

На правах рукописи

Тарасов Анатолий Евгеньевич

МАССИВНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ И Ve ФЕНОМЕН

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Официальные оппоненты:

ЧЕРЕПАЩУК Анатолий Михайлович,
академик РАН, профессор, научный руководитель Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, руководитель отдела звездной астрофизики ГАИШ МГУ.

ФАБРИКА Сергей Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук.

САВАНОВ Игорь Спартакович,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 2 ноября 2018 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте www.gaoran.ru/russian/diss/dis1.html.

Автореферат разослан ____ _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.120.01

Булига С. Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена изучению физических и кинематических характеристик компонентов массивных двойных систем на различных стадиях эволюции системы в целом и каждого из компонентов. Под массивными двойными системами в данной работе подразумеваются системы, в которых один из компонентов является звездой с массой более $5 M_{\odot}$. Как правило, это звезда раннего спектрального класса В.

В работе исследованы массивные двойные системы с компонентами, находящимися на стадии горения водорода в ядре, а также системы в стадии активного обмена массой и после него. Основываясь на результатах спектральных, фотометрических, рентгеновских и радио наблюдений детально исследованы нестационарные процессы, возникающие в звездном ветре оптических компонентов и в аккреционных дисках вокруг релятивистских компонентов, таких как маломассивные черные дыры и нейтронные звезды. На примере эволюции звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях исследованы процессы в массивных двойных системах, приводящие к массовому формированию Ве звезд по мере увеличения возраста скоплений.

Актуальность работы

подавляющее количество массивных звезд (65-80%; Chini et al., 2012) входят в двойные системы, у которых в процессе эволюции происходил, или произойдет обмен массой и угловым моментом. Таким образом, эволюция компонентов двойной системы может существенно отличаться от эволюции одиночных звезд тех же масс. Это влияет на время жизни звезды на главной последовательности и последующую эволюцию, химический состав их атмосфер и скорость вращения. Понимание процессов эволюции двойной системы может прояснить процессы, приводящие к формированию маломассивных черных дыр, нейтронных звезд и белых карликов.

До начала XXI столетия теория эволюции массивных звезд базировалась на моделях невращающихся звезд с переносом вещества из недр на поверхность только в периоды развития конвективных оболочек. Данный подход удовлетворительно описывал распределение массивных звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела и их эволюцию от главной последовательности (ГП) в область гигантов и сверхгигантов. В последние два десятилетия, благодаря развитию вычислительной техники, пониманию физики процессов внутри звезд и накоплению значительного количества наблюдательных данных стало возможным рассчитывать модели звезд с учетом их вращения и связанных с ним процессов. Появилась возможность количественно объяснить эволюцию углового момента звезд, выноса продуктов горения в верхние слои звезд и поступлению свежего вещества в ядерную область массивных звезд. Моделирование эволюции и углового момента компонентов двойных систем, в силу присутствия значительного количества свободных параметров, все еще далеко от совершенства и способно удовлетворительно описать, хотя и существенно более широкий круг наблюдаемых явлений, но далеко не все свойства массивных звезд. Остается ряд фундаментальных параметров, которые необходимо получить из наблюдений для двойных систем, находящихся в ключевых фазах эволюции. Кроме того, важно рассмотреть более полную статистическую картину распространенности того или иного феномена. Поэтому получение как можно более аккуратных наблюдательных данных об орбитальных и физических параметрах компонентов, так же как и статистический анализ массивных двойных и одиночных звезд в зависимости от их возраста, безусловно, является актуальной задачей современной физики звезд.

Цель и задачи диссертации

Основная цель диссертационной работы – исследовать массивные двойные системы в широком диапазоне величин орбитальных периодов, на различных стадиях эволюции, включая системы, чьи компоненты находятся на главной последовательности, исследовать системы в фазе активного обмена массой и сразу после него, рассмотреть процессы обмена массой и нестационарности аккреционных дисков в массивных двойных системах с релятивистскими компонентами; исследовать формирование Be феномена при эволюции B звезд в течение их жизни на ГП.

Для достижения этих целей необходимо было решить следующие научные задачи.

1. Выполнить необходимые спектроскопические наблюдения массивных двойных систем на различных стадиях эволюции их компонентов.
2. Определить, либо уточнить параметры орбиты исследуемых двойных систем.
3. На основе полученных орбитальных решений определить, либо уточнить фундаментальные параметры исследуемых звезд.
4. Исследовать связь между эволюцией дисков вокруг Be звезд и рентгеновской активностью релятивистских компонентов двойных систем.
5. Исследовать содержание Be и двойных звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях различного возраста.
6. Выяснить возможную эволюционную природу Be феномена на основе исследования относительного содержания Be звезд в молодых Галактических звездных скоплениях различного возраста.

Объект и предмет исследования

Объект исследования - звезды спектральных классов O9 – B5, входящие в состав двойных систем; Be звезды; массивные двойные в состав которых входят вырожденные объекты, такие как маломассивные черные дыры или рентгеновские пульсары.

Предмет исследования – параметры орбит массивных двойных звездных систем; физические характеристики B и Be звезд; процессы обмена массой между компонентами двойных систем с членами, находящимися на разных стадиях эволюционного развития; процессы формирования, развития и нестационарности дисков вокруг Be звезд.

Теоретическая и методологическая база исследования

В последнее десятилетие благодаря накоплению высококачественных астрофизических данных о массах, светимостях, угловых моментах, химическому составу атмосфер массивных звезд стало возможным построение моделей эволюции этого типа звезд с учетом их углового момента. Было показано, что вращение играет значительную роль в формировании меридианальной циркуляции вещества в лучистых оболочках данной группы объектов, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на скорость эволюции звезд на главной последовательности, химический состав их атмосфер и скорости вращения.

Вместе с тем, как было показано из наблюдений, до 80% массивных звезд главной последовательности входят в двойные и кратные системы, чья дальнейшая эволюция предполагает существенный обмен массой и угловым моментом. Таким образом, эволюция одиночного объекта является скорее исключением, нежели общим правилом, и эволюция двойных массивных звездных систем требует самого пристального внимания. Процессы обмена массой и угловым моментом сами по себе требуют детального изучения. Однако, взаимный учет особенностей эволюции одиночных звезд, так же как и исследование деталей эволюции параметров орбиты и обмена массой между

компонентами позволяет надеяться на прогресс в понимании эволюции этой группы звезд.

Научная новизна работы и положения, выносимые на защиту

На основе анализа параметров орбит двойных массивных звездных систем, находящихся на главной последовательности, с высокой точностью определены их кинематические и физические характеристики, оценен эволюционный статус. Обнаружена двойственность ряда массивных систем, находящихся на стадии активного обмена массой, получены параметры орбит, исследованы физические характеристики компонентов и процессы активного обмена массой в системах. Исследованы процессы истечения вещества в околозвездные диски и их взаимодействие с релятивистскими объектами (маломассивной черной дырой и рентгеновскими пульсарами) в массивных двойных системах, находящихся на стадии после вспышки сверхновых. Впервые детально исследованы долговременные процессы неустойчивости декреционных дисков в данной группе объектов. Детально исследована популяция В и Ве звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях. Показано, что Ве феномен возникает в ходе эволюции В звезды. Проанализированы причины возникновения данного явления.

Положения, выносимые на защиту:

1. По многочисленным спектральным наблюдениям, выполненным автором, определены, либо существенно уточнены периоды и параметры орбиты у массивных двойных систем: α Vir, V380 Cyg, θ Per, V373 Cas, V497 Cep, 103 Tau, KX And, V367 Cyg, V622 Per, Cyg X-1.
2. Результаты определения физических параметров и эволюционного статуса видимых компонентов массивных двойных систем: α Vir, V380 Cyg, θ Per, V373 Cas, V497 Cep, 103 Tau, KX And, V622 Per, X Per.
3. Результаты исследования обмена массой в двойных системах, находящихся на различных стадиях эволюции: 103 Tau, KX And,

V373 Cyg, HD 187399, XX Oph, V622 Per, Cyg X-1, X Per, HDE 245770, LSI+61°303.

4. Результаты комплексных исследований нестационарности на различных временных интервалах декреционных дисков вокруг Ве компонент, входящих в двойные массивные системы с релятивистскими компонентами: Cyg X-1, X Per, HDE 245770, LSI+61°303, LSI+61°235. Обнаружение долговременной переменности дисков вокруг оптических компонент у всех исследованных рентгеновских транзиентов.
5. Результаты исследования популяции В и Ве звезд в молодых Галактических звездных скоплениях возрастом 3 – 25 млн лет. Обнаружение выраженной зависимости относительного содержания количества Ве звезд от возраста скоплений.

Практическое значение

- Метод определения физических параметров массивных звезд по компонентам двойных систем остается наиболее точным способом получения важнейшей информации об эволюционном статусе звезд.
- Исследование процессов обмена массой в двойных системах позволяет выявить особенности эволюции подавляющего количества массивных звезд.
- Исследовались процессы обмена массой в системах с вырожденными рентгеновскими компонентами. Это позволило существенно повысить уровень наших знаний о роли звезд – оптических доноров в формировании нестационарного рентгеновского излучения в областях, окружающих релятивистские компоненты.
- Факт эволюционной природы Ве феномена существенно дополняет теорию эволюции углового момента массивных звезд главной последовательности.

- Понимание процессов потери вещества быстровращающимися звездами позволяет выявить явления, приводящие к формированию декреционных дисков вокруг горячих звезд.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы, подходы и методы были представлены в докладах на 9 международных и всероссийских научных конференциях. Среди них:

- Конференция "Современная звездная астрономия – 2017", 14-16 июня 2017, УрФУ, Екатеринбург.
 - Международная астрономическая конференция "Физика звезд от коллапса до коллапса", 3- 7 октября 2016, САО, п. Нижний Архыз.
 - International conference "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today", 21 – 25 September 2015, Saint-Petersburg State Univ., Saint-Petersburg.
 - 15-я Конференция молодых ученых-астрономов 2-5 декабря 2008, КНУ, Киев, Украина.
 - IAU Symp. No. 240 "Binary Stars as Critical Tools and Tests in Contemporary Astrophysics", 22-25 August, 2006, Prague, Czech Republic.
 - IAU Conf. "Stars with the B[e] Phenomenon", 10-16 July, 2005, the Isle of Vlieland, The Netherlands.
 - Современные проблемы физики космоса. Гамовская международная конференция 2007, ОГУ, Одесса, Украина.
 - IAU Colloquium 175 "The Be Phenomenon in Early-Type Stars", 28 June – 2 July 1999, Alicante, Spain.
 - "Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei: Diagnostics, Demography and Formation". ESO Workshop. 6-8 September 1999, Garching, Germany.
- И другие.

Личный вклад автора

По теме диссертации опубликовано 42 работы (без тезисов), из них 31 опубликованы в основных современных рецензируемых журналах (журналах, входящих в международную реферативную базу данных Astrophysics Data System), в том числе 17 – в отечественных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторской диссертации.

Четыре статьи написано без соавторов. В тех 4-рех работах, где имя автора стоит первым в списке соавторов, автором поставлена задача, проведены расчеты по оригинальным методам автора, сформулированы и обсуждены с соавторами результаты, написан текст статьи.

В тексте данной диссертационной работы представлены только результаты, полученные непосредственно автором, либо те, в которых автор принимал значительное по вкладу участие. Незначительная часть представленных в диссертационной работе результатов получена автором с меньшим личным участием, однако не может быть исключена из текста в силу потери логичности в обосновании полученных результатов.

Всего 95 работ автора опубликовано в реферируемых ADS изданиях. Общее количество цитирований работ (без самоцитирования) автора по системе ADS составляет 1015.

Структура и объем

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 278 наименований. Работа содержит 309 страниц, 95 рисунков и 47 таблиц в тексте диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертационной работы дается краткое описание общей характеристики работы, ее актуальность, цели и задачи, объект исследования, а также обсуждается новизна, практическая и теоретическая значимость исследований. В данной части работы перечислены положения, выносимые на защиту, апробация работы и публикации автора по теме диссертационной работы с указанием вклада автора в выполненных исследованиях.

Глава 1 посвящена описанию особенностей эволюции умеренно массивных звезд, входящих в двойные системы, и ее отличий от эволюции одиночных звезд тех же масс. В качестве примера взяты теоретические расчеты эволюции вращающихся звезд, входящих в двойные системы de Mink et al. (2013). Несмотря на существующие неопределенности в выборе многочисленных свободных параметров модели, данные расчеты наглядно демонстрируют существенные отличия эволюции одиночных звезд и звезд, входящих в двойные системы. Поскольку в процессе обмена массой в двойной системе происходит перераспределение и общая потеря массы системой и, в связи с этим, кардинальное изменение угловых моментов компонентов, то время нахождения звезды в той либо иной фазе эволюции существенно отличается от тех же времен для одиночного объекта. Это в свою очередь сказывается на эволюции химического состава изучаемых объектов.

Современные спектральные исследования распространенности массивных двойных систем (Chini et al., 2012) показывают, что двойные системы, у которых в процессе эволюции компонентов будет наблюдаться обмен массой и угловым моментом, достигает 70-80% среди звезд спектральных классов O9-V3. Таким образом, учет влияния двойственности на эволюционный статус объекта просто необходим, даже в том случае, когда звезда выглядит одиночной.

В следующей части главы описаны приборы, с помощью которых диссертантом выполнены спектральные наблюдения. Дано описание методики получения спектров и методов начальной обработки спектрограмм,

описана методика измерения параметров спектральных линий, прежде всего, лучевых скоростей.

Глава 2 посвящена результатам исследования параметров орбит, физических параметров компонентов и определению их эволюционного статуса в разделенных системах с умеренно массивными звездами, находящимися на главной последовательности. В этот отрезок времени каждый из компонентов системы эволюционирует как одиночная звезда, а обмен массой может возникать только у наиболее короткопериодических систем с орбитальными периодами менее четырех дней. Данный этап эволюции двойных систем чрезвычайно важен, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, используя двойную систему как естественные весы, можно определить с высокой точностью такие фундаментальные параметры, как масса и радиус компонентов, в особенности, если система является затменной (Andersen, 1991). Это позволяет исследовать с высокой точностью атмосферы звезд и их химический состав. Во-вторых, получить статистическое представление о процентном содержании двойных систем, их орбитальных периодах, отношении масс компонентов и др. Эти исследования позволяют проанализировать последующую эволюцию масс, скоростей вращения и орбитальных периодов компонентов на более поздних стадиях обмена массой, а также рассмотреть возможность последующего формирования релятивистских компонентов и/или горячих субкарликов или белых карликов.

В данной главе были детально исследованы параметры орбит и физические параметры компонентов в системах α Vir, ρ Per, V380 Cyg, V373 Cas, V497 Ser и 103 Tau. Для них были получены, или существенно уточнены параметры орбиты, массы компонентов, эволюционный статус и возраст каждого из компонентов двойных систем.

Ниже кратко изложены полученные результаты. Для двойной системы α Vir уточнены орбитальные элементы с $P_{orb} = 4.0145^d$ и $e = 0.18$, уточнены массы компонентов, их T_{eff} и $\lg g$, определен эволюционный статус и возраст.

Показано, что эволюция более массивного компонента значительно отличается от эволюции одиночной не вращающейся звезды. Для двойной системы V380 Cyg существенно уточнен орбитальный период $P_{orb} = 12.425653 \pm 0.000013^d$ с $e = 0.218$. Впервые уверенно построена орбита вторичного, менее массивного, компонента, найдены массы компонентов M_A и M_B , составившие 12.1 и 7.3 M_{\odot} , определены T_{eff} и $\lg g$ и определен эволюционный статус компонентов. Как и в случае с α Vir, для более массивного компонента найдено значимое расхождение между истинным положением звезды на диаграмме Герцшпрунга - Рассела и вычисленным по эволюционным трекам. Для короткопериодической ($P_{orb} = 4.419159^d$) двойной системы o Per существенно уточнены параметры орбиты, определены физические параметры компонентов и их атмосфер, получен эволюционный статус звезд. Впервые комплексно исследована массивная двойная система V373 Cas. Благодаря высококачественным определениям лучевых скоростей, с высокой точностью определены параметры орбиты системы с $P_{orb} = 13.41942^d$, найдены массы компонентов и определены физические параметры их атмосфер. Это позволило уверенно оценить эволюционный статус компонентов. Обнаруженная, переменная с фазой орбитального периода, эмиссионная компонента в профиле линии $H\alpha$, позволяет сделать заключение о начале обмена массой в системе до того, как более массивная звезда заполнит свою полость Роша. Обнаружена двойственность звезды раннего спектрального класса B3 V497 Ser, члена рассеянного звездного скопления NGC 7160. Определен период системы, составивший $P_{orb} = 1.2028251^d$ и параметры ее орбиты. Анализ фотометрической переменности выявил присутствие касательного затмения компонентов и позволил вместе со спектральными данными определить массы и радиусы компонентов. Поиск следов обмена массой в системе не дал положительных результатов. Благодаря тому, что система является членом рассеянного звездного скопления известного возраста, с высокой точностью определен эволюционный статус компонентов. У известной массивной двойной системы 103 Tau обнаружены спектральные

линии вторичного компонента, что позволило впервые определить параметры орбиты системы с $P_{orb} = 58.305^d$. Обнаружен эмиссионный компонент в профиле линии H α , переменный с фазой орбитального периода. Как и в случае другой массивной двойной системы V373 Cas, эмиссия формируется в полости Роша менее массивного компонента, что указывает на начало обмена массой в системе, до того, как более массивный компонент заполнит свою полость Роша.

Глава 3 посвящена исследованию параметров орбит, физическим характеристикам компонентов и процессов обмена веществом в двойных системах, находящихся в фазе активного обмена массой. Если орбитальный период у массивной двойной системы превышает величину 6 – 7 дней, то в процессе ухода с главной последовательности более массивного компонента он достаточно быстро заполняет свою полость Роша и система вступает в фазу быстрого обмена массой. При этом вокруг все еще непроэволюционировавшего вторичного компонента формируется аккреционный диск, который легко регистрируется по присутствию ярких эмиссионных линий, профили которых по форме близки к профилям классических Be звезд. Согласно классификации Plavec (1980), данный тип двойных систем относят к классу объектов типа W Serpentis (по имени звезды прототипа).

Большинство систем этого типа имеют соизмеримую по светимости звезду - донора, оболочку, окружающую горячий компонент и систему в целом. Анализ спектров двойных систем, находящихся на данном этапе эволюции, чрезвычайно сложен, так как часто трудно найти следы фотосферных линий компонентов в видимой области спектра. Поэтому нахождение даже приблизительных параметров орбит систем типа W Ser является непростой задачей. Плотные газовые потоки, оптически толстые диски и значительная потеря массы системой формируют яркие эмиссионные и оболочечные линии поглощения в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах излучения. В

зависимости от активности системы потеря массы системой \dot{M} составляет от 10^{-7} до $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ (Plavec, 1980).

В главе 3 исследуется ряд систем типа W Ser. Показаны их характерные эмиссионные спектры в зависимости от угла наклона плоскости орбиты к наблюдателю. Детально исследована орбитальная переменность систем KX And, V367 Cyg, HD 187399, XX Oph и V622 Per.

Так для двойной системы KX And были обнаружены слабые спектральные линии, принадлежащие холодному гиганту. По этим линиям построена орбитальная кривая переменности лучевых скоростей, и найдены параметры орбиты системы с $P_{orb} = 38.919^d$. Результаты анализа обнаруженных спектральных линий позволили оценить физические параметры холодного гиганта спектрального типа G8 и оценить его химический состав. Найден значительный избыток содержания тяжелых элементов s-процесса, типичного для гигантов асимптотической ветви.

Детально исследована массивная двойная система типа W Ser, V367 Cyg. Существенно уточнены параметры орбиты данной системы, обнаружена долговременная квазипериодическая переменность лучевых скоростей единственной известной фотосферной линии MgII 4481 Å, вероятно связанная с присутствием третьего тела в системе, либо прецессий ассиметричного газового диска. Обнаружена эмиссия в линии HeI 6678 Å, показано, что она формируется в полости Роша более массивного и горячего компонента, скрытого оптически-толстым диском. Сделана попытка определить массы компонентов, показано, что найденные величины находятся в существенном противоречии с результатами фотометрического анализа. Данные противоречия, тем не менее, являются естественными при анализе двойных систем данного типа.

Впервые, благодаря высококачественным спектральным наблюдениям массивной двойной системы HD 187399, обнаружена многокомпонентная структура большинства абсорбционных линий. Помимо спектральных компонентов, переменных с фазой орбитального периода $P_{orb} = 27.9795^d$,

присутствует компонент, формирующийся в общей оболочке системы и в газовых потоках между компонентами.

Проведены уникальные спектральные наблюдения необычной двойной системы XX Ori в период первого за 80 лет глубокого фотометрического минимума, вероятно связанного с затмением одного из компонентов, или части газового диска. Природа XX Ori остается неизвестной, однако анализ спектров высокого разрешения, полученных автором в течение ряда лет в периоды до, во время и после ослабления блеска звезды на более чем звездную величину, позволили обнаружить кардинальное изменение эмиссионного спектра, интенсивностей и лучевых скоростей абсорбционных компонент. Рассмотрено несколько возможных сценариев, приводящих к столь драматическим изменениям.

Обнаружена двойственность, получены параметры орбиты и определены физические параметры и эволюционный статус компонентов массивной двойной системы V622 Per, подтвержденного члена молодого рассеянного звездного скопления χ Per. Исследование выполнено на основе спектральных и фотометрических наблюдений. Найдено, что двойная система имеет орбитальный период $P_{orb} = 5.21429^d$ и круговую орбиту. По обнаруженным линиям обоих компонентов определены параметры орбиты. Анализ фотометрической переменности выявил эллипсоидальность компонентов и связанную с этим переменность блеска системы с фазой орбитального периода, что позволило с высокой точностью определить угол наклона плоскости орбиты к наблюдателю, массы и радиусы компонентов. Исследования показали, что двойная система V622 Per находится в фазе эволюции после первого обмена массой с первичным компонентом, имеющим большую светимость, при меньшей, чем у вторичного компонента массе. Определен эволюционный статус обоих компонентов, полностью согласующийся с возрастом скопления, составляющим 14 млн лет. Анализ спектров позволил найти заметный избыток продуктов CNO цикла в атмосфере компонента с большей светимостью, что согласуется с его

эволюционным статусом и указывает на существенную потерю массы. Не обнаружено значительного избытка углового момента более массивного компонента, что является указанием на быстро наступившую синхронизацию сразу после быстрого обмена массой и угловым моментом.

Глава 4 посвящена исследованию нестационарных процессов в оболочках массивных двойных систем с релятивистскими компонентами (маломассивными черными дырами и рентгеновскими пульсарами). Большое внимание уделено исследованию системы Лебедь X-1/V1357 Cyg. Данная двойная система состоит из горячего сверхгиганта, близкого к заполнению своей полости Роша, и маломассивной черной дыры с массой $\sim 10 M_{\odot}$. Для данной системы проведен ряд комплексных исследований в широком диапазоне длин волн, от жесткого рентгена до радио. Для получения достоверных результатов, путем критического анализа всех исторических и, полученных автором, измерений лучевых скоростей уточнен орбитальный период системы, составляющий $P_{orb} = 5.599829 \pm 0,000016^d$. Совместный анализ орбитальной и долговременной переменности жесткого и мягкого рентгеновского излучения, оптической и инфракрасной фотометрии, спектроскопии и радио излучения на временных шкалах дни – несколько лет, позволил исследовать переменность системы в периоды низкого и высокого состояния рентгеновской активности. Обнаружена орбитальная переменность излучения во всех спектральных полосах с фазой орбитального периода во время низкой рентгеновской активности. Впервые найдена долговременная переменность с периодом 142 дня, которая была связана с прецессией аккреционного диска, формирующегося вокруг релятивистского компонента. Совместный анализ переменности коллимированного звездного ветра от оптического компонента и рентгеновской активности, формирующейся в аккреционном диске вокруг черной дыры, позволил выявить взаимосвязь данных явлений, носящих в периоды рентгеновской активности вероятностный характер. С уменьшением излучения, формирующегося в звездном ветре от оптического компонента, спектр мягкого рентгеновского

излучения становился более жестким. Для объяснения данного явления предложена гипотеза “рваных облаков” или уплотнений, возникающих в звездном ветре от горячего сверхгиганта.

Наблюдения ряда рентгеновских двойных систем с Be компонентами и рентгеновскими пульсарами позволили исследовать долговременную и орбитальную нестационарность декреционных дисков, формирующихся вокруг оптических компонентов. Наиболее детально исследована двойная система X Per. Для нее впервые выполнены долговременные спектроскопические исследования нестационарности декреционного диска, формирующегося вокруг оптического компонента рентгеновской двойной системы. Определены физические характеристики Be звезды и ее эволюционный статус. По спектроскопическим и фотометрическим наблюдениям впервые обнаружены и исследованы на протяжении длительного интервала времени сложные структуры, возникающие в декреционном диске вокруг Be компонента. Показано, что причиной такой сложной переменности может быть нейтронная звезда, находящаяся на удаленной орбите с высоким эксцентриситетом.

Впервые по спектрам высокого разрешения исследовано поведение декреционного диска вокруг оптического компонента известной рентгеновской двойной системы HDE 245770 (A0535+26). Одновременные рентгеновские и оптические (спектральные и фотометрические) наблюдения в течение гигантской рентгеновской вспышки позволили обнаружить нестационарность диска вокруг оптического компонента, вызванную влиянием орбитального движения (орбитальный период 111 дней) нейтронной звезды.

Исследована переменность декреционного диска вокруг оптического компонента массивной рентгеновской двойной системы с большим эксцентриситетом орбиты V615 Cas (LSI+61°303). Обнаружена переменность профиля линии H α с фазой орбитального периода 26.5 дня и долговременная переменность ее эквивалентной ширины с характерным временем 1584 дня.

Исследована долговременная переменность профиля линии $\text{H}\alpha$ у массивной двойной системы с Be компонентом LSI+61°235. Показано, что данная переменность связана с волнами плотности, возникающими в диске в результате приливных сил со стороны релятивистского компонента.

Глава 5 посвящена исследованию популяции Be звезд в молодых галактических рассеянных звездных скоплениях. Основываясь на собственных спектральных наблюдениях B и Be звезд спектральных классов O9 – B3 в ряде скоплений, автор установил увеличение их относительного содержания с увеличением возраста скоплений. Наибольшее количество Be звезд ранних спектральных типов B0-B3 наблюдается в скоплениях с возрастом 12-20 млн лет. Показано, что, как минимум, в трех богатых на B звезды скоплениях относительное содержание Be звезд может превосходить 40%. Спектральные исследования очень молодых звездных скоплений практически не выявили присутствия заметного количества Be звезд. Рассмотрены причины, которые могут приводить к такому распределению содержания Be звезд. Показано, что ключевым фактором в появления дисков вокруг B звезд является эволюция их углового момента как у одиночных звезд, так и у компонентов двойных систем. Приведены примеры ряда групп массивных двойных систем, в состав которых входят Be звезды. Кратко рассмотрены конкретные примеры массивных двойных систем, членов молодых рассеянных звездных скоплений.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В диссертационной работе исследованы параметры орбит массивных двойных систем с компонентами, находящимися на главной последовательности, в фазе быстрого обмена массой и после него, а так же физические характеристики и эволюционный статус их компонентов. Детально анализируются кинематические и физические характеристики массивных двойных систем с компонентами на главной последовательности, в фазе активного обмена массой и сразу после него. Исследованы процессы долговременной неустойчивости декреционных дисков у Be компонентов

массивных двойных систем с релятивистскими компонентами: маломассивной черной дырой или рентгеновскими пульсарами. Исследованы процессы, приводящие к рентгеновской активности в системах данного типа. В заключительной главе исследовано содержание Be звезд в молодых Галактических рассеянных звездных скоплениях различного возраста. Показано, что Be феномен является результатом эволюции B звезд в процессе их жизни на главной последовательности. Показано, что наиболее вероятным сценарием увеличения относительного содержания Be звезд с возрастом скопления являются процессы обмена массой в массивных двойных системах, остальные вероятные процессы играют менее заметную роль.

Таким образом, основные результаты диссертационной работы можно представить как:

1. В результате многочисленных спектральных исследований были определены, либо существенно уточнены параметры орбиты массивных двойных систем: α Vir, V380 Cyg, σ Per, V373 Cas, V497 Cep, 103 Tau, KX And, V367 Cyg, V622 Per, Cyg X-1. В работе использованы все доступные измерения лучевых скоростей, взятые из литературных источников.
2. Используя современные модели атмосфер и результаты современных расчетов внутреннего строения массивных вращающихся звезд и их эволюции, определены физические параметры и эволюционный статус видимых компонентов массивных двойных систем: α Vir, V380 Cyg, σ Per, V373 Cas, V497 Cep, 103 Tau, KX And, V622 Per, X Per.
3. Детальный анализ профилей эмиссионных и пекулярных абсорбционных линий в спектрах массивных двойных систем позволил обнаружить, либо исследовать процессы обмена массой в двойных системах, находящихся сразу перед началом обмена массой, в процессе активного обмена массой и сразу после него. Результаты исследования представлены для известных и обнаруженных двойных систем: 103 Tau,

KX And, V373 Cyg, HD 187399, XX Oph, V622 Per, Cyg X-1, X Per, HDE 245770, LSI+61°303.

4. В результате комплексных наблюдений в широком спектральном диапазоне от жесткого рентгена до радио, в диссертационной работе детально исследована долговременная переменность массивных двойных систем с вырожденными релятивистскими компонентами. Изучена нестационарность декреционных дисков вокруг оптических Ве компонентов, обнаружена нестационарность звездного ветра от них, рассмотрены процессы, приводящие к рентгеновской активности в аккреционных дисках вокруг релятивистских компонентов. Данное исследование выполнено для двойных систем: Cyg X-1, X Per, HDE245770, LSI+61°303, LSI+61°235.
5. На основе выполнения многочисленных спектральных наблюдений нескольких сотен В и Ве звезд в ряде молодых рассеянных Галактических звездных скоплениях проведена спектральная классификация данных объектов, определены их основные физические характеристики. Выполнен поиск Ве звезд в молодых скоплениях различного возраста. Найдена уверенная зависимость увеличения относительного содержания Ве звезд с увеличением возраста скоплений. Показано, что полученная зависимость является результатом эволюции В звезд. Анализируются причины данной зависимости, из которой следует, что вклад эволюции скоростей вращения одиночных В звезд, приводящей к формированию Ве звезд, незначителен, тогда как вклад эволюционирующих массивных двойных систем, может быть определяющим.

Список публикаций по теме диссертации:

1. **Тарасов А.Е.** Ве звезды в рассеянных скоплениях. // *Астрофизика* — 2017. — Т. 60. — С. 291 – 316.
2. **Тарасов А.Е.**, Мальченко С.Л., Якут К. Орбита и физические характеристики компонентов массивного Алголя V622 Per, члена рассеянного звездного скопления χ Персея. // *Письма Астрон. Ж.* — 2016. — Т. 42. — С. 741 – 753.
3. **Тарасов А.Е.** Параметры орбиты и переменность эмиссионного спектра массивной двойной системы 103 Тау. // *Письма Астрон. Ж.* — 2016. — Т. 42. — С. 658 – 666.
4. **Тарасов А.Е.**, Мальченко С.Л. Относительное содержание Ве-звезд в молодых рассеянных звездных скоплениях // *Письма Астрон. Ж.* — 2012. — Т. 38. — С. 428 – 435.
5. Мальченко С.Л., **Тарасов А.Е.:** В и Ве-звезды в молодых рассеянных звездных скоплениях NGC 659 и NGC 7419 // *Астрофизика* — 2011. — Т. 54. — С. 63– 80.
6. Мальченко С.Л., **Тарасов А.Е.:** Спектроскопия В и Ве-звезды в рассеянных звездных скоплениях NGC 6871 и NGC 6913 // *Астрофизика* — 2009. — Т. 52. — С. 257 – 274.
7. Мальченко С.Л., **Тарасов А.Е.:** Профили линий H α и H β в спектрах В и Ве-звезд в рассеянном звездном скоплении h/ χ Персея // *Астрофизика* — 2008. — Т. 51. — С. 305 – 319.
8. Malchenko S.L., **Tarasov A.E.:** Population of Be Stars in Young Open Clusters // *Conf. Yang Astronom.* — 2007. Одесса — P. 52-56.
9. Karitskaya E.A., Agafanov M.I., Bochkarev N.G., Bondar A.V., Galazutdinov G.A., Lee B.-C., Musaev F.A., Sharova O.I., Shimanskii V.V., **Tarasov A.E.:** Results of high-resolution optical spectroscopy investigation of Cyg X-1=V1357 Cyg // *Astron. Astrophys. Transact.* — 2007. — V. 26. — P. 159-162.
10. Karitskaya E.A., Lyuty V.M., Bochkarev N.G., Shimanskii V.V., **Tarasov A. E.**, Galazutdinov G.A., Lee, B.-C.: Long-Term Changes of the Supergiant in the X-Ray Binary CYG X-1 // in “Binary Stars as Critical Tools and

Tests in Contemporary Astrophysics”, Publ. IAU Symp. — 2007. — V. S240. — P. 122 – 126.

11. Malchenko S.L., **Tarasov A.E.**, Yakut K.: Duplicity and Evolution Status of the Early-Type Be Star V622Per the Member of the χ Per Open Star Cluster // *Odessa Astron. Publ.* — 2007. — V. 20. — P. 120– 128.

12. **Tarasov A.E.**: Spectral Variability of the Unusually Peculiar Be Star XX Ophiuchi // in “Stars with the B[e] Phenomenon” ASP Conf. Ser. — 2006. — V. 355. — P. 297– 305.

13. Blay P., Negueruela I., Reig P., Coe M.J., Corbet R.H.D., Fabregat J., **Tarasov A.E.**: Multiwavelength monitoring of BD +53°2790, the optical counterpart to 4U 2206+54 // *Astron. Astrophys.* — 2006. — T. 446. — C. 1095 – 1105.

14. Karitskaya E.A., Lyuty V.M., Bochkarev N.G., Shimanskii V.V., **Tarasov A.E.**, Bondar A.V., Galazutdinov G.A., Lee B.-C., Metlova N.V.: Long-Term Variations of the Supergiant in the X-Ray Binary Cyg X-1 // *Inf. Bull. Var. Stars.* — 2006. — No. 5678.

15. Yakut R., **Tarasov A.E.**, Ibanoglu C., Harmanec P., Kalomeni B., Holmgren D.E., Bozic H. Basic physical properties of the close binary V497 Cep in the open cluster NGC 7160 // *Astron. Astrophys.* — 2003. — V. 405. — P. 1087 – 1093.

16. **Tarasov A.E.**, Brocksopp C., Lyuty V.M.: Variability of the H α emission of Cygnus X-1 and its connection with the soft X-ray radiation // *Astron. Astrophys.* — 2003. — V. 402. — P. 237-246.

17. Clark J.S., **Tarasov A.E.**, Okazaki A.T., Roche P., Lyuty V.M.: Phase changes of the Be/X-ray binary X Persei // *Astron. Astrophys.* — 2001. — V. 380. — P. 615– 329.

18. Brocksopp C., Fender R., Larianov V., Lyuty V., **Tarasov A.**, Pooley G., Paciesas W., Roche P.: Orbital, Precessional and Flaring Variability in Cygnus X-1 // *Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei: Diagnostics, Demography and Formation: Proc. ESO Workshop.* — 2001. — V. 380. — P. 202-206.

19. Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., **Tarasov A.E.**, Poklad D.B., Larionov V.M., Larionova L.V.: Surface abundances of light elements for a large sample of early B-type stars – I. Spectral observations of 123 stars; measurements of hydrogen and helium lines; infrared photometry // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* — 2000. — V. 316. — P. 19– 32.
20. Reig P., Negueruela I., Coe M.J., Fabregat J., **Tarasov A.E.**, Zamanov R.K.: Correlated V/R and infrared photometric variations in the Be/X-ray binary LSI +61° 235/RX J0146.9+6121 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2000. — V. 317. — P. 205-210.
21. Reig P., Negueruela I., Coe M.J., Fabregat J., **Tarasov A.E.**, Zamanov R.K.: Global One-armed Oscillations in the Be/X-ray Binary LS I+61° 235/RX J0146.9+6121 // *The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, IAU Col. 175, ASP Conf. Proc. — 2000. — V. 214. — P. 719-723.
22. **Tarasov A.E.**: Be Stars in Roche-Lobe Interacting Binaries // *The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, IAU Col. 175, ASP Conf. Proc. — 2000. — V. 214. — P. 644-655.
23. Roche P., **Tarasov A.E.**, Lyuty V.M., Clark J.S., Larionov V.: Multiwavelength Monitoring of the Be/X-ray Binary X Persei- Evidence for Multiple Disk Structures // *The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, IAU Col. 175, ASP Conf. Proc. — 2000. — V. 214. — P. 589-593.
24. Brocksopp C., **Tarasov A.E.**, Lyuty V.M., Roche P.: An improved orbital ephemeris for Cygnus X-1// *Astron. Astrophys.* — 1999. — V. 343. — P. 861– 864.
25. Brocksopp C., Fender R.P., Larionov V., Lyuty V.M., **Tarasov A.E.**, Pooley G.G., Paciesas W.S., Roche P.: Orbital, precessional and flaring variability of Cygnus X-1 // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* — 1999. — V. 309. — P. 1063-1073.
26. Clark J.S., Lyuty V.M., Zaitseva G.V., Larionov V.M., Larionova L.V., Finger M., **Tarasov A.E.**, Roche P., Coe M.J.: Long-term variability of the Be/X-ray binary A0535+26 – III. Photometry // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* — 1999. — V. 302. — P. 167– 172.

27. Zamanov R.K., Martí J., Paredes J.M., Fabregat J., Ribó M., **Tarasov A.E.**: Evidence of H α periodicities in LS I+61°303 // *Astron. Astrophys.* — 1999. — V. 351. — P. 543-550.
28. Clark J. S., **Tarasov A.E.**, Steele I.A., Coe M.J., Roche P., Shrader C., Buckley D.A.H., Larionov V., Larionova L., Lyuty V.M.: Long-term variability of the Be/X-ray binary A0535+26. I – Optical and UV spectroscopy // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* — 1998. — V. 294. — P. 165– 186.
29. Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Ростопчин С.И., **Tarasov A.E.** Двойная система V373 Cas: элементы орбиты, параметры компонентов и содержание гелия // *Астрон. Ж.* — 1998. — Т. 75. — С. 355 – 366.
30. Бердюгин А.В., **Tarasov A.E.**: HD187399 – массивная взаимодействующая двойная система с эксцентричной орбитой и активным обменом масс. Результаты поляриметрических наблюдений // *Письма Астрон. Ж.* — 1998. — Т. 24. — С. 139–144.
31. Бердюгин А.В., **Tarasov A.E.**: Результаты новых поляриметрических наблюдений V367 Cyg // *Астрон. Ж.* — 1997. — Т. 74. — С. 230– 242.
32. Бердюгин А.В., Бердюгина С.В., **Tarasov A.E.**: Новые фотометрические и поляриметрические наблюдения массивной взаимодействующей двойной системы KX And // *Письма Астрон. Ж.* — 1998. — Т. 24. — С. 367– 376.
33. Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Ростопчин С.И., **Tarasov A.E.** Двойная система o Per: элементы орбиты, параметры компонентов и содержание гелия // *Астрон. Ж.* — 1997. — Т. 74. — С. 710 – 719.
34. Roche P., Larionov V., **Tarasov A.E.**, Fabregat J., Clark J.S., Coe M.J., Kalv P., Larionova L., Negueruela I., Norton A.J., Reig P.: Observations of the recent disc loss in X Persei: photometry and polarimetry // *Astron. Astrophys.* — 1997. — V. 322. — P. 139– 146.
35. Волошина И.В., Лютый В.М., **Tarasov A.E.** Фотометрическое поведение двойной системы Cyg X-1/V1357 Cyg в период рентгеновской вспышки 1996 года // *Письма Астрон. Ж.* — 1997. — Т. 23. — С. 293 – 298.

36. Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Roche P., **Tarasov A.E.**: Fundamental parameters, helium abundance and distance of X Persei // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* — 1997. — V. 286. — P. 549-557.
37. Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Ростопчин С.И., **Тарасов А.Е.** Двойная система V380 Cyg: элементы орбиты, параметры компонентов и содержание гелия // *Астрон. Ж.* — 1996. — Т. 73. — С. 55 – 66.
38. Lyubimkov L.S., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., **Tarasov A.E.**: Investigation of Components of the Binary System 38 Per // *Odessa Astron. Publ.* — 1996. — V. 9. — P. 77 – 81.
39. Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Ростопчин С.И., **Тарасов А.Е.**: о Per: элементы орбиты, параметры компонентов и содержание гелия // *Астрон. Ж.* — 1997. — Т. 74. — С. 710 – 719.
40. **Tarasov A.E.**, Roche P. Double circumstellar disk structure in X Persei. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1995. — V. 276. — P. L19 – L20.
41. Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Ростопчин С.И., **Тарасов А.Е.** Двойная система α Vir (Спика): фундаментальные параметры компонентов и различие в содержании гелия между ними // *Астрон. Ж.* — 1995. — Т. 72. — С. 212 – 221.
42. Berdyugin A.V., Rachkovskaja T.M., Rostopchin S.I., **Tarasov A.E.**: The Discovery of H α Emission in V373 Cas // *Inf. Bull. Var. Stars*— 1995. — V. 4158.

Список цитируемой литературы

Andersen J.: Accurate masses and radii of normal stars // *Astron. Astrophys. Rew.* — 1991. — V. 3. — P. 91.

Chini R., Hoffmeister V.H., Nasserri, A., Stahl O., Zinnecker H.: A spectroscopic survey on the multiplicity of high-mass stars // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — V. 424. — P. 1925.

de Mink S.E., Langer, N., Izzard R.G., Sana H., de Koter A.: The Rotation Rates of Massive Stars: The Role of Binary Interaction through Tides, Mass Transfer, and Mergers // *Astrophys. J.*— 2013. — V. 764. — P. 166.

Plavec M.J.: Accretion in Binary Stars // *IAU Symposium No. 88, Dordrecht: Reidel* — 1980. — P. 251.