

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.33:525.5:520.826

МИРОШНИЧЕНКО Анатолий Сергеевич

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД
С ГАЗОПЫЛЕВЫМИ ОБОЛОЧКАМИ**

(01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

Нижний Архыз – 2008

Работа выполнена в Главной Астрономической Обсерватории
Российской Академии Наук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
С. А. Ламзин,
Государственный астрономический институт
им. Штернберга, МГУ

доктор физико-математических наук,
Ю. А. Фадеев,
Институт Астрономии
Российской Академии Наук

доктор физико-математических наук
Ю. В. Глаголевский,
Специальная Астрофизическая Обсерватория
Российской Академии Наук

Ведущая организация: Южный Федеральный Университет

Защита состоится – 15 – апреля – 2008 г. в – 9 – часов – 30 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 “_____” _____ 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д002.203.01
кандидат физико-математических наук

Майорова Е.К

Общая характеристика работы и ее актуальность

Звезды аккрецируют вещество или теряют его с различным темпом на протяжении почти всей своей эволюции, так что некоторое количество материи всегда присутствует в непосредственной близости от звезды или звездной системы. Эта околозвездная материя (ОЗМ) перерабатывает энергию фотонов, излученных центральными звездами, и переизлучает ее в форме рекомбинационных эмиссионных линий и континуума (свободно-свободное и свободно-связанное излучение). Присутствие большого количества ОЗМ в звездных системах, с одной стороны, искажает наблюдаемые характеристики звезд и затрудняет определение их физических параметров, а с другой, вносит новые особенности в излучение объектов, позволяющие изучать характеристики ОЗМ и, таким образом, звездную эволюцию. Последняя характеризуется спокойными стадиями, когда внутренняя структура и наблюдаемые параметры объектов меняются плавно (например, стадия Главной Последовательности, далее ГП), и критическими стадиями, когда объекты испытывают сильные изменения (например, стадия асимптотической ветви гигантов). Критические стадии связаны со значительной потерей или аккрецией вещества звездами и, в ряде случаев, с созданием околозвездной пыли. Изучение этих стадий дает возможность понять такие важные аспекты эволюции Вселенной как эволюция галактик и формирование планетных систем, при этом уточняя знания о спокойных стадиях и причинах межстадийных переходов.

Несмотря на то, что горячие звезды с эмиссионными спектрами известны со времени первых спектральных наблюдений, проведенных уже в середине 19-го века (Secchi 1867), механизмы образования и эволюции их ОЗМ не понятны до настоящего времени. Это в полной мере относится к эволюции звезд с начальными массами от ~ 3 -х до ~ 20 -ти M_{\odot} , которые имеют на ГП спектральные классы В и А. Типичные темпы потери массы такими звездами ($\dot{M} \sim 10^{-11} - 10^{-9} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$) не предполагают наличия мощных околозвездных оболочек вокруг них. Однако, заметное их количество характеризуется Ве и В[e] феноменами, существование которых является вызовом

современным моделям звездной эволюции и требует тщательного исследования, но также представляет возможности для развития и проверки новых методов астрофизического анализа данных.

Недавние исследования показывают, что значительная часть звезд в указанном интервале начальных масс рождается двойными и кратными (Preibisch et al. 2000). Перенос вещества (а с ним и углового момента) в двойных системах может объяснить как быстрое вращение Ве звезд (Kříž & Harmanec 1975), так и присутствие большого количества ОЗМ. Однако, обнаружение двойственности является трудной задачей, поскольку в большинстве известных случаев вторичные звездные компоненты объектов с Ве и В[e] феноменами существенно (на 2–4 звездные величины) слабее главных компонентов в оптическом диапазоне, тогда как в ИК диапазоне околозвездная оболочка излучает значительно сильнее центральных звезд. В результате, проблема роли двойственности в таких объектах детально изучена не была.

ОЗМ стала доступной для изучения в 1960-х годах, когда астрономия стала всеволновой. Это привело к открытию новых фаз некоторых спокойных и критических стадий звездной эволюции. В 1970 году были открыты избытки инфракрасного (ИК) излучения у горячих звезд и замечена корреляция между присутствием этих избытков и эмиссионных линий однократно ионизованного железа (Geisel 1970). Эти явления были интерпретированы как следствие сильной потери массы, приводящей к образованию пыли. Однако, скоро выяснилось, что $\sim 30\%$ из 70-ти объектов, описанных Geisel, являются молодыми звездами, окруженными облаками пыли, созданной предыдущими поколениями звезд. Еще $\sim 40\%$ являются сильно проэволюционировавшими (сверхгиганты, планетарные туманности), которые действительно создают новую пыль на различных критических стадиях эволюции. В оставшиеся 30% входят классические Ве звезды без пыли в оболочках и 6 объектов, которые были названы пекулярными Ве звездами, позднее вошедшими в список звезд с В[e] феноменом (одновременное присутствие запрещенных эмиссионных линий и сильных избытков ИК излучения, Allen & Swings 1976).

Информация, полученная из обзора неба в диапазоне длин волн

12–100 микрон, выполненного спутником IRAS в 1983 году, позволила уточнить детали эволюции ОЗМ у некоторых групп горячих объектов. В частности, были открыты объекты типа Веги, являющиеся звездами спектрального класса А, сохраняющими остатки пылевых оболочек на протяжении значительной части их эволюции на ГП (Aumann 1985), и особенности оболочек Прото-Планетарных Туманностей (ППТ), выметающих околозвездную пыль, созданную на предыдущей эволюционной стадии, в межзвездную среду (van der Veen, Habing, & Geballe 1989). Эти открытия внесли существенный вклад в изучение как ранних, так и поздних стадий звездной эволюции, а также процесса образования околозвездной пыли.

Уже в 1970-е годы были поняты причины образования пыли в хромосферах и оболочках холодных звезд, где температура вещества близка к температуре сублимации пылинок, тогда как плотность вещества высока (Salpeter 1974). Последующее изучение горячих объектов высокой светимости ($L \geq 10^5 L_{\odot}$, звезды Вольфа-Райе и Luminous Blue Variables – далее LBV) показало, что пыль может образовываться при менее благоприятных, но особых условиях (например, при дефиците водорода в ОЗМ или присутствии плотных конденсаций, которые могут создавать повышенную плотность материи даже на далеких расстояниях от центральной звезды). Поскольку даже одиночные такие звезды интенсивно теряют массу ($\dot{M} \geq 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$) за счет сильного давления излучения в их атмосферах, плотность ОЗМ в их оболочках велика, и пыль может в них образовываться. Однако, до недавнего времени возможность образования пыли вблизи горячих звезд со светимостями ниже светимостей сверхгигантов не рассматривалась (Gehrz 1989, Dwek 1998).

Таким образом, не все процессы, происходящие со звездными системами на спокойных стадиях эволюции, детально изучены и не все критические стадии эволюции открыты. Одной из основных проблем в понимании эволюции горячих звезд с большим количеством ОЗМ является недостаточно четкая классификация объектов, относимых к различным группам, связанная с ограниченностью наблюдательной информации. К последней относятся одновременность наблюдений в различных диапазонах спектра, малая продол-

жительность слежения за объектами (часто имеются только единичные фотометрические и/или спектральные наблюдения), недостаток наблюдений с высоким спектральным и пространственным разрешением. Другими проблемами являются отсутствие строгих критериев разделения молодых и проэволюционировавших объектов, а также критериев спектральной классификации звезд с оболочками. В результате, например, до 30% объектов единственного опубликованного к настоящему времени каталога классических Be звезд (1159 объектов, Jaschek & Egret 1982) относятся к этому типу только на основании присутствия в их спектрах эмиссионных линий, обнаруженных на спектрограммах, полученных с объективной призмой. Как следствие, в список этих объектов (по определению III и V классов светимости) попали сверхгиганты, Ae/Be звезды, и даже звезды с B[e] феноменом. Список же последних (Allen & Swings 1976) оказался таким неоднородным, что это привело к значительной потере интереса к этой группе объектов и существенно замедлило изучение феномена пылеобразования горячими звездами.

В связи с этим автором была поставлена задача сбора и обобщения существующего наблюдательного материала по основным группам горячих эмиссионных объектов, поиска новых членов этих групп в обзорах неба в разных диапазонах спектра (IRAS, 2MASS и USNO) и разработки критериев их выделения, проведения новых спектральных с высоким разрешением и многоцветных фотометрических наблюдений большой выборки таких объектов, определения физических параметров избранных (в основном, малоизученных и открытых при выполнении настоящей работы) звезд и их оболочек, и создания фундамента для исследования физических механизмов образования и эволюции ОЗМ на основе базы полученных данных.

В представляемой диссертации рассматриваются звездные системы, в состав которых входит хотя бы один компонент раннего спектрального класса (в основном, класса B) и которые окружены большим количеством околозвездного газа и пыли. Основными группами объектов, рассматриваемыми автором, являются не достигшие ГП Ae/Be звезды Хербига, классические Be звезды, и звезды с B[e] феноменом. Согласно современным представлениям, эти объекты

находятся на различных стадиях звездной эволюции, на которых происходят интенсивные процессы потери или обмена массой как внутри систем (например, между звездными компонентами), так и с окружающими их околозвездной оболочкой и межзвездной средой (например, с молекулярным облаком, из которого система образовалась). Эти группы объектов могут представлять последовательные стадии эволюции звездных систем в одном и том же диапазоне масс. Кроме того, возможно, что феномены Be и B[e] возникают у звездных систем с разными параметрами (например, разными отношениями масс звездных компонентов и разными орбитальными периодами в начале эволюции).

Основным направлением работы является исследование наименее изученной группы звезд с B[e] феноменом, половина объектов начального списка которой (32 объекта, Allen & Swings 1976), не была причислена ни к одной из известных групп (неклассифицированные объекты с B[e] феноменом, см. ниже описание Главы 4). Исследование других групп объектов как в вышеуказанном интервале начальных звездных масс, так и вне его (LBV, звезды типа VV Ser, и звезды типа Веги), имеет в данной работе вспомогательное значение. Так, например, изучение LBV помогло открыть новые объекты этого типа и показало, что ИК избытки их излучения объясняются, как правило, только присутствием холодной околозвездной пыли (с температурами $\sim 100\text{--}200\text{ K}$), что позволяет легко отличить LBV от объектов с B[e] феноменом. Кроме того, такой комплексный подход привел как к более ясному пониманию физики объектов основной исследуемой группы, так и к уточнению представлений о свойствах других исследованных групп, а также к открытию новых их членов.

В целом, характер работы является наблюдательным с акцентом на применение комплексных методов исследования в широком диапазоне спектра и на сравнение наблюдаемых характеристик больших групп объектов, представляющие различные стадии эволюции. Основное внимание уделялось классификации объектов, определению физических параметров центральных звезд и качественной диагностике околозвездных оболочек. Такой подход обеспечивает фундамент для последующего количественного исследования рассмат-

риваемых объектов с учетом всей сложности их строения.

Цели работы

Основной целью работы является развитие представлений об эволюции звезд и звездных систем на критических стадиях, на которых объекты интенсивно теряют массу или обмениваются ей, образуя оболочки как вокруг отдельных звездных компонентов, так и вокруг систем в целом.

Конкретизируя, можно сформулировать следующие частные цели работы:

- изучить эволюцию околозвездной пыли у не достигших ГП Ae/Be звезд Хербига, а также различия между Ae/Be звездами и звездами с B[e] феноменом;
- изучить роль двойственности в объектах с Be и B[e] феноменами;
- проверить достоверность отождествления горячих эмиссионных звезд с позиционно близкими ИК источниками;
- проверить и уточнить классификацию объектов, относимых к основным группам горячих эмиссионных звезд, и провести новый поиск таких объектов в фотометрических обзорах неба;
- исследовать вновь открытые объекты, уточнить физические параметры отдельных представителей различных групп и проследить изменения их наблюдаемых параметров на длительных промежутках времени (годы - десятилетия);
- разработать новые методы выделения горячих звезд с компактными пылевыми оболочками.

Основные результаты и их достоверность

Для достижения вышеупомянутых целей были собраны практически все ранее полученные спектральные и фотометрические наблю-

дения объектов упомянутых групп и получены новые наблюдения наименее исследованных объектов. Основное внимание было уделено получению многоцветной фотометрии и спектроскопии высокого разрешения ($R = \Delta\lambda/\lambda \geq 20000$). Эти данные были использованы для построения распределений энергии в спектрах (РЭС) объектов, исследования их ИК избытков и определения физических параметров избранных объектов. Были проанализированы списки горячих эмиссионных звезд в Галактике (Wackerling 1970, Allen & Swings 1976, Jaschek & Egret 1982, Thé, Pérez & de Winter 1994) и проведена их позиционная кросс-корреляция с оптическими (USNO-B1.0) и ИК (IRAS, 2MASS) обзорами неба.

В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты и выводы:

- Впервые детально и систематически изучены галактические звезды с V[e] феноменом, найдены незамеченные ранее особенности ИК избытков неклассифицированных объектов этого типа (сильные эмиссионные спектры и быстрое падение ИК потока излучения с длиной волны).
- Впервые показано, что среди звезд с V[e] феноменом только неклассифицированные объекты и сверхгиганты создают (или недавно создавали) околозвездную пыль в своих оболочках.
- Впервые предположено, что неклассифицированные объекты с V[e] феноменом являются взаимодействующими двойными системами в широком диапазоне светимостей и что звезды спектрального класса В, находящиеся на этой стадии эволюции, являются важными поставщиками пыли как в Млечном Пути, так, возможно, и в других галактиках. Такие объекты со светимостями $L \leq 10^5 L_{\odot}$ выделены в новую группу, названную объектами типа FS CMa. Показано, что около 30% объектов этой группы действительно показывают различные признаки двойственности. Таким образом, открыто новое направление в звездной астрофизике, связанное с исследованием пылеобразования вблизи горячих звезд.

- Получено, обработано и исследовано более 700 спектров высокого разрешения более чем 50-ти объектов, а также более 5000 многоцветных фотометрических наблюдений более чем 100 объектов.
- Выполнена позиционная кросс-корреляция нескольких обзоров неба в разных спектральных диапазонах и найдено несколько десятков неизвестных ранее систем, содержащих горячую звезду с эмиссионным спектром и сильным ИК избытком.
- Предложена схема эволюции пылевых оболочек Ae/Be звезд Хербига, позднее независимо подтвержденная другими исследователями. Предложена двухкомпонентная модель пылевых оболочек Ae/Be звезд.
- Изучены свойства группы из 300 ярчайших галактических Be звезд; установлено, что 25% из них являются двойными системами; предположено, что двойные системы следует прежде всего искать среди объектов с сильными эмиссионными линиями; показано, что вклад ОЗМ в оптическом континууме следует учитывать при определении светимостей Be звезд.

Достоверность результатов по поиску новых горячих эмиссионных звезд и определению их физических характеристик обеспечивается многократными независимыми фотометрическими и спектральными наблюдениями оптических объектов, найденных с помощью позиционной кросс-корреляции в оптических и ИК каталогах. Достоверность классификации объектов в настоящей работе обеспечивается исследованием больших групп звезд и звездных систем, находящихся на разных стадиях эволюции и имеющих различную природу и особенности образования околозвездных оболочек.

Положения, выносимые на защиту

1. Выделение новой группы объектов типа FS CMa с сильными эмиссионными спектрами и избытками ИК излучения, основ-

ным звездным компонентом которых является горячая звезда, в результате анализа обзоров неба в оптическом и ИК диапазонах спектра на основе разработанных фотометрических критериев выделения объектов с компактными пылевыми оболочками.

2. Результаты долговременной международной программы наблюдения звезд типа FS CMa организованной и руководимой автором с участием более 30-ти астрофизиков из 15-ти стран и с использованием 23-х телескопов; обработка полученных спектральных (более 250-ти) и фотометрических (более 2000) наблюдений и анализ результатов.
3. Открытие 16-ти новых объектов типа FS CMa, 4-х галактических B[e] сверхгигантов и двойственности 6-ти звезд с B[e] феноменом.
4. Интерпретация результатов наблюдений звезд типа FS CMa в рамках гипотезы двойной звездной системы со взаимодействующими компонентами. В частности, интерпретация результатов анализа наблюдаемых особенностей объектов и их возможного эволюционного статуса, а также результаты определения физических параметров 6-ти звезд типа FS CMa и 5-ти B[e] сверхгигантов.
5. Открытие и результаты исследования 3-х галактических объектов типа LBV, 2-х гигантов спектрального класса A и F с околозвездной пылью, 3-х двойных Be звезд (включая результаты определения элементов орбиты), 6-ти A/F/G звезд с газопылевыми оболочками и 4-х молодых Ae/Be звезд Хербига.
6. Результаты исследования РЭС большой группы Ae/Be звезд Хербига и звезд типа Веги, в результате которого впервые была предложена схема эволюции пылевых оболочек звезд промежуточной массы и двухкомпонентная модель распределения околозвездной пыли в оболочках Ae/Be звезд Хербига.

Научная новизна и практическая ценность работы

- Впервые показано, что образование околозвездной пыли возможно около горячих звезд (спектральных классов В/А) в широком диапазоне светимостей (от ~ 300 до $\sim 30000 L_{\odot}$), а не только вблизи горячих звезд высокой светимости (типа Вольфа-Райе и LBV), как считалось ранее.
- Открыт новый большой класс объектов, наиболее вероятно двойных систем (звезды типа FS CMa), вокруг которых образуется (или недавно образовалась) околозвездная пыль и которые следует принимать во внимание при исследовании эволюции пылевых компонент галактик.
- Впервые найдены звезды спектральных классов А/В, заканчивающие эволюцию на ГП или сразу после этой стадии, с ИК избытками излучения, связанными с горячей, недавно образованной пылью.

Выделенная группа объектов типа FS CMa и другие обнаруженные объекты с околозвездной пылью являются основой более детального теоретического и практического исследования эволюции звездных систем на критических стадиях, а также исследования образования околозвездной пыли у более широкого класса объектов, чем изучалось ранее. Эти результаты могут быть применены к анализу эволюции пылевых составляющих галактик как на современном этапе, так и в более ранней Вселенной. Изучение процессов, протекающих в окрестностях объектов, исследованных в настоящей диссертации, может привести к развитию новых представлений об околозвездном пылеобразовании и методов анализа многокомпонентных звездных систем со сложной структурой околозвездной среды.

Структура диссертации

Диссертация состоит из 6-ти глав, заключения и списка литературы, включающего 394 источника. Объем диссертации – 250 страниц,

включая 91 рисунок и 19 таблиц.

В **первой главе** выполнен обзор проблем в исследовании горячих объектов с околозвездными газопылевыми оболочками, сформулированы цели работы, ее новизна, практическая ценность, результаты, выносимые на защиту. Описаны личный вклад автора, апробация работы и структура диссертации.

Во **второй главе** кратко описаны методы наблюдений и обработки фотометрического и спектрального материала, а также примененная методика кросс-корреляции обзоров неба. В ней рассмотрены основные методы моделирования наблюдаемых параметров (спектральных линий и РЭС) и программы, примененные для такого анализа данных.

В **третьей главе** рассмотрены наблюдаемые особенности Ae/Be звезд Хербига и показана эволюция избытков их ИК излучения по мере приближения к ГП. На основе этого исследования сделан вывод о том, что околозвездная пыль с течением времени удаляется от звездных источников, сохраняя при этом лишь далекий ИК избыток (на длинах волн более 10 микрон) ко времени выхода на ГП. Этот вывод был впервые получен на большом статистическом материале (более 50-ти объектов, см. публикацию автора 8). Впоследствии он был подтвержден на статистически сравнимом материале (например, Malfait, Bogaert, & Waelkens 1998). Позднее было показано, что диссипация холодной пыли прежде горячей может иметь место лишь в плотных молодых звездных группах, в которых Ae/Be звезды Хербига наблюдаются редко (Hollenbach & Adams 2004).

Упомянутая работа автора получила продолжение в исследовании по моделированию РЭС 7-ми Ae/Be звезд Хербига, которое было выполнено автором совместно с группой профессора М. Elitzur (Университет штата Кентукки, США) с применением программы расчета излучения звезд со сферическими пылевыми оболочками Dusty (Ivezić, Nenkova, & Elitzur 1999). На основе наблюдательных данных, собранных автором, первоначально было показано, что изменение лишь одного параметра модели (оптической толщины пылевой оболочки) позволяет с высокой точностью воспроизвести наблюдаемые РЭС в диапазоне длин волн от 0.3 до 100 микрон. Однако,

практически одновременно с публикацией автора 11, вышла работа Mannings & Sargent (1997) с результатами наблюдений потоков излучения и размеров оболочек некоторых Ae/Be звезд (включая ряд объектов, исследованных автором) в миллиметровом диапазоне волн, которые ясно доказали, что распределение околозвездной пыли не может быть сферическим.

Новый теоретический анализ и моделирование РЭС с помощью модифицированной программы Dusty (в которую была добавлена возможность рассчитывать вклад аккреционного диска), проведенный автором с тем же коллективом (публикация 23), привели к ряду оригинальных выводов, показав, что 1) анализ только РЭС приводит к неоднозначным результатам; 2) одновременное объяснение РЭС и изменения размеров оболочек объектов (увеличение до длины волны ~ 100 микрон с дальнейшим уменьшением в сторону миллиметрового диапазона) возможно лишь в рамках модели с двухкомпонентным распределением пыли: оптически толстый диск и оптически тонкая оболочка. Более тщательный анализ в публикации 49 подтвердил эти выводы и позволил предложить наблюдательную проверку гипотезы о двухкомпонентности пылевой оболочки, которая пока еще не выполнена. Эта гипотеза получила независимую поддержку недавними интерферометрическими результатами (Liu et al. 2007), которые свидетельствуют в пользу присутствия оптически тонкого компонента в излучении пылевой оболочки. Несмотря на то, что до сих пор существует дилемма при объяснении РЭС Ae/Be звезд (модель диска с утолщенным внутренним кольцом, описанная в работе Dullemond, Dominik, & Natta 2001, или вышеупомянутая двухкомпонентная модель), это исследование автора создало основу для анализа характеристик звезд с V[e] феноменом, описанного в Главе 4.

Наряду с исследованием пылевых оболочек Ae/Be звезд, автором были проведены работы по изучению отдельных объектов и поиску новых представителей этого типа в каталоге точечных источников IRAS. В частности, были определены физические параметры объектов HD 203024, HD 36112 и IP Per; а также найдены следующие новые Ae/Be звезды – MQ Cas, BD+11°829, и HD 29035. Физические

параметры Ae звезды Хербига IP Per, определенные автором и его коллегами, были независимо подтверждены в результате астросейсмологического исследования Ripepi et al. (2006). Кроме того, было показано, что ранее считавшийся молодым объект HD 35929 уже покинул ГП, является звездой-гигантом (F2 IIIe) и, вероятно, начал создавать новую околозвездную пыль. Подобный вывод был сделан и для открытого автором объекта HD 19993 (A7/8 IIe). В следующей главе описано открытие еще нескольких объектов с похожими свойствами. Таким образом, вероятно открыта ранее не упоминавшаяся в литературе новая группа создающих пыль объектов.

Четвертая глава посвящена основному направлению исследований автора – выяснению природы звезд с B[e] феноменом. Проведен анализ классификации объектов этого типа в Галактике, предложенной Lamers et al. (1998), где было выделено 5 подгрупп этих объектов: не достигшие ГП (HAeB[e]), сверхгиганты (sgB[e]), симбиотические (symbB[e]), компактные планетарные туманности (cPNB[e]) и неклассифицированные (не отнесенные ни к одной из известных групп объектов). Впервые показано, что большинство неклассифицированных объектов демонстрирует резкое падение наблюдаемых ИК потоков с увеличением длины волны, начиная от ~ 10 микрон. Их показатели цвета в фотометрической системе IRAS нетипичны для горячих звезд, ультрафиолетовое излучение которых может нагреть даже достаточно далекую пыль (см. рис. 1). Таким образом, эта особенность может быть объяснена компактностью распределения околозвездной пыли, что, наряду с анализом природы последней вблизи объектов с известным эволюционным статусом, указывает на недавнее (или незавершившееся) ее образование.

Спектральное исследование неклассифицированных объектов показало, что их эмиссионные спектры аномально сильны. В частности, Бальмеровские линии в их спектрах на 1–2 порядка сильнее, чем в спектрах классических Be звезд, Ae/Be звезд и даже сверхгигантов спектральных классов O и B. Автором были детально изучены следующие неклассифицированные объекты с B[e] феноменом: AS 160, MWC 342, HD 50138. Кроме того, было показано, что к этому типу относится и объект HD 85567, считавшийся ранее Ae/Be звездой

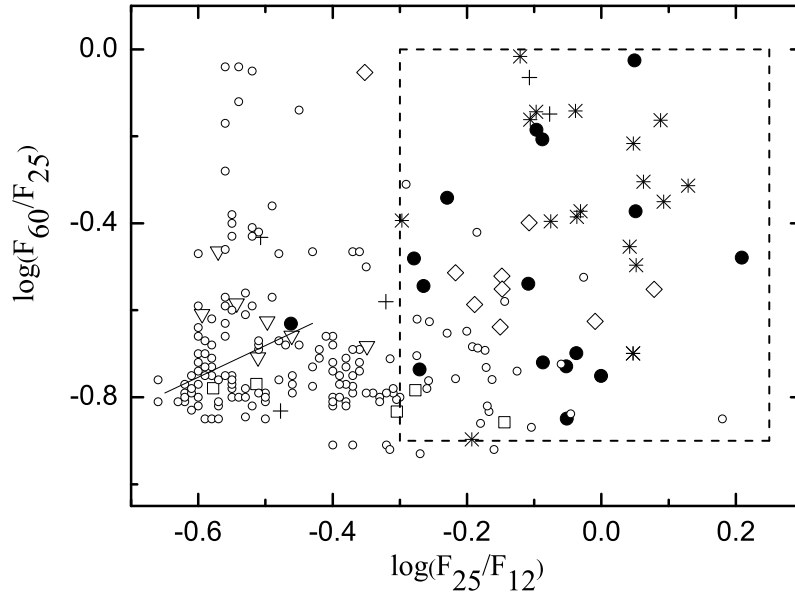


Рис. 1: Диаграмма показателей цвета в системе спутника IRAS для различных объектов с околозвездной пылью. Параметры: F_{12} , F_{25} , F_{60} – наблюдаемые потоки ИК излучения на эффективных длинах волн 12, 25 и 60 мкм фотометрической системы IRAS, рассчитанные на единичный интервал частот. Символы: звезды типа FS CMA из оригинального списка Allen & Swings (1976) – заполненные кружки; звезды типа VV Сер – квадраты; углеродные звезды – треугольники; звезды спектрального класса M, включая Мириды – маленькие незаполненные кружки; звезды типа Вольфа-Райе – крестики; звезды типа RV Тау – ромбы; объекты типа FS CMA, открытые автором – звездочки. Сплошная линия показывает влияние межзвездной экстинкции на показатели цвета от положения звездных фотосфер до величины визуальной экстинкции $A_V=20$ звездных величин. Часть диаграммы, ограниченная пунктирными линиями, показывает наиболее вероятное положение звезд с V[e] феноменом. Здесь также присутствуют звезды спектрального класса M, Вольфа-Райе и типа RV Тау.

Хербига (Lamers et al. 1998).

Для выяснения распространенности систем с горячими звездными компонентами и вышеуказанными ИК показателями цвета был проведен анализ каталога точечных источников IRAS. На начальном этапе была выполнена позиционная кросс-корреляция этого каталога с опубликованными списками Галактических эмиссионных звезд (см. выше описание основных результатов) и найдены очевидные оп-

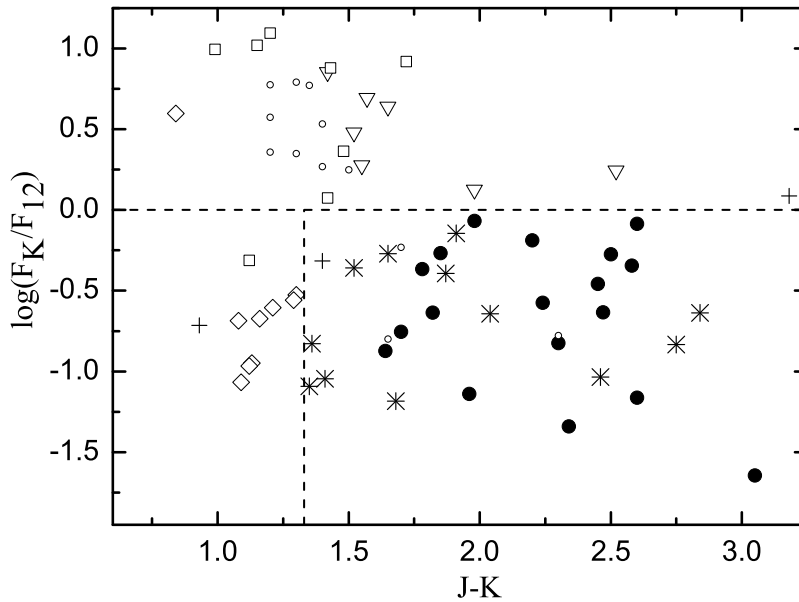


Рис. 2: Одна из двухцветных диаграмм для выделения звезд типа FS CMa. Параметры: F_{12} и F_K – потоки излучения на 12 микронах в фотометрической системе IRAS и в полосе K (2.2 микрона) фотометрической системы Джонсона, соответственно, рассчитанные на единичный интервал частот; $J - K$ – показатель цвета в широкополосной фотометрической системе Джонсона. Символы представляют те же группы объектов, что и на рис. 1. Большинство звезд спектрального класса M, показанных на рис. 1, имеют большие величины F_K/F_{12} и находятся вне границ рис. 2. Пунктирные линии показывают эмпирическое разделение между холодными и горячими звездами с пылевыми оболочками. Большинство объектов, находящихся в правом нижнем углу диаграммы, являются звездами типа FS CMa.

тические отождествления ИК источников, частично независимо найденные Dong & Nu (1991). Наблюдения, выполненные автором и его коллегами в рамках совместной программы, показали, что объекты AS 78, Hen 3–140, Hen 3–303, MWC 657, V669 Ser являются неклассифицированными объектами с B[e] феноменом.

Попутно было показано, что вследствие низкой позиционной точности каталога IRAS, многие оптические отождествления ИК источников могут быть неоднозначными. После опубликования в 2003 году обзоров неба в оптическом и ближнем ИК диапазонах с астро-

метрической точностью порядка 1–2 угловых секунд (2MASS и USNO–B1.0) работа по поиску новых звезд с V[e] феноменом получила новый импульс. Автор показал, что в связи с более низкой чувствительностью IRAS, практически во всех случаях выбранному из этого обзора источнику будет соответствовать ярчайший объект обзора 2MASS. Однако, поскольку похожие РЭС в ИК диапазоне могут иметь и холодные звезды (в частности, на стадии асимптотической ветви гигантов и ППТ), были разработаны дополнительные фотометрические критерии, позволяющие с большой вероятностью выделять объекты с V[e] феноменом (например, диаграмма (J-K) $\sim \lg F_K/F_{12}$, см. рис. 2). Последующие спектральные наблюдения подтвердили присутствие V[e] феномена у следующих кандидатов, найденных в результате кросс-корреляции каталогов: IRAS 00470+6429, 03421+2935, 06071+2925, 07080+0605, 07377–2523, 07455–3143, 08307–3748, 17449+2320. Таким образом, количество галактических звезд с V[e] феноменом и недавно созданной пылью было доведено до ~ 60 -ти (включая сверхгиганты).

Исследования в рамках международной программы, организованной автором, показали, что эти объекты можно разделить на два класса: V[e] сверхгиганты (~ 10 объектов) и объекты более низкой светимости (от ~ 300 до $\sim 30000 L_{\odot}$). Последние были названы объектами типа FS CMa по имени прототипа оригинальной группы звезд с V[e] феноменом. Автор показал, что наблюдаемые сильные эмиссионные спектры объектов типа FS CMa можно объяснить, лишь предположив темп потери массы на ~ 2 порядка больший, чем теория звездной эволюции предсказывает для одиночных звезд таких светимостей (Vink, de Koter, & Lamers 2001). В связи с этим, автор выдвинул гипотезу о двойственности этих объектов. Поскольку количество ОЗМ в этих системах велико, что обуславливает присутствие сильных эмиссионных линий и ИК избытков, вероятно, звездные компоненты взаимодействуют друг с другом. Однако, в большинстве случаев, это взаимодействие вряд ли связано с заполнением полости Роша одной или обеими звездами (что к настоящему времени было подтверждено только у одного из исследованных объектов, V[e] сверхгиганта RY Sct). Более оправданным представ-

ляется взаимодействие через обмен ОЗМ через первую точку Лагранжа, а также потеря вещества из полостей Роша компонентов в окоლოსистемный диск, в котором образуется пыль. К настоящему времени, различными методами (спектроскопия, спектроастрометрия) вторичные звездных компонентов обнаружены у $\sim 30\%$ объектов типа FS CMa.

Побочным результатом вышеописанного исследования явилось открытие ряда новых объектов (как с эмиссионными линиями в спектрах, так и без них) с ИК избытками, не показывающими V[e] феномена (IRAS 02155+6410, 17050–2408, 22022+4410, и 22061+4747). Возможно, они представляют группу звезд, уже закончившую эволюцию на ГП, в оболочках которых сложились условия для образования новой пыли. Это явление пока не получило никакого объяснения, и его изучение не входило в цели настоящей работы.

В **пятой главе** описываются исследования V[e] сверхгигантов и объектов типа LBV. Обе группы представляют различные стадии эволюции массивных звезд, характеризующиеся сильной потерей вещества. Десять галактических звезд с V[e] феноменом были описаны в литературе как сверхгиганты и еще 15 были открыты в Магеллановых Облаках (Zickgraf et al. 1986, Gummersbach, Zickgraf, & Wolf 1995). В отличие от обычных сверхгигантов (типичные терминальные скорости ветров которых достигают тысяч км с^{-1}), V[e] сверхгиганты имеют ветры с низкой терминальной скоростью (порядка сотни км с^{-1}), во внешних частях которых может образовываться пыль, так как плотность ОЗМ в таких ветрах падает медленно по мере удаления от звезды. Автором было предпринято первое систематическое исследование галактических V[e] сверхгигантов, опубликована серия из пяти статей (публикации 40, 46, 52, 54, 55) и открыты 4 новых V[e] сверхгиганта (Hen 3–298, Hen 3–1398, HDE 327083, AS 381), у последних двух из которых были обнаружены вторичные звездные компоненты.

Как и V[e] сверхгиганты, LBV имеют замедленные ветры, но их избытки ИК излучения указывают на наличие, как правило, только холодной пыли в их оболочках. Последнее связано с образованием пыли во время дискретных выбросов большого количества вещества

с поверхности звезд, последний из которых наблюдался у объекта η Carinae в середине 19-го века. LBV редки в Галактике и обнаружение новых членов этой группы очень важно для понимания деталей эволюции массивных звезд. Автор впервые детально изучил свойства объектов MWC 314, AS 314 и MWC 930 и показал, что они принадлежат к типу LBV. Путем моделирования профилей Бальмеровских линий в спектрах этих объектов, автор получил оценки темпа потери массы ($\dot{M} \sim 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5} M_{\odot} \text{год}^{-1}$). Для этого была использована программа расчета переноса излучения в спектральных линиях водорода на основе метода Соболева, впервые описанная Погодиным (1986) и существенно модернизированная автором. В частности, для MWC 930 было показано, что вклад излучения ОЗМ в оптический континуум объекта составляет ~ 0.5 звездной величины и должен учитываться при определении его светимости.

В **шестой главе** содержится обзор современного состояния исследования классических Be звезд; обсуждаются результаты, полученные автором по обновлению каталога объектов этого типа в Галактике и его статистическому исследованию; описываются работы автора по изучению отдельных объектов и обнаружению их двойственности. Статистическое исследование ~ 250 ярчайших Be звезд в Галактике показало, что относительное количество известных двойных систем с Be звездой падает с ослаблением блеска объекта, что определенно связано с сильным эффектом наблюдательной селекции. Это исследование, наряду с результатами изучения отдельных Be звезд, описанных ниже, привело автора к предположению, что двойственность следует искать у объектов с наиболее сильными эмиссионными спектрами, поскольку гравитационное взаимодействие между звездными компонентами, по всей вероятности, облегчает истечение вещества с их поверхности. Это предположение, пока не проверенное теоретически, позволяет наблюдателям сосредоточиться на конкретных объектах и ускорить формирование базы данных для уточнения современных представлений о природе классических Be звезд.

В результате поиска горячих звезд, связанных с источниками каталога IRAS, было обнаружено 50 неотожествленных Be

звезд, включая два ярких объекта (HD 4881 и HD 5839), эмиссионный спектр которых был открыт автором. Автор также установил, что эмиссионный объект LS II+22° 8 не связан с ИК источником IRAS 19381+2224, как указывали Dong & Hu (1991), получил новые наблюдения этого объекта, и показал, что объект является классической Ве звездой.

Автором были впервые детально исследованы переменность блеска и спектра Ве звезды π Aquarii между началом 1950-х годов, когда в ее спектре было отмечено появление и быстрое усиление эмиссионных линий, до 1996 года, когда эти линии исчезли. Было обнаружено аналогичное развитие избытка ИК излучения. Спектральные наблюдения, полученные в 1996–2000 годах с активным участием автора, позволили ему установить противофазность изменения лучевой скорости слабого остаточного эмиссионного компонента линии H α и ее крыльев с периодом 84.1 суток и, таким образом, открыть двойственность этого объекта (публикация 39). Это исследование впервые убедительно показало, что вклад излучения ОЗМ в оптическом континууме у Ве звезд значителен и может быть сравним со вкладом излучения фотосферы центральной горячей звезды. Автором было подтверждено открытие двойственности исторически первой Ве звезды γ Cassiopeae (Harmanec et al. 2000) и уточнены параметры ее орбиты (орбитальный период 205 суток и эксцентриситет орбиты $e=0$, публикация 42).

Организованная автором программа наблюдений двойной системы δ Scorpii, околозвездный диск которой начал образовываться в 2000 году, привела к уточнению ее орбиты и открытию сложного характера истечения вещества из главного компонента (публикации 34, 47, и 58). В частности, было обнаружено, что эмиссионные линии усиливаются при ослаблении оптического блеска объекта. При найденном наклоне околозвездного газового диска к лучу зрения (38 ± 5 градусов), наличие этого явления позволяет предположить, что истечение вещества из атмосферы главного компонента системы происходит не только в плоскости диска. Эта уникальная система, имеющая эксцентриситет орбиты $e=0.94$, будет проходить очередной периастр в 2011 году, что приведет к сильному уменьшению

полостей Роша обоих звездных компонентов и позволит изучить не наблюдавшиеся ранее явления, связанные с этим эффектом, а также уточнить ее орбитальный период.

В Заключение подведены итоги диссертации и намечены пути дальнейшего исследования звездных систем с околозвездными газопылевыми оболочками. Отмечено, что наиболее информативными методами их изучения являются спектроскопия высокого разрешения с высоким отношением сигнал/шум, дополненная квазисинхронной многоцветной фотометрией и ИК интерферометрией. Указано на важность комплексного исследования объектов с околозвездными оболочками и звезд, находящихся в направлении этих объектов для уточнения их расстояний и светимостей (например, по межзвездным спектральным особенностям), а также оценки вклада ОЗМ в их наблюдаемые характеристики (используя одновременное моделирование профилей эмиссионных линий, позволяющее определить вклад газовой составляющей оболочки в наблюдаемый континуум, и избытков ИК излучения, позволяющее определить суммарный вклад газовой и пылевой составляющей).

Апробация работы

В ходе выполнения работы постановка задач и полученные результаты обсуждались на:

- **научных семинарах:** ГАО РАН (2001 и 2007 годы), САО РАН (2001 и 2007 годы), Институтах Астрофизики в Льеже (Бельгия, 1997 год) и Париже (Франция, 2002 год), Института Макса Планка по Радиоастрономии (Бонн, Германия, 5 докладов, 2002–2007 годы), Университетов Амстердама и Утрехта (Нидерланды, 2002, 2004, и 2005 годы), Университета Лидса (Великобритания, 2007 год), Университета штата Северная Каролина в г. Гринсборо (США, 2005 и 2006 годы), Обсерватории Cote d’Azur (Ницца, Франция, 2004 год), Бразильской Национальной Обсерватории (Рио де Жанейро, 2006 год);

- **международных конференциях:** коллоквиуме “Звездные джеты и биполярные истечения” (остров Капри, Италия, 1991); симпозиуме МАС № 162 “Пульсации, вращение и потеря массы звездами ранних спектральных классов” (Антиб, Франция, 1993 год); конференции “Природа и эволюционный статус Ae/Be звезд Хербига” (Амстердам, Нидерланды, 1993 год); конференции “Околос звездная материя – 94” (Эдинбург, Шотландия, 1994 год); конференции “Околос звездные диски, истечения и звездообразование” (остров Козумел, Мексика, 1994 год); конференции “Голубые переменные высокой светимости: массивные звезды на промежуточной стадии эволюции” (Гавайи, США, 1996 год); конференции “В[e] звезды” (Париж, Франция, 1997 год, автор входил в состав научного оргкомитета); коллоквиуме МАС № 169 “Переменные и несферичные ветры горячих звезд высокой светимости” (Гейдельберг, Германия, 1998 год); коллоквиуме МАС № 175 “Be феномен в звездах ранних спектральных классов” (Аликанте, Испания, 1999 год); коллоквиуме МАС № 187 “Экзотические звезды как вызов эволюции” (Майами, США, 2002 год); коллоквиуме “Открытые вопросы локального звездообразования” (Уро-Прето, Бразилия, 2003 год); Всероссийской Астрономической Конференции “Горизонты Вселенной” (ВАК–2004, Москва); конференции “Массивные звезды во взаимодействующих двойных системах” (Монреаль, Канада, 2004 год); конференции “Звезды с В[e] феноменом” (остров Флиеланд, Нидерланды, 2005 год, автор являлся со-председателем научного оргкомитета и со-издателем трудов конференции); конференции “Потеря массы звездами и эволюция звездных скоплений” (Лунтерен, Нидерланды, 2006 год), региональных совещаниях астрономов штатов Южная и Северная Каролина (США, 4 доклада, 2005–2007 годы); и съездах Американского Астрономического Общества в 1998, 1999, 2000, 2001 и 2004 годах.

Результаты работы отражены в 67-ми публикациях, 59 из которых написаны совместно с другими авторами.

Список основных публикаций по теме диссертации:

1. Miroschnichenko A.S., Ivanov A.S. On photometric properties of different types of stars with infrared excesses. “Stellar jets and bipolar outflows” (L. Errico, A. Vittone eds.). 1993, *Astrophys. Space Sci. Library*, **186**, p. 221–222
2. Мирошниченко А.С., Иванов А.С. Фотометрия северных звезд VV Сер. 1993, *Письма в Астрон. Журн.*, **19**, с. 919–927
3. Бергнер Ю.К., Мирошниченко А.С., Кривцов А.А., Юдин Р.В., Ютанов Н.Ю., Джакушева К.Г., Куратов К.С., Муканов Д.Б. Наблюдения звезд с эмиссионными линиями и ИК-избытками. I. Многоцветная фотометрия звезд Ae/Be Хербига. 1993, *Переменные Звезды*, **23**, с. 163–174
4. Miroschnichenko A.S. MWC 314 – a new galactic B[e] supergiant. “Pulsation, rotation, and mass loss in early-type stars (L.A. Balona, H.F. Herichs, J.M. LeContel eds.) 1994, *Proc. IAU Symposium* № 162, p. 396–397
5. Miroschnichenko A.S. On the nature of the Herbig Be stars MWC 137 and MWC 297. “The nature and evolutionary state of Herbig Ae/Be stars” (P.S. Thé, M.R. Pérez, D. de Winter eds.) 1994, *ASP Conf. Ser.*, **62**, p.134–135
6. Miroschnichenko A.S. Possible binaries among B[e] stars. 1995, *Astron. Astrophys. Transactions*, **6**, p. 251–263
7. Bergner Yu.K., Miroschnichenko A.S., Yudin R.V., Kuratov K.S., Mukanov D.B., Sheikina T.A. Observations of emission-line stars with IR excesses. II. Multicolor photometry of B[e] stars. 1995, *Astron. Astrophys.*, **112**, p. 221–228
8. Miroschnichenko A.S., Bergner Yu.K., Mukanov D.B., Sheikina T.A. Massive early-type emission-line stars: an attempt to distinguish a new group of stellar objects. 1995. *Astrophys. Space Sci.*, **224**, p. 519–520

9. Мирошниченко А.С., Бергнер Ю.К., Куратов К.С., Муканов Д.Б., Шейкина Т.А. Инфракрасные избытки звезд спектрального класса А. 1996, *Астрон. Журн.*, **73**, p. 559–569
10. Miroshnichenko A.S. MWC 314 - a high-luminosity peculiar B[e] star. 1996, *Astron. Astrophys.*, **312**, p. 941–949
11. Miroshnichenko A.S., Ivezić Ž., Elitzur M. On protostellar disks in Herbig Ae/Be stars. 1997, *Astrophys. J.*, **475**, L41–L44
12. Мирошниченко А.С., Бергнер Ю.К., Куратов К.С. Исследование кандидатов в звезды Ae/Be Хербига HD 35929 и HD 203024. 1997, *Письма в Астрон. Журн.*, **23**, с. 118–124
13. Miroshnichenko A.S., Kuratov K.S., Ivezić Ž., Elitzur M. MWC 657 – a new peculiar Be star. 1997, *Inform. Bull. Variable Stars*, № 4506, p. 1–4
14. Miroshnichenko A.S. Peculiar early-type supergiants and LBVs: resemblance and difference. “Luminous Blue Variables: Massive Stars in Transition”. (A. Nota, H. Lamers eds.). 1997, *ASP Conf. Ser.* **120**, p. 202–203
15. Miroshnichenko A.S., Fremát Y., Houziaux L., Andrillat Y., Chentsov E.L., Klochkova V.G. High-resolution spectroscopy of the galactic candidate LBV MWC 314. 1998, *Astron. Astrophys. Suppl*, **131**, p. 469–478
16. Bjorkman K.S., Miroshnichenko A.S., Meade M.R., Babler B.L., Code A.D., Anderson C.M., Fox G.K., Johnson J.J., Weitenbeck A.J., Zellner N.E.B., Lupie O.L. The first ultraviolet and optical spectropolarimetry of the B[e] star HD 50138. 1998, *Astrophys. J.*, **509**, p. 904–910
17. Miroshnichenko A.S. Photometry, polarimetry, and interferometry of B[e] stars. “B[e] stars” (A.-M. Hubert, C. Jaschek eds.). 1998, *Astrophys. Space Sci. Library*, **233**, p. 145–164

18. Kuratov K.S., Miroshnichenko A.S., Bergner Yu.K. Observations of galactic B[e] stars at the Tien-Shan observatory. “B[e] stars” (A.-M. Hubert, C. Jaschek eds.). 1998, *Astrophys. Space Sci. Library*, **233**, p. 165–166
19. Ivezić. Ž., Miroshnichenko A.S., Elitzur M. Infrared emission from dust around B[e] stars. “B[e] stars” (A.-M. Hubert, C. Jaschek eds.). 1998, *Astrophys. Space Sci. Library*, **233**, p. 227–228
20. Miroshnichenko A.S., Mulliss C.L., Bjorkman K.S., Morrison N.D., Kuratov K.S. Wisniewski, J.P. Six intermediate-mass stars with far-infrared excess: a search for evolutionary connections. 1999, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **302**, p. 612–624
21. Beskrovnaya N.G., Pogodin M.A., Miroshnichenko A.S., Thé P.S., Savanov I.G., Shakhovskoy N.M., Rostopchina A.N., Kozlova O.B., Kuratov K.S. Spectroscopic, photometric, and polarimetric study of the Herbig Ae candidate HD 36112. 1999, *Astron. Astrophys.*, **343**, p. 161–174
22. Miroshnichenko A.S., Gray R.O., Vieira S.L.A., Kuratov K.S., Bergner Yu.K. Observations of recently recognized candidate Herbig Ae/Be stars. 1999, *Astron. Astrophys.*, **347**, p. 137–150
23. Miroshnichenko A.S., Ivezić Ž., Vinković D., Elitzur M. Dust emission from Herbig Ae/Be stars – evidence for disks and envelopes. 1999, *Astrophys. J.*, **520**, L115–L118
24. Miroshnichenko A.S., Kuratov K.S., Sheikina T.A., Mukanov D.B. LS II +22 8 – a newly recognized classical Be star. 1999, *Inform. Bull. Variable Stars*, № 4743, p. 1–4
25. Miroshnichenko A.S., Corporon P. Revealing the nature of the B[e] star MWC 342. 1999, *Astron. Astrophys.*, **349**, p. 126–134
26. Miroshnichenko A.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G. High-resolution spectroscopy of stellar winds in recently recognized LBV candidates. “Variable and non-spherical stellar winds in luminous

- hot stars” (B. Wolf, O. Stahl, A.W. Fullerton eds.) 1999, Lecture Notes in Physics, **523**, p. 272–274
27. Clark J.S., Miroshnichenko A.S., Larionov V.M., Lyuty V.M., Hynes R.I., Pooley G.G., Coe M.J., McCollough M., Dieters S., Efimov Yu.S., Fabregat J., Goranskii V.P., Haswell C.A., Metlova N.V., Robinson E.L., Roche P., Shenavrin V.I., Welsh W.F. Photometric observations of the radio bright B[e]/X-ray binary CI Cam. 2000, *Astron. Astrophys.*, **356**, p. 50–62
 28. Miroshnichenko A.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G. Optical spectrum of a dusty A-hypergiant AS 314. 2000, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **144**, p. 379–389
 29. Pogodin M.A., Miroshnichenko A.S., Bjorkman K.S., Morrison N.D., Mulliss C.L. Spectroscopic behaviour of the Herbig Be star HD 200775 around its maximum activity in 1997. 2000, *Astron. Astrophys.*, **359**, p. 299–305
 30. Miroshnichenko A.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G., Kuratov K.S., Sheikina T.A., Mukanov D.B., Bjorkman K.S., Gray R.O., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Puetter R., García-Lario P., Perea J.V., Bergner Yu.K. Spectroscopy and photometry of the emission-line B-type stars AS 78 and MWC 657. 2000, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **147**, p. 5–24
 31. Miroshnichenko A.S., Bjorkman K.S. Far-infrared excesses in classical Be stars. “The Be-phenomenon in early-type stars”. Proc. IAU Coll. № 175 (M.A. Smith, H. F. Hendrichs, J. Fabregat eds.). 2000, *ASP Conf. Ser.* **214**, p. 484–487
 32. Sheikina T.A., Miroshnichenko A.S., Corporon P. B-type emission-line stars with warm circumstellar dust. “The Be-phenomenon in early-type stars”. Proc. IAU Coll. № 175 (M.A. Smith, H.F. Hendrichs, J. Fabregat eds.). 2000, *ASP Conf. Ser.* **214**, p. 494–497

33. Miroschnichenko A.S., Levato H., Bjorkman K.S., Grosso M. Spectroscopy of B-type emission-line stars with compact dusty envelopes: HD 85567, Hen 3–140, and Hen 3–1398. 2001, *Astron. Astrophys.*, **371**, p. 600–613
34. Miroschnichenko A.S., Fabregat J., Bjorkman K.S., Knauth D.C., Morrison N.D., Tarasov A.E., Reig P., Negueruela I., Blay P. Spectroscopic observations of the δ Scorpii binary during its recent periastron passage. 2001, *Astron. Astrophys.*, **377**, p. 485–495
35. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G., Gray R.O., Garcia-Lario P., Perea Calderon, J.V. The pre-main-sequence star IP Per. 2001, *Astron. Astrophys.*, **377**, p. 854–867
36. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Krugov V.D., Usenko I.A. Properties of classical Be stars from analysis of high-resolution H α profiles. 2001, *Odessa Astronomical Publ.*, **14**, p. 47
37. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G., Ezhkova O.V., Gray R.O., García-Lario P., Perea Calderon J.V., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Venturini C.C., Puetter R. The Luminous B[e] Binary AS 381. 2002, *Astron. Astrophys.*, **383**, p. 171–181
38. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G., Manset N., García-Lario P., Perea Calderon J.V., Rudy R.J., Lynch D.K., Wilson J.C., Gandet T.L. V669 Cep : A new binary system with a B[e] star. 2002, *Astron. Astrophys.*, **388**, p. 563–572
39. Bjorkman K.S., Miroschnichenko A.S., McDavid D.A., Pogrosheva T.M. A study of π Aqr during a quasi-normal star phase: refined fundamental parameters and evidence for binarity. 2002, *Astrophys. J.*, **573**, p. 812–824
40. Miroschnichenko A.S., Klochkova V.G., Bjorkman K.S., Panchuk V.E. Properties of galactic B[e] supergiants. I. CI Cam. 2002, *Astron. Astrophys.*, **390**, p. 627–632

41. Hynes R.I., Clark J.S., Barsukova E.A., Callanan P.J., Charles P.A., Collier Cameron A., Fabrika S.N., Garcia M.R., Haswell C.A., Horne K., Miroschnichenko A.S., Negueruela I., Reig P., Welsh W.F., Witherick D.K. Spectroscopic observations of the candidate sgB[e]/X-ray binary CI Cam. 2002, *Astron. Astrophys.*, **392**, p. 991–1013
42. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Krugov V.D. Long-term variations and binary nature of Gamma Cas. 2002, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **114**, p. 1226–1233
43. Hofmann K.-H., Balega Y., Ikhsanov N.R., Miroschnichenko A.S., Weigelt G. Bispectrum speckle interferometry of the B[e] star MWC 349A. 2002, *Astron. Astrophys.*, **395**, p. 891–898
44. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G. Be binaries with warm dust and exotic high-luminosity A-F emission-line stars. “Exotic Stars as Challenges to Evolution”. *Proc. IAU Colloq. N187*, (C.A. Tout, W. Van Hamme eds.). 2002, *ASP Conf. Ser.*, **279**, p. 303–308
45. Мирошниченко А.С., Ключкова В.Г., Бйоркман К.С. Исследование В[e] звезды AS 160. 2003, *Письма в Астрон. Журн.*, **29**, с. 384–392
46. Miroschnichenko A.S., Levato H., Bjorkman K.S., Grosso M. Properties of galactic B[e] supergiants. II. HDE 327083. 2003, *Astron. Astrophys.*, **406**, p. 673–683
47. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Morrison N.D., Wisniewski J.P., Manset N., Levato H., Grosso M., Pollmann E., Buil C., Knauth D.C. Spectroscopy of the growing circumstellar disk in the δ Scorpii Be binary. 2003, *Astron. Astrophys.*, **408**, p. 305–311
48. Miroschnichenko A.S., Kusakin A.V., Bjorkman K.S., Drake N.A., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Venturini C.C., Puetter R.C., Perry R.B. HD 19993 and HD 29035: new bright A-type emission-line stars. 2003, *Astron. Astrophys.*, **412**, p. 219–228

49. Vinković D., Ivezić, Ž., Miroshnichenko A.S., Elitzur M. Disks and Halos in Pre-Main-Sequence Stars. 2003, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **346**, p. 1151–1161
50. Miroshnichenko A.S., Bjorkman K.S., Kusakina A.V., Gray R.O., Manset N., Klochkova V.G., Yushkin M.V., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Venturini C., Puetter R.C., Perry R.B. New candidates for dust-forming hot stars. 2003, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **35**, p. 1359
51. Pogodin M.A., Miroshnichenko A.S., Tarasov A.E., Mitskevich M.P., Chountonov G.A., Klochkova V.G., Yushkin M.V., Manset N., Bjorkman K.S., Morrison N.D., Wisniewski J.P. A new phase of activity of the Herbig Be star HD 200775 in 2001: evidence for binarity. 2004, *Astron. Astrophys.*, **417**, p. 715–723
52. Miroshnichenko A.S., Levato H., Bjorkman K.S., Grosso M., Manset N., Men'shchikov A.B., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Venturini C.C., Puetter R.C., Perry R.B. Properties of galactic B[e] supergiants. III. MWC 300. 2004, *Astron. Astrophys.*, **417**, p. 731–743
53. Miroshnichenko A.S., Gray R.O., Klochkova V.G., Bjorkman K.S., Kuratov K.S. Fundamental parameters and evolutionary state of the Herbig Ae star candidate HD 35929. 2004, *Astron. Astrophys.*, **427**, p. 937–944
54. Miroshnichenko A.S., Bjorkman K.S., Grosso M., Hinkle K., Levato H. Properties of galactic B[e] supergiants. IV. Hen 3–298 and Hen 3–303. 2005, *Astron. Astrophys.*, **436**, p. 653–659
55. Men'shchikov A.B., Miroshnichenko A.S. Properties of galactic B[e] supergiants. V. Two-dimensional radiative transfer model of RY Sct and its dusty disc. 2005, *Astron. Astrophys.*, **443**, p. 211–222
56. Miroshnichenko A.S., Bjorkman K.S., Grosso M., Levato H., Grankin K.N., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Venturini C.C., Puetter R.C. MWC 930 – a new LBV candidate. 2005, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **364**, p. 335–343

57. Wisniewski J.P., Babler B.L., Bjorkman K.S., Kurchakov A.V., Meade M.R., Miroshnichenko A.S. The asymmetrical wind of the candidate Luminous Blue Variable MWC 314. 2006, Publ. Astron. Soc. Pacific, **118**, p. 820–827
58. Carciofi A.C., Miroshnichenko A.S., Kusakin A.V., Bjorkman J.E., Bjorkman K.S., Marang F., Kuratov K.S., García-Lario P., Perea Calderon J.V., Fabregat J., Magalhaes A.M. Properties of the δ Scorpii circumstellar disk from continuum modeling. 2006, *Astrophys. J.*, **652**, p. 1617–1625
59. Miroshnichenko A.S. Galactic B[e] stars: a review of 30 years of investigation. “Stars with the B[e] Phenomenon”, (M. Kraus, A.S. Miroshnichenko eds.) 2006, ASP Conf. Ser., **355**, p. 13–23
60. Miroshnichenko A.S., Bernabei S., Bjorkman K.S., Chentsov E.L., Klochkova V.G., Gray R.O., Levato H., Grosso M., Hinkle K.H., Kuratov K.S., Kusakin A.V., García-Lario P., Perea Calderon J.V., Polcaro V.F., Norci L., Manset N., Men’shchikov A.B., Rudy R.J., Lynch D.K., Venturini C.C., Mazuk S., Puetter R.C., Perry R.B., Gandet T.L. B[e] stars with warm dust: revealing the nature of unclassified B[e] stars and expanding the family. “Stars with the B[e] Phenomenon”, (M. Kraus, A.S. Miroshnichenko eds.) 2006, ASP Conf. Ser., **355**, p. 315–325
61. Polcaro V.F., Miroshnichenko A.S., Bernabei S., Viotti R.F., Rossi C., Norci L. The low resolution spectrum of selected B[e] stars with warm dust. “Stars with the B[e] Phenomenon”, (M. Kraus, A.S. Miroshnichenko eds.) 2006, ASP Conf. Ser., **355**, p. 343–346
62. Miroshnichenko A.S., Bernabei S., Polcaro V.F., Viotti R.F., Norci L., Manset N., Klochkova V.G., Rudy R.J., Lynch D.K., Venturini C.C., Mazuk S., Puetter R.C., Perry R.B., Gandet T.L. Optical and near-IR observations of the B[e] star AS 119. “Stars with the B[e] Phenomenon”, (M. Kraus, A.S. Miroshnichenko eds.) 2006, ASP Conf. Ser., **355**, p. 347–350

63. Miroschnichenko A.S. Discussion Session: How can we determine the evolutionary phase of the unclassified B[e] stars? “Stars with the B[e] Phenomenon”, (M. Kraus, A.S. Miroschnichenko eds.) 2006, ASP Conf. Ser., **355**, p. 365–368
64. Domiciano de Souza A., Driebe T., Chesneau O., Hofmann K.-H., Kraus S., Miroschnichenko A.S., Ohnaka K., Petrov R.G., Preibisch Th., Stee P., Weigelt G. VLTI/AMBER and VLTI/MIDI spectro-interferometric observations of the B[e] supergiant CPD–57°2874. Size and geometry of the circumstellar envelope in the near- and mid-IR. 2007, *Astron. Astrophys.*, **464**, p. 81–86
65. Miroschnichenko A.S., Bjorkman K.S., Kusakin A.V., Gray R.O., Manset N., Klochkova V.G., Yushkin, M.V., Rudy R.J., Lynch D.K., Mazuk S., Venturini C.C., Puetter R.C., Perry R.B., Gandet T.L. 2007, “Massive Stars in Interacting Binaries” (A.F.J. Moffett, N. Saint-Louis eds.), ASP Conf. Ser., **367**, p. 343–348
66. Miroschnichenko A.S. Towards understanding the B[e] phenomenon. I. Definition of the galactic FS CMA stars. 2007, *Astrophys. J.*, **667**, p. 497–504
67. Miroschnichenko A.S., Manset N., Kusakin A.V., Chentsov E.L., Klochkova V.G., Zharikov S.V., Gandet T.L., Gray R.O., Grankin K.N., Bjorkman K.S., Rudy R.J., Lynch D.K., Venturini C.C., Mazuk S., Puetter R.C., Perry R.B., Levato H., Grosso M., Bernabei S., Polcaro V.F., Viotti R.F., Norci L., Kuratov K.S. Towards understanding the B[e] phenomenon. II. New galactic FS CMA stars. 2007, *Astrophys. J.*, **671**, p. 828–841.

Личный вклад автора

Автору принадлежат постановка задачи по комплексному исследованию В[e] звезд; организация долговременной международной программы наблюдения этих объектов и сбора всех наблюдательных данных; получение и обработка более 250 эшелельных спектров с помощью комплекса программ IRAF; получение и обработка более 2000 фотометрических наблюдений более 100 объектов (классических Ве звезд, звезд с В[e] феноменом, Ae/Ве звезд Хербига, звезд типа Веги, звезд типа VV Сер, LBV); написание трех обзоров по исследованию В[e] звезд (публикации 17, 59 и 60); анализ спектральных и фотометрических характеристик и интерпретация наблюдений всех исследованных объектов; выполнение расчетов по моделированию Бальмеровских линий в спектрах LBV, распределений энергии в спектрах, и определению орбитальных элементов двойных звезд с Ве и В[e] феноменом, открытых автором (публикации 10, 11, 13, 15, 28, 30, 34, 37, 38, 40, 42, 46, 56); разработка и реализация методов кросс-корреляции каталогов позиционных и фотометрических данных в оптическом и ИК диапазонах спектра.

В совместных работах автору принадлежат:

- публикации : 1–2, 8–9, 12–13, 18–20, 22, 24–25, 31–33, 36–40, 42, 44, 50, 60, 66–67 постановка задачи, получение и обработка всего или части наблюдательного материала, интерпретация;
- публикации : 15, 29–30, 34–35, 45–48, 51, 53–54, 56, 62 постановка задачи, обработка наблюдательного материала, обсуждение результатов;
- публикации : 3, 7, 11, 16, 21, 23, 27–28, обработка наблюдательного материала, обобщение данных, участие в интерпретации;
- публикации : 41, 43, 49, 55, 57–58, 61, 64 обобщение данных, участие в интерпретации.

Цитируемая литература

- Погодин М.А. 1986, *Астрофизика*, **24**, 491
- Allen D.A., Swings J.-P. *Astron. Astrophys.*, 1976, 47, 293
- Aumann H.H. 1985, *Publ. Astr. Soc. Pacific*, **97**, 885
- Dong Y.-S., Hu J.-Y. 1991, *Chin. Astron. Astrophys.*, **15**, 275
- Dullemond C.P., Dominik C., Natta A. 2001, *Astrophys. J.*, **560**, 957
- Dwek E. 1998, *Astrophys. J.*, **501**, 643
- Gehrz R.D. 1989, *Proc. IAU Symp. № 135*, 445
- Geisel S. 1970, *Astrophys. J.*, **161**, 105
- Gummersbach C.A., Zickgraf F.-J., Wolf B. 1995, *Astron. Astrophys.*, **302**, 409
- Harmanec P., et al. 2002, *Astron. Astrophys.*, **364**, L85
- Hollenbach D., Adams F. 2004, *ASP Conf. Ser.*, **324**, 168
- Ivezić Ž., Nenkova M., Elitzur M. 1999, *User Manual for Dusty*, Univ. of Kentucky Internal Report, <http://www.pa.uky.edu/~moshe/dusty>
- Jaschek M., Egret D. 1982, *Proc. IAU Symp. № 98*, 261
- Kříž S., Harmanec P. 1975, *Bull. Astron. Inst. Czech.*, **26**, 65
- Lamers H.J.G.L.M., et al. 1998, *Astron. Astrophys.*, **340**, 117
- Liu W.M., et al. 2007, *Astrophys. J.*, **658**, 1164
- Malfait K., Bogaert E., Waelkens C. 1998, *Astron. Astrophys.*, **331**, 211
- Mannings V., Sargent A.I. 1997, *Astrophys. J.*, **490**, 792
- Preibisch Th., et al. 2000, *Proc. IAU Symp. № 200*, 106
- Ripepi, V., et al. 2006, *Astron. Astrophys.*, **449**, 335
- Salpeter E.E. 1974, *Astrophys. J.*, **193**, 585
- Secchi A. *Astronomical Register*, 1867, **5**, 18
- Thé P.S., Pérez M., de Winter D. 1994, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **104**, 315
- van der Veen W.E.C.J., Habing H.J., Geballe T.R. 1989, *Astron. Astrophys.*, **226**, 108
- Vink J., de Koter A., Lamers H.J.G.L.M. 2001, *Astron. Astrophys.*, **369**, 574
- Wackerling L.R. 1970, *Mem. Roy. Astron. Soc.*, **73**, 153
- Zickgraf F.-J., et al. 1986. *Astron. Astrophys.*, **163**, 119

Бесплатно

МИРОШНИЧЕНКО Анатолий Сергеевич

Фотометрические и спектральные исследования горячих звезд
с газопылевыми оболочками

Зак. № 152с Уч. изд. л. – 2.1 Тираж 100
Специальная астрофизическая обсерватория РАН