

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Институт астрономии РАН

На правах рукописи
УДК 524.3

САЧКОВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗДНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ И
КИНЕМАТИКИ ЗВЕЗД
МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ**

Специальность 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте астрономии РАН

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор
Панчук Владимир Евгеньевич
(САО РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Гнедин Юрий Николаевич
(ГАО РАН)

доктор физико-математических наук,
Дамбис Андрей Карлович
(ГАИШ МГУ)

доктор физико-математических наук,
Романюк Иосиф Иванович
(САО РАН)

Ведущая организация: Южный Федеральный Университет

Защита состоится « » октября 2011 г. в ч. мин на заседании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Астрофизической Обсерватории РАН по адресу: 369167 КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан « » 2011 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.203.01

кандидат физико-математических наук

Майорова Е.К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Методы доплеровских измерений лучевых скоростей развиваются уже более 140 лет. За это время неоднократно изменялись как техника наблюдений, так и интерпретация полученных результатов. Именно положения спектральных линий первыми получили правильную интерпретацию, тогда как результаты измерений распределения энергии в спектре и интенсивностей линий еще долго «ожидали» появления теорий излучения, возбуждения атомных уровней, ионизации вещества и переноса излучения. По мере того, как повышалась точность измерения лучевых скоростей, становились доступными для решения все новые задачи, и обнаруживались новые эффекты. В большинстве случаев техника измерений и результаты наблюдений существенно опережали развитие адекватных гипотез. Например, на рубеже XIX и XX столетий для интерпретации результатов измерений лучевых скоростей спектрально-двойных звезд еще привлекались представления о космической дисперсии света (ставилась задача поиска одновременности наступления определенных моментов движения в двойной системе, полученных по различным длинам волн в спектре). Другим, более известным примером являются попытки интерпретации изменения лучевых скоростей пульсирующей звезды в рамках гипотезы о двойной системе.

Измерение положений отдельных линий в спектре всегда являлось кропотливой и трудоемкой работой, доступной далеко не всем спектроскопистам. Время обработки спектрограммы намного превышало время ее получения. Поэтому накопление данных о лучевых скоростях происходило медленно. Массовым наблюдениям были доступны относительно яркие звезды, по лучевым скоростям которых можно было получить лишь сведения о кинематике тел в окрестностях Солнечной системы. Наблюдения избранных физических переменных звезд не позволяли накопить достоверную статистику о кинематических характеристиках их атмосфер.

С появлением техники оцифровки спектрограмм определенную нишу заняли корреляционные методы измерения обобщенных характеристик спектров (лучевая скорость, проекция скорости осевого вращения, микро-

турбуленция и, при наличии информации об эффективной температуре и *logg*, металличность), когда результат можно было получить относительно быстро. Использовалось основное преимущество корреляционных методов измерения лучевых скоростей - возможность получения результата при уровне сигнала, еще недостаточного для точного измерения положений отдельных линий. Это позволило систематически измерять лучевые скорости на телескопах умеренных размеров. Появление эффективных корреляционных методов и создание на их основе приборов нового поколения на базе эшелле спектрографов произвело, по сути, подлинную революцию в измерениях лучевых скоростей и позволило получать массовые и однородные измерения с небывалой до той поры точностью 0.3 - 0.5 км/с. Были выполнены измерения лучевых скоростей у десятков тысяч звезд, что позволило изучать кинематику Галактики в целом. Достигнутой точности было достаточно и для мониторинга лучевых скоростей двойных и пульсирующих звезд. Были поставлены задачи исследования бимодальных цефеид, обнаружения и исследования спектрально-двойных цефеид, определения пульсационных радиусов цефеид, определения мод пульсаций. Этим задачам, в частности, посвящена настоящая работа.

Принципиальное ограничение корреляционных методов состоит в том, что для данного объекта на практике возможно получение только одного значения лучевой скорости, без учета явлений в звездных атмосферах, которые приводят к различиям лучевых скоростей, измеряемым по разным спектральным линиям. Возврат к измерениям по отдельным линиям стал возможным после появления спектрографов, оснащенных многоканальными твердотельными приемниками - линейками и матрицами приборов с зарядовой связью (ПЗС). Высокая точность метода, достигаемая за счет большого одновременно регистрируемого диапазона длин волн и высокой квантовой эффективности, позволила сформулировать и решить новые задачи. В частности, появилась возможность исследования методами спектроскопии быстро осциллирующих химически пекулярных A (roAp) звезд, одних из ключевых объектов для астросейсмологии - самого мощного инструмента для проверки теории строения и эволюции звезд в настоящее время. При этом спектральные данные стали доступны как для классического астро-

сейсмологического анализа (определение светимости и внутреннего химического состава пульсирующих звезд на основе точных измерений пульсационных частот), так и для изучения распространения p -мод в атмосферах γ Ар звезд. Существенная часть настоящей работы посвящена решению этих задач.

Наблюдения с высоким спектральным разрешением, выполняемые на больших телескопах, относятся к категории «slit limited», т.е. являются ограниченными либо потерями света на входной щели, либо потерями в числе одновременно регистрируемых элементов спектра (за счет снижения потерь на щели). В связи с этим важной становится задача поиска новых методов измерения доплеровских смещений, более экономичных в сравнении с уже ставшей классической спектроскопией с применением эшелле и ПЗС. Полезным мог бы оказаться опыт развития другого направления, частью которого является, прежде всего, фурье-спектроскопия. Действительно, в большинстве методов измерения лучевых скоростей используется классический спектрограф, который физически выполняет преобразование поступающего излучения в распределение амплитуды сигнала вдоль частоты (длины волны). На этапе этого преобразования происходят основные энергетические и, следовательно, информационные потери. Кроме того, эти методы требуют трудоемких измерений положений отдельных линий, по которым вычисляется среднее значение лучевой скорости. Одноканальный корреляционный измеритель лучевых скоростей является примером прибора, в котором среднее значение лучевой скорости получается без измерения положений отдельных линий. Поэтому в настоящий момент актуальным является вопрос поиска технических решений, более экономичных по сравнению с классической спектроскопией, в семействе многоканальных методов. Анализ известных интегральных методов позволяет оценить их применимость в задачах определения лучевых скоростей и предложить такие новые многоканальные методы. Результаты численного и лабораторного моделирования дают возможность утверждать, что у наземной спектроскопии существует резерв, как по проникающей способности, так и по точности измерения лучевых скоростей.

При исследовании кинематических процессов в звездных атмосферах

важную роль играет снижение скважности наблюдений вследствие короткой временной шкалы некоторых явлений, проявляющихся в доплеровских смещениях избранных линий. Результаты наземных спектроскопических наблюдений на телескопах, распределенных по долготе, ограничены как различиями спектральной аппаратуры, так и сложностью организации синхронных наблюдений. В настоящей работе показана продуктивность сочетания наземных спектроскопических наблюдений (выполняемых с высокой скважностью), с орбитальными фотометрическими наблюдениями. Следующим шагом может стать продолжительный спектроскопический мониторинг с минимальной скважностью, который осуществим с применением орбитальных средств. Поэтому некоторые методические работы по комплексу спектральной аппаратуры космического проекта ВКО-УФ («Спектр-УФ») [1] мы рассматриваем как естественное продолжение результатов, полученных наземными методами.

Структура диссертации отражает развитие техники доплеровских измерений. На последовательных этапах этого развития автором получены новые оригинальные результаты. Новым элементом данной работы, отличающей ее от других работ по лучевым скоростям, является анализ соотношения методов и соответствующих астрофизических результатов, полученных на каждом этапе, и анализ и прогноз развития методов. Именно это позволило предложить новые задачи исследований, найти соответствующие методы и оценить перспективу доплеровских измерений.

Цель работы

1. Определение принципиальных и технологических ограничений различных методов доплеровских измерений.
2. Исследование популяции классических цефеид. Определение радиусов различных групп цефеид: малоамплитудных, бимодальных, спектрально двойных, и получение зависимости «период - радиус».
3. Поиск критериев, позволяющих эффективно выделять моды пульсаций цефеид. Являясь фундаментальной характеристикой звезды, мода пульсации важна не только для задач исследования звездных пуль-

саций, но непосредственно связана с проблемой шкалы расстояний: неверная идентификация моды пульсации ведет к неверной оценке светимости и, следовательно, к ошибкам в определении шкалы расстояний.

4. Проведение частотного анализа быстро осциллирующих химически пекулярных А звезд для задач астросейсмологии. Пульсационные изменения лучевых скоростей этих звезд, достигая амплитуд в несколько километров в секунду, гораздо более значимы, чем изменения их блеска, амплитуда которых составляет как правило всего несколько тысячных долей звездной величины.
5. Исследование распространения пульсационной волны в атмосферах быстро осциллирующих химически пекулярных звезд. Изучение пульсационных особенностей этих звезд на основе предположения о вертикальной стратификации химических элементов в их атмосферах.
6. Определение общих пульсационных характеристик быстро осциллирующих химически пекулярных звезд. Исследование стабильности возбужденных мод в этих звездах.
7. Разработка методов доплеровских наземных измерений с целью увеличения спектрального разрешения существующих приборов для задач исследования звездных пульсаций и кинематики звезд.
8. Разработка методов доплеровских орбитальных измерений с целью увеличения точности определения лучевых скоростей звезд.

Научная новизна диссертации

Проведено наиболее полное к настоящему времени исследование радиусов классических цефеид. Впервые радиусы определены на основе однородных наблюдательных данных для самой большой даже в сравнении с компилятивными работами выборки (128 цефеид). Полученные данные не зависят от межзвездного поглощения.

Впервые предложен метод определения мод пульсаций цефеид на основе анализа диаграммы «период - радиус». Были обнаружены цефеиды,

пульсирующие в первом оберitone, которые ошибочно принимались ранее пульсирующими в основном тоне. Выяснилось, что различия в результатах применения метода статистических параллаксов к разным выборкам цефеид [10] частично вызваны «загрязнением» выборки короткопериодических цефеид пульсаторами первого обертона, ошибочно принятыми за пульсаторы основного тона.

Впервые определены общие пульсационные характеристики быстро осциллирующих химически пекулярных А звезд. Пульсации появляются в слоях концентрации Y и Eu (и Fe в звезде 33 Lib), затем распространяются через слои, в которых образуются линии Nd, Pr, ядро линии H_{α} , достигают максимума и, в большинстве звезд, показывают уменьшение амплитуды пульсаций; фаза максимума лучевых скоростей (V_R) вторых ионов достигается позднее, чем первых ионов; линии Tb и Th показывают самые большие сдвиги фаз максимума V_R по сравнению с остальными ионами; пульсационная волна возникает как стоячая волна (фаза максимума V_R постоянная) в более глубоких слоях атмосферы и затем во внешних слоях атмосферы преобразуется в бегущую волну (фаза максимума V_R непостоянна).

Впервые предложен метод исследования распространения пульсационной волны в атмосферах быстро осциллирующих химически пекулярных звезд на основе анализа диаграмм «пульсационная фаза - пульсационная амплитуда». Метод применен к 11 быстро осциллирующим химически пекулярным звездам. Проведено исследование стабильности возбужденных мод в быстро осциллирующих химически пекулярных звездах. Данные анализа пульсаций V_R свидетельствуют в пользу стабильности мод на шкале времени в несколько лет.

Предложены два новых метода измерения лучевых скоростей с использованием интерферометра Фабри-Перо (ИФП) на внешней установке перед эшелле спектрографом. Первый метод основан на измерениях интенсивностей в специально сформированных группах спектральных порядков ИФП, что позволяет определить изменение лучевой скорости только по изменению угла наклона ИФП. Второй метод основан на корреляционном измерении смещений интерференционных полос вдоль монохроматических изображений щели.

Предложен новый метод контроля положения звезды на входной апертуре спектрографа космической обсерватории «Спектр-УФ». Показано, что учет перемещений звезды в течение экспозиции позволяет, при соответствующей математической обработке, увеличить спектральное разрешение в 1.5-2 раза, а точность определения лучевой скорости - более, чем в три раза.

Научная и практическая ценность работы

В ходе выполнения диссертационной работы получен большой наблюдательный материал: автором измерено около 700 лучевых скоростей цефеид по наблюдениям, полученным на 1-м и 60-см телескопах Симеизского отделения КрАО, 70-см телескопе ГАИШ МГУ и 6-м телескопе БТА; автором получено и обработано более 1000 спектров $\text{H}\alpha$ звезд. По своему качеству этот наблюдательный материал соответствует общепринятым стандартам и может быть использован как для задач исследования кинематики Галактики, так и для исследования химического состава и других параметров звезд.

Программы расчета пульсационных радиусов, разработанные при участии автора, применяются для исследования радиальных пульсаций различных типов переменных звезд, в частности, звезд типа RV Tau, RR Lyr, CW Vir.

Моды пульсаций цефеид, определенные автором, уже используются для уточнения шкалы расстояний.

Оба предложенных интерферометрических метода успешно испытаны в наблюдениях на 6-метровом телескопе БТА.

Предложенный нами метод контроля положения звезды на входной апертуре спектрографа уже применен в конструкции орбитального спектрографа проекта «Всемирная Космическая Обсерватория - Ультрафиолет» («Спектр-УФ»).

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в научных учреждениях России, в которых ведутся исследования звездных пульсаций и звездных атмосфер: САО РАН, ИНАСАН, ГАО РАН, ГАИШ МГУ, кафедрах астрофизики и звездной астрономии, экспериментальной астрономии МГУ; астрономии, астрофизики СПбГУ; астрономии и космической геодезии КФУ; физики космоса ЮФУ, а также зарубежных обсерва-

ториях и университетах.

Апробация работы

Результаты работы представлялись в том числе в виде приглашенных докладов на российских и международных конференциях, в том числе на: IAU Coll. 176, «The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research» (Будапешт, 1999); IAU Coll. 183, «Small-Telescope Astronomy on Global Scales» (Тайвань, 2001); «New Horizons in Globular Cluster Astronomy» (Падуя, 2002); IAU Coll. 193, «Variable Stars in the Local Group» (Крайсчерч, 2003); IAU Symp. 224, «The A-Star Puzzle» (Попрад, 2004); «The Three-Dimensional Universe with Gaia» (Париж, 2005); IAU Symp. 232, «The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes» (Кейптаун, 2005); «Физика магнитных звезд» (САО РАН, 2006); V и VI Конференции «Spectral Line Shapes in Astrophysics» (Сербия, 2005 и 2007); «CP#AP Workshop» (Вена, 2007) «New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations» (Пуэрто Вайярта, 2007); «FUTURE DIRECTIONS IN ULTRAVIOLET SPECTROSCOPY: A Conference Inspired by the Accomplishments of the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Mission» (Мэриленд, 2008) «Ультрафиолетовая Вселенная 2008» (Москва, 2008); «Science with the new Hubble Space Telescope after Servicing Mission 4» (Болонья, 2008) «Interpretation of asteroseismic data» (Вроцлав, 2008); «Beyond JWST: The Next Steps in UV-Optical-NIR Space Astronomy» (Балтимор, 2009) «The Lyman alpha Universe» (Париж, 2009); «The Fourth Meeting on Hot Subdwarf Stars and Related Objects» (Шанхай, 2009); «Конференция, посвященная 100-летию Б.В.Кукаркина: Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy formation» (Звенигород, 2009) «Ультрафиолетовая Вселенная 2010» (Санкт-Петербург, 2010); «Магнитные звезды» (САО РАН, 2010); PLATO Science Conference (Берлин, 2011); Interdisciplinary Workshop on PLASMA PHYSICS (Мадрид, 2011).

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах САО РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ, семинарах Института астрономии ARIES (Индия), Института астрономии и астрофизики Бангалора (Индия), Университета Комплутенсе Мадрида (Испания), Института астрономии и астро-

физики Тюбингенского университета (Германия), Медонской обсерватории (Франция).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Определены астрофизические и технологические ограничения различных методов доплеровских измерений. Показано, что трудоемкий процесс снижения инструментальных ошибок, характерных для определенного метода доплеровских измерений, выгоднее заменить постановкой принципиально нового метода, основанного на другом диспергирующем элементе или новом сочетании последних.
2. Впервые определены радиусы для самой большой выборки классических цефеид Галактики (128 звезд). Получена зависимость «период - радиус». Результаты базируются на наблюдательном материале по лучевым скоростям цефеид, полученном при участии автора (около 700 измерений).
3. Впервые предложен метод определения мод пульсаций на основе анализа диаграммы «период - пульсационный радиус», являющийся самым надежным методом определения мод пульсаций. Уточнены моды пульсаций 128 цефеид.
4. Проведен частотный анализ 11 быстро осциллирующих химически пекулярных звезд на основе оригинальных измерений лучевых скоростей, выполненных по индивидуальным спектральным линиям с характерной точностью от 10 до 50 м/с. Результаты спектральных наблюдений быстро осциллирующих химически пекулярных звезд (автором получено более 1000 и обработано более 4000 спектров). Использование лучевых скоростей даже при гораздо меньшем количестве наблюдений, чем фотометрические, позволило обнаружить для ряда звезд новые пульсационные частоты.
5. Предложен метод исследования распространения пульсационной волны в атмосферах быстро осциллирующих химически пекулярных звезд на основе анализа диаграмм «пульсационная фаза - пульсационная

амплитуда». Метод применен к 11 гоAr звездам. Определены общие пульсационные характеристики быстро осциллирующих химически пекулярных звезд.

6. Проведено исследование стабильности возбужденных мод в быстро осциллирующих химически пекулярных звездах. Данные анализа пульсаций V_R свидетельствуют в пользу стабильности мод на шкале времени в несколько лет.
7. Рассмотрены два новых метода наземных доплеровских измерений, основанные на сочетании интерферометра Фабри-Перо с эшелле спектрографом. Данные методы свободны от инструментальных ошибок и технологических ограничений, характерных для дифракционной спектроскопии, отличаются повышенным спектральным разрешением и светосилой, что позволит использовать 1-2м телескопы для решения наблюдательных задач, выполняемых в настоящее время только с помощью крупнейших телескопов. Предложен новый метод орбитальных доплеровских измерений, основанный на одновременных спектроскопических и позиционных наблюдениях и включающий непрерывный контроль положения звезды в пределах входной апертуры эшелле спектрографа. По сравнению с существующим подходом, применение данного метода обеспечит более чем трехкратное повышение точности определений лучевых скоростей.

Содержание работы

Диссертация состоит из 6 Глав, Введения и Заключения. Работа изложена на 321 странице, включает 37 рисунков, 9 таблиц и список литературы, состоящий из 356 наименований.

Во **Введении** дается общая характеристика работы, определяются цели, обосновывается актуальность и научная новизна, а также практическая ценность полученных результатов, формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций по результатам работы.

В первой главе «**Методы доплеровских измерений**» представлено описание истории и современного состояния проблемы. Исследователи

до сих пор используют результаты определения лучевых скоростей звезд, выполненные более века тому назад. В связи с этим в работе определенное внимание уделено инструментальным ошибкам и техническим особенностям полутора десятков методов доплеровских измерений в оптическом диапазоне и их разновидностей, включая и малоиспользуемые сегодня. Рассмотрены технологические ограничения на точности различных методов. Для большинства методов измерения лучевых скоростей ошибки V_R определяются не шумами приемника, а инструментальными эффектами. В методах, использующих спектрографы с малой шириной входной щели, ошибки V_R связаны, главным образом, с нестабильностями системы «телескоп-спектрограф», в широкощельных методах - с режимом освещенности на входе в спектрограф. Различные методы, рассмотренные в этой главе, объединены также проблемой рассогласования научного и опорного каналов. Далее в главе рассматриваются астрофизические эффекты (в частности, грануляция, гравитационное покраснение, пятнистость, истечение вещества), ограничивающие однозначную трактовку термина «лучевая скорость центра звезды» при достижении очередного предела точности измерений.

Корреляционный измеритель лучевых скоростей имеет ряд принципиальных ограничений, в частности, из-за неодинаковых доплеровских сдвигов для центра и краев одного и того же порядка эшелле спектра. Как в одноканальных, так и в многоканальных корреляционных методах проблему представляет изменение функции рассеяния точки по полю камерного объектива. Оптоволоконные системы снижают эффект неоднородности освещенности щели, но не устраняют его полностью. Эффект различного заполнения оптики спектрографа от исследуемого объекта и от канала калибровки ограничивает точность V_R на уровне 50 м/с.

Вторая глава **«Исследование классических цефеид с помощью одноканальных корреляционных методов»** посвящена исследованиям радиально пульсирующих звезд. Данные исследования выполнены с применением корреляционного измерителя лучевых скоростей, в связи с этим в первых разделах приведены теоретическое обоснование метода, конструктивные особенности приборов и оценки их эффективности. Представлен обзор наблюдательного материала, полученного, в том числе, автором дис-

сертации. В подавляющем большинстве работ, посвященных определению лучевых скоростей цефеид, проведено сравнительно небольшое число измерений V_R для каждой звезды (как правило, 2-5, редко 10), что позволяет оценить ее среднюю скорость с точностью 3-5 км/с. Этого обычно достаточно для изучения кинематики, т.к. дисперсия скоростей цефеид составляет около 12 км/с [2]. При отсутствии хорошего покрытия всех фаз кривой лучевых скоростей для оценки средней скорости цефеиды часто используется инвертированная, нормированная и сдвинутая по пульсационной фазе средняя кривая блеска [2]. Однако, сравнение высокоточных кривых лучевых скоростей с качественными кривыми блеска показало, что в большинстве случаев кривые блеска и лучевых скоростей не являются зеркальными отражениями друг друга и имеют существенно различную форму [3]. С 1988 г. московская группа ИНАСАН и ГАИШ МГУ, в которую входит автор диссертации, проводит систематические наблюдения лучевых скоростей классических цефеид, поставив задачу получения длительных рядов измерений с плотным покрытием фазовых кривых. К 2011 году получено более 11 000 измерений лучевых скоростей 171 звезды (около 72% от всего мирового массива опубликованных данных по цефеидам северного неба). При этом высокоточные кривые изменения лучевых скоростей 89 цефеид были получены впервые [4, 5]. Этот массив однородных и высокоточных измерений сейчас является самым обширным в мире.

Далее в главе приводятся результаты определения пульсационных радиусов классических цефеид. Основная идея метода заключается в том, что на любой фазе пульсаций индикатором скорости изменения радиуса звездной фотосферы dR/dt является лучевая скорость звезды V_R , которую можно рассматривать как средневзвешенное значение проекции скорости оболочки на луч зрения (с учетом потемнения к краю диска звезды). Поэтому, интегрируя кривую изменения лучевых скоростей, мы можем рассчитать кривую изменения линейного радиуса фотосферы и средний радиус звезды. Для этой цели одновременно используются спектральные наблюдения (ряд лучевых скоростей) и фотоэлектрическая кривая изменения блеска. Для определения пульсационных радиусов был выбран метод, предложенный Л.Балона [6], который нам удалось существенно модифицировать

при его реализации [3]. Важным преимуществом метода является независимость результатов определения радиусов от межзвездного поглощения. Основываясь только на собственных измерениях лучевых скоростей, нами были получены оценки радиусов для самой большой однородной выборки северных цефеид (64 классических, 13 малоамплитудных и 7 бимодальных цефеид). С привлечением опубликованных данных по цефеидам южного полушария, имеющим удовлетворительные фотометрические наблюдательные данные [7], были получены оценки радиусов для 128 звёзд Галактики. Это самая большая выборка цефеид (почти в три раза больше, чем самые представительные выборки цефеид, ранее использованные другими авторами для этих целей), для которой нами определены радиусы на основе однородных наблюдательных данных. Была получена зависимость «период-радиус»: $\log R = 1.09(\pm 0.04) + 0.74(\pm 0.04) \times \log P_0$, являющаяся в настоящее время самой надёжной и точной.

В главе описывается предложенный нами метод определения мод пульсаций цефеид. Неоднозначность в идентификации мод является серьёзной проблемой при определении светимостей цефеид (ошибка до $0^m.65$!), а также при использовании этих звёзд для задач кинематики Галактики. Все существовавшие подходы для разделения цефеид по модам пульсаций использовали зависимости параметров Фурье-разложения кривых блеска от логарифма периода (например, [8, 9]) и практически оказывались неприменимы для диапазонов периодов $0.6 \leq \log P \leq 0.8$ и $0.2 \leq \log P \leq 0.4$. Автором был предложен метод определения моды пульсации цефеид, основанный на анализе зависимости «период - радиус». С помощью этого метода были уточнены моды пульсаций цефеид (было обнаружено 13 цефеид с неверной идентификацией мод), что позволило объяснить различия в результатах применения метода статистических параллаксов к короткопериодическим ($P \leq 10$ суток) и долгопериодическим ($P \geq 10$ суток) цефеидам [10].

Полученные измерения лучевых скоростей цефеид сделали возможным уточнение или определение средних скоростей звёзд, которые были использованы в работах [11, 12] для детального изучения кинематики галактического диска совместно с данными о собственных движениях. Выведена

наиболее точная кривая вращения, оценены параметры эллипсоида остаточных скоростей и параметры спирального узора (угол закрутки и амплитуды возмущений поля скоростей). В заключение в главе приводятся результаты измерения лучевых скоростей и определения радиусов переменных типа RV Тельца.

Третья глава **«Доплеровские измерения с многоканальными приемниками»** посвящена современным методам наблюдений с использованием эшелле спектрографов. Анализируются два основных метода измерений доплеровских смещений: корреляционный и классический, в которых измеряются положения отдельных линий. Описаны используемые системы обработки спектров. Для методов, ограниченных шумами считывания, рассмотрен вопрос оптимизации спектрального разрешения в задаче измерения различных параметров спектральных линий. Анализируются конструктивные особенности спектрографов, использованных при выполнении данного исследования, оценены инструментальные ошибки. Показано, что в задаче доплеровских измерений важную роль играют стабилизаторы положения изображения звезды на входе в спектрограф. Исследованы ошибки V_R , вносимые применением резателей изображения. Рассматривается роль оптоволоконных эшелле спектрографов в задаче повышения точности определения V_R . Показано, что при использовании современных дифракционных спектрографов резервы в задаче доплеровских измерений исчерпаны.

Четвертая глава **«Исследования пульсаций α звезд методами спектроскопии»** посвящена исследованию нерадиальных пульсаций в атмосферах быстро осциллирующих химически пекулярных A звезд. Эти звезды характеризуются: сильными аномалиями химического состава, в частности, редкоземельных элементов; сильными магнитными полями с величиной до 24.5 кГс [13, 14]; неоднородным распределением элементов, как по горизонтали (пятна), так и по вертикали (стратификация); пульсациями с периодами в диапазоне 5.6 - 21.2 минут и типичной амплитудой изменения блеска в несколько тысячных звездной величины в присутствии, как правило, вращательной модуляции и модуляции, вызванной биениями близких частот. Дано описание предложенного метода исследования распространения волны в атмосфере. Информация, полученная по линиям, образованным

на различных оптических глубинах, открывает доступ к различным модам и может быть использована для получения вертикальной томографической карты пульсирующей атмосферы. Далее в главе обсуждаются примененные способы увеличения точности определения пульсационного сигнала при использовании лучевых скоростей, методы измерения лучевых скоростей по отдельным спектральным линиям, а также описывается последовательное применение предложенного метода к индивидуальным γ Ar звездам. Несмотря на тот факт, что пульсационное поведение различных γ Ar звезд не идентично, нами были впервые обнаружены обобщенные характеристики распространения пульсационной волны в атмосфере.

Предложенный нами метод анализа диаграмм «фаза-амплитуда» является мощным инструментом для изучения вертикальной структуры p -мод в атмосферах γ Ar звезд. Проведенный пульсационный анализ лучевых скоростей демонстрирует сходство особенностей распространения пульсационных волн в γ Ar атмосферах. С помощью предложенного метода нами было обнаружено, что пульсационная волна либо характеризуется постоянной фазой и изменяющейся амплитудой с высотой в атмосфере, либо у нее наблюдается зависимость от оптической глубины обоих этих параметров. Первый случай интерпретируется как признак стоячей волны, второй - как доказательство распространяющейся (бегущей) волны в звездной атмосфере. В целом, атмосферные пульсационные колебания в γ Ar звездах могут быть представлены в виде суперпозиции стоячих и бегущих волн. Основываясь на наших исследованиях, можно сделать вывод о распространяющейся волне от самых глубоких слоев в атмосферах трех γ Ar звезд, HD 24712, HD 134214 и α Cir, частоты пульсаций которых близки или ниже акустических пределов. В звездах с большими периодами пульсаций, стоячие волны наблюдаются лишь до некоторых слоев атмосферы, определяемых глубинами формирования линий конкретных элементов, в то время как бегущие волны доминируют выше в атмосфере. Нами также было обнаружено, что характер распространения волны, напоминающий переход от стоячей волны к бегущей, зависит от эффективной температуры звезды. При одних и тех же периодах пульсаций в более горячих звездах бегущая волна развивается глубже в атмосфере, чем в более холодных звездах. За исключением 33 Lib и

10 Aql, во всех остальных звездах независимо от атмосферных и пульсационных параметров, волна распространяется через слои, определяемые одной и той же последовательностью ионов. Самые низкие амплитуды наблюдаются для линий Eu II, далее пульсации распространяются в слоях, где образуется ядро линии H_α и линии Nd и Pr. Пульсации достигают максимума амплитуды приблизительно на этой высоте в атмосфере, а затем уменьшаются к более верхним слоям атмосферы для большинства звезд. Максимум лучевых скоростей для линий дважды ионизованных редкоземельных элементов всегда наблюдается позднее по времени, чем для однократно ионизованных. Максимальные фазы и амплитуды как правило наблюдаются в линиях Tb III и Th III. Пульсации линий Th обнаружены нами впервые. Схожесть особенностей распространения пульсационной волны в атмосферах изученных γ Ar звезд позволяет сделать предположение, что слои, обогащенные различными редкоземельными элементами, расположены примерно в одном и том же порядке по высоте во всех таких звездах. Пульсационное поведение звезд 33 Lib и 10 Aql отличается вследствие наличия нода (узла) в их атмосферах. Нод в атмосфере звезды 10 Aql был обнаружен впервые нами.

Далее в главе представлены результаты определения соотношения между фазой максимума блеска и фазой максимума лучевых скоростей, проведенного на основе фотометрического мониторинга γ Ar звезд с помощью мини-спутника MOST и одновременных спектральных исследований γ Ar звезд. Осуществленный в работе частотный анализ показал преимущества даже сравнительно немногочисленных спектральных данных высокого разрешения перед фотометрическими при исследовании этого класса звезд. Обнаруженные новые частоты были использованы нами для задач астросейсмологии при определении большого частотного интервала, в частности, величина $\Delta\nu = 51$ мкГц для звезды 10 Aql. Самый богатый частотный спектр был получен нами в случае проведения спектрального мониторинга пульсаций звезды γ Eri с помощью спектрографа НЭС БТА [15] в 2008-2010 гг с привлечением архивных данных САО РАН. Представлены результаты исследования стабильности p -мод в γ Ar звездах. Данные анализа пульсаций V_R свидетельствуют в пользу стабильности мод на шкале времени по крайней мере в несколько лет. В главе представлены также результаты поиска

пульсаций в звездах - кандидатах в гоАр. Для исследованных звезд определены верхние пределы амплитуд V_R возможных пульсаций: HD 115708 по наблюдениям на спектрографе ОЗСП (БТА) - 100 м/с, а для звезды HD 103498 по наблюдениям на спектрографе FIES (NOT) - 80 м/с.

В пятой главе «**Интегральные методы в астрономической спектроскопии**» представлен анализ перспектив измерения лучевых скоростей звезд с использованием как методов определения интегральных характеристик спектральных линий, так и методов, позволяющих измерять отдельные линии или выборки линий. Основной задачей было определить, существуют ли резервы повышения эффективности наблюдений (увеличение спектрального разрешения, светосилы по потоку, или сокращение времени накопления сигнала), оставаясь в рамках класса 1-2м телескопов, доступных для выполнения долгосрочных программ измерений V_R . Сделан обзор интегральных методов и рассмотрены два новых метода, основанные на комбинации интерферометра Фабри-Перо с эшелле спектрографом. Первый метод сочетает достоинства многоцелевой (механической) модуляции спектра с высокой широкощельностью ИФП. Суть метода состоит в группировке спектральных порядков ИФП, приходящихся на коротковолновые и длинноволновые крылья линий, с последующим анализом интенсивностей, измеренных в данных группах. Изменение лучевой скорости между двумя такими наблюдениями определяется путем измерения угла наклона пластин ИФП. Второй метод состоит в корреляционном измерении положения полос интерференционной картины в направлении вдоль проекции изображения щели спектрографа. Оба метода испытаны на БТА при сочетании ИФП с эшелле спектрографом НЭС. Определено, что эффективным развитием второго метода является замена ИФП на интерферометр Майкельсона с постоянным сдвигом.

Показано, что при близких потерях света на входной щели, применение сканирующего ИФП позволяет увеличить спектральное разрешение (при наблюдениях на существующих спектрографах БТА) приблизительно в 6-7 раз. Интегральные методы позволяют на телескопах 2-м класса либо увеличить проникающую способность измерений доплеровских смещений, либо сократить экспозиции до значений, позволяющих использовать спектральные данные для задач астросейсмологии. Оба метода свободны

от ошибок, связанных с нестабильностями дифракционного спектрографа и светоприемника, а также с неоднозначностями построения дисперсионных кривых.

Шестая глава «**Измерения лучевых скоростей звезд с помощью орбитальных телескопов**» посвящена проблемам и перспективам измерений лучевых скоростей звезд при наблюдениях с инструментами, размещаемыми на космических аппаратах. Приведен анализ работы спектрографов космического телескопа им. Хаббла (HST). Внутренняя точность определений V_R на спектрографе HST STIS ($R \approx 100000$) составляет от 100 м/с до 2 км/с, а точность относительно наземных определений - 2.2 км/с [16]. В главе дано описание комплекса научной аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ» («Всемирная Космическая Обсерватория - Ультрафиолет»), в частности, блока спектрографов, пригодных для измерения лучевых скоростей. При проектировании спектрографов высокого разрешения и разработке технического задания на блок обработки научных данных нами решена проблема высокоточных доплеровских измерений с подвижной платформы. Во-первых, предусмотрены хранение и экспресс-обработка результатов покадровой регистрации спектров. Это позволит учитывать траекторные данные для (многократной в течение накопления каждого спектра) доплеровской коррекции координат событий, с учетом номера порядка эшелле спектра и положения события в спектральном порядке. Таким образом, снимается проблема, к какому моменту времени относить гелиоцентрическую поправку, вычисленную для середины (или для центра тяжести по накопленному сигналу) продолжительной экспозиции. Во-вторых, координаты событий могут быть скорректированы и с учетом перемещений центра изображения (размер ≈ 20 мкм) звезды в пределах входной апертуры (размер 80 мкм) спектрографа. Для контроля положения звезды в пределах входной апертуры спектрографа нами предложен дополнительный координатно-фотометрический канал, работающий в спектральном диапазоне, не используемом в спектрографе. Показано, что при мониторинге положения звезды относительно центра входной апертуры с последующей совместной обработкой данных спектрального и координатно-фотометрического каналов точность измерений V_R становится независимой от работы системы тонкой

коррекции положения телескопа, и может быть увеличена более чем втрое. Этот метод дает существенное увеличение спектрального разрешения по сравнению с определенными размерами входной апертуры и абберациями оптической схемы, что, в свою очередь, обеспечит повышение точности доплеровских измерений. Кроме того, метод предоставляет возможность значительной экономии ресурса системы тонкой коррекции положения телескопа, что позволяет увеличить время активной жизни космической обсерватории. Поэтому требования к траекторным измерениям обсерватории сформулированы в том числе с учетом задач продолжительного мониторинга лучевых скоростей звезд. В главе также приведены оценки параметров эффективности спектрографов проекта «Спектр-УФ» относительно других проектов.

В **Заключении** кратко изложены основные результаты работы.

Публикации по теме диссертации

Результаты работы отражены в 61 публикации.

1. Gorynya, N.A., Samus, N.N., Berdnikov, L.N., Rastorguev, A.S., and Sachkov M.E. «Orbital parameters of six spectroscopic binary Cepheids» 1995, Inf. Bull. Var. Stars, No.4199, P.1-4.
2. Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Расторгуев А.С., Сачков М.Е. «Каталог лучевых скоростей цефеид, измеренных в 1992-1995 с корреляционным спектрометром» 1996, Письма в АЖ, Т.22, №3-4, с.198-230.
3. Sachkov, M.E. «Radial velocity curves and first calculations of the radii for four double-mode Cepheids» 1997, Inf. Bull. Var. Stars, No.4484, P.1-4.
4. Sachkov, M.E. «Radii of low-amplitude Cepheids and their pulsation mode» 1997, Inf. Bull. Var. Stars, No.4522, P.1-4.
5. Mkrtichian, D.E., Samus, N.N., Gorynya, N.A., Antipin, S.V., North, P., Rastorguev, A.S., Glushkova, E.V., Smekhov, M.G., and Sachkov, M.E. «The radial velocity of the roAp star gamma Equ» 1998, Inf. Bull. Var. Stars, No.4564, P.1-4.
6. Сачков М.Е., Расторгуев А.С., Самусь Н.Н., Горыня Н.А. «Радиусы 62 классических цефеид» 1998, Письма в АЖ, Т.24, №5-6, с.443-449.

7. Горыня Н.А., Самусь Н.Н., Сачков М.Е., Расторгуев А.С., Глушкова Е.В., Антипин С.В. «Каталог лучевых скоростей цефеид, измеренных в 1995-1998 с корреляционным спектрометром» 1998, Письма в АЖ, Т.24, №11-12, с. 939-942.
8. Antipin, S.V., Gorynya, N.A., Sachkov, M.E., Samus, N.N., Berdnikov, L.N., Rastorguev, A.S., and Glushkova, E.V. «The radial velocity of double-mode Cepheid BD -10° 4669» 1999, Inf. Bull. Var. Stars, No.4718, P.1-4.
9. Сачков М.Е. «Две зависимости период-радиус классических цефеид: определение моды пульсаций и шкала расстояний» 2002, Письма в АЖ, Т.28, с.653-657.
10. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Ilyin, I.; Kochukhov, O.; Luftinger, T. «Radial velocity pulsations in the atmosphere of the roAp star HD 24712» 2004, in Proc. IAU Symp. 224, The A-Star Puzzle eds. J. Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, and W.W. Weiss Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004., p.770
11. Kochukhov, O.; Piskunov, N.; Sachkov, M.; Kudryavtsev, D. «Inhomogeneous distribution of mercury on the surfaces of rapidly rotating HgMn stars» 2005, Astronomy and Astrophysics, V. 439, p.1093
12. Sachkov, M., Ryabchikova, T. «Spectroscopic observations of pulsations in roAp stars» 2006, in Proc. IAU Symp. 232, The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes, eds. Patricia Ann Whitelock; Michel Dennefeld; Bruno Leibundgut. Cambridge: Cambridge University Press, 2006., pp.300
13. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Bagnulo, S.; Ilyin, I.; Kallinger, T.; Kochukhov, O.; Leone, F.; Lo Curto, G.; Luftinger, T.; Lyashko, D.; Magazzu, A.; Saio, H.; Weiss, W. W. «Spectroscopy of roAp star pulsation: HD 24712» 2006, Memorie della Societa Astronomica Italiana, v.77, p.397
14. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Bagnulo, S.; Ilyin, I.; Kallinger, T.; Kochukhov, O.; Leone, F.; Lo Curto, G.; Luftinger, T.; Lyashko, D.;

- Magazzu, A.; Mashonkina, L.; Weiss, W. W. «Spectroscopic study of the pulsations in the roAp star HD 24712» 2006, Communications in Asteroseismology, V. 147, P. 97
15. Ryabchikova, T.; Sachkov, M.; Weiss, W. W.; Kallinger, T.; Kochukhov, O.; Bagnulo, S.; Ilyin, I.; Landstreet, J. D.; Leone, F.; Lo Curto, G.; Luftinger, T.; Lyashko, D.; Magazzu, A. «Pulsation in the atmosphere of the roAp star HD 24712. I. Spectroscopic observations and radial velocity measurements» 2007, Astronomy and Astrophysics, V. 462, P.1103
 16. Ryabchikova, T.; Sachkov, M.; Kochukhov, O.; Lyashko, D. «Pulsation tomography of rapidly oscillating Ap stars. Resolving the third dimension in peculiar pulsating stellar atmospheres» 2007, Astronomy and Astrophysics, V.473, P. 907-922
 17. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Kochukhov, O.; Lyashko, D. «Vertical structure of the roAp stars atmospheres» 2007, Communications in Asteroseismology, V. 150, P.81
 18. Sachkov, M.; Kochukov, O.; Ryabchikova, T.; Leone, F.; Bagnulo, S.; Weiss, W. W. «Spectroscopic study of pulsations in the atmosphere of roAp star 10 Aql» 2008, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, vol. 38, no. 2, p. 323-328
 19. Семенко Е.А., Сачков М.Е., Рябчикова Т.А., Кудрявцев Д.О., Пискунов Н.Е. «Исследование химического состава и поиск нерадиальных пульсаций в атмосфере химически peculiarной звезды HD 115708» 2008, Письма в АЖ, Т.34, №6, с.455-464.
 20. Sachkov, M.; Kochukhov, O.; Ryabchikova, T.; Huber, D.; Leone, F.; Bagnulo, S.; Weiss, W.W. «Pulsations in the atmosphere of the rapidly oscillating Ap star 10 Aquilae» 2008, MNRAS, 389, 903
 21. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Gruberbauer, M.; Kochukhov, O. «On the excited mode stability in the roAp star gamma Equ» 2008, Communications in Asteroseismology, V.157, p.363-364

22. Панчук В.Е.; Сачков М.Е.; Якопов М.В. «О пользе неклассических представлений астрономических спектров» 2008, *Odessa Astronomical Publications*, Vol.21, pp. 85-87
23. Shustov, B.; Sachkov, M.; Gómez de Castro, A.I.; Maohai, Huang; Werner, K.; Kappelman, N.; Pagano, I. «WSO-UV - Ultraviolet Mission for the Next Decade» 2009, *Astrophysics and Space Science*, V. 320, Issue 1-3, pp. 187-190
24. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, М.Е.Сачков, М.В.Юшкин «Техника определений лучевых скоростей звезд» 2009, *Кинематика и физика небесных тел*, Т.6, дополнение, с.391-395
25. М.Е.Сачков, А.С.Расторгуев, В.Е.Панчук «Лучевые скорости звезд» 2009, *Кинематика и физика небесных тел*, Т.6, дополнение, с. 253-263
26. Joshi, S.; Ryabchikova, T.; Kochukhov, O.; Sachkov, M.; Tiwari, S. K.; Chakradhari, N. K.; Piskunov, N. «Time-resolved photometric and spectroscopic analysis of the luminous Ap star HD103498» 2010, *MNRAS*, Vol. 401, pp. 1299-1307
27. Saio, H.; Ryabchikova, T.; Sachkov, M. «Pulsations in the atmosphere of the roAp star HD24712 - II. Theoretical models» 2010, *MNRAS*, Vol.403, pp. 1729-1738
28. Панчук В.Е., Сачков М.Е., Юшкин М.В., Якопов М.В. «Интегральные методы в астрономической спектроскопии» 2010, *Астрофизический бюллетень*, Т.65, с. 78-99
29. Sachkov, M. «UV observations of sdB stars and prospects of WSO-UV mission for such studies» 2010, *Astrophys. Space Sci*, Vol. 329, pp. 261-266
30. Reutlinger, A.; Sachkov, M.; Gál, C.; Brandt, C.; Haberler, P.; Zuknik, K.-H.; Sedlmaier, T.; Shustov, B.; Moisheev, A.; Kappelman, N.; Barnstedt, J.; Werner, K. «Using the CeSiC material for the WSO-UV spectrographs» 2011, *Astrophys. Space Sci*, DOI 10.1007/s10509-011-0701-2

31. Sachkov, M.E. «Cepheids radial velocities and phase lag» 2000, in Proc. IAU Coll. 176, The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research, eds. Szabados L., Kurtz D.W., Budapest, Aug 1999, ASP Conf. Ser., Vol. 203, P.240-241.
32. Gorynya, N.A., Samus, N.N., Sachkov, M.E., Antipin, S.V., and Rastorguev, A.S. «New results of Moscow Cepheid radial velocity programme» 2000, in Proc. IAU Coll. 176, The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research, eds. Szabados L., Kurtz D.W., Budapest, Aug 1999, ASP Conf. Ser., Vol. 203, P.242.
33. Sachkov, M.E., Glushkova, E.V., and Rastorguev, A.S. «Systematic spectroscopic observations on small telescopes: past and future research of stellar kinematics» 2001, in Proc. IAU Coll. 183, Small-Telescope Astronomy on Global Scales, eds. W.P.Chen, B.Patchinsky, Taiwan, Jan 2001, ASP Conf. Ser., V.246, P.327
34. Sachkov, M.E., and Rastorguev, A.S. «Radial Velocity Observations and Radius Determination of Pulsating Stars in Globular Cluster M5» 2003, in Proc. conf. , held 24-28 June 2002 at Dipartimento di Astronomia, Universita' di Padova, Padova, Italy, New Horizons in Globular Cluster Astronomy eds. G.Piotto, G.Meylan, S.George Djorgovski and M.Riello, ASP Conf. Ser., V.296, P. 309
35. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Kochukhov, O.; Weiss, W. W.; Reegen, P.; Landstreet, J. D. «Pulsational velocity fields in the atmospheres of two roAp stars HR 1217 and gamma Equ» 2004, in Proc. IAU Coll. 193, Variable Stars in the Local Group eds. Donald W. Kurtz and Karen R. Pollard, ASP Conf. Ser., V.310, P.208
36. Sachkov, M., Ryabchikova, T. «Pulsations in the atmospheres of Ap stars» 2005, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement, v.7, p.93
37. Zabolotskikh, M.V.;Sachkov, M.E.;Berdnikov, L.N.;Rastorguev, A.S.; Egorov, I.E. «The Classification of Cepheids by Pulsation Modes and the Problem of the Distance scale» 2005, Proceedings of the Gaia

Symposium «The Three-Dimensional Universe with Gaia». eds. C. Turon, K.S. O’Flaherty, M.A.C. Perryman ESA SP-576, P.723

38. Kappelman, N.; Barnstedt, J.; Gringel, W.; Werner, K.; Becker-Ross, H.; Florek, S.; Graue, R.; Kampf, D.; Reutlinger, A.; Neumann, C.; Shustov, B.; Sachkov, M.; Panchuk, V.; Yushkin, M.; Moisheev, A.; Skripunov, E. «HIRDES UV spectrographs» 2006, Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray. Eds. Turner, Martin J. L.; Hasinger, Gunther. Proceedings of the SPIE, Volume 6266, pp. 62660X
39. Sachkov, M.; Ryabchikova, T.; Kochukhov, O.; Lyashko, D. «Propagation of pulsation waves in roAp atmospheres» 2007, in Physics of Magnetic Stars. Proceedings of the International Conference, held in the Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, August 28-31, 2006, Eds: I. I. Romanyuk and D. O. Kudryavtsev, p. 315-324
40. Mashonkina, L.; Sachkov, M. «Spectroscopic methods in modern astrophysics» 2007, in Spectroscopic methods in modern astrophysics, held at the Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 13- 15 September 2006. Published by «Yanus-K», Moscow, Russia
41. Sachkov, M.; Ryabchikova, T. «Pulsation analysis of roAp stars» 2007, in Spectroscopic methods in modern astrophysics. Proceedings of the conference held 13-15 September 2006, Moscow, Russia. Eds. L. Mashonkina, M. Sachkov, p. 255-270
42. Sachkov, M. «World Space Observatory-Ultraviolet: International Mission for UV Spectroscopy and Imaging» 2007, in VI Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (VI SCSLSA). AIP Conference Proceedings, Volume 938, pp. 148-155
43. Sachkov, M. «Pulsations of Rapidly Oscillating Ap Stars and Vertical Structure of their Atmospheres» 2007, in VI Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics (VI SCSLSA). AIP Conference Proceedings, Volume 938, pp. 183-189

44. Huang, Maohai; Barstow, M.A.; Chen, Zhiyuan; Lapington, J.S.; Sachkov, M.; Shustov, B.; Song, Qian; Wang, Sen «The long slit spectrograph onboard the World Space Observatory - Ultraviolet» 2008, Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Turner, Martin J. L.; Flanagan, Kathryn A. Proceedings of the SPIE, Volume 7011, pp. 70111Y-70111Y-8
45. Шустов Б.М., Сачков М.Е., Кильпио Е.Ю. «Ультрафиолетовая Вселенная II» 2008 Труды всероссийской конференции прошедшей 19-20 мая 2008 г., Москва, Россия, издательство «Янус-К».
46. Расторгуев А.С., Заболотских М.В., Сачков М.Е. «Галактическая астрономия в УФ» 2008 Труды всероссийской конференции прошедшей 19-20 мая 2008 г., Москва, Россия, издательство «Янус-К», с.239
47. Рябчикова Т.А., Машонкина Л.И., Сачков М.Е. «Прецизионная спектроскопия звезд в ультрафиолете» 2008 Труды всероссийской конференции прошедшей 19-20 мая 2008 г., Москва, Россия, издательство «Янус-К», с.168.
48. Шустов Б.М., Боярчук А.А., Моишеев А.А., Сачков М.Е. «Всемирная космическая обсерватория - ультрафиолет», 2008 Труды всероссийской конференции прошедшей 19-20 мая 2008 г., Москва, Россия, издательство «Янус-К», с.7.
49. Klochkova, V.; Panchuk, V.; Sachkov, M.; Yushkin, M. «Efficiency of Selected UV Space Based Spectrometers» 2009, in New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations, Proceedings of the International Conference held in Puerto Vallarta, Mexico, April 16-20, 2007. Eds.: M. Chavez, E. Bertone, D. Rosa-Gonzalez, and L. H. Rodriguez-Merino, Springer, p. 337-340
50. Gómez de Castro, A.I.; Pagano, I.; Sachkov, M.; Lecavelier Des Étangs, A.; Piotto, G.; Gonzáles, R.; Shustov, B. «Science with the World Space Observatory - Ultraviolet» 2009, in New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations, Proceedings of

- the International Conference held in Puerto Vallarta, Mexico, April 16-20, 2007. Eds.: M. Chavez, E. Bertone, D. Rosa-Gonzalez, and L. H. Rodriguez-Merino, Springer, p. 319-327
51. Pagano, I.; Sachkov, M.; Gomez de Castro, A. I.; Huang, M.; Kappelman, N.; Scuderi, S.; Shustov, B.; Werner, K.; Zhao, G. «The Focal-plane Instruments on Board WSO-UV» 2009, in *New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations*, Proceedings of the International Conference held in Puerto Vallarta, Mexico, April 16-20, 2007. Eds.: M. Chavez, E. Bertone, D. Rosa-Gonzalez, and L. H. Rodriguez-Merino, Springer, p. 309-318
 52. Sachkov, M.; Gómez de Castro, A.I.; Pagano, I.; Torres, F.; Zaiko, Yu.; Shustov, B. «World Space Observatory-UltraViolet: International Space Mission for the Nearest Future» 2009, in *New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations*, Proceedings of the International Conference held in Puerto Vallarta, Mexico, April 16-20, 2007. Eds.: M. Chavez, E. Bertone, D. Rosa-Gonzalez, and L. H. Rodriguez-Merino, Springer, p.301-308
 53. Werner, K.; Shustov, B.; Sachkov, M.; Gómez de Castro, A.I.; Huang, Maohai; Kappelman, N.; Zhao, Gang «WSO-UV - Ultraviolet Mission for the Next Decade» 2009, in *FUTURE DIRECTIONS IN ULTRAVIOLET SPECTROSCOPY: A Conference Inspired by the Accomplishments of the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Mission*. AIP Conference Proceedings, Volume 1135, pp. 314-317
 54. Saio, Hideyuki; Ryabchikova, Tanya; Sachkov, Mikhail «Modelling the Pulsations of the roAp Star HR 1217» 2009, in *STELLAR PULSATION: CHALLENGES FOR THEORY AND OBSERVATION*: Proceedings of the International Conference. AIP Conference Proceedings, Volume 1170, pp. 512-516
 55. Vallejo, J. C.; Lozano, J. M.; Vazquez, R.; Yanez, J.; Gomez, A. I.; Zaiko, Y.; Sachkov, M. «Planning and Scheduling Systems Within the WSO-UV Observatory» 2009, in *Astronomical Data Analysis Software*

- and Systems XVIII ASP Conference Series, Vol. 411, proceedings of the conference held 2-5 November 2008 at Hotel Loews Le Concorde, Quebec City, QC, Canada. Edited by David A. Bohlender, Daniel Durand, and Patrick Dowler. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009., p.523
56. Malkov, O.; Sachkov, M.; Shustov, B.; Kaigorodov, P.; Yannez, F.J.; Comez de Castro, A.I. «Time allocation scheme for the WSO-UV mission» 2009, Proceedings of Science, V.5, pp.31-37
57. Gomez de Castro, A.I.; Shustov, B.; Sachkov, M.; Kappelmann, N.; Huang, M.; Werner, K. «The Space Telescope for Ultraviolet Astronomy WSO-UV» 2010, in Highlights of Spanish Astrophysics V, Astrophysics and Space Science Proceedings. J.M.Diego et al. (eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, pp. 219-225
58. Sachkov, M.; Ryabchikova, T. «Spectroscopic Study of Pulsations in roAp Stars» 2010, in VARIABLE STARS, THE GALACTIC HALO AND GALAXY FORMATION. C. Sterken, N. Samus and L. Szabados (Eds.) pp. 71-74
59. Kanev, E.; Sachkov, M. «Radial Velocities and Radii of Galactic Cepheids» 2010, in VARIABLE STARS, THE GALACTIC HALO AND GALAXY FORMATION. C. Sterken, N. Samus and L. Szabados (Eds.) p. 208
60. Lozano, J. M.; Molina Cobos, M.A.; Gomez de Castro, A.I.; Sachkov, M.; Zaiko, Yu. «Shared Operations within the WSO-UV Observatory» 2010, Space Optics, Vol.213993, pp. 693-703
61. Reutlinger, A.; Gál, C.; Brandt, C.; Haberler, P.; Zuknik, K.-H.; Sedlmaier, T.; Shustov, B.; Sachkov, M.; Moisheev, A.; Kappelmann, N.; Werner, K. «Using CeSiC for UV Spectrographs for the WSO-UV» 2010, in International Conference on Space Optics

В публикациях, выполненных с соавторами, личный вклад автора заключается в следующем:

в публикациях [1,2,5,7,11,32] - участие в наблюдениях;

в публикациях [6] - равный в постановку задачи и разработку методики и определяющий в проведении расчетов и интерпретации результатов. В остальных работах автору диссертации принадлежит равный с соавторами вклад в проведение расчетов, интерпретацию результатов и написание статьи.

Литература:

- [1] B. Shustov, M. Sachkov, A.I. Gómez de Castro, et al. *Astrophys. Space Science* 320, 187 (2009)
- [2] F. Pont, G. Burki, and M. Mayor. *A&A* 105, 165 (1994)
- [3] М.Е. Сачков, А.С. Расторгуев, Н.Н. Самусь, Н.А. Горыня. *Письма в АЖ* 24, 443 (1998)
- [4] Н.А. Горыня, Н.Н.Самусь, А.С.Расторгуев, М.Е. Сачков. *Письма в АЖ* 22, 198 (1996)
- [5] Н.А. Горыня, Н.Н.Самусь, М.Е. Сачков и др. *Письма в АЖ* 24, 939 (1998)
- [6] L. Balona. *MNRAS* 178, 231 (1977)
- [7] L.N. Berdnikov. *VizieR On-line Data Catalog II/285* (2008)
- [8] C. Alcock. *ApJ* 511, 185 (1999)
- [9] W. Og'loza, P. Moskalik. *ASP Conf. Ser.* 203, 235 (2000)
- [10] A.S. Rastorguev, E.V. Glushkova, A.K. Dambis, M.V. Zabolotskikh. *Astron. Let.* 25, 595 (1999)
- [11] М.Е. Sachkov, E.V. Glushkova, A.S. Rastorguev. *ASP Conf. Ser.* 246, 327 (2001)
- [12] M.V. Zabolotskikh, A.S. Rastorguev, A.K. Dambis. *Astron. Let.* 28, 454 (2002)
- [13] D.W. Kurtz, V.G. Elkin, M.S. Cunha et al. *MNRAS* 372, 286 (2006)
- [14] Ю.В. Глаголевский. *Астроф. Бюлл.* 1, 36 (2010)
- [15] В.Е. Панчук, В.Г. Клочкова, М.В. Юшкин, И.Д. Найденов. *Оптич. Журн.* 76, 42 (2009)
- [16] T.R. Ayres. *in Proc. of 2002 HST Calibration Workshop. S. Arribas, A. Koekemoer, and B. Whitmore (eds.)* p. 147 (2002)