлаждаемые жидким азотом, что в сочетании с высокоточной электроникой обеспечивает стабильность температуры кристалла приемника с точностью не хуже 0.1° . Охлаждение приемника до низких температур порядка 170 К и ниже, плюс высокая термостатичность, в значительной степени снижает и стабилизирует уровень собственных шумов матрицы ПЗС.

2.2.4 Определение положения спектральных порядков на изображении

Следующим шагом после устранения инструментальных эффектов является выделение областей интереса на изображении эшелле-спектра, а именно - отождествление положения спектральных порядков и выделение областей, содержащих рассеянный внутри спектрографа свет или фон. Таблица с координатами средних линий порядков называется маской. Средняя линия в зависимости от методики отождествления положения порядков (построения маски) может представлять собой линию, проходящую вдоль порядка по точкам максимальной ин-

тенсивности поперечных сечений порядка или по центрам тяжести профилей поперечных сечений, или по максимумам гауссиан, вписываемых в профили порядков.

В заключение нам необходимо каждому элементу приемника присвоить соответствующую длину волны. Для этого в процессе наблюдений снимаются спектры лампы полого катода, покрытого солями тория, с аргоновым наполнением колбы (Th-Ag лампы). Данный тип ламп применяется в спектроскопии высокого разрешения для калибровок длин волн из-за того, что весь спектральный диапазон от ближнего УФ до ближнего ИК практически равномерно заполнен множеством узких эмиссионных линий ThAg-лампы [97]. На рисунке 2.1d представлен кадр с изображением эшелле-спектра Th-Ag лампы, полученного с резателем изображения.

2.3 Исследование спектров в программе Dech20t

2.3.1 Континуум

Поведение линии континуума для эшелльных спектров не является сложной процедурой, существуют даже различные программы для его проведения. Эти программы в простых случаях справляются со своей задачей, но в сложных случаях приходится проводить континуум вручную. У разных групп астрономов эта процедура немного отличается, и я счёл нужным рассказать, как мы проводим континуум в своих спектрах в программе Dech20t [101].

Линия континуума проводится по центру шумовой дорожки, так, как показано на рисунке 2.2. Если спектр “сложный”, то увеличивайте количество опорных точек, если в спектре присутствует широкая линия, которая закрывает большую часть порядка, то континуум под(над) ней проводится на основе поведения континуума в соседних порядках эшелле спектра.

2.3.2 Лучевые скорости

Для установления картины движения вещества в атмосфере и оболочке звезды, для определения системной скорости звезды, а также для других задач, мы измеряем лучевые скорости. Точность измерения по одной линии составляет примерно 1 км/с. Измерение положений теллурических линий позволяет вносить “атмосферную” поправку (атмосфера Земли до определенной точности неподвижна относительно телескопа). Для слабых объектов, на фоне спектров которых видны эмиссионные линии, формирующиеся в ионосфере Земли, можно определить “ионосферную” поправку (т.к. абсорбционные линии теллурического спектра в этом случае проработаны слабее). Узкие линии наблюдаются и в спектрах звезд. Это или резонансные абсорбционные линии Na I, Ca II, K I и Li I, формирующиеся в межзвездной среде, или узкие эмиссии, формирующиеся в протяженной разреженной околозвездной оболочке.

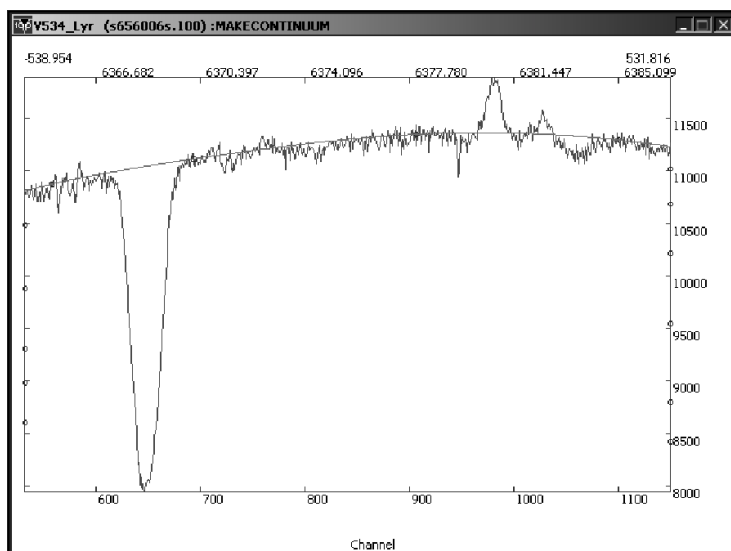


Рис. 2.2: Проведение континуума эшелле-спектра звезды.

В первом случае мы можем оценить, как далеко находится изучаемая звезда (через какие поглощающие структуры, имеющие разную лучевую скорость, проходит свет). Во втором случае мы можем определить системную скорость объекта, т.к. регистрируем излучение в разреженной оболочке, наблюдая как ближнюю, так и дальнюю полусферы медленно расширяющегося (или уже покоящегося) вещества. Лучевые скорости “сильных” линий с низкими потенциалами возбуждения дают представление о картине скоростей в звездной атмосфере. Для измерения лучевой скорости необходимо отождествить измеряемую линию, а потом, в режиме сравнения профиля с его зеркальным отражением, совместить прямое и зеркальное изображения профиля, как показано на рисунке 2.3.

2.3.3 Эквивалентные ширины

Измерение эквивалентных ширин необходимо, в основном, для применения метода моделей атмосфер. Эквивалентную ширину можно определить двумя способами: рассчитать площадь под профилем линии или описать линию гауссианой, а затем измерить площадь под гауссианой (см. рисунок 2.4). Мы используем оба варианта, но в данной работе, для симметричных линий, предпочтение отдано методу гауссиан.

2.4 Спектральный атлас

Спектры всех объектов, использованные нами для изготовления атласа, получены в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА. Эшелльный спектрограф NES [95] в сочетании с ПЗС-матрицей

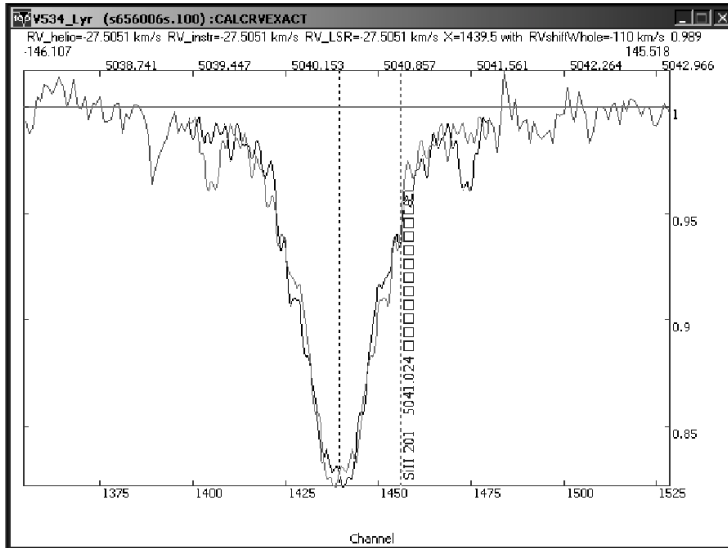
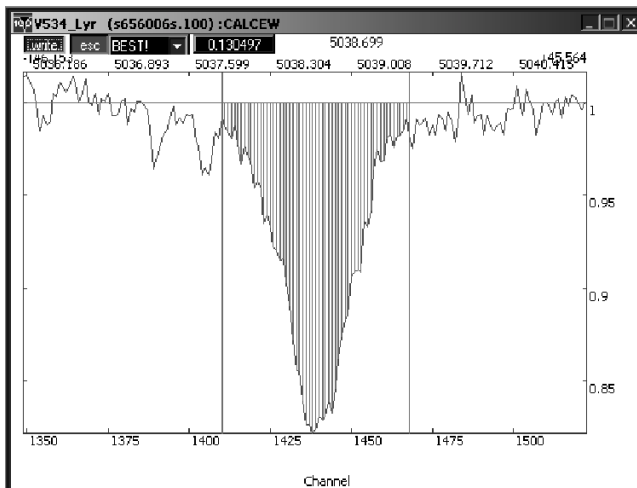


Рис. 2.3: Измерение лучевой скорости линии.



2048 × 4608 элементов и в комбинации с резателем изображения [96], обеспечивает спектральное разрешение $R \geq 60\,000$.

Изготовлен атлас спектров в интервале длин волн 3920–6720 Å для трех А–сверхгигантов с различным эволюционным статусом: массивный сверхгигант α Cyg, пекулярный сверхгигант с околозвездным диском 3 Pup и post-AGB звезда BD +48° 1220 [102]. Атлас доступен в электронном виде [103].

Для увеличения точности измерения интенсивностей и положения спектральных линий путём сравнения наблюдаемых спектров с соответствующими синтетическими, были отобраны неблендированные линии. Определение позиционного нуля-пункта каждой из спектрограмм выполнено стандартным приёмом – привязкой к положениям теллурических абсорбций и ионосферных эмиссий, которые наблюдаются на фоне спектра объекта. Точность измерения скорости на спектрах, полученных со спектрографом NES, лучше 1 км/с по одной линии [94].

Для каждой звезды данные $r(\lambda)$ отдельных эшелных порядков были соединены в единый массив, который затем был разбит на равные фрагменты по 100 Å см. рисунок 2.5. В каждом из фрагментов атласа спектра указано отождествление нескольких линий. Помимо рисунков составлена подробная таблица 2.1 (Посмотреть полную таблицу и все фрагменты спектров можно в [103]). Для отождествления спектральных деталей мы использовали результаты работ [104, 94], а также сведения из базы данных VALD (см. работу [105] и ссылки на предыдущие публикации, касающиеся более ранних версий).

Сопоставление спектров приводит к выводу о том, что определение эволюционного статуса сверхгигантов в галактическом поле – задача нетривиальная, поскольку одни и те же значения спектрального класса и близкого класса светимости могут иметь звезды существенно различающихся возрастов и масс, наблюдаемые на принципиально различающихся эволюционных стадиях. Одну и ту же область диаграммы Герцшпрунга–Рессела занимают post-AGB звезды, эволюционирующие от стадии AGB к планетарной туманности, и массивные сверхгиганты, эволюционирующие от главной последовательности к стадии красного сверхгиганта. Наглядным примером являются post-AGB звезда BD +48° 1220 и массивный сверхгигант 3 Pup с близкими особенностями спектров.

2.5 Применение метода моделей атмосфер

Объекты, исследуемые в данной работе, обладают нестационарными атмосферами, адекватно моделирование которых только начинается. Мы отдаем себе отчет, что определение фундаментальных параметров и химического состава, выполненное в рамках канонических моделей Куруца, может приводить к систематическим ошибкам. Однако задачей данной работы является уточнение эволюционного статуса объектов, а не определение фундаментальных параметров с точностью до сотых dex. Что касается исследования кинематических

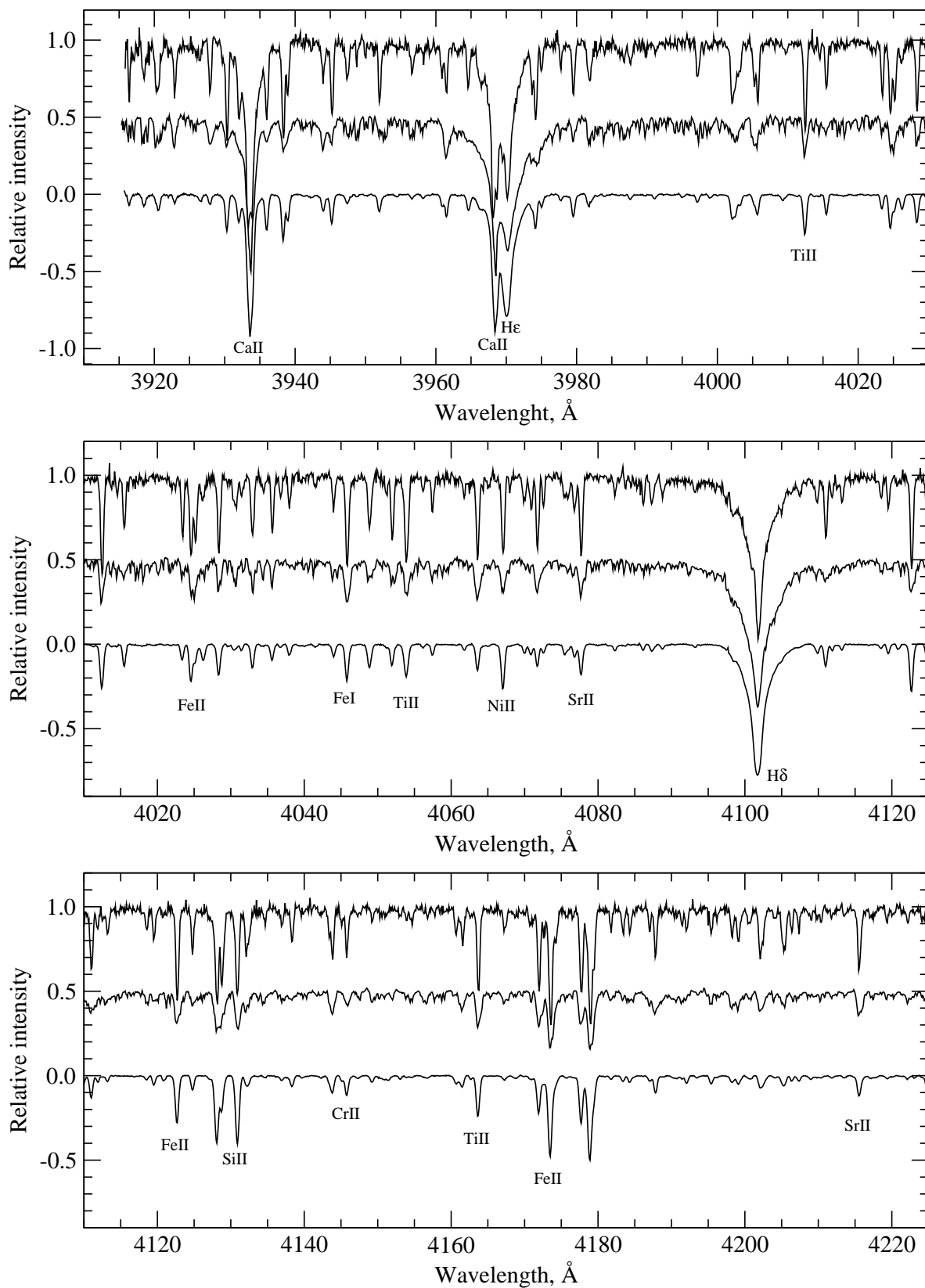


Рис. 2.5: Три коротковолновых фрагмента атласа в диапазоне длин волн 3920–4220 Å. Сверху вниз на каждом рисунке здесь расположены фрагменты спектров: BD+ 48°1220, 3 Pup, α Cyg.

Таблица 2.1: Остаточные интенсивности “r” и гелиоцентрические лучевые скорости V_r (км/с) для отдельных линий в спектрах высокого разрешения α Cyg, 3 Pup, и BD+48° 1220. Двое-точием отмечены неуверенные измерения.

Ident	λ , Å	α Cyg		3 Pup		BD+48° 1220	
		r	V_r (km/s)	r	V_r (km/s)	r	V_r (km/s)
VII(10)	3916.41	0.93	-4.66			0.65:	-11.8:
FeII(191)	3918.53	0.92	-4.11			0.77:	-12.4:
CII	3918.97						
FeI(4)	3920.26						
FeII	3920.64	0.89	-8.58			0.68:	
CII(4)	3920.68						
FeII	3922.00	0.98	-5.74				
FeI(4)	3922.91	0.94	-6.55	0.8	17.4	0.62	-13.2
HeI(58)	3926.54	0.95	-6.34			0.87:	
FeI(4)	3927.92	0.94	-8.03	0.83	28:	0.65	-11.6
VII(10)	3929.72					0.85:	-13:
FeI(4)	3930.30	0.75	-5.43	0.81:	22:	0.35	-8.5
TiII(34)	3932.01	0.81	-4.56			0.49:	-9.8:
FeI	3932.63						
SII	3933.26						
CaII(1)	3933.66						-37
CaII(1)	3933.66	0.08	-6.42	0.43	24		-12
ZrII	3934.09						
ZrII	3934.79						
FeI(362)	3935.82						
FeII(173)	3935.96	0.77	-6.38	0.84:	23.8:	0.48	-12.7:
CoI(32)	3935.97						
FeII(3)	3938.29	0.7	-4.88	0.79	28.5:	0.36	-7.8
MgI(18)	3938.40						
FeII(190)	3938.97	0.83	-8.59			0.65	-14.8
FeI	3940.88						
FeI	3941.28	0.98	-7.27				
NiI	3941.84						
FeI(364)	3942.44	0.98	-5.46			0.93:	
AlI(1)	3944.01	0.89	-6.21	0.79:	21	0.72	-13.3:
NiI	3944.10						
FeII	3944.44						
FeI	3945.12						
FeII(3)	3945.21	0.81	-5.83	0.84:	20.4:	0.53	-8.7
NiII	3945.49						
FeI	3946.99						
OI	3947.29						
OI(3)	3947.48	0.94	-9.47	0.88:		0.74	-17.3:
FeI(361)	3947.53						

характеристик атмосфер, то здесь метод моделей атмосфер окажется пригодным только после появления динамических моделей атмосфер и оболочек. Расчет модели атмосферы и содержания химических элементов выполнен с использованием программы WIDTH9 [7], расчет синтетических спектров выполнен программой SynthV [8], эти программы основаны на моделях Куруца [9] и адаптированы к среде OS Linux. Значения потенциалов возбуждения и сил осцилляторов для всех линий, а также константы уширения, взяты из базы данных атомных линий VALD [105].

Для определения основных параметров модели: эффективная температура T_{eff} и ускорение силы тяжести $lg g$, мы использовали стандартную методику [106], которая впоследствии успешно применялась в исследованиях спектров звезд различных типов. T_{eff} и $lg g$ были определены, исходя из требования соблюдения ионизационного баланса, т.е. равенства содержания железа, рассчитанного по линиям Fe I и Fe II. Микротурбулентная скорость ξ_t определена также стандартным способом из условия отсутствия зависимости содержания железа $\log \epsilon(\text{Fe I}, \text{Fe II})$, определенных по набору линий, от их эквивалентных ширин W_λ .

2.6 Заключение

Описанные алгоритмы, методы и программы обработки прошли успешное испытание в течение нескольких лет работы на 6-метровом телескопе БТА. Являются хорошими инструментами в астрономических исследованиях, а умение пользоваться этими программами, методами и алгоритмами будет полезно астроному-наблюдателю. По мере усовершенствования NES и появления новых возможностей спектрографа, корректируются методы подготовки к наблюдениям и наблюдений, усовершенствуются алгоритмы обработки. С использованием изложенной методики наблюдений и обработки, изготовлен высокоточный атлас звездных спектров.

3. Переменность спектра оптического компонента ИК–источника IRAS 01005+7910

3.1 Введение

ИК–источник IRAS 01005+7910 (далее в тексте IRAS 01005) 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 соответствии с хронологической последовательностью Льюиса [107], отсутствие излучения в полосах OH и CO [108, 109, 110, 111, 112] указывает на то, что объект близок к фазе планетарной туманности (PN). Первое детальное исследование оптического спектра для центральной звезды IRAS 01005 получено Клочковой и др. [5]. Эти авторы, определив фундаментальные параметры этого сверхгиганта ($T_{\text{eff}} = 21\,500\text{ K}$, ускорение силы тяжести на ее поверхности $\log g = 3.0$, металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.31$ и содержания ряда химических элементов), подтвердили для него стадию post-AGB. Важным результатом этой работы является обнаружение избытка углерода ($\text{C}/\text{O} > 1$) в атмосфере центральной звезды. Подчеркнем, что и металличность центральной звезды IRAS 01005, и химический состав в целом ее атмосферы принципиально отличаются от этих свойств у UU Her [46].

В ИК–спектре околозвездной оболочки IRAS 01005 содержатся спектральные детали углеродосодержащей молекулы – фуллерена C_{60} [113, 114], что свидетельствует о том, что околозвездная оболочка этого объекта также, как и атмосфера центральной звезды, обогащена углеродом. IRAS 01005 является самым горячим из тех post-AGB звезд, в ИК–спектре которых содержатся неотожествленные пока детали на длине волны 3.3 и 3.4 мкм [115]. Большая галактическая широта в сочетании с пониженной металличностью указывает на принадлежность IRAS 01005 к толстому диску Галактики.

Фотометрическая переменность IRAS 01005 изучалась несколькими группами. Хривнак и др. [116] отметили переменность блеска объекта на очень короткой для post-AGB шкале, менее нескольких дней. Архипова и др. [117] в ходе долговременного фотометриче-

ского мониторинга, проведенного в UVB-полосах для нескольких горячих post-AGB, включая IRAS 01005, обнаружили быструю нерегулярную переменность их блеска. Опираясь на эти наблюдения малоамплитудной переменности блеска для выборки post-AGB, авторы [117] пришли к выводу о вариациях параметров звездного ветра у этих звезд и (или) о наличии микропульсаций с характерными периодами в несколько часов.

В то же время особенности оптического спектра IRAS 01005 в настоящее время мало изучены. Ху [118] на основе наблюдений с низким спектральным разрешением определил спектральный класс ($S_p = B2Ie$), отметив, что линия $H\alpha$ в спектре IRAS 01005 имеет профиль типа P Cyg. В спектрах, отстоящих друг от друга на 10 лет, этим автором не было найдено различий. Однако, в публикации [5] по спектрам, полученным с эшелльными спектрографами 6-м телескопа БТА, были отождествлены спектральные детали и обнаружена переменность спектра центральной звезды. В спектре присутствуют абсорбционные линии C II, O II, N II, Al III, Si III, линия Mg II $\lambda 4481 \text{ \AA}$, эмиссионные детали, отождествляемые с линиями Si II и запрещенными линиями [Fe II]. В профилях линий водорода серии Бальмера, резонансного дублета Na I, линий He I и Fe III присутствуют как эмиссионные, так и абсорбционные компоненты. Выявлена значительная переменность оптического спектра: линии нейтрального гелия меняют профиль с прямого P Cyg-типа на обратный, на временной шкале дни-месяцы. Линии резонансного дублета Na I содержат пять абсорбционных компонентов со скоростями -11 , -28 , -52 , -65 и -73 км/с , причем абсорбционный профиль линии $\lambda 5890 \text{ \AA}$ наложен на широкий высокоскоростной эмиссионный компонент, ширина которого совпадает с шириной эмиссионных компонентов водородных линий. Обнаруженная переменность спектра служит стимулом к продолжению изучения оптического компонента ИК-источника IRAS 01005.

В данной главе представлены результаты долговременного мониторинга IRAS 01005, целью которого является изучение переменности оптического спектра. Причем, в отличие от предыдущей работы [5], здесь использован спектральный материал только высокого спектрального разрешения. В разделе 3.2 кратко описана методика наблюдений и обработки данных. В разделе 3.3 представим основные результаты.

3.2 Наблюдательный материал и его обработка

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. Для изучения спектральной переменности важно, что все спектры получены с одним и тем же спектрографом, хотя и в разных диапазонах длин волн. К сожалению, от спектра к спектру сильно различаются также и уровни экспонирования (отношение уровня сигнала к шуму S/N). Даты получения спектров, спектральные интервалы и максимальные значения S/N представлены 1-й, 2-й и 3-й колонками табл. 3.1, соответственно. Для обработки спектров использована про-

грамма Dech20t [101], позволяющая, в частности, сглаживать кривые $r(\lambda)$ без существенного снижения разрешения и измерять лучевые скорости по отдельным деталям сложных линий (характерных для наших спектров) путем совмещения прямых и зеркальных изображений их профилей.

Все приведенные лучевые скорости – гелиоцентрические. Используемые для их получения лабораторные длины волн содержатся в приложении табл. 8, её полный вариант можно найти в [119]. Большая часть их взята из базы данных NIST [120] и проконтролирована по спектрам звезд с узкими линиями 10 Lac (O9 V) и ι Her (B3 III), полученным с тем же спектрографом, что и спектры IRAS 01005. В ряде случаев (триплеты He I, дублеты C II, Mg II и др.) использованы эффективные длины волн. В табл. 8 (в приложении) и в тексте в скобках рядом с символом элемента указан номер мультиплета.

При наличии в спектре теллурических линий, по ним выполнены контроль и коррекция лучевых скоростей. Стабильность их системы за время наблюдений контролировалась также по межзвездным линиям, в основном по линиям Na I (1). При этом учитывались помехи от блендирования их теллурическими абсорбциями H₂O и эмиссиями Na I, а в случае линии D2, еще и триплетом C II (5). Все эти помехи переменны во времени. Рис. 3.1 демонстрирует их присутствие в спектре 13.11.05, а также сложную структуру профиля линии D2 Na I (1) 5890 Å. Для 5 основных его компонентов гелиоцентрические лучевые скорости, усредненные по всему нашему материалу, составляют: -72.5 , -65.3 , -52.2 , -27.7 и -10.2 км/с. Значения скоростей для двух крайних (наиболее глубоких) компонентов приведены в табл. 3.1 (колонка 4). Судя по ним, систематические ошибки лучевых скоростей, приводимых в остальных колонках табл. 3.1, не превышают 1 км/с.

Точность измерения скорости по одиночной линии определяется величинами шумов (S/N) и градиентов остаточной интенсивности в ее профиле ($\Delta r/\Delta \lambda$). Как видно на примере, приведенном на рис. 3.2, в спектре IRAS 01005 профили изменяют форму со временем и от линии к линии. Об ошибках скоростей, найденных по отдельным линиям, можно судить по разбросу значков на рис. 3.3, представляющем зависимости $V_r(r)$ в спектре 29.05.13. Для этого спектра со средним для нашего материала уровнем S/N и наибольшим интервалом длин волн средние значения ошибок: 0.5 км/с для запрещенных эмиссий, около 1 км/с для ядер абсорбций и около 3 км/с для слабых эмиссионных компонентов линий Fe III.

3.3 Полученные результаты

3.3.1 Вариации профилей линий и лучевых скоростей

В работе [5] показано, что форма профилей большинства линий изменяется как со временем, так и в пределах одного спектра, от линии к линии. Профили и предположительные области их формирования можно в первом приближении разделить на три типа:

Таблица 3.1: Спектральный материал и средние гелиоцентрические лучевые скорости V_r измеренные по спектральным деталям различного типа

Дата	$\Delta\lambda$, nm	S/N	V_r , км/с						
			Основные компоненты NaI, (CaII)	Запрещ. эмис.	Абсорбции		Эм./абс. Fe III (He I)	Абс./эм.	
					крылья	ядра		H β	H α
25.01.02	354–500	40	(-71.; -12.)	-50:	-45	-40:	-78/-37	-77/-31	-82/-32
04.02.02	460–607	60	-72.5, -10.0	-51.0	-46	-44	-44/	-75/-35	-83/-31
22.11.02	538–685	50	-72.5, -9.9	-49.5	-50	-45			
25.11.02	538–685	30	-72.3, -10.3	-50:	-43	-30			
27.11.02	452–600	35	-71.5, -9.3	-51.1	-44	-41	-45/	-86/-23	
02.12.02	452–600	45	-72.5, -10.2	-51.0	-42	-29	-56/-26	-87/-24	
03.12.02	452–600	30	-71.9, -10.3	-49.2	-42	-26	-58/-25	-86/-27	
19.12.02	452–600	50	-72.7, -10.6	-50.4	-47	-37	-70/-34:	-80/-35	
23.02.03	516–666	55	-72.5, -9.2	-51:	-50	-40	-80/-38:	-101/-27	
13.04.03	528–676	80	-72.3, -10.0	-48:	-43	-33		-100/-19	
15.11.03	352–500	100	(-70.5, -10.8)	-49.6	-32	-19	(-70/-29)	-81/-24	
10.01.04	528–676	50	-72.2, -10.3	-49.8	-50	-51			-124/-32
09.03.04	528–676	55	-72.3, -9.5	-50.6	-46	-37			-110/-25
28.08.04	528–676	55	-72.5, -10.1	-51:	-48	-45			-86/-27
18.01.05	528–676	110	-72.8, -10.2	-50.9	-55	-53			-77/-28
13.11.05	456–601	110	-72.3, -10.1	-50.6	-45	-37	-64/-29	-75/-33	
15.11.05	528–678	120	-72.7, -10.1	-51.0	-43	-30	(-70/-35:)		-82/-28
09.12.06	447–594	130	-72.3, -10.6	-49.7	-46	-25	-55/-22	-80/-29	
03.11.08	446–593	160	-71.8, -10.0	-50.3	-41	-24	-53/-18	-85/-30	
05.11.08	446–593	160	-72.3, -10.5	-50.7	-44	-30	-54/-20	-90/-27	
20.11.10	397–545	75		-50.5	-46	-29	-55/-20	-82/-30	
29.05.13	391–680	70	-72.5, -9.8	-50.5	-45	-40	-72/-33	-77/-30	-87/-25
21.08.13	391–680	80	-71.8, -10.0	-51.1	-40	-27	-60/-22	/-26	-103/-27

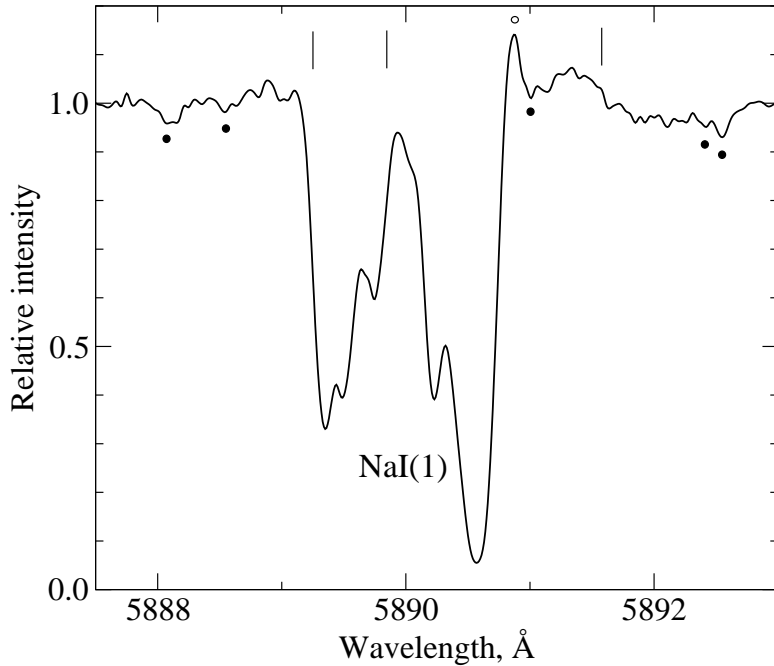


Рис. 3.1: Участок спектра IRAS 01005 13.11.05 с многокомпонентной межзвездной абсорбцией NaI (1) 5889.95 Å, эмиссионно-абсорбционной линией Si II (5) 5891.59 Å. На горизонтальной оси – шкала лабораторных длин волн фотосферных абсорбций. Положения линий мультиплета Si II (5) помечены вертикальными штрихами, теллурических абсорбций H₂O – точками, теллурической эмиссии NaI – колечком.

- узкие эмиссии – протяженная разреженная оболочка
- эмиссионно-абсорбционные профили – область, переходная от фотосферы к оболочке, в частности, ветер
- абсорбции – фотосфера

Из узких эмиссий наиболее просты (симметричны) и стабильны профили запрещенных линий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II]. Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околзвездной оболочки и близость стадии планетарной туманности. Средние значения лучевых скоростей (полученные в разные даты по разным наборам этих линий!) представлены в 5-й колонке табл. 3.1. Временные вариации скорости для запрещенных эмиссий близки к таковым для межзвездных абсорбций, т.е. к ошибкам измерений. По-видимому, сама скорость за время наших наблюдений оставалась постоянной. Усреднение по всему материалу дает ее величину: -50.5 ± 0.2 км/с. На рис. 3.4 профиль одной из звездных линий, [N I] 5198 Å, сравнивается с профилем теллурической эмиссии [O I] 5577 Å, – первый заметно шире, его полуширина около 10 км/с.

В отличие от лучевых скоростей, интенсивности запрещенных эмиссий показывают небольшие колебания (максимальный перепад остаточных интенсивностей составляет 5–6%).

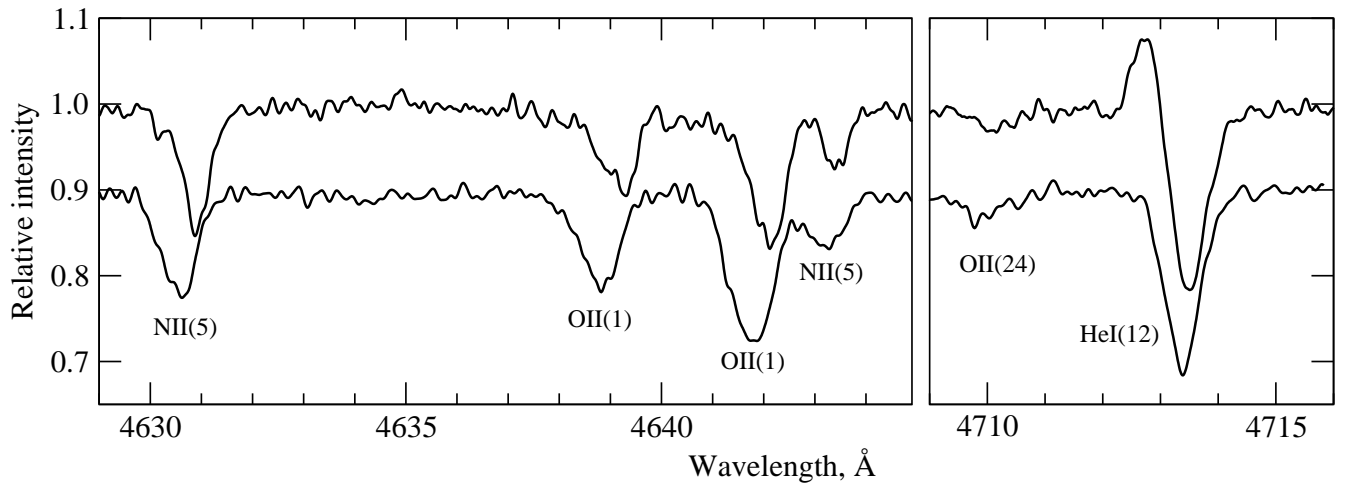


Рис. 3.2: Вариации формы и положения профилей в спектре IRAS 01005. Фрагменты спектров 15.11.03 (вверху) и 13.11.05 (сдвинут вниз на 0.1) сглажены по 7 точкам. Горизонтальная ось размечена по лабораторным длинам волн фотосферных абсорбций в спектре за 13.11.05.

Реальность колебаний подтверждается их синхронностью для разных линий, отсутствием изменений за 2 суток, а также тем, что вариации относительных интенсивностей линий в дублетах [N I] 5198, 5200, [Fe II] 4814, 5158 и др., ограниченные лишь ошибками измерений, существенно меньше (2–3%). В доступной нам области спектра IRAS 01005 присутствует несколько слабых эмиссий O I. При этом сильнейший триплет O I(1) 7773 наблюдается в абсорбции [5]. Исходя из его интенсивности можно было ожидать, что более слабые линии, члены мультиплетов 9 (6454–56 Å) и 10 (6156–58 Å), также окажутся абсорбциями с глубинами $R \approx 0.02$, однако в наших спектрах они не выделяются из шумов, – возможно, заполнены эмиссиями. Чистые эмиссии принадлежат мультиплетам: (5) 4368, (23) 5958 и (22) 6046 Å, их средние остаточные интенсивности: 1.04, 1.05 и 1.11 соответственно. Профиль последней линии показан на рис. 3.4. По ширине, и средней лучевой скорости (-50.8 ± 1 км/с) эмиссии O I близки к запрещенным. Если в запрещенных линиях, а также в эмиссиях O I, излучает протяженная медленно расширяющаяся оболочка звезды, то к ней естественно отнести и излучение в узких эмиссионных компонентах сложных профилей первых членов серии Бальмера. Их ветровые составляющие за время наших наблюдений заметно изменяли интенсивность, но сохраняли форму P Cug III по Билсу: красный эмиссионный пик намного выше синего. Образцы верхних частей комплексных профилей H α представлены на рис. 3.5, а лучевые скорости для абсорбционных и эмиссионных экстремумов их ветровых составляющих, по всему нашему материалу, – в последней колонке табл. 3.1.

По визуальному впечатлению переменность потока от оболочки в линиях водорода выражена сильнее, чем в запрещенных линиях и эмиссиях O I. Количественная оценка затруднена блендированием оболочечных и ветровых эмиссий, но все же возможна – путем сопоставления всех наличных профилей H α . Перепад интенсивностей в пиках узких компонентов

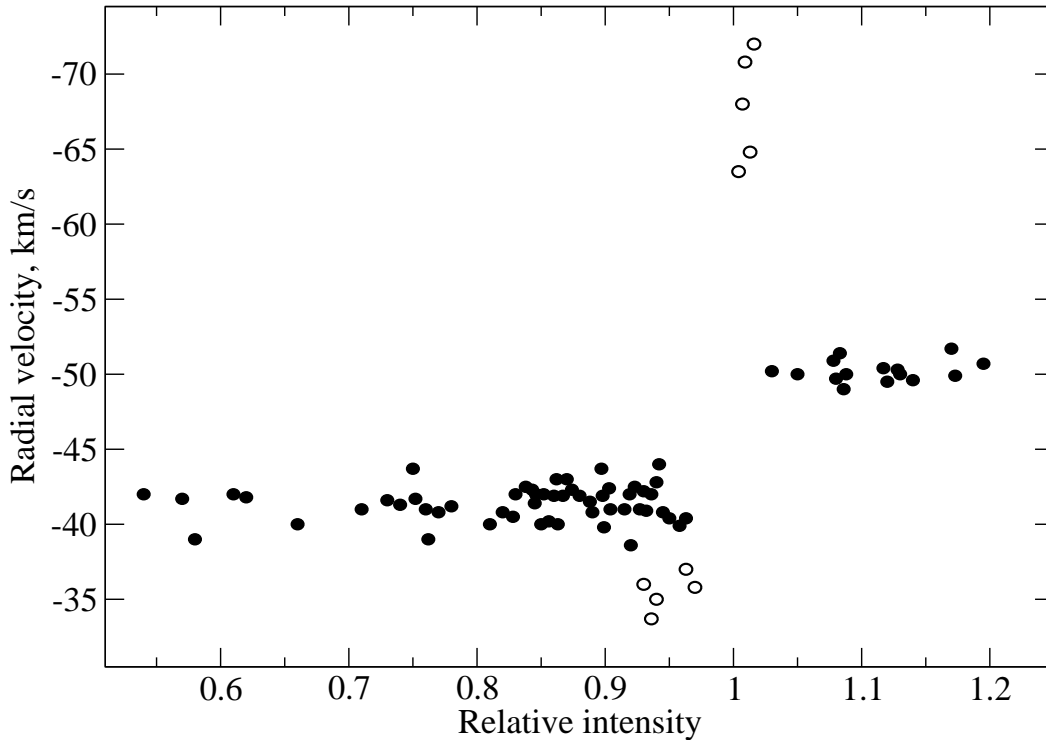


Рис. 3.3: Зависимости лучевой скорости V_r от остаточной интенсивности “ r ” для линий в спектре IRAS 01005 29.05.13. Каждый значок относится к отдельной линии. Точки – запрещенные эмиссии ($r > 1.0$, скорости измерены по их вершинам) и абсорбции He I и ионов ($r < 1.0$, скорости измерены по их ядрам), колечки – эмиссионные ($V_r < -60$ км/с) и абсорбционные ($V_r > -40$ км/с) компоненты профилей линий Fe III.

составляет около 20% с учетом изменений интенсивностей на соответствующих длинах волн в ветровых компонентах. На рис. 3.5 приведены верхние части профилей $H\alpha$ с относительно сильной (21.08.13) и слабой (22–25.11.02) оболочечными компонентами. Видно, что наиболее сильные (и, следовательно, наименее деформированные блендированием) узкие эмиссии $H\alpha$ по ширине близки к запрещенным эмиссиям и минимально смещены относительно них. С ослаблением компоненты ее пик смещается в красную сторону, и найденная по нему лучевая скорость меняется от -50 км/с (21.08.13) до -43 км/с (22–25.11.02).

В оболочке, по-видимому, формируются, по крайней мере частично, также и линии Si II. Об этом говорит прежде всего то, что в доступном нам интервале спектра IRAS 01005 почти все они эмиссионные (исключение составляет абсорбционно-эмиссионный дублет 4128 и 4131 Å). Кроме того, усреднение по всему материалу лучевых скоростей, найденных по пикам эмиссий, дает величину близкую к -50 км/с. Однако линии Si II отличаются от рассмотренных выше оболочечных эмиссий формой профилей и их изменчивостью. Лучевые скорости для их пиков изменяются со временем от -46 км/с до -54 км/с, остаточные интенсивности на 10%, а полу-полуширины при этом – на 30%. Затрудняясь дать оценку временной шкалы этих изменений по нашим данным, отметим лишь, что, по крайней мере, за 2 суток

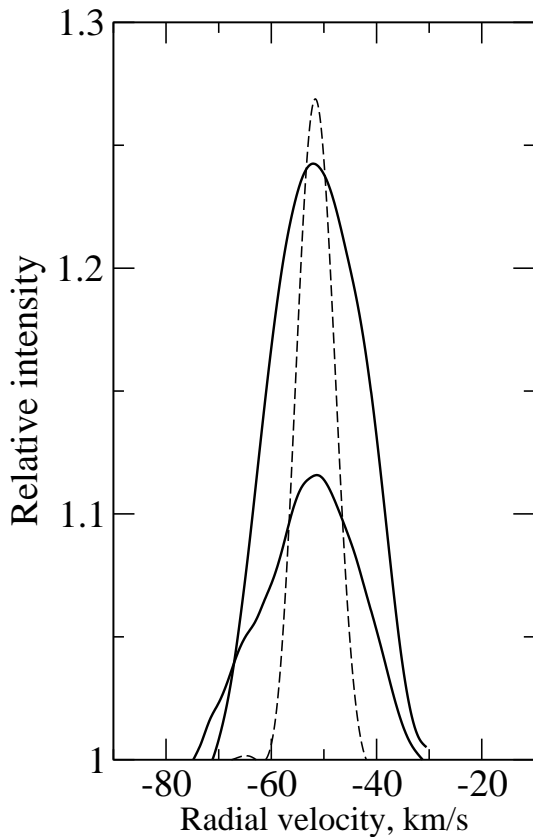


Рис. 3.4: Профили эмиссий [N I] F1 5198 Å и более слабой O I(22) 6046 в спектре IRAS 01005 21.08.13 в сравнении с профилем теллурической эмиссии [O I] F3 5577 Å (штриховая линия, сдвинута по оси V_r).

(25–27.11.02, 13–15.11.05, 3–5.11.08) изменения не выходят за пределы ошибок.

Образцы профилей линий Si II представлены на рис. 3.6. Штриховой кривой на нем показана внешняя огибающая 17 профилей самой сильной линии, Si II 5979 Å, совмещенных по оси V_r . Она напоминает силуэт горы Фудзи на японских гравюрах: острая вершина ($r \approx 1.22$), вогнутые склоны (на половине высоты $\Delta V_r \approx \pm 20$ км/с) и широкое основание (до ± 90 км/с). На примере линии Si II 6347 можно видеть, как время от времени профиль становится резко асимметричным: “провисает” тот или иной его склон, иногда даже ниже уровня континуума (синий склон 13.04.03). Эти деформации профилей могут быть связаны, как и в случае линий водорода, с изменениями их абсорбционных (фотосферных) составляющих, но также и с вариациями геометрии и кинематики в основании ветра. Привлекая данные 6-й и 7-й колонок табл. 3.1, можно видеть, что сопоставленным на рис. 3.6 профилям 13.04.03 и 15.11.05 с противоположной асимметрией соответствуют почти одинаковые лучевые скорости для абсорбций.

Как отмечено выше, линии $H\alpha$, освобожденные от налагающихся на них узких оболочечных эмиссий, имеют профили P Cуг III, т.е. типично ветровые. Рис. 3.7 демонстрирует это

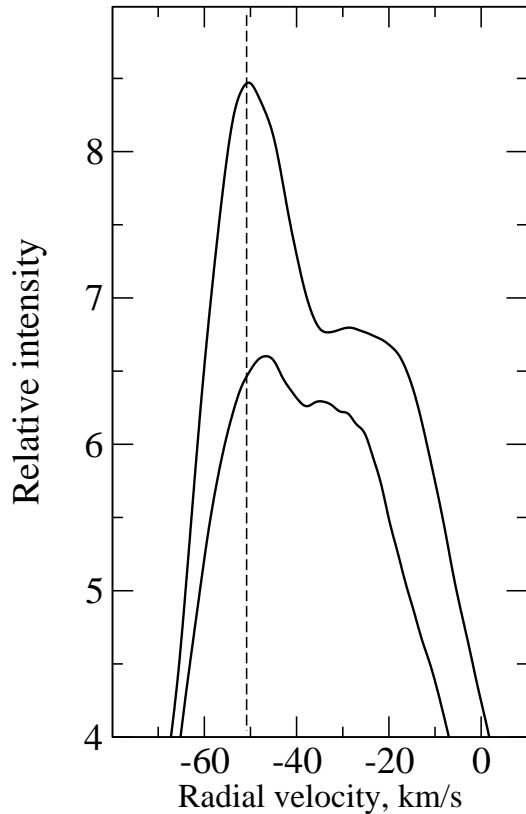


Рис. 3.5: Вершины профилей $H\alpha$ в спектрах IRAS 01005, сверху вниз: 21.08.13 и среднее между 22.11.02 и 25.11.02. Вертикальная штриховая прямая отмечает положение запрещенных эмиссий.

для двух уровней мощности ветра (по всему материалу остаточная интенсивность красного эмиссионного пика изменяется у $H\alpha$ на 50%, а у $H\beta$ на 70%). Главные эмиссионные пики и абсорбционные депрессии располагаются по разные стороны от вертикальной прямой, фиксирующей скорость по запрещенным эмиссиям (-50.5 км/с). Две последние колонки табл. 3.1 показывают, что эта ситуация сохраняется для $H\alpha$ и $H\beta$ также и во всех остальных наших спектрах. Причем и величины смещений $\Delta V_r = (V_r + 50.5$ км/с), и их разброс невелики: для абсорбционного минимума $H\alpha$: $-74 < \Delta V_r < -27$ км/с, для главного эмиссионного пика: $18 < \Delta V_r < 31$ км/с. Такая, относительно низкая, скорость ветра, как и большая интенсивность красного эмиссионного пика (превышение уровня континуума до 7 раз) характерны не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов. IRAS 01005 – пример спектральной “мимикрии” маломассивной звезды, находящейся на стадии post-AGB, под массивный гипергигант.

По-видимому, отклонения ветра от сферической симметрии невелики. На это указывают симметрия профилей $H\alpha$ в нижних частях ($1.2 < r < 1.8$) и близость находимых по

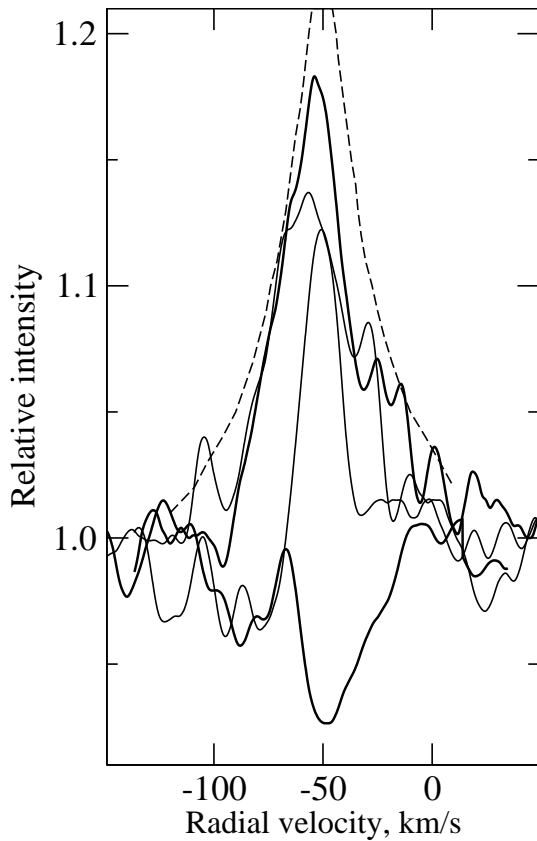


Рис. 3.6: Вариации профилей Si II в спектре IRAS 01005. Жирные линии – эмиссия Si II (2) 6347 Å и среднее из эмиссионно-абсорбционных профилей Si II (3) 4128 Å и 4130 Å, то и другое 29.05.13. Тонкие линии – профили Si II (2) 6347 Å: слева 15.11.05, справа 13.04.03. Штриховая линия – наружная огибающая набора всех профилей Si II 5979 Å.

ним значений V_r к -50 км/с, обратная корреляция между интенсивностями синего и красного эмиссионных пиков, а также обратная корреляция между глубиной абсорбционного минимума и высотой красного эмиссионного пика и прямая корреляция глубины абсорбции с величиной ее синего сдвига. Вывод о незначительных отклонениях ветра от сферической симметрии согласуется с формой околозвездной оболочки IRAS 01005. Изображение объекта, полученное в [121] с высоким угловым разрешением с помощью космического телескопа Хаббла, отнесено авторами [121] к морфологическому типу SOLE, в котором доминирует поток от центральной звезды. Околозвездная оболочка иррегулярна и содержит несколько лепестков разного масштаба.

Профили линий He I более разнообразны. На рис. 3.8 сведены пары наиболее различающихся профилей линий He I 5876 и He I 5016 Å. Линия He I 5876 – сильнейшая в видимой области спектра, формируется выше других линий He I, поэтому не удивительно, что в 12 из 20 наших спектров ее профиль повторяет прямой P Cug – профиль $H\beta$ либо $H\alpha$, отслеживая и изменения интенсивности. Это сходство сохранялось, например, с 22.11.02 по 3.12.02. Другой случай представлен на рис. 3.8 профилем 13.04.03, сдвиги его экстремумов (используется

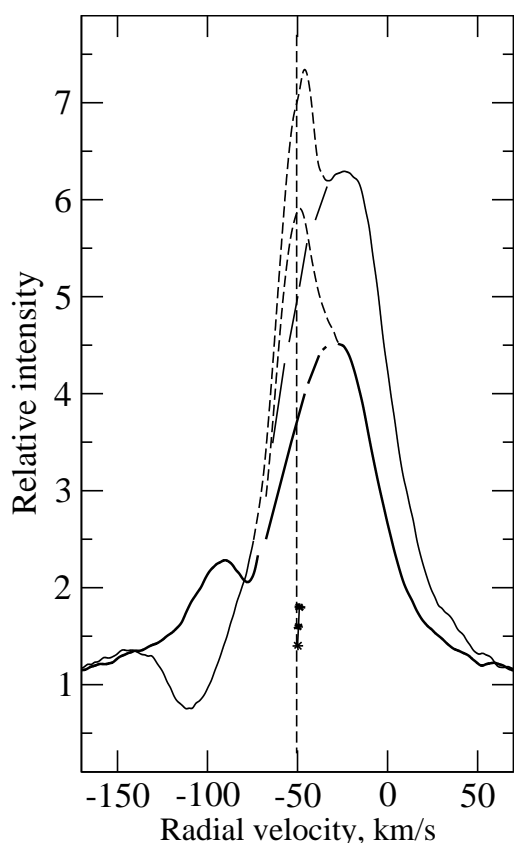


Рис. 3.7: Профили $H\alpha$ в спектре IRAS 01005 9.03.04 (тонкая линия) и 18.01.05 (жирная линия). Штрихи – оболочечные эмиссии, прерывистые линии – участки ветровых профилей под ними. Вертикальная штриховая прямая фиксирует лучевую скорость для запрещенных эмиссий, цепочка звёздочек рядом с ней – бисектор для нижней части профиля 18.01.05.

введенная выше величина ΔV_r): -45 и 22 км/с, а у $H\alpha$: -50 и 31 км/с. Однако достаточно часто такое сходство пропадает. В приведенном на том же рисунке профиле 13.11.05 главный эмиссионный пик находится не с красной стороны от абсорбционной депрессии, а с синей, для первого $\Delta V_r \approx -32$ км/с, для второй -6 км/с, соответствующие же значения для $H\beta$: $+17$ и -25 км/с. При этом речь не идет о смене прямого P Cug-профиля He I 5876 обратным, т.к. и эмиссионная и абсорбционная детали располагаются по одну сторону от “линии -50 км/с”.

Профиль более слабой линии He I 5016 Å проще и стабильнее, он содержит одиночный, довольно узкий (средняя полуширина 18 км/с) эмиссионный компонент. Из его параметров наиболее заметно изменение остаточной интенсивности, по нашим данным около 30% , лучевая скорость колеблется вблизи “линии -50 км/с” от -62 до -43 км/с.

При переходе к еще более слабым линиям He I обнаруживается и усиливается сходство их профилей с эмиссионно-абсорбционными профилями более тяжелых элементов: C II, N II, Fe III (рис. 3.9). У последних они наиболее характерны, поэтому скорости для их экстремумов представлены в 8-й колонке табл. 3.1 (сходство профилей позволило в двух случаях отсутствия надежных линий Fe III заменить их измерениями линии He I). Интерпретация профи-

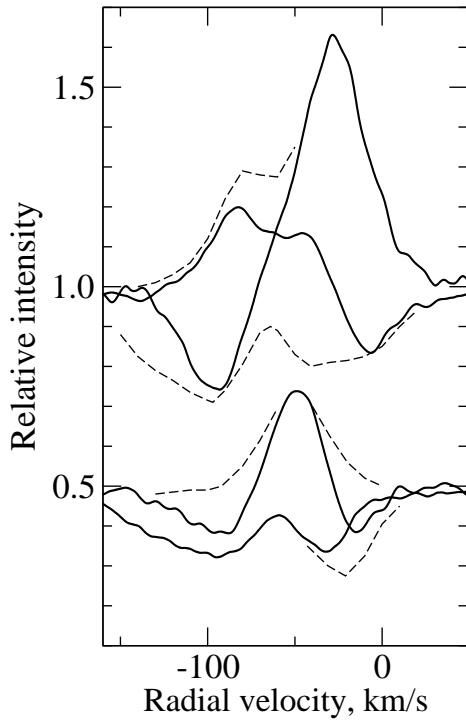


Рис. 3.8: Профили линий He I в спектре IRAS 01005: 5876 Å (вверху) и 5016 Å (смещена вниз на 0.5). Сплошными линиями показаны профили с наибольшей и наименьшей интенсивностями эмиссий (для 5876 Å – 13.04.03 и 13.11.05, для 5016 Å – 2.12.02 и 29.05.13 соответственно), штриховыми линиями – огибающие наборов профилей.

лей линии He I 4713 и др., как инверсных P Cyg-профилей, т.е. как проявление глобального сжатия слоев их формирования, представляется иногда допустимой, но большинство наших спектров показывает скорее лишь наложение эмиссии на синий склон абсорбционного профиля. Рис. 3.9 (в его верхней части) демонстрирует это на примере профиля чисто абсорбционной линии O II 4676 близкой интенсивности.

Линии, формирующиеся в основании ветра и в слое, переходном к фотосфере, также переменны по всем параметрам. Наш материал уверенно фиксирует изменения профилей по крайней мере за 2 суток. Это демонстрирует рис. 3.10. Если различия профилей линий He I 5048 и N II 5679, возникшие за 6 часов (левый фрагмент рисунка), еще близки к погрешностям измерений, то за 2 суток (правый фрагмент) они достигают существенной, уверенно измеримой величины: так, эквивалентная ширина линии N II 5679 выросла с 0.15 до 0.22 Å.

Более или менее чистые фотосферные абсорбции, как правило, асимметричны: ядро сдвинуто относительно крыльев в красную сторону. Поэтому лучевые скорости были измерены не только по их ядрам, но и по по крыльям профилей, они приведены соответственно в 7-й и 6-й колонках табл. 3.1. Каждая цифра – результат усреднения по многим абсорбциям данного спектра с помощью построенного для него графика типа рис. 3.3, причем, поскольку полоса зависимости $V_r(r)$ может быть наклонной, в качестве результата принимался предел,

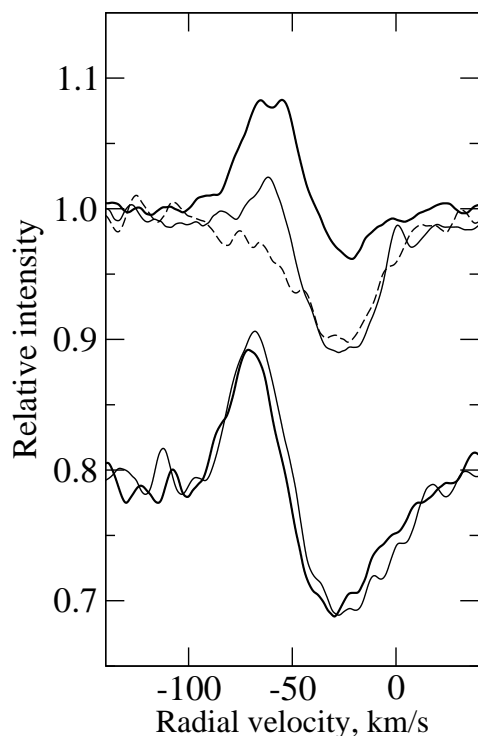


Рис. 3.9: Сходство эмиссионно-абсорбционных профилей в спектре IRAS 01005, полученном 21.08.13. Вверху: профили Fe III (среднее для 5127 и 5156 Å, жирная линия) и He I (5048 Å, тонкая линия); для сравнения приведен профиль абсорбции O II 4267 Å (пунктир). Внизу (сдвиг вниз по вертикали на 0.2): C II 4267 Å (жирная линия) и He I 4713 Å (тонкая линия).

к которому стремится значение V_r с приближением к $\gamma = 1.0$.

Лучевые скорости из колонок 6 и 7 табл. 3.1 представлены графически на рис. 3.11. Их временные вариации необходимо соотносить с лучевой скоростью звезды в целом, V_{sys} . Резонно принять за такую скорость для запрещенных эмиссий, т.е. считать $V_{\text{sys}} = -50.5$ км/с. В пользу этого говорит то, что V_r для крыльев, относящиеся к наиболее глубоким из доступных нам слоев атмосферы, ближе к предлагаемой V_{sys} , чем V_r для ядер, а еще более то, что абсорбции с $V_r \approx V_{\text{sys}}$ наименее деформированы эмиссионными деталями или вообще свободны от них – см. нижние фрагменты рис. 3.11, в которых сопоставлены профили двух линий N II для моментов больших расхождений лучевых скоростей. Перепад скорости для ядер составляет по нашим данным 34 км/с, и часть его может быть вызвана деформациями профилей переменными эмиссионными деталями. Для крыльев перепад меньше, 23 км/с, и даже с учетом пониженной точности измерений может трактоваться как следствие пульсаций или/и скрытой двойственности звезды. Предположение о наличии пульсационной неустойчивости согласуется с аналогичным объяснением быстрой переменности фотометрических параметров этой звезды [117].

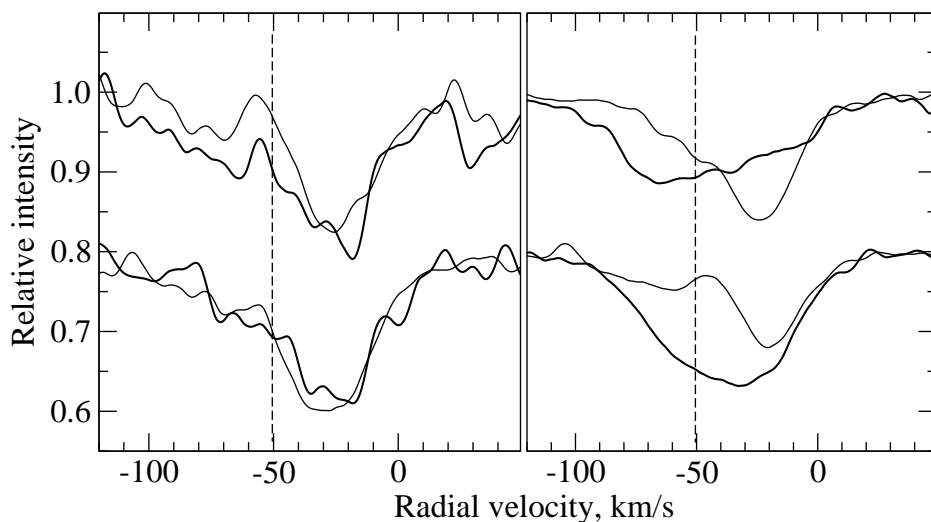


Рис. 3.10: Изменения со временем профилей He I 5048 Å (вверху) и N II 5679 Å (смещен вниз по вертикали на 0.2) в спектре IRAS 01005: за 6 часов (2/3.12.02, слева) и за 2 суток (3 и 5.11.08, справа). Тонкими линиями показаны более ранние виды профилей, жирными – более поздние.

3.3.2 К проблеме двойственности и пульсаций post-AGB звезд

Многие из кандидатов в post-AGB демонстрируют переменность блеска и лучевой скорости с характерным временем процесса в несколько сотен дней, что может говорить и об их двойственности. Для нескольких оптически ярких звезд на стадии post-AGB получены убедительные доказательства орбитального движения. Например, доказана двойственность, определены элементы орбиты и предложена модель системы для высокоширотных сверхгигантов 89 Her [122, 123], HR 4049, HD 44179 и HD 52961 [124]. Природа компаньона для post-AGB звезд, заподозренных в двойственности, пока неизвестна, поскольку нет прямых его проявлений в континууме или спектральных линиях – все известные двойные среди post-AGB относятся к типу SB1. Компаньоном может быть либо очень горячий объект, либо объект очень низкой светимости на главной последовательности, не исключен и белый карлик, как в случае Ba-звезд.

Согласно теоретическим расчетам Гаучи [125], пульсации присущи post-AGB звездам в широком интервале температур $3.8 \geq \log T_{\text{eff}} \leq 4.9$. Признаки атмосферных пульсаций ранее обнаружены для ряда звезд на стадии post-AGB. Примером может быть оптический компонент ИК-источника IRAS 07134+1005, хорошо изученная полуправильная переменная CY CMi. Переменность лучевой скорости этой звезды была впервые заподозрена в работе [3] из сравнения опубликованных данных с результатами, полученными на 6 м телескопе. Несколько позже Лебре и др. [126], проанализировав Фурье-методом переменность профиля H α в спектре CY CMi и соответствующий массив лучевых скоростей, пришли к выводу о

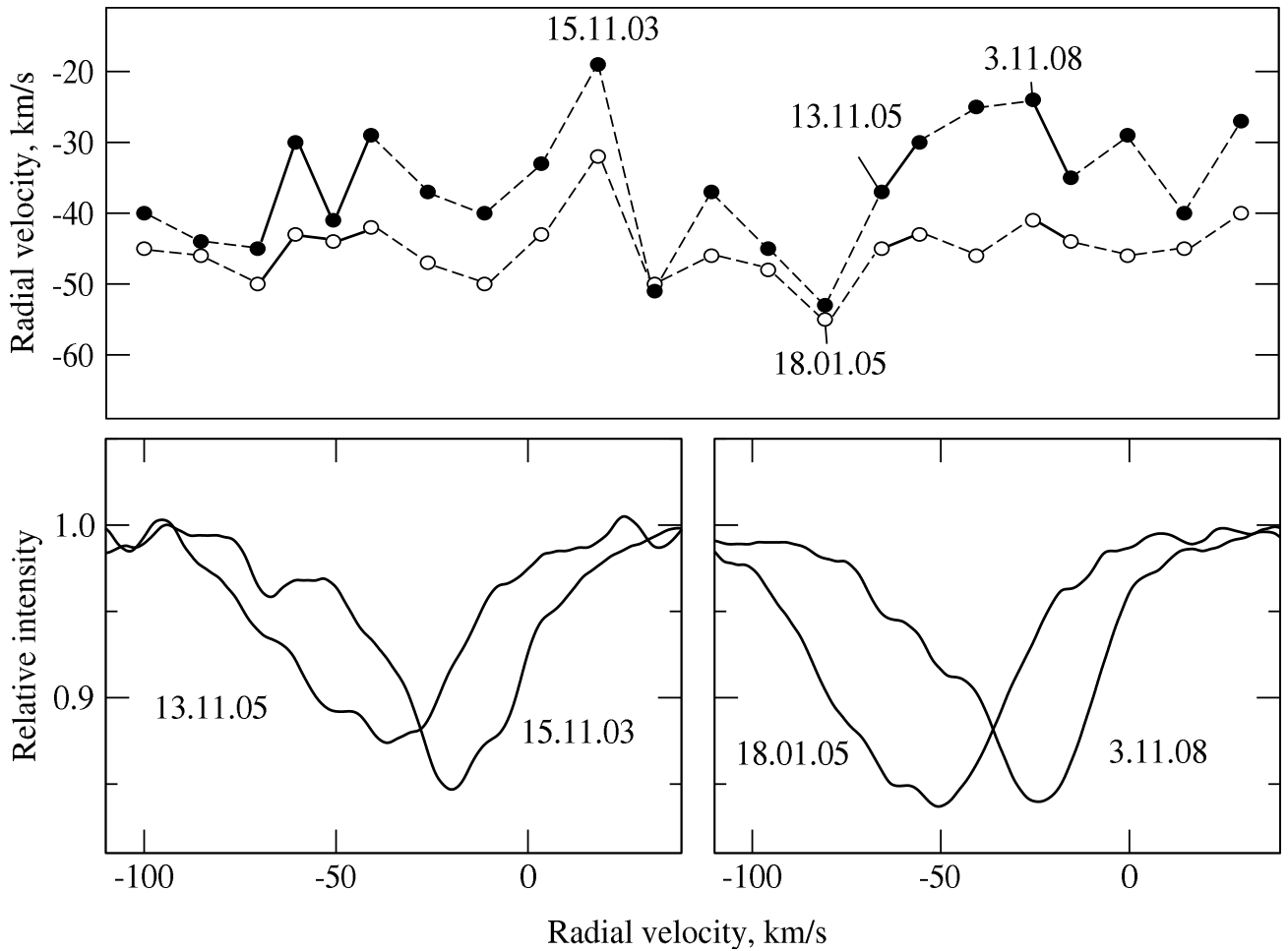


Рис. 3.11: Вверху: изменение от даты к дате (между 25.01.02 и 21.08.13) лучевых скоростей для слабых абсорбций в спектре IRAS 01005, измеренных по их ядрам (точки) и крыльям (колечки). Близкие даты соединены сплошными прямыми, остальные – штриховыми. Помечены даты, для которых ниже приводятся профили линий. Внизу: сопоставление профилей N II 4630 Å (слева) и N II 5679 Å (справа) в даты с большими различиями лучевых скоростей.

сложной динамике атмосферы этой звезды, обусловленной пульсациями. Бартье и др. [127], получив в течение почти 8 лет обширный массив качественных спектров CY CMi, пришли к выводу о существовании переменности лучевой скорости с полуамплитудой 2.7 км/с и главным периодом $P = 36.8 \pm 0.2^d$. Период фотометрической переменности имеет ту же величину, амплитуда очень мала, 0.02^m .

Авторы [128, 50], изучив кинематическую картину в атмосфере и оболочке CY CMi по спектральным деталям различной интенсивности, обнаружили ее переменность и также отметили, что переменность скоростей по предельно слабым абсорбциям может быть указанием на двойственность звезды, но может быть и проявлением малоамплитудных пульсаций в околофотосферных слоях. Для решения вопроса о двойственности CY CMi важно было бы проследить изменение V_r на промежутке времени в несколько лет, регулярно получая 1–2

спектра в месяц.

Пульсации в атмосферах post-AGB звезды V354 Lac (IRAS 22272+5435) и V448 Lac (IRAS 22223+4327) изучены Хривнаком и др. [129] на основе долговременных наблюдений переменности блеска, цветов и лучевой скорости. Определив периоды, их отношения и амплитуды пульсаций для этих звезд, авторы [129] пришли к выводу о том, что пульсационные свойства post-AGB звезд не полностью согласуются с теоретическими расчетами для этой стадии эволюции [130] и отличаются от таковых у классических цефеид. Звезды CY CMi, V354 Lac и V448 Lac с обнаруженной пульсационной нестабильностью входят в группу F-сверхгигантов с атмосферами, обогащенными углеродом и тяжелыми металлами s-процесса, синтезированными в ходе предшествующей эволюции. Основные сведения для этой группы родственных post-AGB приведены в статьях [116, 4]. В работе [94] получены указания на переменность скорости по абсорбционным деталям в спектре более горячей post-AGB звезды – A-сверхгиганта BD+48° 1220 = IRAS 05040+4820.

3.3.3 Линии дублета натрия Na I и DIBs

Рассмотрим изменения положения компонентов профилей спектральной линии Na I 5890 Å. Для наглядности все спектры приведены на одном рисунке (рис. 3.12). Все компоненты линии, от спектра к спектру, хорошо согласуются по лучевым скоростям, но различаются по остаточной интенсивности, также в некоторых спектрах присутствует ионосферный эмиссионный компонент. Лучевая скорость эмиссии совпадает со скоростями атмосферных линий [O I], O₂ и H₂O (равны нулю), а, следовательно, имеет земное происхождение.

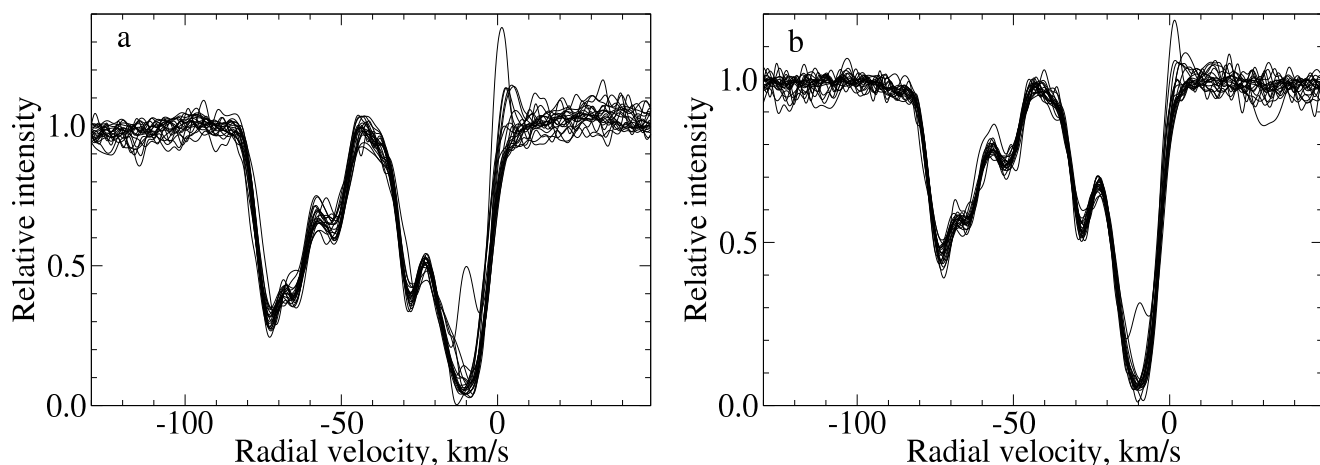


Рис. 3.12: Профили линий Na I 5890 Å (a) и Na I 5896 Å (b) для 20 спектров, наложенные друг на друга

Исследование лучевых скоростей абсорбционных минимумов линий Na I 5890 Å, Na I 5896 Å (см. приложение табл. 5 и 6), Ca II 3934 Å и Ca II 3968 Å (см. приложение табл. 7)

начнём с самого коротковолнового минимума -72.4 км/с. Этот коротковолновый компонент формируется в расширяющейся околозвёздной оболочке IRAS01005. Системная скорость IRAS 01005 $V_{\text{sys}} = -50.5$ км/с [119], отсюда получаем типичную для протопланетарной туманности скорость расширения оболочки $V_{\text{exp}} \approx 22$ км/с [131, 132]. Данные GAIA, из каталога DR2, показывают, что в направлении IRAS 01005 есть звёзды со скоростями около -70 км/с, что косвенно может свидетельствовать о межзвёздном происхождении абсорбционного минимума данной скорости.

Ещё один коротковолновый компонент ($V_r = -65.7$ км/с) D-линии NaI формируется в рукаве Персея. Это предположение основано на том, что в спектрах B-звезд с близкими галактическими координатами HD 4841, HD 4694 и Hiltner 62 [133], которые являются членами ассоциации Cas OB7, обнаружен аналогичный межзвёздный компонент с $V_r = -65$ км/с. Расстояние до ассоциации Cas OB7 $d = 2.5$ кпк [134], это расстояние является нижней оценкой до IRAS01005. Слабый компонент, $V_r = -52.2$ км/с, формируется в межзвёздной среде около рукава Персея. Два длинноволновых компонента ($V_r = -27.6$ км/с и $V_r = -10.6$ км/с) формируются в межзвёздной среде в Местном рукаве Галактики.

Детальный анализ линии NaI 5890 Å позволил выделить у 12 из 20 спектров свечение ионосферы Земли (рис. 3.13), на рисунке изображены 3 характерных спектра с выраженным эмиссионным компонентом ионосферы. Процедура произведена путём деления каждого спектра на так называемый “средний спектр”, который состоит из склеенных кусочков разных спектров для каждого компонента. Выбирались кусочки с наибольшей остаточной интенсивностью, то есть построен огибающий спектр. Подобный метод создания среднего спектра был применён из-за того, что усреднение по нескольким спектрам спектрально-переменной звезды может привести к частичной потере информации. Для подтверждения того, что эмиссии имеют ионосферное происхождение, было проведено дополнительное исследование. Один из спектров, содержащий эмиссионную линию был обработан особым образом. Вместо усреднения по 5 кадрам, каждый кадр обработан отдельно. 5 спектров, полученных один за другим, длина экспозиции для каждого кадра составляет 60 минут, разделены на средний спектр (рис. 3.13d). На рисунке можно проследить последовательное увеличение остаточной интенсивности от спектра к спектру. Спектр номер 2 рисунка 3.13d имеет немного завышенные значения остаточной интенсивности, подобные показатели обусловлены неоднородностью свечения ионосферы, но в целом тенденция изменения остаточной интенсивности со временем прослеживается. Изменение интенсивности эмиссии атомарного натрия 5890 Å в ночной период суток подробно описано авторами [135].

В спектрах IRAS 01005 отождествлены 6 межзвёздных полос DIBs: 5780, 5797, 6196, 6203, 6379, 6614 Å (см. рис. 3.14), длины волн DIBs взяты из работы [136]. Измерены лучевые скорости и эквивалентные ширины (см. приложение табл. 9). В работе Фридмана и др. [137] исследована методика вычисления межзвёздного покраснения E_{B-V} и столбцовой

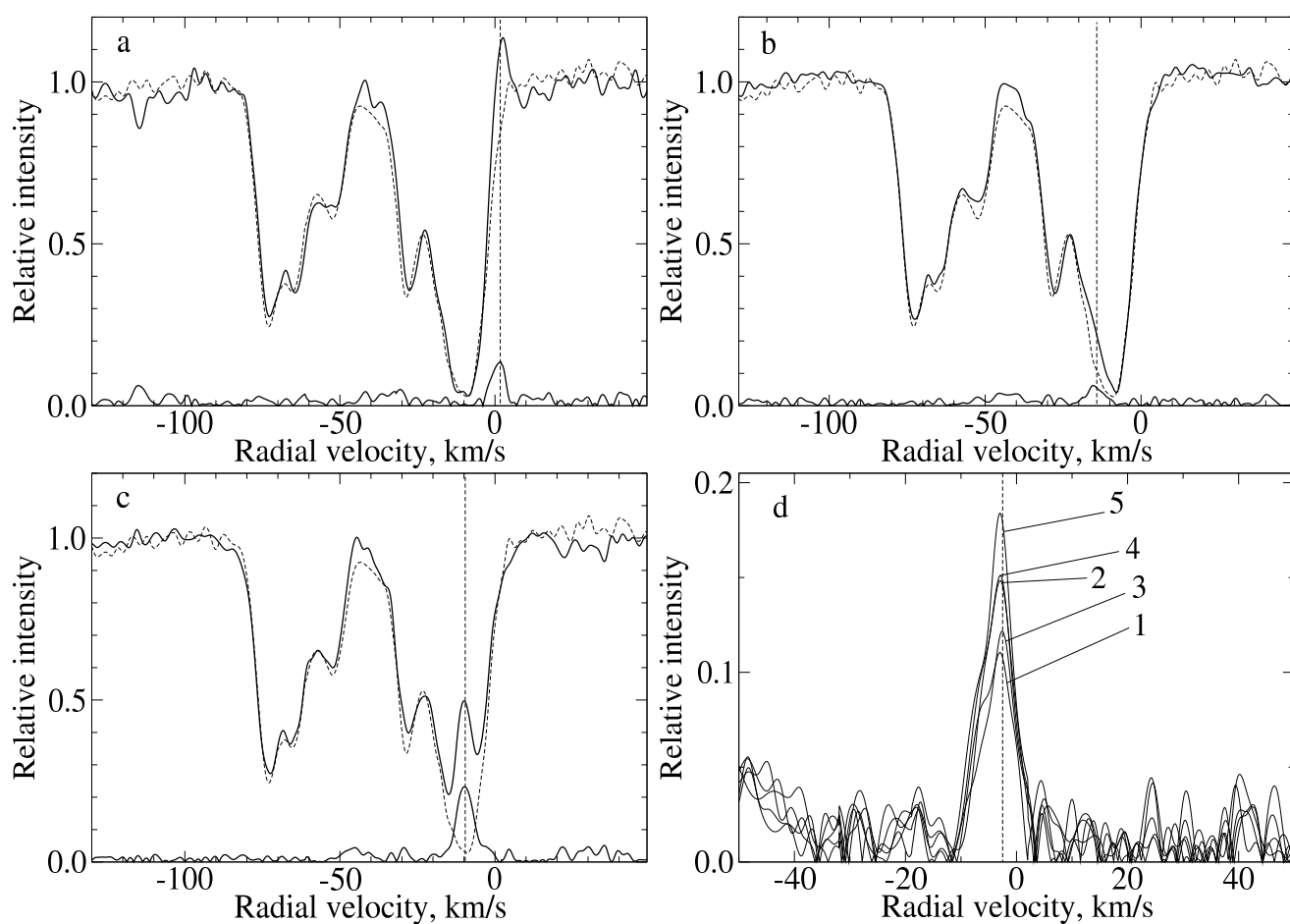


Рис. 3.13: Рисунки а, б, с показывают эмиссионный компонент линии Na I 5890 Å как результат деления каждого спектра на средний (прерывистая линия), на картинке d изображены профили эмиссионного компонента Na I 5890 Å для 5 спектров, полученных 09.12.2006, наложенные друг на друга с обозначенными порядковыми номерами кадров. Вертикальная прерывистая линия на всех рисунках показывает лучевую скорость гелиоцентрической поправки.

плотности нейтрального водорода $\log[N(\text{H})]$ по эквивалентной ширине некоторых DIBs. С использованием результатов Фридмана, вычислено межзвёздное покраснение и столбцовая плотность нейтрального водорода по четырём полосам DIBs (см. приложение табл. 9).

3.3.4 Спектральный класс центральной звезды IRAS 01005

Используя только слабые и минимально деформированные абсорбции C II/III, N II/III, O II/III, Si III/IV и др., а также прямое сравнение спектра IRAS 01005 со спектрами V1853 Cyg (B1 Iae), 9 Ser (B2.3 Ib) и других ранних сверхгигантов из атласа [138], получаем спектральный класс $B1.5 \pm 0.3$. Оценка класса светимости по линиям H I и He I – Ib. В работе [5] для IRAS 01005

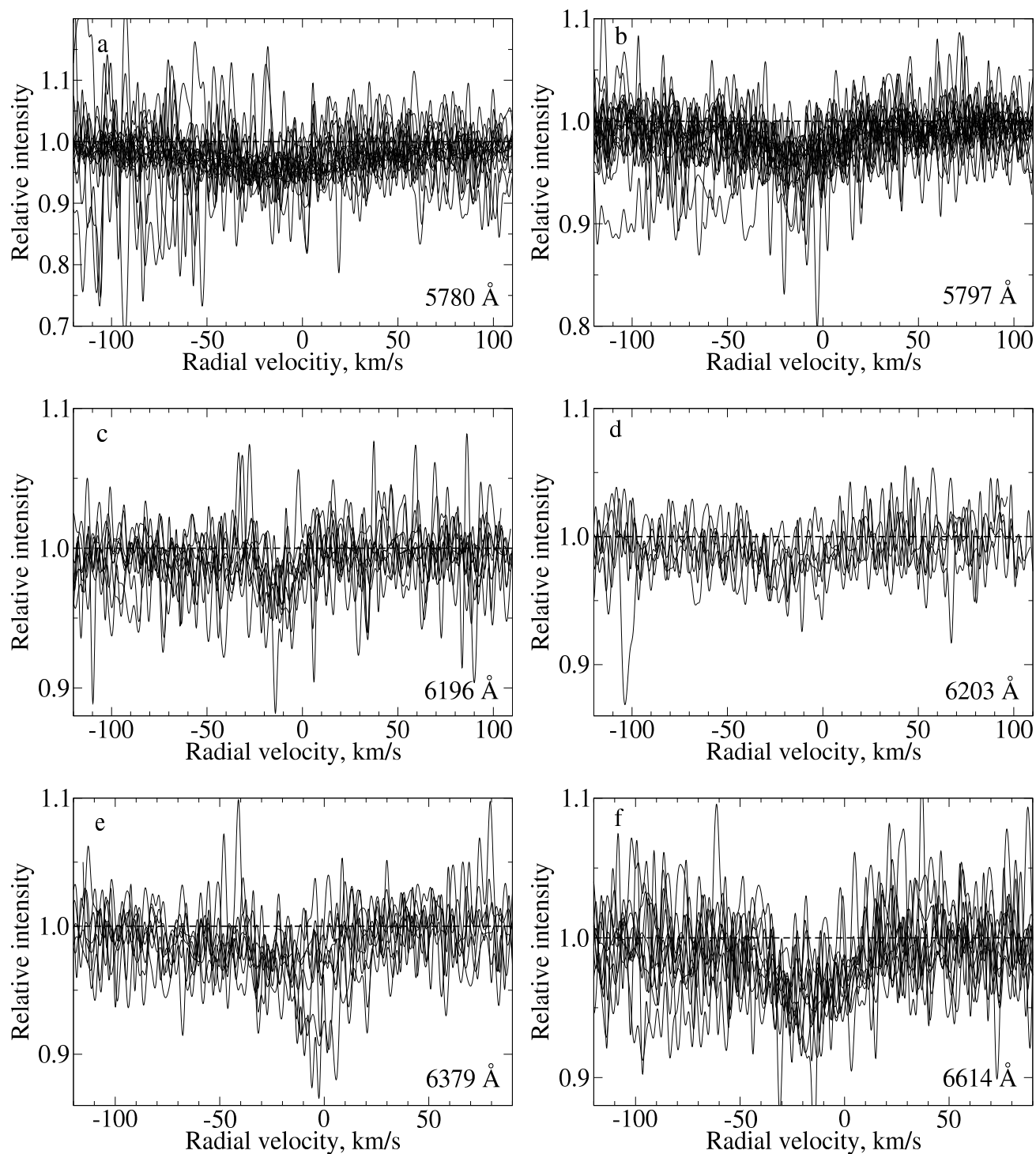


Рис. 3.14: Профили DIBs в спектре ИК-источника IRAS 01005+7910, в порядке возрастания длины волны 5780 (a), 5797 (b), 6196 (c), 6203 (d), 6379 (e), 6614 (f) Å.

получена близкая оценка спектрального класса $B1.7 \pm 0.5$. Необходимо отметить, что проведение спектральной классификации для звезды с пониженной металличностью и измененным в ходе эволюции химическим составом путем сравнения со спектрами звезд I-го типа населения, может внести в результат систематические ошибки.

Родственными для IRAS 01005 объектами являются горячие post-AGB сверхгиганты V1853 Cyg [139], V886 Her [140], LS III 52° 24 [141] и несколько звезд на южном небе [142, 143]. В статье [144] приведен список из 15 горячих post-AGB звезд, рассмотрены особенности их ИК-спектров и определены параметры околозвездных пылевых оболочек. Среди изученных горячих post-AGB звезд следует выделить близкую по основным параметрам к IRAS 01005 высокоширотную Be-звезде V886 Her (IRAS 18062+2410). Анализ многочисленных наблюдений V886 Her указывает на ее быструю эволюцию к стадии PN [145, 146, 147].

3.4 Заключение

По 23-м спектрам, полученным на 6-м телескопе с высоким спектральным разрешением, $R = 60\,000$, определены спектральный класс центральной звезды $B1.5 \pm 0.3$ и класс светимости Ib, отождествлены многочисленные спектральные детали, рассмотрена переменность их профилей и лучевой скорости. По положению симметричных и стабильных профилей запрещенных эмиссий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II] определена системная скорость $V_{\text{sys}} = -50.5$ км/с. Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околозвездной оболочки и близость стадии планетарной туманности.

Различия лучевой скорости V_r по ядрам линий, ≈ 34 км/с, частично вызваны деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад V_r по крыльям линий меньше, ≈ 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.

Линии $\text{H}\alpha$ имеют ветровые профили типа P Cyg 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), что характерно не для классических сверхгигантов, а для гипергигантов.

Для 5 основных компонентов D-линий Na I (рисунок 3.12) гелиоцентрические лучевые скорости составляют: $V_r = -72.5, -65.3, -52.2, -27.7$ и -10.2 км/с, что в пределах ошибок совпадает с опубликованными данными. Наличие компонента $V_r = -65.3$ км/с, по-видимому возникающего в межзвездной среде рукава Персея, позволяет рассматривать $d = 2.5$ кпк как нижнюю оценку расстояния до IRAS 01005. GAIA оценивает расстояние до объекта как

$d = 3.8$ кпк. Слабый компонент, $V_r = -52.2$ км/с, формируется в межзвездной среде около рукава Персея. Два длинноволновых компонента являются межзвездными, формирующимися в Местном рукаве Галактики. Самый коротковолновый компонент, $V_r = -72.5$, может формироваться в околозвездной оболочке, расширяющейся с типичной для post-AGB скоростью $V_{\text{exp}} \approx 22$ км/с.

Несмотря на то, что многолетние наблюдения IRAS 01005 проводились с помощью разных приёмников, результаты измерений лучевой скорости остаются практически одинаковыми и колеблются в пределах ошибки. Отождествлены 6 межзвёздных полос DIBs, измерены их лучевые скорости и эквивалентные ширины, все они имеют примерно одинаковую лучевую скорость около -13 км/с. Определены значения межзвёздных покраснений E_{B-V} и столбцовых плотностей нейтрального водорода $\log[N(\text{H})]$.

По совокупности полученных параметров, ближайшим аналогом среди изученных горячих post-AGB звезд следует считать близкую к стадии планетарной туманности [145] высокоширотную Be-звезду V886 Her (IRAS 18062+2410).

4. Об эволюционном статусе высокоширотной переменной V534 Lyr

4.1 Введение

Звезда V534 Lyr (HD 172324, HIP 91359) расположена на высокой галактической широте ($b = 18.58^\circ$). Наш интерес к этой относительно яркой ($V = 8.16^m$) звезде обусловлен тем, что Трамс и другие [148] включили V534 Lyr в список звезд высокой светимости на высоких широтах Галактики. Большая часть исследованных этими авторами звезд отнесены к post-AGB кандидатам. Однако у V534 Lyr отсутствует ИК-поток, поэтому авторы [148] отнесли эту звезду лишь к предполагаемым post-AGB кандидатам. Дополнительным стимулом для нас к изучению V534 Lyr служит эмиссия в линиях H I, обнаруженная еще в ранней работе Бонсака и Гринстейна [149] и подтвержденная в [150]. Позже эта звезда изучалась неоднократно с помощью различных фотометрических систем [151, 152, 153] и спектральными методами, но к настоящему времени ни в одной из имеющихся публикаций нет определенного вывода об ее эволюционном статусе. Как следует из данных табл. 4.1, в которой мы указываем основные работы, касающиеся исследования V534 Lyr, эволюционный статус этой звезды остается неопределенным.

Таблица 4.1: Некоторые ранее опубликованные результаты исследований V534 Lyr

Методика, результаты	Статус звезды	Ссылка
IR-фотометрия	post-AGB звезда ?	[154]
оптическая спектроскопия, метод моделей атмосфер, M_V, V_r	post-AGB звезда ?	[150]
оптическая спектроскопия метод моделей атмосфер, переменность V_r и H I	высокоскоростная HGL звезда ?	[12]

Целью данной работы является определение на основе высококачественных оптических спектров основных параметров V534 Lyr, поиск возможной переменности спектра и картины лучевых скоростей в атмосфере и уточнение эволюционного статуса звезды. В разд. 4.2.4

приведем методику определения параметров звёздной атмосферы и расчета содержания химических элементов. В разд. 4.2 приведем полученные сведения об особенностях спектра и профилей деталей, обнаруженных по спектрам высокого разрешения. Здесь же будут обсуждены полученные результаты и сделаны попытки применить наши данные для определения светимости, удаленности и эволюционного статуса звезды. В заключительном разд. 4.4 суммируются основные выводы.

4.2 Полученные результаты

4.2.1 Особенности спектра V534 Lyr

Особенностью оптического спектра V534 Lyr является мощная эмиссия профиля $H\alpha$, что отмечалось в каждой предыдущей статье, касающейся спектроскопии этой звезды (см, например, [150, 12] и ссылки в этих статьях). Линия $H\alpha$, которая присутствует в 7 из 8 наших спектров, самая интенсивная в спектре. Вариации ее профиля с двухпиковой эмиссией значительны. В самом раннем спектре (08.07.2000) весь эмиссионный профиль расположен выше континуума. Но в последующих спектрах ядро абсорбционного компонента, который формируется в поверхностных слоях атмосферы, опускается ниже уровня континуума. Меняется положение абсорбционного компонента, а также интенсивности и положения эмиссионных компонентов, но интенсивность длинноволнового пика всегда выше коротковолнового (рис. 4.1). Сдвиг синей границы абсорбционного компонента относительно вертикальной штриховой линии, соответствующей V_{sys} , усилился в спектре за 24.09.2010: $V_r - V_{\text{sys}} \approx -50$ км/с.

Кардинальное изменение профиля зафиксировано в спектре 2017 г. Вместо двухпикового видим профиль типа P Cyg, абсорбционный компонент которого сдвинут на $V_r - V_{\text{sys}} \approx -70$ км/с. Профиль $H\beta$ зарегистрирован в меньшем числе дат, но и этого оказалось достаточно, чтобы заметить, как более сильный из эмиссионных компонентов переходит с красного крыла на синее (рис. 4.2). Подобные же вариации профилей $H\alpha$ и $H\beta$ в спектре V534 Lyr были зарегистрированы авторами [12]. Как следует из рис. 4.2, в спектре за 08.06.2017 г наблюдалось изменение типа профиля и у $H\beta$: 08.06.2017 тип P Cyg с максимальным смещением абсорбционного компонента. А спустя несколько дней, 13.06.2017, видим раздвоение абсорбционного компонента $H\beta$, причем в отсутствие изменений профиля $H\alpha$.

Отметим, что для спектра V534 Lyr характерно усиление линий нейтрального гелия He I при существенном ослаблении линий железа. Это хорошо иллюстрирует верхняя панель рис. 4.3, где фрагмент этой звезды с линией He I 4026 Å сопоставлен с аналогичным участком спектра массивного сверхгиганта α Cyg. МК-спектральный класс α Cyg (Sp = A2 Ia) близок к таковому у V534 Lyr, но интенсивность He I 4026 Å в их спектрах заметно различается.

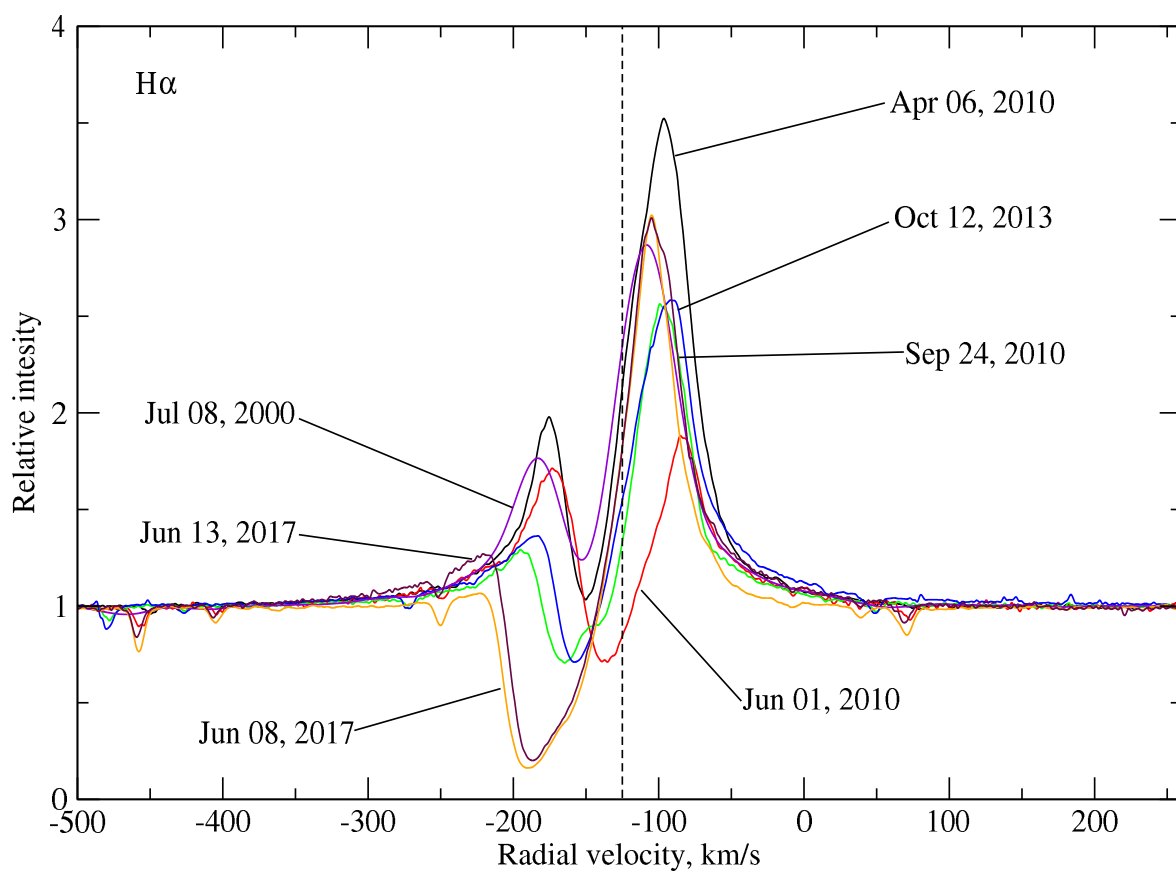


Рис. 4.1: Профили линии H α для разных моментов наблюдений. Прерывистая вертикаль – принятая системная скорость $V_{\text{sys}} \approx -125$ км/с.

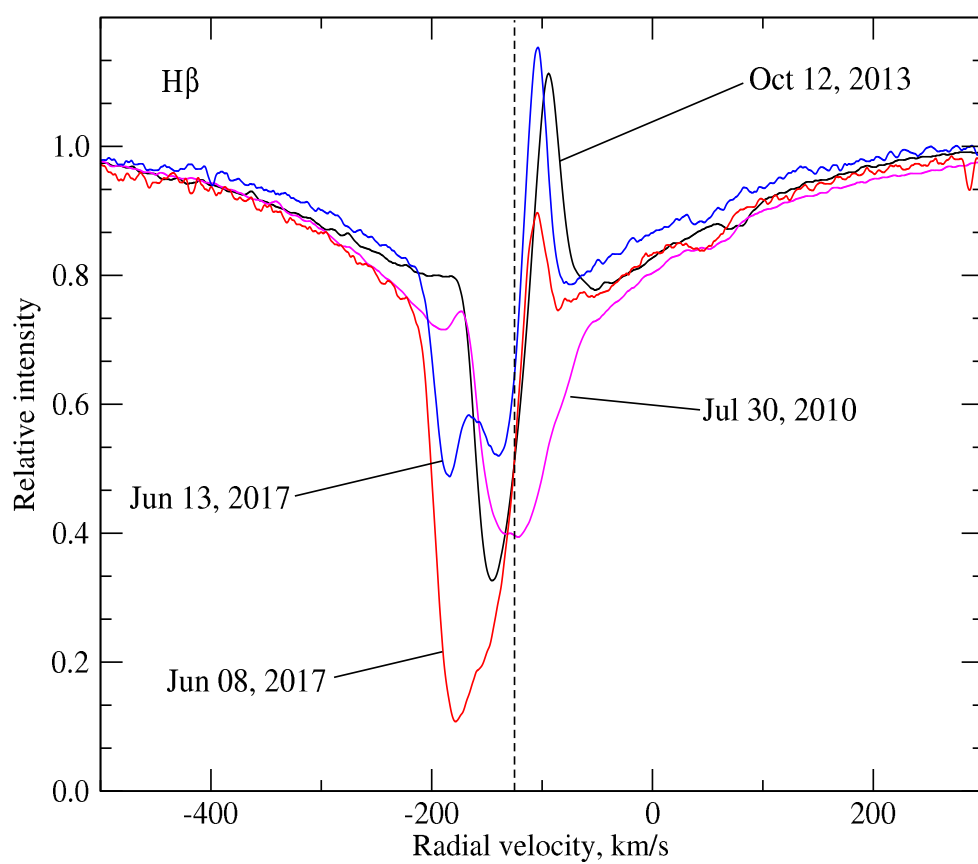


Рис. 4.2: Профили линии H β , вертикальная линия – то же, что и на рис. 4.1.

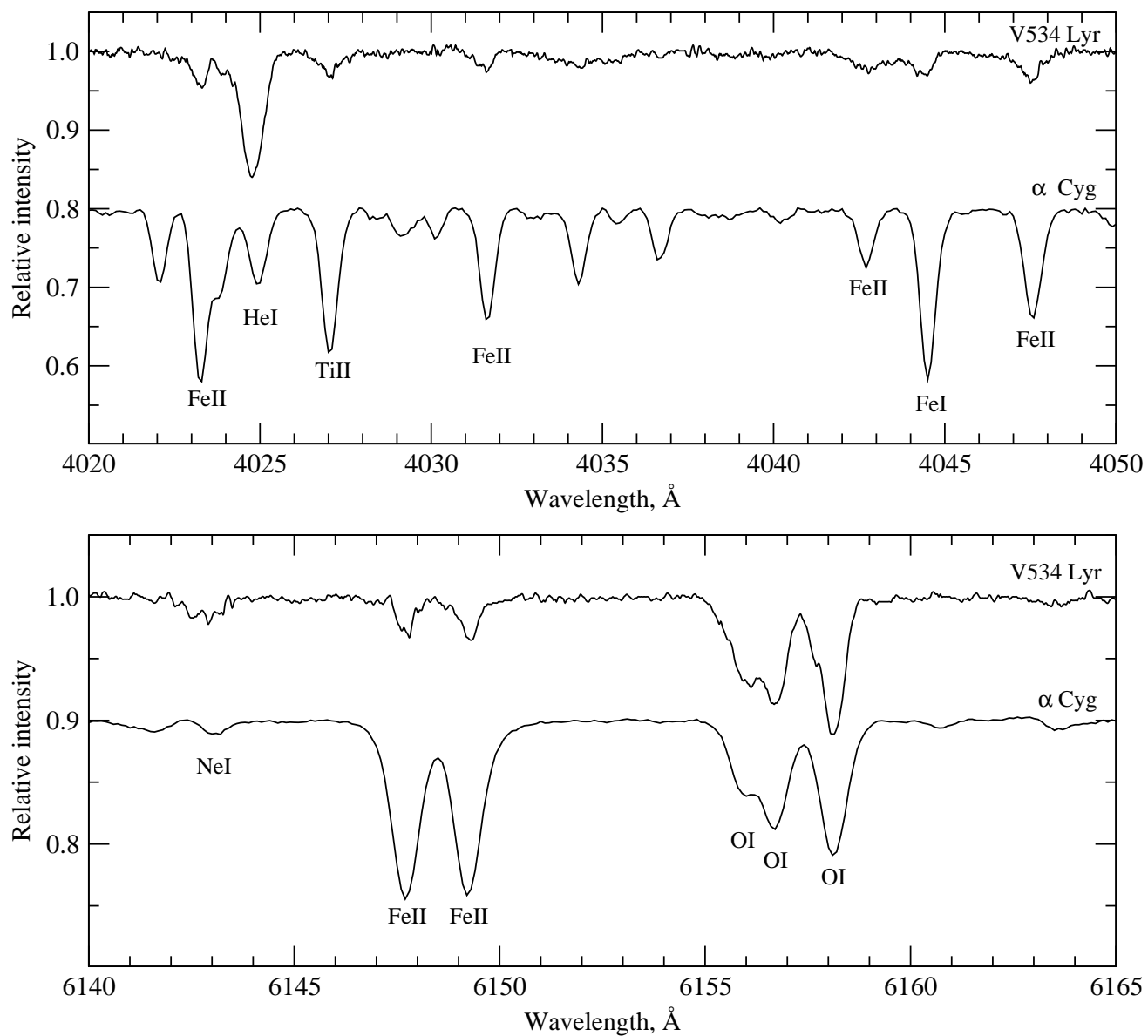


Рис. 4.3: Сопоставление фрагментов спектров V534 Лур с аналогичными фрагментами спектра массивного сверхгиганта α Суг. Отождествлены основные абсорбции.

4.2.2 Картина лучевых скоростей

Обобщенные результаты измерения лучевых скоростей для каждого момента наблюдений представлены в табл. 4.2. Колонки 4–7 содержат величины, полученные усреднением скоростей для: эмиссий Fe II 6318, 6384 и 6385 Å, в спектрах 2017 г. к ним добавились эмиссии Fe II 6493, 7496, 7513 Å; ядер абсорбций He I, S II и ядер абсорбций дублета Si II (2); ядер компонентов абсорбций Fe II, соответственно. В последнем столбце приведена скорость по линиям Fe II с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня. В спектрах для 4-х дат эти линии расщеплены на два компонента, поэтому даны оба средних значений скорости: по длинноволновым компонентам и ниже этих значений указана средняя скорость по коротковолновым компонентам. Подчеркнем, что расщепление для всех моментов, когда оно присутствует в спектре, достигает больших значений: $\Delta V_r = 20 \div 50$ км/с. В спектре 2000 г., из-за его пониженного спектрального разрешения, измерения компонентов абсорбций ненадежны. По этой причине данные для этого спектра не приводятся на рис. 4.4, где представлены зависимости лучевой скорости от центральной остаточной интенсивности соответствующей линии, $V_r(r)$. Каждой линии соответствует один или два (в случаях раздвоенных абсорбций) значка. Кружки – абсорбции Fe II высокого возбуждения, квадратики – абсорбции Fe II низкого возбуждения, колечки – He I, S II, горизонтальные чёточки – в основном - это эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å, в спектрах 2017 г. еще и эмиссии Fe II 6493, 7496, 7513 Å. Указанные эмиссии Fe II формируются в протяжённых оболочках и, будучи стационарными у некоторых сверх- и гипергигантов, используются для оценки их системных скоростей, V_{sys} [54]. У исследуемой звезды V534 Lyr по нашим данным скорости, найденные по эмиссиям в разные даты 2010 г., различаются примерно на 5 км/с, причем разные линии смещаются на разные величины, но все в одну сторону. В спектре 2013 г. положение этих эмиссий существенно отличается от предыдущих дат. При этом в каждую из дат положение эмиссий близко к таковому для нерасщеплённых абсорбций, поэтому скорости в колонке 5 близки к скоростям в колонке 6, измеренным по верхним частям абсорбций.

Полуширина линии Mg II 4481 Å в спектре V534 Lyr составляет $\delta\lambda = 0.5$ Å. С использованием зависимости полуширины этой линии от скорости вращения звезды из работы [155] получаем низкую скорость вращения $V \sin i = 5 \div 6$ км/с.

Из табл. 4.2 и рис. 4.4 очевидны изменения со временем положений всех линий и формы профилей некоторых из них. Последнее явление связано преимущественно с верхними слоями атмосферы. Это видно, например, из того, что абсорбции Fe II низкого возбуждения в спектрах 6.04.2010, 1.06.2010 и 12.10.2013 раздвоены, а формирующиеся глубже абсорбции высокого возбуждения остаются одиночными в эти даты. Рис. 4.5 демонстрирует это для линий Fe II 5363 и 5506 Å (их потенциалы нижних уровней 3.2 eV и 10.2 eV, соответственно), а рис. 4.6 для линий Fe II 5169 Å, самой сильной из низковозбужденных абсорбций в видимой части спектра (у нее потенциал нижнего уровня 2.9 eV), и Si II 6371 Å (потенциал нижнего

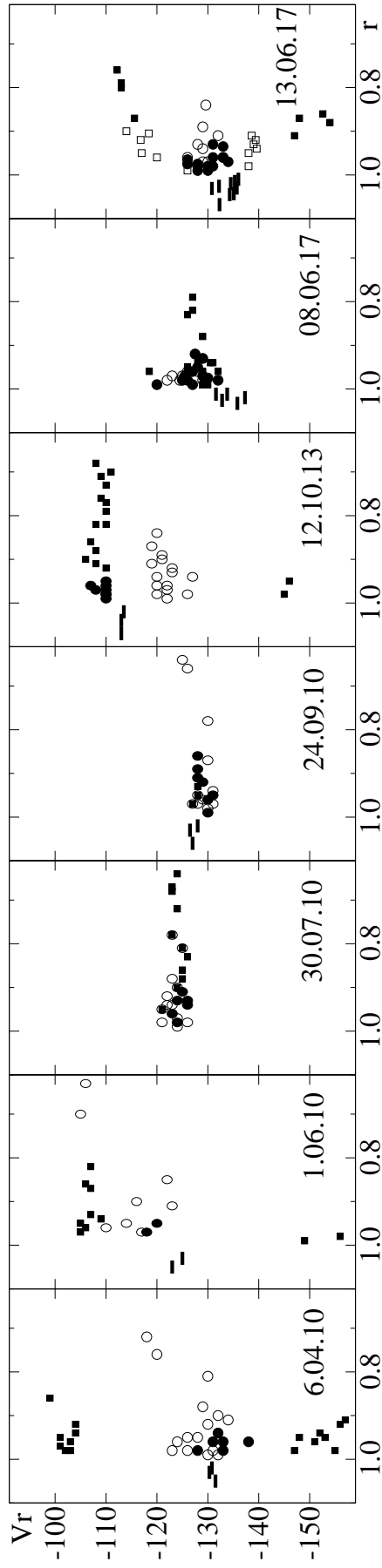


Рис. 4.4: Зависимости $V_r(\text{г})$ для имеющихся дат наблюдений. Заполненные кружки – абсорбции Fe II высокого возбуждения, квадратика – абсорбции Fe II низкого возбуждения, колечки – He I, S II, горизонтальные чёрточки – эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å.

Таблица 4.2: Моменты наблюдений, зарегистрированный спектральный интервал, эффективная температура и значения лучевой скорости, усредненные для различных групп спектральных линий. В двух последних колонках даны средние значения V_r по линиям ионов железа с высокими Fe(high) и низкими Fe(low) потенциалами возбуждения нижнего уровня.

Дата	UT	$\Delta\lambda$, nm	T_{eff} , К	V_r , км/с			
				эмиссии	абсорбции		
				FeII	HeI+SII +SiII	FeII (high)	FeII (low)
08.07.2000	17:23	430–780		–131	–140	–145:	–143:, –154 ¹
06.04.2010	01:18	516–669	10100	–131	–131	–132	–103 –152
01.06.2010	23:56	522–669	10250	–123	–120	–120	–107 –156
30.07.2010	23:41	443–593	10300		–124	–125	–125
24.09.2010	20:01	522–669	10800	–127	–130	–130	–128
12.10.2013	17:10	392–698	9750	–114	–120	–108	–109 –146
08.06.2017	00:01	470–778	10250	–134	–130	–134	–134
13.06.2017	21:12	470–778		–134	–129	–133	–119 ² , –113 ¹ –140 ² , –152 ¹

¹ – среднее значение V_r по линиям FeII (42),

² – среднее значение V_r по линиям FeII (мультиплеты 48, 49, 74.)

уровня 8.1 eV). На нижних фрагментах рис. 4.5, 30.07.2010 и 24.09.2010, профиль Fe II 5363 Å лишь слегка асимметричен, а на верхнем, 6.04.2010, он расщеплён на два компонента, близких по глубине и отстоящих друг от друга на 48 км/с. Профиль Fe II 5169 Å (рис. 4.6) 6.04.2010 также состоит из двух компонентов, но разной глубины, раздвинутых на 56 км/с. На рис. 4.6 показан промежуточный случай трансформации профиля. Абсорбция Si II 6371 Å (потенциал нижнего уровня 8.1 eV) 6.04.2010 отчётливо не расщеплена, но заметно уширена по сравнению с 24.09.2010 (в спектре 30.07.2010 она отсутствует).

Табл. 4.3 содержит параметры профилей линий, представленных на рис. 4.5 и 4.6, их глубины, R , ширины в крыльях (на $\gamma = 0.99$), δV_r , и эквивалентные ширины W_λ . В спектре за 6.04.2010 абсорбции были мельче и шире в крыльях, чем 30.07.2010 и 24.09.2010. Причём, эти различия сравнительно невелики у линий Fe II высокого возбуждения, а так же у линий He I и S II, и заметно больше у низковозбужденных линий Fe II. Глубины FeII 5506 Å во все три даты практически одинаковы, а у FeII 5363 Å и FeII 5169 Å они различаются в 2.5 и 2.6 раза соответственно. Углубление линий Fe II 5363 Å от 6.04.2010 к 24.09.2010 так компенсировалась сужением, что её эквивалентная ширина вернулась к прежнему значению. Мы полагаем, что уширение и раздвоение низковозмущённых линий Fe II связаны с особенностями поля скоростей в верхних слоях атмосферы, а не с появлением в них эмиссионных компонентов. В доступной нам области спектра V534 Луг последнее уверенно наблюдается только в линиях водорода. В отдельные моменты, как было отмечено выше, в спектре заре-

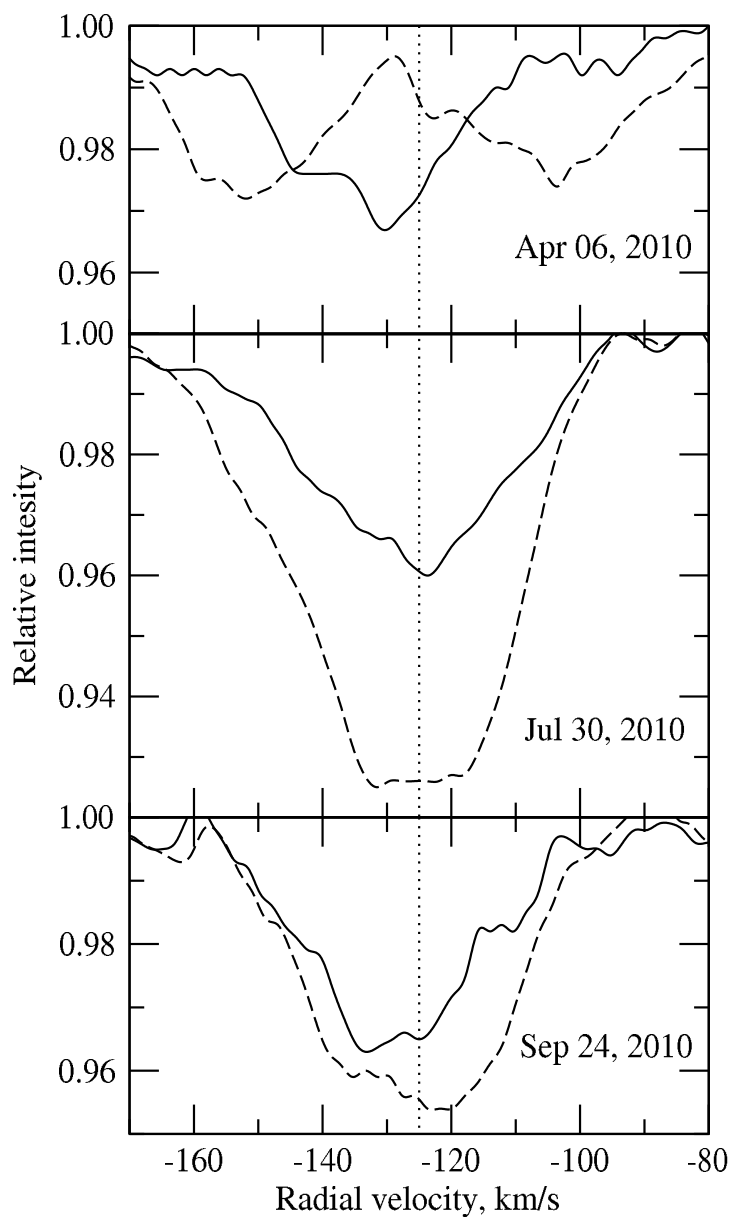


Рис. 4.5: Профили линий Fe II 5363 (3 eV, прерывистая) и Fe II 5506 (10 eV, сплошная). Вертикальная линия – то же, что и на рис. 4.1

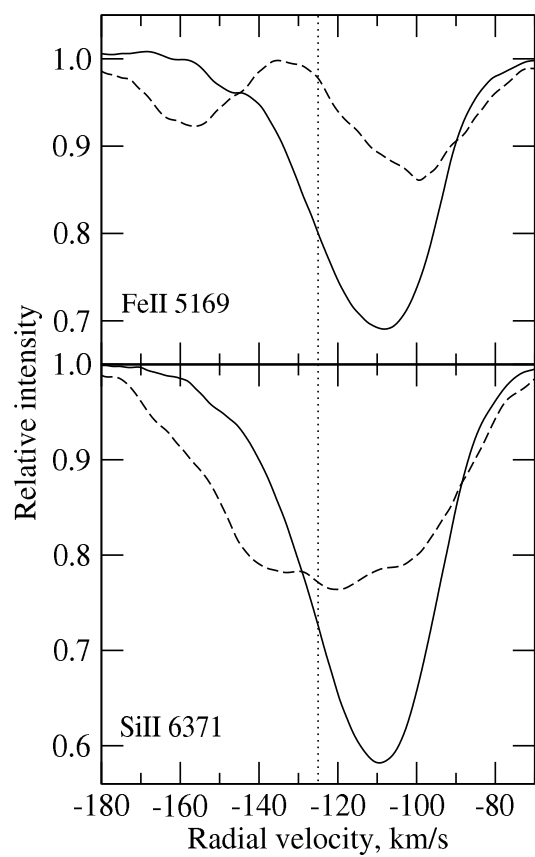


Рис. 4.6: Профили Fe II 5169 и Si II 6371 Å для двух дат: 6.04.2010 – прерывистая линия, 12.10.2013 – сплошная линия. Вертикальная линия – то же, что и на рис. 4.1.

Таблица 4.3: Параметры некоторых абсорбций в спектре V534 Lyr: глубины R, ширины δV_r , км/с, и эквивалентные ширины W_λ , Å.

Линия, параметр	Дата		
	6.04.2010	30.07.2010	24.09.2010
FeII 5506			
R	0.037	0.039	0.036
δV_r	66	52	45
W_λ	0.030	0.026	0.022
FeII 5363			
R	0.030	0.075	0.045
δV_r	85	62	49
W_λ	0.030	0.055	0.031
FeII 5169			
R	0.140	0.370	
δV_r	108	78	
W_λ	0.120	0.274	
SiII 6371			
R	0.240		0.340
δV_r	102		87
W_λ	0.330		0.340

гистрированы слабые эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å. В спектрах 2017 г. добавились эмиссии Fe II в более длинноволновой области: 7388, 7496, 7513 Å.

Перепад значений скорости невелик: вариации V_r от даты к дате от 11 км/с для He I и Si II и до 24 км/с для абсорбции Fe II высокого возбуждения. Из данных, приведенных в таблицах и на рисунках с профилями линий, можно заключить, что радиальный градиент скорости в атмосфере V534 Lyr был минимален и она была наиболее стабильна 30.07.2010, 24.09.2010 и 08.06.2017: дифференциальные сдвиги линий в эти даты близки к ошибкам измерения, ширины и аномалии формы их профилей минимальны. Предполагая, что средняя лучевая скорость в эти даты была близка к скорости центра массы звезды, мы принимаем как первое приближение $V_{\text{sys}} \approx -125$ км/с ($V_{\text{lsr}} \approx -105$ км/с). Эта оценка близка также к средним величинам скоростей в 5÷7 колонках табл. 4.2. Близкие величины средних значений и амплитуд приведены в [149] и [12], однако, надо иметь в виду, что в работах [149] и [12] скорости получены усреднением по всем измеренным линиям, без анализа их особенностей.

4.2.3 Светимость и удалённость звезды

Первая оценка двумерного спектрального класса V534 Lyr, сделанная В. Морганом: B9 Ib [156]. Бонсак и Гринштейн [149] изменили спектральный класс до A0 Iab_e, основываясь на том, что Бальмеровская серия в спектре простирается до H24, а линии H β и H γ имеют эмиссионные

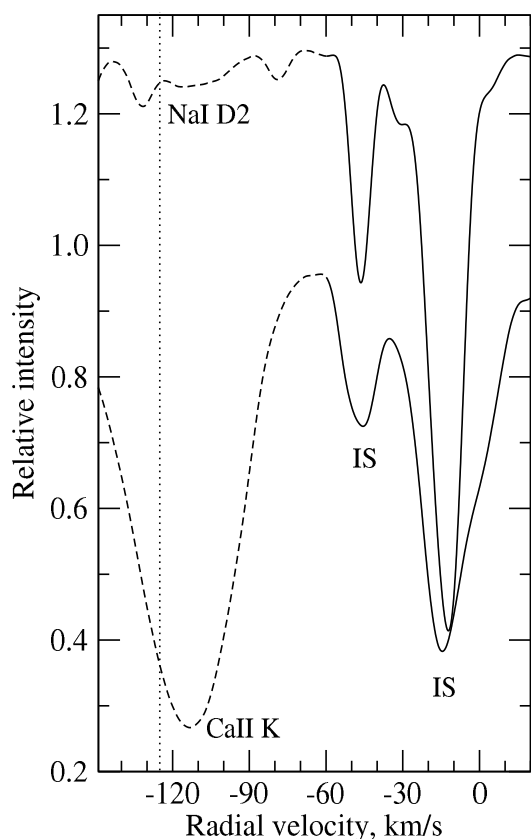


Рис. 4.7: Звездная (прерывистая линия) и межзвездная части профилей линий Na I D2 и Ca II K по спектру, полученному 12.10.2013. Вертикальная прерывистая линия – как и на рис. 4.1.

компоненты и амплитуда изменения лучевой скорости выше типичной для сверхгигантов Ib. Последний аргумент усиливают обнаруженные нами значительные и переменные дифференциальные сдвиги линий, в частности, наблюдавшийся 12.10.2013 Бальмеровский прогресс (рост V_r от $H\alpha$ к $H\delta$ с -157 км/с до -133 км/с), и отмеченная авторами [149, 12] и наблюдавшаяся нами переменность интенсивностей и положений эмиссионных деталей профилей линий H I. Как видно на рис. 4.1, в спектрах 2000–2010 г.г. эмиссия $H\alpha$ двухпиковая и интенсивность красного пика всегда выше синего. Однако в июне 2017 г. $H\alpha$ имеет профиль типа P Cyg, который через пару месяцев приобретает характер двухпиковой эмиссии. Переменность профиля $H\beta$ аналогична: как иллюстрирует рис. 4.2, ее эмиссионный компонент переходит с красного крыла на синее. В спектре за 08.06.2017 г. профиль $H\beta$ имеет тип P Cyg с мощной и сдвинутой в коротковолновую область абсорбцией, которая раздваивается в спектре, полученном спустя несколько дней, 13.06.2017.

Спектральный класс A0 Iab соответствует расстоянию до V534 Lyr, $d = 5.7$ кпк [149]. Профили межзвёздных линий Na I (1) и Ca II (1) в спектре звезды также говорят о ее большой удалённости. Присутствие в них компонентов с $V_r = -46$ км/с (рис. 4.7) с учетом данных работы Бранда и Блитца [157] указывает на $d > 7$ кпк. Параллакс звезды, $\pi = 0.456 \pm 0.04$ mas

(2.2 кпк), измеренный GAIA, в каталоге DR2, говорит о близости звезды и не согласуется с вышеизложенными оценками расстояния.

Наличие межзвездных компонентов у линий Na I (1) и Ca II (1) заставило нас предпринять поиск возможных DIBs. Луна и др. [158] в своем исследовании межзвездного и околозвездного поглощения для выборки post-AGB звезд, обнаружили в спектре V534 Lyr две такие детали (5780 и 5797 Å). Однако в их измерениях положений DIBs получен большой разброс. В наших спектрах нет деталей, которые можно было бы надежно отождествить с известными DIBs. Единственная деталь, которую можно отождествить с наиболее сильной из известных полос 5780 Å, в спектре V534 Lyr очень слаба – ее остаточная интенсивность лишь ≈ 0.985 .

Полученная GAIA оценка расстояния $d \approx 2.2$ кпк для высокоширотной звезды с видимой звездной величиной $V = 8.58^m$ [152] приводит нас к значению ее абсолютной величины: $M_V \approx -3.13^m$, которая соответствует спектральному классу A0 II. Вickers и др. [159], моделируя распределение энергии в спектре звезды, получили расстояние $d \approx 3.19 \pm 0.43$ кпк. Эта оценка расстояния даёт абсолютную величину светимости $M_V \approx -3.94^m$, что лучше согласуется с данными GAIA.

Светимость звезды можно оценить по эквивалентной ширине ИК-триплета кислорода O I 7773 Å в спектре V354 Lyr: $W_\lambda = 1.99$ Å. Используя калибровку [160, 161], получаем очень высокую светимость $M_V \approx -8.0^m$. Однако эта оценка отягощена значительными погрешностями, поскольку обе калибровки получены авторами [160, 161] для сверхгигантов I-типа населения. Исследуемая нами звезда V354 Lyr, очевидно, не относится к массивным сверхгигантам. Кроме того, оценку ее светимости искажает также и специфический химический атмосферы этой звезды, прежде всего – аномальное содержание кислорода.

4.2.4 Определение параметров модели атмосферы и расчет химического состава

Для определения основных параметров модели: эффективная температура T_{eff} и ускорение силы тяжести $lg g$, мы использовали стандартную методику [106], которая впоследствии успешно применялась в исследованиях спектров звезд различных типов. T_{eff} и $lg g$ были определены, исходя из требования соблюдения ионизационного баланса, т.е. равенства содержания железа, рассчитанного по линиям Fe I и Fe II. Микротурбулентная скорость ξ_t определена также стандартным способом из условия отсутствия зависимости содержания железа $\log \epsilon(\text{Fe I}, \text{Fe II})$, определенных по набору линий, от их эквивалентных ширин W_λ . Для учета возможных изменений параметры T_{eff} и $\log g$ были определены для каждого имеющегося момента наблюдений. Полученные индивидуальные значения температуры T_{eff} , приведенные в 4-й колонке табл. 4.2, отличаются друг от друга незначительно. Их различия находятся в

пределах ошибок определения этого параметра, поэтому для расчета содержаний химических элементов мы использовали среднее значение $T_{\text{eff}} = 10\,000$ К. Эта средняя температура отлично согласуется с предыдущим ее определением в работе [12], что является дополнительным указанием на постоянство температуры звезды. Заметим, что ранее авторы [150] для определения температуры V534 Lyr приняли условие солнечного содержания гелия в ее атмосфере, что привело к более высокому значению $T_{\text{eff}} = 11\,500$ К.

Контроль отождествления спектральных деталей в спектре V534 Lyr мы выполняли с привлечением спектрального атласа [102], изготовленного по спектрам высокого разрешения А-сверхгигантов. Содержания химических элементов в атмосфере исследуемой звезды рассчитаны по эквивалентным ширинам линий в приближении ЛТР. Расчет модели атмосферы, содержаний химических элементов и расчет синтетических спектров выполнен с использованием программы WIDTH9 на основе сетки моделей Куруца [9], адаптированной [8] к среде OS Linux. Значения потенциалов возбуждения и сил осцилляторов для всех линий, а также константы уширения, взяты из базы данных атомных линий VALD [105].

Учитывая вышеизложенные особенности спектра V354 Lyr, мы рассчитали химический состав по эквивалентным ширинам абсорбций, измеренных в спектре за 08.06.2017 из-за диапазона длин волн, зарегистрированного в эту дату и из-за отсутствия раздвоения абсорбций в этом спектре (рис. 4.4 и табл. 4.2). Для увеличения числа линий частично привлечены эквивалентные ширины нераздвоенных линий из спектра 2013 г. Результаты расчета содержаний, выполненного с параметрами $T_{\text{eff}} = 10\,000$ К, $\lg g = 2.5$, $\xi_t = 4.0$, приведены в табл. 4.4. Здесь указаны число использованных линий, среднеквадратичная ошибка определения содержания элементов. В последней колонке таблицы приведены относительные содержания, $[X/Fe]_{\odot}$, для расчета которых мы использовали содержания элементов в фотосфере Солнца согласно Асплунду и др. [162].

4.3 Обсуждение результатов

Наличие эмиссионно-абсорбционного профиля линии $H\alpha$, у которого меняется со временем положение эмиссионных компонентов и соотношение их интенсивностей, является признаком прохождения ударной волны в звездной атмосфере. Кроме того, мы видим малоамплитудную переменность значений лучевой скорости по линиям с высоким потенциалом возбуждения, которые формируются в глубоких слоях звездной атмосферы. Таким образом мы получили признаки пульсационной неустойчивости звезды. В спектрах V534 Lyr нами обнаружен неизвестный ранее для этой звезды спектральный феномен: раздвоение профилей избранных абсорбций металлов в отдельные моменты наблюдений. Такого рода дублирование линий металлов свидетельствует о пульсациях по типу пульсаций звезд типа W Vir. Хорошим примером является поле скоростей в атмосфере самой W Vir [163]. Дополнительный аргумент, подтверждающий наличие пульсаций, дает нам анализ индивидуальных скоростей по расщепленным

Таблица 4.4: Содержания химических элементов $\log \epsilon$, рассчитанные с параметрами модели $T_{\text{eff}} = 10\,000\text{ K}$, $\lg g = 2.5$, $\xi_t = 4.0$. Указаны ошибка среднего, σ , число использованных линий (n) и относительные содержания элементов, $[X/\text{Fe}]_{\odot}$. Во 2-м столбце приведены содержания элементов в фотосфере Солнца [162].

Элемент, ион	$\log \epsilon_{\odot}$ [162]	V534 Lyr			
		$\log \epsilon$	$\pm\sigma$	n	$[X/\text{Fe}]_{\odot}$
HeI	10.32	11.31	0.17	10	+1.27
CII	8.70	8.70	0.06	3	+0.28
NI	7.83	8.65	0.21	2	+1.10
NII		8.53	0.10	3	+0.98
OI	8.69	8.94	0.04	18	+0.53
NeI	7.93	8.37	0.08	6	+0.72
MgI	7.60	7.43	0.08	5	+0.11
MgII		7.13	0.09	7	-0.19
AlII	6.45	6.79	0.08	2	+0.52
SiII	7.51	7.53	0.16	6	+0.30
PII	5.41	6.13	0.03	4	+0.90
SII	7.12	7.72	0.08	9	+0.88
ScII	3.15	3.14	0.18	2	+0.27
TiII	4.95	4.61	0.05	20	-0.06
VII	3.93	3.66	0.06	2	+0.01
CrII	5.64	5.14	0.05	20	-0.28
MnII	5.43	5.69	0.10	4	+0.44
FeI	7.50	7.23	0.05	5	+0.01
FeII		7.20	0.04	66	-0.02
NiII	6.22	6.02	0.15	5	+0.08
SrII	2.87	2.50	0.01	2	-0.09

линиям в спектре за 13.06.2017 г., в котором степень расщепления низковобужденных абсорбций меняется в зависимости от глубины абсорбций. Это различие иллюстрируют данные в последней строке табл. 4.2 и панель для 13.06.2017. на рис. 4.4.

Определенные нами параметры модели атмосферы и содержания химических элементов в атмосфере V534 Lyr мало отличаются от ранее опубликованных [12] для этой звезды. Здесь мы рассмотрим особенности химического состава лишь вкратце. Детальный анализ особенностей химического состава этой звезды затруднен по ряду причин: весьма ограниченный набор полученных содержаний химических элементов; применение стандартной модели атмосферы к звезде, атмосфера которой нестабильна и, вероятно, подвержена влиянию ударных волн. Возможен также вклад ошибки из-за неучета эффекта отклонения от локального термодинамического равновесия, однако, их влияние на оценку металличности невелико для горячей звезды [164].

Основные группы элементов, относительные содержания которых позволяют судить о стадии эволюции звезды и ее принадлежности к тому или иному населению Галактики, следующие: CNO-триада, группа железа (Cr, V, Fe, Ni), легкие металлы α -процесса (Mg, Al, Si, P, S) и тяжелые металлы s-процесса. Содержание железа в атмосфере V534 Lyr слегка понижено: $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.28$, что в сочетании с высокой лучевой скоростью $V_r \approx -125$ км/с указывает на принадлежность звезды к толстому диску Галактики. Содержание металлов группы железа (Cr, V, Mn, Ni) незначительно отличается от содержания Fe: $[\text{Met}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.06$.

Принципиальным моментом в распространенности элементов для определения статуса далеко проэволюционировавшей звезды является содержание элементов CNO-группы. Высокое содержание азота $[\text{N}/\text{Fe}]_{\odot} = +1.10$ надежно определено нами по 2 линиям NI низкой интенсивности. Избыток азота в атмосфере сверхгиганта может быть результатом первого перемешивания, при котором осуществляется вынос продуктов CN цикла в ходе горения водорода в ядре. Большой избыток гелия $[\text{He}/\text{Fe}]_{\odot} = +1.27$ является результатом последовательности ядерных реакций в звездном ядре и последующего перемешивания. Избыток кислорода в спектре V534 Lyr иллюстрирует нижняя панель рис. 4.3, где сопоставлены фрагменты, содержащие линии кислорода O I 6155–6157 Å в спектрах V534 Lyr и α Cyg. Здесь также хорошо видим ослабление линий иона Fe II в спектре V534 Lyr по сравнению со спектром α Cyg. Содержания легких металлов (Mg, Al, Si, P, S), синтезируемых за счет α -процесса, усилены в атмосфере V534 Lyr в среднем на $[\alpha/\text{Fe}] = +0.4$. Усиление легких металлов согласуется с принадлежностью звезды к толстому диску Галактики, что подтверждается результатами исследования обширной выборки звезд близкой металличности в толстом диске [165].

По совокупности свойств близким аналогом V534 Lyr можно считать горячую звезду HD 105262, которая расположена в Галактике на высокой широте ($b = 72.47^\circ$) и имеет спектральный класс B9-A0. В базе данных SIMBAD эта звезда причислена к post-AGB сверхгигантам. Ранее эта звезда, не имеющая ИК-избытка, рассматривалась как представитель

более ранней стадии эволюции – горизонтальной ветви (далее – НВ). Ключкова и Панчук [166] по фотографическим спектрам определили параметры $T_{\text{eff}} = 8500 \text{ K}$, ускорение силы тяжести $lg g = 1.5$, пониженную металличность $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -1.2$ и получили детальный химический состав атмосферы. В недавней работе Гиридхара и др. [167] получены те же параметры модели, но металличность существенно ниже: $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} \approx -1.9$. Это различие можно объяснить более высоким спектральным разрешением спектров в работе [167]. Для нашего сравнения V534 Lyr и HD 105262 важным является большой избыток азота, обнаруженный и в атмосфере HD 105262 [167]. Обе звезды имеют низкую скорость вращения, $V \sin i = 6 \text{ км/с}$. Для HD 105262 скорость вращения измерена по спектрам высокого разрешения в работе [168]. Принадлежность к стадии горизонтальной ветви может объяснять отсутствие у V534 Lyr и HD 105262 околозвездной пыли и обусловленного ею ИК-избытка.

Особенности оптического спектра, родственные к спектру V534 Lyr, имеет также A-сверхгигант BD+48° 1220. На 6 м телескопе БТА в сочетании с эшелльным спектрографом в течение нескольких наблюдательных сезонов были получены оптические спектры высокого спектрального разрешения, на основании которых была обнаружена значительная переменность профилей линий H I и линий металлов [169]. Анализ этого спектрального материала методом моделей атмосфер с параметрами $T_{\text{eff}} = 7900 \text{ K}$, $lg g = 0.0$, $\xi_t = 6.0$ показал, что металличность BD+48° 1220 близка к солнечной: $[\text{Fe}/\text{H}]_{\odot} = -0.10$ [94], а химический состав ее атмосферы мало отличается от такого у V534 Lyr. Как и в случае V534 Lyr, был обнаружен большой избыток гелия, $[\text{He}/\text{H}] = +1.04$ и столь же значительный избыток кислорода $[\text{O}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.72 \text{ dex}$. При этом избыток углерода мал, $[\text{C}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.09$, и отношение $[\text{C}/\text{O}] < 1$. Содержания легких металлов изменены: $[\text{Na}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.87$ при $[\text{Mg}/\text{Fe}]_{\odot} = -0.31$. Но самое важное – в атмосфере BD+48° 1220 обнаружен большой избыток лития $[\text{Li}/\text{Fe}]_{\odot} = +0.62$, что свидетельствует о выносе в атмосферу лития, синтезированного на AGB-стадии. Кроме того, сделан вывод о вероятной эффективности механизма селективной сепарации химических элементов на пылинки оболочки. Полная совокупность имеющихся данных (светимость $M_v \approx -5^m$, скорость $V_{\text{lsr}} \approx -20 \text{ км/с}$, пониженная металличность и особенности оптического спектра и химического состава) подтверждают для BD+48° 1220 статус O-rich post-AGB звезды с исходной массой $4 \div 9 M_{\odot}$. Таким образом, звезда BD+48° 1220, имеющая ряд близких к V534 Lyr свойств, является сверхгигантом на более продвинутой стадии, после AGB. Этот вывод согласуется с тем, что у звезды BD+48° 1220 существует околозвездная оболочка, а звезда ассоциирована с источником IRAS 05040+4820.

Итак, видим, что наблюдаемые свойства V534 Lyr, за исключением ее высокой светимости и расположения вне плоскости Галактики, не дают оснований для классификации ее как post-AGB. Главное – V534 Lyr не имеет ИК-избытка и аномалий химического состава, ожидаемых для сверхгиганта на стадии post-AGB. Рассмотрим иные возможные варианты ее статуса. Отсутствие пылевой оболочки у звезды достаточно высокой светимости позволяет

рассмотреть ее как объект на стадии после красной ветви гигантов, находящийся на стадии выше НВ. Источником энерговыделения у звезд на этой стадии, прошедших гелиевую вспышку в ядре, является горение гелия в ядре и водорода в слое. Большой потери массы у этих сверхгигантов не ожидается. Для подтверждения такого статуса звезды можно опереться на удобную диаграмму $\lg g - T_{\text{eff}}$ (рис. 1. в статье [168]). Сочетание основных параметров V534 Lyr соответствует звездам НВ на диаграмме. Низкая скорость осевого вращения $V \sin i = 5 - 6$ км/с также согласуется с предполагаемым статусом вблизи ВНВ: известно, что НВ звезды вращаются медленно [170, 164]. Результаты, полученные нами в данной статье для V534 Lyr, – это еще одно подтверждение вывода [4, 171] о неоднородности выборки кандидатов в post-AGB.

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 НВ 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 $H\alpha$, $H\beta$ (рис. 4.1 и 4.2), наличие в отдельные моменты наблюдений раздвоения абсорбций (рис. 4.5) и наличие градиента скорости в атмосфере, зарегистрированное 13.06.2017, что хорошо видно на рис. 4.2.

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 содержание 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.

Типичными представителями звезд типа W Vir являются члены шаровых скоплений. Примером может служить виргинида V1 (K 307) в составе шарового скопления M 12. Авторы [172] определили фундаментальные параметры виргиниды ($T_{\text{eff}} = 5600$ K, $\log g = 1.3$) и металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.27$, согласующуюся с металличностью других членов M 12. В атмосфере этой виргиниды выявлены измененные содержания CNO-элементов, причем азот имеет избыток: $[\text{N}/\text{Fe}] = +1.15$ dex. Относительные содержания Na и элементов α -процесса Mg, Al, Si, Ca и Ti в различной степени также усилены. Основной особенностью спектра K 307 являются сложные абсорбционно-эмиссионные профили линий $H\beta$ и $H\alpha$ (см рис. 2 в

[172]), подобные профилям в спектре V534 Lyr.

Основные кинематические и химические параметры для обширной выборки звезд HB в толстом диске рассмотрены Кинманом и др. [173]. Наше предположение о том, что V534 Lyr может быть звездой толстого диска на стадии выше HB (post-HB) подтверждается большой пространственной скоростью исследуемой звезды, отсутствием пылевой околозвездной оболочки и специфическим химическим составом атмосферы. Усложняющим фактором для фиксации статуса звезды служит то, что выше HB могут наблюдаться звезды нескольких стадий эволюции: это могут быть достаточно молодые звезды, эволюционирующие к RGB, а также более продвинутые в эволюции звезды после RGB или же перед AGB.

Критичным для более определенных выводов является решение вопроса о возможной двойственности V534 Lyr. Изменения V_r со временем, вероятно, вызваны пульсациями, но пока не исключена и спектральная двойственность в варианте SB 1. Указанием на возможную двойственность звезды можно считать найденную переменность скорости по эмиссиям FeII (таблица 4.2). Здесь отметим результаты Сахина и Джеффри [174], которые, проанализировав переменность фотометрических данных для V534 Lyr, не нашли явного периода и предположили, что изменения могут быть короткопериодическими. Надежные данные долговременного фотометрического и спектрального мониторинга, необходимые для изучения и определения параметров переменности блеска и спектра, в настоящее время отсутствуют. Поэтому крайне необходимо провести долговременный и детальный мониторинг V534 Lyr для окончательных выводов о природе ее переменности.

4.4 Заключение

На основании наблюдений на 6-м телескопе с эшелным спектрографом НЭС ($R = 60\,000$) детально изучены особенности оптического спектра V534 Lyr – высокоширотной звезды с неопределенным статусом. Для всех дат наблюдений измерены гелиоцентрические лучевые скорости V_r , соответствующие положению всех компонентов абсорбций металлов, а также D-линий NaI и H α . Анализ поля скоростей по линиям различной природы выявил малоамплитудную переменность V_r по линиям с высоким потенциалом возбуждения, которые формируются в глубоких слоях звездной атмосферы и позволил оценить системную скорость $V_{\text{sys}} \approx -125$ км/с ($V_{\text{lsr}} \approx -105$ км/с). Сделанная GAIA оценка расстояния $d \approx 2.2$ кпк для высокоширотной звезды приводит к значению абсолютной величины: $M_v \approx -3.13^m$, что соответствует спектральной классификации A0 II.

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:

$$\Delta V_r = 20 \div 50 \text{ км/с.}$$

Спектральный класс звезды близок к A0 II, а эффективная температура $T_{\text{eff}} \approx 10500$ К.

Металличность, надежно определенная по линиям металлов группы железа (Cr, V, Mn, Ni) незначительно отличается от содержания Fe: $[\text{Met}/\text{Fe}] = +0.06$. Избыток азота и гелия свидетельствует о продвинутой эволюционной стадии звезды. Пониженное содержание металлов группы железа в сочетании с высокой лучевой скоростью указывает на принадлежность звезды к толстому диску Галактики.

Наблюдаемые особенности V534 Lyr: наличие вероятных пульсаций в глубоких слоях атмосферы, наблюдаемое в отдельные моменты наблюдений раздвоение профилей абсорбций металлов с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, пониженная металличность, тип и переменность эмиссионно-абсорбционного профиля $\text{H}\alpha$ и $\text{H}\beta$ – позволяют отнести звезду к пульсирующим звездам II-го типа населения, которые находятся в полосе неустойчивости вблизи HB. В целом сделан вывод о полном несоответствии для V534 Lyr принадлежности стадии post-AGB, фигурирующей в ранее опубликованных статьях.

Поставлена задача выполнения долговременного фотометрического и детального спектрального мониторинга V534 Lyr для изучения и определения параметров переменности блеска и спектра, что позволит сделать окончательные выводы о природе переменности звезды.

Заключение

В данной работе кратко рассмотрены важнейшие проблемы и факты, касающиеся эволюции звезды от AGB к планетарной туманности. Также кратко описаны причины большого интереса к исследованию объектов на данной эволюционной стадии и выделены приоритетные направления для будущих работ. Подробно описан процесс наблюдений на БТА и обработки полученных данных.

Для накопления опыта и выработки критериев классификации звёзд высокой светимости полезным подходом является детальное сопоставление их спектров высокого разрешения в широком интервале длин волн, что послужило для нас основанием для изготовления сравнительного атласа спектров. Атлас включает спектры трех А-сверхгигантов с различным эволюционным статусом: массивный сверхгигант α Cyg, пекулярный сверхгигант с околозвездным диском 3 Pup и post-AGB звезда BD +48° 1220. в интервале длин волн 3920–6720 Å, полученные с высоким спектральным разрешением $R = 60\,000$ на 6-м телескопе БТА с эшелъным спектрографом НЭС. Создание спектральных атласов особенно актуально в связи с ростом качества наблюдательных данных, обусловленного переходом на современные спектрографы высокого спектрального разрешения с регистрацией спектров на малошумящих матрицах ПЗС. Кроме того, в настоящее время есть возможность представления графической информации атласов и детальных таблиц с отождествлением линий в электронном виде, что обеспечивает неограниченный доступ пользователей к этим наблюдательным массивам. Графическая информация нашего атласа в полном объеме представлена в Интернете в виде электронного препринта <http://lanl.arxiv.org/abs/1502.01444> и pdf-файла по Web-адресу: <http://www.sao.ru/hq/ssl/Deneb/Atlas.pdf>.

Подробно описаны исследования ИК-источника IRAS 01005+7910 и высокоширотного объекта V534 Lyr.

Для ИК-источника IRAS 01005+7910:

- Мы определили спектральный класс центральной звезды $B1.5 \pm 0.3$ и класс светимости Ib, была рассмотрена переменность их профилей и лучевой скорости.
- По положению симметричных и стабильных профилей запрещенных эмиссий [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II] определена системная скорость $V_{\text{sys}} = -50.5$ км/с. Присутствие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околозвездной оболочки

и близость стадии планетарной туманности.

- Различия лучевой скорости V_r по ядрам линий, ≈ 34 км/с, частично вызваны деформациями профилей переменными эмиссиями. Перепад V_r по крыльям линий меньше, ≈ 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.
- Линии $\text{H}\alpha$ имеют ветровые профили типа P Cyg 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).
- Отождествлены 7 межзвёздных полос DIBs, измерены их лучевые скорости и эквивалентные ширины, 6 из 7 имеют примерно одинаковую лучевую скорость около -13 км/с. Определены значения межзвёздных покраснений E_{B-V} и столбцовых плотностей нейтрального водорода $\log[N(\text{H})]$.

Для высокоширотного объекта V534 Lyr:

- Анализ поля скоростей по линиям различной природы выявил малоамплитудную переменность V_r по линиям с высоким потенциалом возбуждения, которые формируются в глубоких слоях звездной атмосферы, и позволил оценить системную скорость $V_{\text{sys}} \approx -125$ км/с ($V_{\text{lsr}} \approx -105$ км/с).
- 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.
- Спектральный класс звезды близок к A0 II, а эффективная температура $T_{\text{eff}} \approx 10\,500$ К. Металличность, надежно определенная по линиям металлов группы железа (Cr, V, Mn, Ni) незначительно отличается от содержания Fe: $[\text{Met}/\text{Fe}] = +0.06$. Избыток азота и гелия свидетельствует о продвинутой эволюционной стадии звезды. Пониженное содержание металлов группы железа в сочетании с высокой лучевой скоростью указывает на принадлежность звезды к толстому диску Галактики.
- Совокупность наблюдаемых особенностей V534 Lyr: наличие вероятных пульсаций в глубоких слоях атмосферы, наблюдаемое в отдельные моменты наблюдений 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 нестабильности вблизи HB. В целом сделан вывод о полном несоответствии для V534 Lyr принадлежности стадии post-AGB, фигурирующей в ранее опубликованных статьях.

Основой нашего подхода является использование крупного телескопа, оснащенного совершенной спектральной аппаратурой в сочетании с ПЗС. Это позволяет получать однородные спектральные данные и выполнять спектроскопические исследования достаточно слабых объектов. Видимая яркость объектов с околозвездными газопылевыми оболочками в значительной мере определяется мощностью оболочки, т.е. связана с темпом потери массы. Подавляющая часть спектральных данных для объектов программы получена с эшелле спектрографом НЭС 6-м телескопа БТА. Основными преимуществами НЭС являются высокое спектральное разрешение $R = 60\,000$ в широком диапазоне спектра, долговременная позиционная стабильность и постоянная готовность к наблюдениям за счет стационарного размещения прибора на платформе фокуса Нэсмита, что обеспечивает нам возможность долговременного спектрального мониторинга и однородность данных.

Следующей отличительной чертой данного исследования является применение единого подхода для определения фундаментальных параметров (а, следовательно, эволюционного статуса) звезд и особенностей химического состава их атмосфер. Этот чисто спектроскопический подход в определении параметров возможен за счет широкого спектрального диапазона, регистрируемого с помощью эшелле спектрометров в сочетании с крупноформатными приемниками ПЗС.

Как следует из текста, для каждого индивидуального объекта приходится фиксировать его эволюционный статус, а для этого требуется найти и сопоставить разнообразные параметры: положение в Галактике, светимость, параметры ветра, распределение энергии в спектре, особенности химического состава, а также детальную картину скоростей на разных уровнях в атмосфере звезды и в ее околозвездной среде.

Проведенное в диссертации исследование двух малоизученных звезд хорошо иллюстрирует круг проблем, решаемых в подобной задаче. Необходимым и самым трудоемким моментом такого исследования является определение светимости и массы звезды. Также важно, что при изучении индивидуальных звезд мы неоднократно обнаруживали подобие и даже полное повторение спектральных деталей у объектов всех вышеназванных типов, что является проявлением феномена “спектральной мимикрии”, который необходимо учитывать в фиксации эволюционной стадии малоизученных звезд.

Подчеркнем также эффективность метода спектрального мониторинга с высоким спектральным разрешением, который в сочетании с методом моделей атмосфер обеспечивает

получение надежных параметров звезды.

В результате проведенного в работе исследования получение подтверждение вывода о неоднородности исследуемой выборки объектов в целом. По мере исследования выяснилось, что среди звезд с большими избытками ИК-потока, помимо AGB и post-AGB звезд, присутствуют массивные звезды высокой светимости с протяженными и структурированными околос звездными оболочками.

Литература

- [1] Kwok, S. Proto-planetary nebulae / S. Kwok // *ARA&A*. — 1993. — Vol. 31. — P. 63–92.
- [2] Herwig, F. Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars / F. Herwig // *ARA&A*. — 2005. — Vol. 43. — P. 435–479.
- [3] Klochkova, V. G. Spectroscopy of F supergiants with infrared excess / V. G. Klochkova // *MNRAS*. — 1995. — Vol. 272. — P. 710–716.
- [4] Klochkova, V. G. Circumstellar envelope manifestations in the optical spectra of evolved stars / V. G. Klochkova // *Astrophysical Bulletin*. — 2014. — Vol. 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 et al. // *A&A*. — 2002. — Vol. 392. — P. 143–150.
- [6] Панчук, В. Е. Эшелле спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА / В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94. — С. 808–818.
- [7] Kurucz, R. L. ATLAS12, SYNTHE, ATLAS9, WIDTH9, et cetera / R. L. Kurucz // *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*. — 2005. — Vol. 8. — P. 14.
- [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* / Ed. by S. J. Adelman, F. Kupka, W. W. Weiss. — Vol. 108 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1996. — P. 198.
- [9] Kurucz, R. ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. / R. Kurucz // *ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid*. Kurucz CD-ROM No. 13. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993. — 1993. — Vol. 13.
- [10] Gingold, R. A. The evolutionary status of Type II Cepheids / R. A. Gingold // *Mem. Soc. Astron. Italiana*. — 1985. — Vol. 56. — P. 169–191.

- [11] Клочкова, В. Г. Обнаружение тяжелых металлов в околозвездных оболочках PostAGB-звезд / В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93. — С. 308–320.
- [12] Giridhar, S. Chemical composition of evolved stars of high galactic latitude / S. Giridhar, A. Arellano Ferro // *A&A*. — 2005. — Vol. 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 // *ApJ*. — 2007. — Vol. 666. — P. 378–392.
- [14] Iben Jr., I. Asymptotic giant branch evolution and beyond / I. Iben, Jr., A. Renzini // *ARA&A*. — 1983. — Vol. 21. — P. 271–342.
- [15] Schoenberner, D. Late stages of stellar evolution. II - Mass loss and the transition of asymptotic giant branch stars into hot remnants / D. Schoenberner // *ApJ*. — 1983. — Vol. 272. — P. 708–714.
- [16] Renzini, A. Red giants as precursors of planetary nebulae / A. Renzini // *Physical Processes in Red Giants* / Ed. by I. Iben, Jr., A. Renzini. — Vol. 88 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 1981. — P. 431–446.
- [17] van der Veen, W. E. C. J. The IRAS two-colour diagram as a tool for studying late stages of stellar evolution / W. E. C. J. van der Veen, H. J. Habing // *A&A*. — 1988. — Vol. 194. — P. 125–134.
- [18] de Jager, C. Dynamics and stability of supergiant atmospheres / C. de Jager // *Instabilities in Evolved Super- and Hypergiants* / Ed. by C. de Jager, H. Nieuwenhuijzen. — 1992. — P. 98.
- [19] Bloeker, T. Stellar evolution of low and intermediate-mass stars. I. Mass loss on the AGB and its consequences for stellar evolution. / T. Bloeker // *A&A*. — 1995. — Vol. 297. — P. 727.
- [20] Bloeker, T. Stellar evolution of low- and intermediate-mass stars. II. Post-AGB evolution. / T. Bloeker // *A&A*. — 1995. — Vol. 299. — P. 755.
- [21] Pottasch, S. R. The far-infrared (IRAS) excess in luminous F-G stars / S. R. Pottasch, M. Parthasarathy // *A&A*. — 1988. — Vol. 192. — P. 182–186.
- [22] Hrivnak, B. J. A study of several F and G supergiant-like stars with infrared excesses as candidates for proto-planetary nebulae / B. J. Hrivnak, S. Kwok, K. M. Volk // *ApJ*. — 1989. — Vol. 346. — P. 265–276.

- [23] SAO stars with infrared excess in the IRAS Point Source Catalog / R. D. Oudmaijer, W. E. C. J. van der Veen, L. B. F. M. Waters et al. // *A&AS*. — 1992. — Vol. 96. — P. 625–643.
- [24] The spectral energy distribution and mass-loss history of IRC+10420 / R. D. Oudmaijer, M. A. T. Groenewegen, H. E. Matthews et al. // *MNRAS*. — 1996. — Vol. 280. — P. 1062–1070.
- [25] Kwok, S. Circumstellar Arcs in AGB and Post-AGB Stars / S. Kwok, K. Y. L. Su, J. A. Stoesz // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by R. Szczerba, S. K. Górný. — Vol. 265 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2001.
- [26] van Winckel, H. Post-AGB Stars / H. van Winckel // *ARA&A*. — 2003. — Vol. 41. — P. 391–427.
- [27] An evolutionary catalogue of galactic post-AGB and related objects / R. Szczerba, N. Siódmiak, G. Stasińska, J. Borkowski // *A&A*. — 2007. — Vol. 469. — P. 799–806.
- [28] Клочкова, В. Г. 40 лет САО РАН: Юбилейный сборник / В. Г. Клочкова // Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН. — 2006. — С. 107–148.
- [29] Waelkens, C. Binarity of High-Latitude Supergiants - Observational Evidence / C. Waelkens, L. B. F. M. Waters // *Luminous High-Latitude Stars* / Ed. by D. D. Sasselov. — Vol. 45 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1993. — P. 219.
- [30] Waelkens, C. Radial Velocity Study of IRAS-Selected Post-AGB Candidates / C. Waelkens, M. Mayor, H. Plets // *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings* / Ed. by H. E. Schwarz. — Vol. 46 of *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*. — 1993. — P. 287.
- [31] A model for the 89 Herculis system / L. B. F. M. Waters, C. Waelkens, M. Mayor, N. R. Trams // *A&A*. — 1993. — Vol. 269. — P. 242–248.
- [32] Hrivnak, B. J. Pulsations in Proto-Planetary Nebulae as seen From Light Curve Studies / B. J. Hrivnak, et al. // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by R. Szczerba, S. K. Górný. — Vol. 265 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2001.
- [33] Arellano Ferro, A. Is 89 Herculis a binary star? / A. Arellano Ferro // *PASP*. — 1984. — Vol. 96. — P. 641–645.
- [34] Variability of the post-AGB star HR 4049 - Dust obscuration in a binary system / C. Waelkens, H. J. G. L. M. Lamers, L. B. F. M. Waters et al. // *A&A*. — 1991. — Vol. 242. — P. 433–442.

- [35] Van Winckel, H. The extremely iron-deficient “Post-AGB” stars and binaries. / H. Van Winckel, C. Waelkens, L. B. F. M. Waters // *A&A.* — 1995. — Vol. 293.
- [36] Waters, L. B. F. M. Hot Dust and Mass Loss in Post-AGB Binaries / L. B. F. M. Waters, N. R. Trams, C. Waelkens // *The Infrared Spectral Region of Stars* / Ed. by C. Jaschek, Y. Andrillat. — 1991. — P. 40.
- [37] Spectral variability of the binary HR 4049 / E. J. Bakker, D. L. Lambert, H. Van Winckel et al. // *A&A.* — 1998. — Vol. 336. — P. 263–275.
- [38] Lebre, A. The bright RV Tauri star R Scuti during an exceptional irregular light phase / A. Lebre, D. Gillet // *A&A.* — 1991. — Vol. 246. — P. 490–502.
- [39] Lebre, A. Atmospheric motions in the population II Cepheid W Virginis / A. Lebre, D. Gillet // *A&A.* — 1992. — Vol. 255. — P. 221–232.
- [40] Fokin, A. B. The shock wave propagation effects in BL Herculis. II. Nonlinear model and theoretical profile of $H\alpha$ / A. B. Fokin, D. Gillet // *A&A.* — 1994. — Vol. 290. — P. 875–884.
- [41] The shock wave propagation effects in BL Herculis. 1: The hydrogen alpha profile / D. Gillet, G. Burki, A. Chatel et al. // *A&A.* — 1994. — Vol. 286. — P. 508–514.
- [42] Jura, M. RV Tauri stars as post-asymptotic giant branch objects / M. Jura // *ApJ.* — 1986. — Vol. 309. — P. 732–736.
- [43] Kwok, S. Circumstellar Properties of High Galactic Latitude Supergiants / S. Kwok // *Luminous High-Latitude Stars* / Ed. by D. D. Sasselov. — Vol. 45 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 1993. — P. 348.
- [44] Van Winckel, H. HD 133656: a new high-latitude supergiant. / H. Van Winckel, R. D. Oudmaijer, N. R. Trams // *A&A.* — 1996. — Vol. 312. — P. 553–559.
- [45] A study on the nature of the peculiar supergiant HD 101584. / E. J. Bakker, H. J. G. L. M. Lamers, L. B. F. M. Waters et al. // *A&A.* — 1996. — Vol. 307. — P. 869–890.
- [46] Klochkova, V. G. Is UU Herculis a post-AGB star? / V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, E. L. Chentsov // *A&A.* — 1997. — Vol. 323. — P. 789–796.
- [47] A first optical spectroscopic monitoring of the post-AGB star SAO 96709=IRAS 07134+1005: pulsation and shock waves. / A. Lebre, N. Mauron, D. Gillet, D. Barthes // *A&A.* — 1996. — Vol. 310. — P. 923–932.

- [48] Atmospheric Dynamics of Post-AGB Stars: New Results on the Nature of the Pulsation of HD 56126 / A. Lèbre, A. Fokin, D. Barthès et al. // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by R. Szczerba, S. K. Górný. — Vol. 265 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2001.
- [49] Oudmaijer, R. D. Time-Resolved Spectroscopy of the Post-Agb Star HD56126 / R. D. Oudmaijer, E. J. Bakker // *MNRAS*. — 1994. — Vol. 271. — P. 615.
- [50] Клочкова, В. Г. О кинематической структуре атмосферы и оболочки postAGB-звезды HD 56126 / В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов // *Астрономический журнал*. — 2007. — Т. 81. — С. 1099–1109.
- [51] Klochkova, V. G. VizieR Online Data Catalog: Spectral analysis of V510 Pup (Klochkova+, 2004) / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov // *VizieR Online Data Catalog*. — 2005. — Vol. 808.
- [52] Klochkova, V. G. V2324 Cyg—an F-type star with fast wind / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — Vol. 63. — P. 112–127.
- [53] van Genderen, A. M. S Doradus variables in the Galaxy and the Magellanic Clouds / A. M. van Genderen // *A&A*. — 2001. — Vol. 366. — P. 508–531.
- [54] Ченцов, Е. Л. О пространственной близости белых гипергигантов HD 168607 и HD 168625. / Е. Л. Ченцов, Е. С. Горда // *Письма в Астрономический журнал*. — 2004. — Т. 30. — С. 511–518.
- [55] Spectroscopy of HD 168625 (IRAS 18184-1623) / P. García-Lario, T. Sivarani, M. Parthasarathy, A. Manchado // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by R. Szczerba, S. K. Górný. — Vol. 265 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2001.
- [56] Клочкова, В. Г. К проблеме спектральной мимикрии сверхгигантов / В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов // *Астрономический журнал*. — 2018. — Vol. 95. — P. 22–34.
- [57] HD 52961 - an extremely metal-deficient, CNO- and S-rich, pulsating star embedded in a dust cloud / C. Waelkens, H. Van Winckel, E. Bogaert, N. R. Trams // *A&A*. — 1991. — Vol. 251. — P. 495–504.
- [58] High-resolution spectroscopy of the central star of the Red-Rectangle nebula / C. Waelkens, H. Van Winckel, N. R. Trams, L. B. F. M. Waters // *A&A*. — 1992. — Vol. 256. — P. L15–L18.
- [59] The origin of distant B-type stars in the galactic halo / E. S. Conlon, P. L. Dufton, F. P. Keenan et al. // *ApJ*. — 1992. — Vol. 400. — P. 273–279.

- [60] Van Winckel, H. HD 187885 and s-process element in high galactic latitude supergiants. / H. Van Winckel, C. Waelkens, L. B. F. M. Waters // *A&A*. — 1996. — Vol. 306. — P. L37.
- [61] Lambert, D. L. HR 4912 - A variable of the old-disk population / D. L. Lambert, R. E. Luck, H. E. Bond // *PASP*. — 1983. — Vol. 95. — P. 413–421.
- [62] Bond, H. E. Nitrogen and sulfur overabundances in the population II supergiant HD 46703 / H. E. Bond, R. E. Luck // *ApJ*. — 1987. — Vol. 312. — P. 203–210.
- [63] Lambert, D. L. The peculiar supergiant HR 4049 / D. L. Lambert, K. H. Hinkle, R. E. Luck // *ApJ*. — 1988. — Vol. 333. — P. 917–924.
- [64] Zacs, L. The chemical composition of the post-AGB star, protoplanetary nebula candidate IRAS 22272+5435=SAO 34504 / L. Zacs, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk // *MNRAS*. — 1995. — Vol. 275. — P. 764–772.
- [65] The chemical composition of the protoplanetary nebula candidate HD 179821 / L. Zacs, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, R. Spelmanis // *MNRAS*. — 1996. — Vol. 282. — P. 1171–1180.
- [66] Van Winckel, H. Chemical composition of optically bright post-AGB stars. / H. Van Winckel // *A&A*. — 1997. — Vol. 319. — P. 561–577.
- [67] Klochkova, V. G. Optical Spectroscopy of the Post-AGB Carbon Star Cgcs 6857 = IRAS 20000+3239 / V. G. Klochkova, T. Kipper // *Baltic Astronomy*. — 2006. — Vol. 15. — P. 395–404.
- [68] Şahin, T. High Resolution Optical Spectroscopy of an Intriguing High-Latitude B-Type Star HD119608 / T. Şahin // *Astrophysical Bulletin*. — 2018. — Vol. 73. — P. 35–51.
- [69] Bond, H. E. Chemical Composition of Post-Agb Stars / H. E. Bond // *Evolution of Stars: the Photospheric Abundance Connection* / Ed. by G. Michaud, A. V. Tutukov. — Vol. 145 of *IAU Symposium*. — 1991. — P. 341.
- [70] Bond, H. E. A case of missing metals / H. E. Bond // *Nature*. — 1992. — Vol. 356. — P. 474–475.
- [71] Van Winckel, H. Evidence from zinc abundances for dust fractionation in chemically peculiar stars / H. Van Winckel, J. S. Mathis, C. Waelkens // *Nature*. — 1992. — Vol. 356. — P. 500.
- [72] Variability and nature of the binary in the Red Rectangle nebula. / C. Waelkens, H. Van Winckel, L. B. F. M. Waters, E. J. Bakker // *A&A*. — 1996. — Vol. 314. — P. L17–L20.

- [73] Клочкова, В. Г. HD 331319 - post-AGB F-сверхгигант с линиями He I / В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская // Письма в Астрономический журнал. — 2002. — Т. 28. — С. 56–70.
- [74] Photospheric composition of the carbon-rich 21 micron post-AGB stars IRAS 22223+4327 and IRAS 04296+3429 / L. Decin, H. Van Winckel, C. Waelkens, E. J. Bakker // A&A. — 1998. — Vol. 332. — P. 928–938.
- [75] Klochkova, V. G. Supergiants with large IR excesses. / V. G. Klochkova // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 1997. — Vol. 44. — P. 5–29.
- [76] Van Winckel, H. A homogeneous study of the s-process in the 21 μ m carbon-rich post-AGB objects / H. Van Winckel, M. Reyniers // A&A. — 2000. — Vol. 354. — P. 135–149.
- [77] Klochkova, V. G. Spectroscopic investigation of the PPN candidate AI CMi = IRAS 07331+0021. / V. G. Klochkova, V. E. Panchuk // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory. — 1996. — Vol. 41. — P. 5–27.
- [78] Luck, R. E. S-process deficiencies in low-mass supergiant variables / R. E. Luck, H. E. Bond // ApJ. — 1989. — Vol. 342. — P. 476–488.
- [79] van der Veen, W. E. C. J. The IRAS two-colour diagram as a tool for studying late stages of stellar evolution / W. E. C. J. van der Veen, H. J. Habing // A&A. — 1988. — Vol. 194. — P. 125–134.
- [80] Giridhar, S. The chemical composition of the RV Tauri variable IW Carinae / S. Giridhar, N. K. Rao, D. L. Lambert // ApJ. — 1994. — Vol. 437. — P. 476–484.
- [81] Mantegazza, L. Near infrared spectra of RV Tauri stars / L. Mantegazza // A&AS. — 1991. — Vol. 88. — P. 255–263.
- [82] Trams, N. R. Extremely Metal Poor Post-Agb Stars / N. R. Trams, L. B. F. M. Waters, C. Waelkens // Luminous High-Latitude Stars / Ed. by D. D. Sasselov. — Vol. 45 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1993. — P. 103.
- [83] Wahlgren, G. M. The metallicity and luminosity of RV Tauri variables from medium-resolution spectra / G. M. Wahlgren // AJ. — 1992. — Vol. 104. — P. 1174–1192.
- [84] Klochkova, V. G. Supergiants Transiting Toward White Dwarfs / V. G. Klochkova // Stars: From Collapse to Collapse / Ed. by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin. — Vol. 510 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2017. — P. 121.

- [85] The peculiar post-AGB supergiant IRAS 04296+3429: optical spectroscopy and its spectral energy distribution / V. G. Klochkova, R. Szczerba, V. E. Panchuk, K. Volk // *A&A*. — 1999. — Vol. 345. — P. 905–914.
- [86] Клочкова, В. Г. Оптический спектр инфракрасного источника IRAS 23304+6147 / В. Г. Клочкова, Р. Щерба, В. Е. Панчук // *Письма в Астрономический журнал*. — 2000. — Т. 26. — С. 115–132.
- [87] Клочкова, В. Г. Оптический спектр биполярной туманности AFGL 2688 / В. Г. Клочкова, Р. Щерба, В. Е. Панчук // *Письма в Астрономический журнал*. — 2000. — Т. 26. — С. 510–524.
- [88] Клочкова, В. Г. Новое в оптическом спектре и кинематическом состоянии атмосферы переменной V1027 Cyg (IRAS 20004 2955) / В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская // *Письма в Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 42. — С. 897–907.
- [89] Нестабильный ветер в системе ИК-источника RAFGL 5081 / В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов, В. Е. Панчук и др. // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94. — С. 959–970.
- [90] Klochkova, V. G. Optical spectrum of the IR source IRC+10420 in 1992-1996 / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk // *MNRAS*. — 1997. — Vol. 292. — P. 19.
- [91] Oudmaijer, R. D. High resolution spectroscopy of the post-red supergiant IRC+10420. I. The data / R. D. Oudmaijer // *A&AS*. — 1998. — Vol. 129. — P. 541–552.
- [92] High-resolution optical spectroscopy of the yellow hypergiant V1302 Aql (=IRC+10420) in 2001-2014 / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroshnichenko et al. // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 459. — P. 4183–4190.
- [93] HD 179821 (V1427 Aql, IRAS 19114+0002) - a massive post-red supergiant star? / T. Şahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 461. — P. 4071–4087.
- [94] Эволюционный статус спектрально-переменной звезды BD + 48°1220 = IRAS 05040+4820 / В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов, Н. С. Таволжанская, В. Е. Панчук // *Астрономический журнал*. — 2007. — Т. 84. — С. 714–746.
- [95] Спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА / В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, И. Найдёнов // *Оптический журнал*. — 2009. — Т. 76. — С. 42–55.

- [96] Панчук, В. Е. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. XI. Повышение эффективности эшелле-спектрографов фокуса Нэсмит-2 / В. Е. Панчук, М. В. Юшкин, И. Найдёнов // Препринт САО РАН №179. — 2003.
- [97] Юшкин, М. В. Комплекс программ обработки эшелле-спектров / М. В. Юшкин, В. Г. Клочкова // Препринт САО РАН №206. — 2005.
- [98] Иванов, А. А. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-м телескопа БТА. Локальный корректор положения звезды / А. А. Иванов, В. Е. Панчук, В. С. Шергин // Препринт САО. — 2001. — Т. 155. — С. 1–19.
- [99] Панчук, В. Е. Стабилизация изображения на входе астрономического спектрографа / В. Е. Панчук, М. В. Якопов // Сборник “Физико-математические науки в СГУ”. — 2005. — С. 39–41.
- [100] <http://www.eso.org/projects/esomidas>.
- [101] Галазутдинов, Г. А. Система обработки звездных эшелле-спектров / Г. А. Галазутдинов // Препринт САО РАН №92. — 1992.
- [102] Klochkova, V. G. Spectral atlas of A-type supergiants / V. G. Klochkova, E. G. Sendzikas, E. L. Chentsov // *Astrophysical Bulletin*. — 2015. — Vol. 70. — P. 99–108.
- [103] <http://www.sao.ru/hq/ssl/deneb/atlas.pdf>.
- [104] Chentsov, E. L. Spectral variability of the peculiar A-type supergiant 3Pup / E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, A. S. Miroshnichenko // *Astrophysical Bulletin*. — 2010. — Vol. 65. — P. 150–163.
- [105] VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base / F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova et al. // *A&AS*. — 1999. — Vol. 138. — P. 119–133.
- [106] Клочкова, В. Г. Параметры атмосферы и металличность Theta Leo (A2 V). / В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, В. В. Цимбал // *Астрофизические исследования*. — 1985. — Т. 19. — С. 22–27.
- [107] Lewis, B. M. The chronological sequence of circumstellar masers - Identifying protoplanetary nebulae / B. M. Lewis // *ApJ*. — 1989. — Vol. 338. — P. 234–243.
- [108] Likkell, L. OH and H₂O observations of cold IRAS stars / L. Likkell // *ApJ*. — 1989. — Vol. 344. — P. 350–370.
- [109] CO observations of cold IRAS objects - AGB and post-AGB stars / L. Likkell, T. Forveille, A. Omont, M. Morris // *A&A*. — 1991. — Vol. 246. — P. 153–174.

- [110] A survey of circumstellar CO emission from a sample of IRAS point sources / L.-A. Nyman, R. S. Booth, U. Carlstrom et al. // *A&AS*. — 1992. — Vol. 93. — P. 121–150.
- [111] Characterization and proportion of very cold C-rich circumstellar envelopes / A. Omont, C. Loup, T. Forveille et al. // *A&A*. — 1993. — Vol. 267. — P. 515–548.
- [112] A systematic study of IRAS selected proto-planetary nebula candidates. II. OH and CO observations / J. Y. Hu, P. te Lintel Hekkert, F. Slijkhuis et al. // *A&AS*. — 1994. — Vol. 103. — P. 301–313.
- [113] Zhang, Y. Detection of C₆₀ in the Protoplanetary Nebula IRAS 01005+7910 / Y. Zhang, S. Kwok // *ApJ*. — 2011. — Vol. 730. — P. 126.
- [114] Iglesias-Groth, S. A Search for near Infrared Bands of the Fullerene Cation C₆₀⁺ in the Protoplanetary Nebula IRAS 01005+7910 / S. Iglesias-Groth, M. Esposito // *ApJ*. — 2013. — Vol. 776. — P. L2.
- [115] Hrivnak, B. J. A Study of the 3.3 and 3.4 μm Emission Features in Proto-Planetary Nebulae / B. J. Hrivnak, T. R. Geballe, S. Kwok // *ApJ*. — 2007. — Vol. 662. — P. 1059–1066.
- [116] Variability in Proto-planetary Nebulae. I. Light Curve Studies of 12 Carbon-rich Objects / B. J. Hrivnak, W. Lu, R. E. Maupin, B. D. Spitzbart // *ApJ*. — 2010. — Vol. 709. — P. 1042–1066.
- [117] Нестационарность горячих post-AGB объектов: изменение блеска и спектра IRAS 01005 7910, IRAS 22023 5249 и IRAS 22495 5134 / В. П. Архипова, М. А. Бурлак, В. Ф. Есипов и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 2013. — Т. 39. — С. 695–709.
- [118] Hu, J. IRAS 01005+7910, a High Galactic Latitude Post-AGB Star? / J. Hu // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by R. Szczerba, S. K. Górný. — Vol. 265 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2001.
- [119] Spectral variability of the IR source IRAS 01005+7910 optical component / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk et al. // *Astrophysical Bulletin*. — 2014. — Vol. 69. — P. 439–453.
- [120] www.nist.gov/pml/data/asd.cfm.
- [121] Hubble Space Telescope Snapshot Survey of Post-AGB Objects / N. Siódmiak, M. Meixner, T. Ueta et al. // *ApJ*. — 2008. — Vol. 677. — P. 382–400.
- [122] Arellano Ferro, A. Is 89 Herculis a binary star? / A. Arellano Ferro // *PASP*. — 1984. — Vol. 96. — P. 641–645.

- [123] A model for the 89 Herculis system / L. B. F. M. Waters, C. Waelkens, M. Mayor, N. R. Trams // *A&A*. — 1993. — Vol. 269. — P. 242–248.
- [124] Van Winckel, H. The extremely iron-deficient “Post-AGB” stars and binaries. / H. Van Winckel, C. Waelkens, L. B. F. M. Waters // *A&A*. — 1995. — Vol. 293.
- [125] Gautschy, A. Pulsating Post-Asymptotic Giant Branch Stars / A. Gautschy // *MNRAS*. — 1993. — Vol. 265. — P. 340.
- [126] A first optical spectroscopic monitoring of the post-AGB star SAO 96709=IRAS 07134+1005: pulsation and shock waves. / A. Lebre, N. Mauron, D. Gillet, D. Barthes // *A&A*. — 1996. — Vol. 310. — P. 923–932.
- [127] On the nature of the pulsation of the post-AGB star HD 56126 / D. Barthès, A. Lèbre, D. Gillet, N. Mauron // *A&A*. — 2000. — Vol. 359. — P. 168–180.
- [128] Optical spectrum of the post-AGB Star HD56126 in the wavelength interval 4010–8790 Å Å / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, N. S. Tavolgenskaya, M. V. Shapovalov // *Astrophysical Bulletin*. — 2007. — Vol. 62. — P. 162–192.
- [129] Studies of Variability in Proto-planetary Nebulae. II. Light and Velocity Curve Analyses of IRAS 22272+5435 and 22223+4327 / B. J. Hrivnak, W. Lu, J. Sperauskas et al. // *ApJ*. — 2013. — Vol. 766. — P. 116.
- [130] Non-linear radiative models of post-AGB stars: Application to HD 56126 / A. B. Fokin, A. Lèbre, H. Le Coroller, D. Gillet // *A&A*. — 2001. — Vol. 378. — P. 546–555.
- [131] Klochkova, V. G. Circumstellar envelope manifestations in the optical spectra of evolved stars / V. G. Klochkova // *Astrophysical Bulletin*. — 2014. — Vol. 69. — P. 279–295.
- [132] CO and HCN observations of circumstellar envelopes. A catalogue - Mass loss rates and distributions / C. Loup, T. Forveille, A. Omont, J. F. Paul // *A&AS*. — 1993. — Vol. 99. — P. 291–377.
- [133] Toward Understanding the B[e] Phenomenon. III. Properties of the Optical Counterpart of IRAS 00470+6429 / A. S. Miroshnichenko, E. L. Chentsov, V. G. Klochkova et al. // *ApJ*. — 2009. — Vol. 700. — P. 209–220.
- [134] Cazzolato, F. Large-Scale Structure and Dynamics of Cassiopeia OB7 / F. Cazzolato, S. Pineault // *AJ*. — 2003.
- [135] Shefov, N. N. Airglow as an Indicator of the Upper Atmospheric Structure and Dynamics / N. N. Shefov, A. I. Semenov, V. Y. Khomich. — GEOS, Moscow: 2006. — P. 429–433.

- [136] Small-scale Structure of the Interstellar Medium toward ρ Oph Stars: Diffuse Band Observations / M. A. Cordiner, S. J. Fossey, A. M. Smith, P. J. Sarre // *ApJ*. — 2013. — Vol. 764. — P. L10.
- [137] Studies of Diffuse Interstellar Bands V. Pairwise Correlations of Eight Strong DIBs and Neutral Hydrogen, Molecular Hydrogen, and Color Excess / S. D. Friedman, D. G. York, B. J. McCall et al. // *ApJ*. — 2011. — Vol. 727. — P. 33.
- [138] Chentsov, E. L. Spectral atlas of O9.5-A1-Type supergiants / E. L. Chentsov, A. N. Sarkisyan // *Astrophysical Bulletin*. — 2007. — Vol. 62. — P. 257–284.
- [139] Фотометрическая переменность и спектральные особенности протопланетарной туманности LSII + 34°26 = V1853 Cyg / В. П. Архипова, Н. П. Иконникова, Р. И. Носкова и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 2001. — Т. 27. — С. 841–849.
- [140] Архипова, В. П. Идентификация спектра и фотометрические наблюдения в 1997–1999 гг. будущей планетарной туманности IRAS 18062+2410 = V886 Her / В. П. Архипова, В. Г. Клочкова, Г. В. Сокол // *Письма в Астрономический журнал*. — 2001. — Т. 27. — С. 122–131.
- [141] High-resolution spectroscopy of the high-velocity hot post-AGB star LS III +52°24 (IRAS 22023+5249) / G. Sarkar, D. A. García-Hernández, M. Parthasarathy et al. // *MNRAS*. — 2012. — Vol. 421. — P. 679–699.
- [142] Sarkar, G. High resolution spectroscopy of the hot post-AGB stars IRAS 13266-5551 (CPD-55 5588) and IRAS 17311-4924 (Hen3-1428) / G. Sarkar, M. Parthasarathy, B. E. Reddy // *A&A*. — 2005. — Vol. 431. — P. 1007–1017.
- [143] Chemical abundances of hot post-AGB stars / D. R. C. Mello, S. Daflon, C. B. Pereira, I. Hubeny // *A&A*. — 2012. — Vol. 543. — P. A11.
- [144] Gauba, G. Circumstellar dust shells of hot post-AGB stars / G. Gauba, M. Parthasarathy // *A&A*. — 2004. — Vol. 417. — P. 201–215.
- [145] IRAS 18062 + 2410 – ранняя стадия образования планетарной туманности / В. П. Архипова, Н. П. Иконникова, Р. И. Носкова и др. // *Письма в Астрономический журнал*. — 1999. — Т. 25. — С. 30–39.
- [146] High resolution spectroscopy of the high latitude rapidly evolving post-AGB star SAO 85766 (= IRAS 18062+2410) / M. Parthasarathy, P. García-Lario, T. Sivarani et al. // *A&A*. — 2000. — Vol. 357. — P. 241–254.

- [147] Переменность и быстрая эволюция протопланетарного объекта IRAS 18062+2410=V886 Her / В. П. Архипова, В. Ф. Есипов, Н. П. Иконникова и др. // Письма в Астрономический журнал. — 2007. — Т. 33. — С. 678–689.
- [148] POST AGB candidates - Selection and IR properties / N. R. Trams, L. B. F. M. Waters, H. J. G. L. M. Lamers et al. // A&AS. — 1991. — Vol. 87. — P. 361–382.
- [149] Bonsack, W. K. A High-Velocity Supergiant, HD 172324 / W. K. Bonsack, J. L. Greenstein // PASP. — 1956. — Vol. 68. — P. 249.
- [150] Arellano Ferro, A. Atmospheric abundances in post-AGB candidates of intermediate temperature / A. Arellano Ferro, S. Giridhar, P. Mathias // A&A. — 2001. — Vol. 368. — P. 250–266.
- [151] Rufener, F. Second catalogue of stars measured in the Geneva Observatory photometric system. / F. Rufener // A&AS. — 1976. — Vol. 26. — P. 275–351.
- [152] Fernie, J. D. New UBVR photometry for 900 supergiants / J. D. Fernie // ApJS. — 1983. — Vol. 52. — P. 7–22.
- [153] Hauck, B. Uvbybeta photoelectric photometric catalogue / B. Hauck, M. Mermilliod // A&AS. — 1998. — Vol. 129. — P. 431–433.
- [154] A study of dust shells around high latitude supergiants / W. E. C. J. van der Veen, L. B. F. M. Waters, N. R. Trams, H. E. Matthews // A&A. — 1994. — Vol. 285. — P. 551–564.
- [155] A spectroscopic study of field BHB star candidates / T. Kinman, F. Castelli, C. Cacciari et al. // A&A. — 2000. — Vol. 364. — P. 102–136.
- [156] Morgan, W. W. Revised Standards for Supergiants on the System of the Yerkes Spectral Atlas. / W. W. Morgan, N. G. Roman // ApJ. — 1950. — Vol. 112. — P. 362–364.
- [157] Brand, J. The Velocity Field of the Outer Galaxy / J. Brand, L. Blitz // A&A. — 1993. — Vol. 275. — P. 67.
- [158] A search for diffuse bands in the circumstellar envelopes of post-AGB stars / R. Luna, N. L. J. Cox, M. A. Satorre et al. // A&A. — 2008. — Vol. 480. — P. 133–148.
- [159] New light on Galactic post-asymptotic giant branch stars - I. First distance catalogue / S. B. Vickers, D. J. Frew, Q. A. Parker, I. S. Bojčić // MNRAS. — 2015. — Vol. 447. — P. 1673–1691.

- [160] Arellano Ferro, A. A Revised Calibration of the $M_V-W(O\ I\ 7774)$ Relationship using Hipparcos Data: Its Application to Cepheids and Evolved Stars / A. Arellano Ferro, S. Giridhar, E. Rojo Arellano // *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.* — 2003. — Vol. 39. — P. 3–15.
- [161] Эволюционные изменения в оптическом спектре пекулярного сверхгиганта IRC+10420 / В. Г. Ключкова, М. В. Юшкин, Е. Л. Ченцов, В. Е. Панчук // *Астрономический журнал.* — 2002. — Т. 79. — С. 158–171.
- [162] The Chemical Composition of the Sun / M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, P. Scott // *ARA&A.* — 2009. — Vol. 47. — P. 481–522.
- [163] Neutral and ionized emission lines in the type II Cepheid W Virginis / V. V. Kovtyukh, G. Wallerstein, S. M. Andrievsky et al. // *A&A.* — 2011. — Vol. 526. — P. A116.
- [164] Cohen, J. G. Blue Horizontal Branch Stars in M92 / J. G. Cohen, J. K. McCarthy // *AJ.* — 1997. — Vol. 113. — P. 1353–1358.
- [165] Reddy, B. E. Elemental abundance survey of the Galactic thick disc / B. E. Reddy, D. L. Lambert, C. Allende Prieto // *MNRAS.* — 2006. — Vol. 367. — P. 1329–1366.
- [166] Ключкова, В. Г. Химический состав атмосфер А-звёзд гало / В. Г. Ключкова, В. Е. Панчук // *Астрофизические исследования.* — 1988. — Т. 26. — С. 27–37.
- [167] Chemical composition of A-F type post-AGB candidates / S. Giridhar, R. Molina, A. A. Ferro, G. Selvakumar // *MNRAS.* — 2010. — Vol. 406. — P. 290–306.
- [168] Martin, J. C. The Origins and Evolutionary Status of B Stars Found Far from the Galactic Plane. I. Composition and Spectral Features / J. C. Martin // *AJ.* — 2004. — Vol. 128. — P. 2474–2500.
- [169] Discovery of Spectral Variability of Post-AGB Star SAO 40039 / V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin // *Information Bulletin on Variable Stars.* — 2004. — Vol. 5584.
- [170] Peterson, R. C. The rotation of horizontal-branch stars. II - Members of the globular clusters M3, M5, and M13 / R. C. Peterson // *ApJ.* — 1983. — Vol. 275. — P. 737–751.
- [171] Klochkova, V. G. Study of the physics and evolution of stars at the 6-m BTA telescope / V. G. Klochkova // *Astrophysical Bulletin.* — 2012. — Vol. 67. — P. 385–413.
- [172] Спектроскопия виргиниды VI (К 307) в шаровом скоплении М 12 / В. Г. Ключкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская, В. В. Ковтюх // *Письма в Астрономический журнал.* — 2003. — Т. 29. — С. 842–857.

- [173] Kinman, T. D. Do the Nearby Blue Horizontal Branch Stars Belong to the Thick Disk or the Halo? / T. D. Kinman, H. L. Morrison, W. R. Brown // *AJ.* — 2009. — Vol. 137. — P. 3198–3209.
- [174] Şahin, T. Variability and evolution in various classes of post-AGB stars / T. Şahin, C. S. Jeffery // *Astronomische Nachrichten.* — 2007. — Vol. 328. — P. 848.

Список иллюстраций

2.1	а) Кадр тока смещения, следы космических частиц не удалены. б) Кадр плоского поля. в) Следы космических частиц на кадре спектра звезды. д) Кадр спектра Th-Ag лампы, следы космических частиц не удалены.	35
2.2	Проведение континуума эшелле-спектра звезды.	42
2.3	Измерение лучевой скорости линии.	43
2.4	Измерение эквивалентной ширины линии, двумя вариантами: площадь над профилем линии и площадь над гауссианой	43
2.5	Три коротковолновых фрагмента атласа в диапазоне длин волн 3920–4220 Å. Сверху вниз на каждом рисунке здесь расположены фрагменты спектров: BD+48°1220, 3 Pup, α Cyg.	45
3.1	Участок спектра IRAS 01005 13.11.05 с многокомпонентной межзвездной абсорбцией Na I (1) 5889.95 Å, эмиссионно-абсорбционной линией C II (5) 5891.59 Å. На горизонтальной оси – шкала лабораторных длин волн фотосферных абсорбций. Положения линий мультиплета C II (5) помечены вертикальными штрихами, теллурических абсорбций H ₂ O – точками, теллурической эмиссии Na I – колечком.	52
3.2	Вариации формы и положения профилей в спектре IRAS 01005. Фрагменты спектров 15.11.03 (вверху) и 13.11.05 (сдвинут вниз на 0.1) сглажены по 7 точкам. Горизонтальная ось размечена по лабораторным длинам волн фотосферных абсорбций в спектре за 13.11.05.	53
3.3	Зависимости лучевой скорости V_r от остаточной интенсивности “r” для линий в спектре IRAS 01005 29.05.13. Каждый значок относится к отдельной линии. Точки – запрещенные эмиссии ($r > 1.0$, скорости измерены по их вершинам) и абсорбции He I и ионов ($r < 1.0$, скорости измерены по их ядрам), колечки – эмиссионные ($V_r < -60$ км/с) и абсорбционные ($V_r > -40$ км/с) компоненты профилей линий Fe III.	54
3.4	Профили эмиссий [N I] F1 5198 Å и более слабой O I (22) 6046 в спектре IRAS 01005 21.08.13 в сравнении с профилем теллурической эмиссии [O I] F3 5577 Å (штриховая линия, сдвинута по оси V_r).	55

- 3.5 Вершины профилей $\text{H}\alpha$ в спектрах IRAS 01005, сверху вниз: 21.08.13 и среднее между 22.11.02 и 25.11.02. Вертикальная штриховая прямая отмечает положение запрещенных эмиссий. 56
- 3.6 Вариации профилей Si II в спектре IRAS 01005. Жирные линии – эмиссия Si II (2) 6347 \AA и среднее из эмиссионно-абсорбционных профилей Si II (3) 4128 \AA и 4130 \AA , то и другое 29.05.13. Тонкие линии – профили Si II (2) 6347 \AA : слева 15.11.05, справа 13.04.03. Штриховая линия – наружная огибающая набора всех профилей Si II 5979 \AA 57
- 3.7 Профили $\text{H}\alpha$ в спектре IRAS 01005 9.03.04 (тонкая линия) и 18.01.05 (жирная линия). Штрихи – оболочечные эмиссии, прерывистые линии – участки ветровых профилей под ними. Вертикальная штриховая прямая фиксирует лучевую скорость для запрещенных эмиссий, цепочка звездочек рядом с ней – бисектор для нижней части профиля 18.01.05. 58
- 3.8 Профили линий He I в спектре IRAS 01005: 5876 \AA (вверху) и 5016 \AA (смещена вниз на 0.5). Сплошными линиями показаны профили с наибольшей и наименьшей интенсивностями эмиссий (для 5876 \AA – 13.04.03 и 13.11.05, для 5016 \AA – 2.12.02 и 29.05.13 соответственно), штриховыми линиями – огибающие наборов профилей. 59
- 3.9 Сходство эмиссионно-абсорбционных профилей в спектре IRAS 01005, полученном 21.08.13. Вверху: профили Fe III (среднее для 5127 и 5156 \AA , жирная линия) и He I (5048 \AA , тонкая линия); для сравнения приведен профиль абсорбции O II 4267 \AA (пунктир). Внизу (сдвиг вниз по вертикали на 0.2): C II 4267 \AA (жирная линия) и He I 4713 \AA (тонкая линия). 60
- 3.10 Изменения со временем профилей He I 5048 \AA (вверху) и N II 5679 \AA (смещен вниз по вертикали на 0.2) в спектре IRAS 01005: за 6 часов (2/3.12.02, слева) и за 2 суток (3 и 5.11.08, справа). Тонкими линиями показаны более ранние виды профилей, жирными – более поздние. 61
- 3.11 Вверху: изменение от даты к дате (между 25.01.02 и 21.08.13) лучевых скоростей для слабых абсорбций в спектре IRAS 01005, измеренных по их ядрам (точки) и крыльям (колечки). Близкие даты соединены сплошными прямыми, остальные – штриховыми. Помечены даты, для которых ниже приводятся профили линий. Внизу: сопоставление профилей N II 4630 \AA (слева) и N II 5679 \AA (справа) в даты с большими различиями лучевых скоростей. 62
- 3.12 Профили линий Na I 5890 \AA (a) и Na I 5896 \AA (b) для 20 спектров, наложенные друг на друга 63

3.13	Рисунки a, b, c показывают эмиссионный компонент линии Na I 5890 Å как результат деления каждого спектра на средний (прерывистая линия), на картинке d изображены профили эмиссионного компонента Na I 5890 Å для 5 спектров, полученных 09.12.2006, наложенные друг на друга с обозначенными порядковыми номерами кадров. Вертикальная прерывистая линия на всех рисунках показывает лучевую скорость гелиоцентрической поправки.	65
3.14	Профили DIBs в спектре ИК-источника IRAS 01005+7910, в порядке возрастания длины волны 5780 (a), 5797 (b), 6196 (c), 6203 (d), 6379 (e), 6614 (f) Å. . . .	66
4.1	Профили линии H α для разных моментов наблюдений. Прерывистая вертикаль – принятая системная скорость $V_{\text{sys}} \approx -125$ км/с.	71
4.2	Профили линии H β , вертикальная линия – то же, что и на рис. 4.1.	72
4.3	Сопоставление фрагментов спектров V534 Lyr с аналогичными фрагментами спектра массивного сверхгиганта α Cyg. Отождествлены основные абсорбции.	73
4.4	Зависимости $V_r(r)$ для имеющихся дат наблюдений. Заполненные кружки – абсорбции Fe II высокого возбуждения, квадратики – абсорбции Fe II низкого возбуждения, колечки – He I, Si II, горизонтальные чёрточки – эмиссии Fe II 6318, 6384, 6385 Å.	75
4.5	Профили линий Fe II 5363 (3 eV, прерывистая) и Fe II 5506 (10 eV, сплошная). Вертикальная линия – то же, что и на рис. 4.1	77
4.6	Профили Fe II 5169 и Si II 6371 Å для двух дат: 6.04.2010 – прерывистая линия, 12.10.2013 – сплошная линия. Вертикальная линия – то же, что и на рис. 4.1.	78
4.7	Звездная (прерывистая линия) и межзвездная части профилей линий Na I D2 и Ca II K по спектру, полученному 12.10.2013. Вертикальная прерывистая линия – как и на рис. 4.1.	80

Приложение

Таблица 5: Лучевые скорости (км/с) и остаточные интенсивности спектральных линий Na I 5890 Å (в спектре ИК-источника IRAS 01005+7910)

Дата	1		2		3		4		5	
	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r
04.02.02	-72.9	28.5	-65.3	37.5	-54.4	58.1	-28.2	41.0	-11.0	7.8
22.11.02	-72.5	28.1	-64.6	35.6	-51.8	61.3	-27.2	37.1	-10.1	3.4
25.11.02	-72.8	28.1	-65.5	35.6	-51.8	67.3	-28.5	34.1	-11.0	1.6
27.11.02	-70.7	29.7	-65.9	37.9	-51.2	67.8	-25.8	40.9	-9.7	6.8
02.12.02	-72.8	31.9			-52.9	66.3	-27.9	39.7	-10.7	6.6
03.12.02	-71.9	33.7	-63.8	48.1	-53.8	65.6	-27.0	39.0	-11.4	7.4
19.12.02	-72.7	25	-65.7	38.5	-52.3	59.5	-27.9	41.4	-11.6	5.7
23.02.03	-72.4	27	-66.1	37.3	-52.6	63.3	-27.5	35.0	-9.0	4.7
13.04.03	-72.4	27.7	-66.9	38.6	-52.8	64.8	-27.7	42.5	-10.7	10.9
10.01.04	-72.5	28.1	-66.0	36.6	-52.6	60.5	-27.7	39.9	-11.7	
09.03.04	-72.6	30	-65.6	39.3	-52.3	66.3	-27.7	37.8	-8.7	8.1
28.08.04	-72.4	30.3	-65.5	38.7	-52.1	59.1	-27.9	40.6	-10.7	3.1
18.01.05	-72.8	30.4	-65.2	38.0	-52.4	61.9	-27.9	35.3	-10.6	8.3
13.11.05	-72.3	33.3	-65.4	39.6	-52.4	59.8	-27.5	39.8	-10.5	5.8
15.11.05	-72.5	32.9	-65.1	37.7	-52.5	57.7	-27.5	37.9	-10.4	5.8
09.12.06	-73.0	32.8	-66.8	36.6	-54.0	62.1	-28.0	38.8	-11.7	5.1
03.11.08	-71.7	34.5	-66.4	41.4	-52.9	67.0	-27.0	42.3	-10.3	4.3
05.11.08	-72.2	35.1	-66.5	39.8	-53.7	65.8	-27.1	43.5	-10.9	4.4
29.05.13	-72.3	31.8	-65.9	35.5	-52.4	60.6	-27.7	37.0	-10.4	4.2
21.08.13	-72.5	35.9	-65.5	42.1	-52.3	65.1	-27.5	38.7	-10.1	4.1
Ср. значения	-72.4	30.7	-65.7	38.7	-52.7	63.0	-27.6	39.1	-10.6	5.7

Таблица 6: Лучевые скорости (км/с) и остаточные интенсивности спектральных линий Na I 5896 Å (в спектре ИК-источника IRAS 01005+7910)

Дата	1		2		3		4		5	
	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r
04.02.02	-72.7	44.7	-64.9	56.5	-53.1	72.5	-28.8	56.1	-10.4	6.1
22.11.02	-72.2	39.1	-65.6	54.2	-51.4	72.3	-27.2	52.5	-9.8	1.8
25.11.02	-73.7	44.7	-67.1	54.4	-51.1	77.3	-28.8	51.8	-10.5	5.8
27.11.02	-71.0	42.6	-63.4	57.2	-50.7	73.6	-24.9	59.9	-9.1	7.6
02.12.02	-72.8	47.1	-64.9	58.0	-52.8	72.9	-27.8	57.7	-10.5	6
03.12.02	-73.2	49.3			-52.4	73.7	-27.8	57.0	-10.5	5.4
19.12.02	-73.0	43.7	-65.6	56.8	-52.8	74.5	-27.5	54.3	-10.9	6.1
23.02.03	-72.7	42.7	-64.8	55.3	-53.0	71.0	-27.2	55.5	-9.8	5.8
13.04.03	-72.6	44.6			-52.7	73.8	-27.9	54.5	-10.3	7.3
10.01.04	-72.7	46.7	-64.8	57.0	-52.7	73.5	-28.0	55.3	-10.4	21.2
09.03.04	-72.6	43.7	-65.1	53.0	-52.4	69.8	-27.6	51.8	-9.1	7.9
28.08.04	-73.3	45.3	-66.2	52.2	-52.3	72.2	-27.9	51.1	-10.4	1.2
18.01.05	-73.1	46.5	-64.9	55.8	-52.1	73.6	-28.2	52.2	-10.4	6.2
13.11.05	-73.1	49.2	-65.0	57.4	-51.8	74.5	-27.7	53.1	-10.4	5.9
15.11.05	-73.1	48.4	-64.7	56.1	-51.5	74.9	-28.0	53.0	-10.1	5.7
09.12.06	-73.5	48.8	-65.5	55.8	-52.5	73.2	-28.0	54.3	-11.0	5.1
03.11.08	-72.4	50.2	-65.6	55.8	-52.2	75.0	-27.4	56.4	-9.8	5.3
05.11.08	-72.8	51.3	-66.2	56.5	-52.0	76.5	-27.5	55.7	-10.5	4.6
29.05.13	-73.3	48.4	-65.4	55.6	-51.5	72.5	-27.8	52.9	-9.8	4.6
21.08.13	-73.1	46.7	-65.2	54.7	-52.9	76.3	-27.7	53.3	-9.9	4.9
Ср. значения	-72.8	46.2	-65.3	55.7	-52.2	73.7	-27.7	54.4	-10.1	6.2

Таблица 7: Лучевые скорости (км/с) и остаточные интенсивности спектральных линий Ca II в спектре ИК-источника IRAS 01005+7910

Дата	Ca II 3934 Å				Ca II 3968 Å			
	1		2		1		2	
	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r
15.11.03	-71.0	44.7	-13.4	27.2	-71.7	60.1	-12.1	44.4
29.05.13	-72.1	39.3	-13.0	21.7	-67.2	58.4	-11.9	31.8
21.08.13	-70.1	36.7	-13.7	18.9	-70.6	51.9	-15.6	34.5
Ср. значения	-71.1	40.2	-13.4	22.6	-69.8	56.8	-13.2	36.9

Таблица 8: Отождествление линий в коротковолновом фрагменте спектра IRAS 01005, их остаточные интенсивности (τ) и гелиоцентрические лучевые скорости (V_r). Буквой “e” помечены эмиссии и эмиссионные компоненты.

Линия (мульти-т)	λ , \AA	τ	V_r , км/с
<u>15.11.03</u>			
He I (36)	3530.49	0.71:	-22 :
He I (34)	3554.43	0.68:	-28 :
He I (31)	3587.29	0.76	-27
He I (6)	3613.64	0.77	-25 :
He I (28)	3634.25	0.74	-23
H 24	3671.48	0.94:	-12 :
H 23	3673.76	0.88:	-13 :
H 22	3676.36	0.87:	-19 :
H 21	3679.35	0.83:	-15 :
H 20	3682.81	0.81:	-21 :
H 19	3686.83	0.79:	-19
H 18	3691.56	0.73	-16
H 17	3697.15	0.72	-21
H 16	3703.86	0.64:	-15 :
He I (25)	3705.02	0.61	-26
H 15	3711.97	0.64	-15
H 14	3721.94	0.64	-13
O II (3)	3727.33	0.87:	-27 :
He I (24)	3732.87	0.81	-18 :
H 13	3734.37	0.65	-12
H 12	3750.15	0.63	-14
He I (65)	3768.78		
H 11	3770.63	0.65	-18
		e 0.72:	-43 :
He I (64)	3784.86	0.92	-23
Si III (5)	3791.41	0.93	-16 :
H 10	3797.90	0.64	-26
		e 0.69:	-40 :
He I (63)	3805.74	0.90	-23 :
Si III (5)	3806.54	0.90:	-25 :
He I (22)	3819.64	e 1.00	-70
		0.61	-26
He I (62)	3833.55	0.83	-20
H 9	3835.38	0.68	-20 :
		e 0.80:	-32 :
He I (61)	3838.10		
N II (30)	3838.37		

Таблица 9: Лучевые скорости (км/с), остаточные интенсивности, эквивалентные ширины (mÅ) межзвёздных диффузных полос и расчётные значения столбцовой плотности нейтрального водорода и межзвёздного покраснения (в спектре ИК-источника IRAS 01005+7910)

Дата	DIB 5780 Å			DIB 5797 Å			DIB 6196 Å			DIB 6203 Å			DIB 6379 Å			DIB 6614 Å		
	V_r	r	W_λ	V_r	r	W_λ	V_r	r	W_λ	V_r	r	W_λ	V_r	r	W_λ	V_r	r	W_λ
04.02.02	-14.2	96.2	18	-16.9	94.3	16	-18.1	95.0	29	-17.6	94.3	26	-15.2	97.2	10	-7.1	94.7	27
22.11.02	-15.5	92.8	43	-11.3	95.5	28	-11.1	91.6	32							-11.0	93.5	19
25.11.02	-13.0	91.5	30	-14.2	90.0	53												
27.11.02	-4.8	85.4	39	-10.3	88.1	33												
02.12.02	-13.2	89.2	54	-16.1	93.9	24												
03.12.02	-8.7	96.6	30	-12.8	93.2	38												
19.12.02	-5.0	88.3	32	-20.2	95.2	17												
23.02.03	-15.2	94.9	17	-13.4	95.4	18	-14.5	95.9	10	-18.4	95.5	17	-19.1	94.5	20	-18.5	92.8	47
13.04.03	-17.9	93.3	25	-11.9	94.3	23	-5.4	97.2	12	-6.6	98.5	8	-14.9	95.0	31	-19.6	94.2	22
10.01.04	-18.0	90.9	36	-11.8	95.8	22	-12.0	95.7	16	-10.4	97.5	17	-13.1	93.8	33	-16.5	94.1	23
09.03.04	-15.7	91.8	35	-16.9	96.1	18							-4.2	89.0	42	-8.9	96.1	31
28.08.04	-19.3	92.4	20	-7.1	95.0	20	-10.6	96.3	10	-13.1	69.6	22	-6.1	91.3	35	-8.0	93.8	50
18.01.05	-3.4	94.2	33	-21.9	96.3	22	-13.9	96.8	19							-17.3	94.4	34
13.11.05	-8.7	93.7	33	-19.4	96.8	17												
15.11.05	-7.7	96.0	30	-13.8	95.2	30	-14.0	98.3	7	-12.1	97.3	21	-15.0	96.2	27	-11.8	95.0	30
09.12.06	-18.1	94.5	25	-12.5	92.1	37												
03.11.08	-19.5	94.9	21	-12.7	96.7	20												
05.11.08	-25.9	95.9	33	-19.0	93.6	40												
29.05.13	-14.8	93.9	42	-12.1	95.8	35	-13.4	96.5	11				-24.3	96.6	22	-13.3	96.0	48
21.08.13	-6.1	94.4	37	-11.6	96.4	26	-11.7	96.3	17				-15.4	96.1	29	-16.7	95.2	47
Ср. значения	-13.2	93.0	30	-14.3	94.5	27	-12.5	96.0	16	-13.0	92.1	19	-14.1	94.4	28	-13.5	94.5	34
$\log[N(\text{H})]$	20.39			20.81			21.04									20.92		
$E_{\text{B-V}}$	0.051			0.126			0.286									0.137		