

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени П.К.ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи
УДК 524.38

Кильпио Елена Юрьевна

**Исследование вспышечной активности в
симбиотических звездах**

01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена в Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Бисикало Дмитрий Валерьевич,
Институт астрономии РАН

**Официальные
оппоненты:** доктор физико-математических наук
Чечеткин Валерий Михайлович,
Институт прикладной математики
имени М.В. Келдыша РАН

Ведущая организация: Кандидат физико-математических
наук
Татарникова Анна Александровна
Государственный астрономический
институт им. П.К. Штернберга
Главная астрономическая
обсерватория РАН (Пулково)

Защита состоится « 5 » октября 2006 г. в 14 ч. 00 мин. на
заседании диссертационного совета Московского государственного
университета им.М.В. Ломоносова, шифр Д 501.001.86

Адрес: 119992, Москва, Университетский проспект, дом 13,
Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга
(ГАИШ МГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного
астрономического института им. П.К.Штернберга.

Автореферат разослан « » 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

С.О.Алексеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Симбиотические звезды – взаимодействующие двойные системы, состоящие из красного гиганта и белого карлика, окруженных туманностью [1]. В настоящее время известно около 200 симбиотических звезд но, согласно оценкам [2], их число в Галактике может составлять от 3 000 до 30 000. Симбиотические звезды – разделенные системы и обмен веществом между компонентами в них происходит через звездный ветер. Это интереснейший класс объектов со сложным поведением. Важное наблюдаемое проявление симбиотических звезд – происходящие в них вспышки, по характеру которых их можно разделить на два типа – симбиотические новые и классические симбиотические звезды [3,4]. В рамках данной работы исследуются классические симбиотические звезды (также называемые звездами типа Z Andromedae).

Классические симбиотические звезды характеризуются новоподобными вспышками, во время которых их оптический блеск возрастает на $2-3^m$. В соответствии с общепринятым сейчас сценарием выделение энергии происходит в результате увеличения темпа аккреции и выхода его за пределы интервала, соответствующего устойчивому режиму горения. Для объяснения причин, вызывающих такие изменения темпа аккреции, ранее предлагалось несколько разных механизмов но, к сожалению, ни один из них не был в состоянии описать всю картину полностью.

В последние годы объем наблюдательных данных существенно вырос. В частности это связано с появлением космических миссий, обеспечивающих возможности проведения наблюдений в различных спектральных диапазонах. Во время последней вспышки Z And – прототипа классических симбиотических звезд – была получена детальная кривая блеска, на которой стали видны подробности, не замеченные во время предыдущих вспышек, а именно, что рост к

максимуму блеска происходит в несколько этапов [5]. Наличие детальных сведений о развитии вспышки вводит дополнительные ограничения на существующие модели и приводит к необходимости разработки новой модели, учитывающей все факторы.

Создание модели, способной объяснить всю совокупность имеющихся наблюдательных данных - одна из наиболее актуальных задач в области исследования симбиотических звезд.

Цель диссертации

Целью работы является исследование вспышечной активности в классических симбиотических звездах при помощи двумерных и трехмерных газодинамических расчетов. Исследование проводилось на примере прототипа классических симбиотических звезд – Z And.

В работе решались следующие основные задачи:

1. *Исследование газодинамики течения вещества в симбиотической звезде при разных параметрах ветра от донора. Определение условий формирования аккреционного диска в системе.* Известно, что структура течения вещества в системе с компонентами, не заполняющими полость Роша, определяется в первую очередь принятыми параметрами звездного ветра (см. например, [6,7]). В данной работе впервые проводилось исследование зависимости структуры течения вещества от параметров ветра в рамках трехмерного моделирования. Это позволило проверить при помощи более реалистичных расчетов результаты, полученные ранее и определить физические условия формирования в системе аккреционного диска.

2. *Исследование механизма перехода от спокойного к активному состоянию в классических симбиотических звездах.* В ряде работ высказывались предположения, что вспышечная активность симбиотических звезд связана с переменностью ветра от гиганта, однако наблюдения фиксируют лишь незначительные изменения его свойств. Это обстоятельство накладывает жесткие

ограничения на все сценарии развития вспышечной активности вследствие изменения свойств гиганта. В соответствии с результатами моделирования, в симбиотических звездах при скоростях, близких к наблюдаемой, возможно существование двух режимов аккреции – с аккреционным диском и без него (аккреция из ветра) и для перехода от одного режима к другому достаточно небольшого (в пределах наблюдаемого) изменения параметров ветра. При увеличении скорости ветра диск разрушается и происходит переход от дисковой аккреции к аккреции из ветра. Этот процесс сопровождается ростом темпа аккреции, приводящим к превышению диапазона его значений, при которых возможно устойчивое горение на поверхности белого карлика и, как следствие, к развитию вспышки. Одна из основных целей диссертации – исследовать возможность перехода между спокойным и активным состояниями в рамках этого механизма, отталкиваясь от изменений параметров ветра гиганта, не противоречащих наблюдениям.

3. *Исследование процесса развития вспышки в классической симбиотической звезде Z And в рамках модели сталкивающихся ветров.* Данные наблюдений свидетельствуют о наличии ветра от горячего компонента во время вспышек Z And, а также некоторых других симбиотических звезд. Для исследования структуры течения после начала вспышки расчеты проводились с учетом существования ветра от обоих компонентов (модель сталкивающихся ветров). Возникновение ветра от горячего компонента существенно влияет на распределение вещества в системе и на кривую блеска системы. Целью этой части работы было рассмотрение изменения структуры течения вещества при возникновении ветра от горячего компонента, исследование влияния ветра от горячего компонента на блеск системы и попытка объяснить выявленные во время последней вспышки особенности кривой блеска Z And.

Научная новизна

В рамках диссертационной работы впервые при помощи трехмерных расчетов определены условия формирования диска в системах с массообменом посредством звездного ветра. Показано, что при скоростях ветра от донора меньших орбитальной аккреция происходит с образованием диска, в то время как при больших скоростях ветра имеет место аккреция из ветра. Определены условия образования диска для классической симбиотической звезды Z And.

Вспышки в классических симбиотических звездах связаны с изменением темпа аккреции на белый карлик и его выходом за пределы диапазона устойчивого горения [3]. До недавнего времени, несмотря на обилие предлагаемых сценариев, причины изменения темпа аккреции не были выявлены. Новый механизм, предложенный в диссертации, позволяет объяснить переход между спокойным и активным состояниями, отталкиваясь от незначительных, не противоречащих наблюдениям, изменений параметров ветра гиганта. Вызванная небольшим возрастанием скорости ветра смена режима аккреции обеспечивает изменение темпа аккреции достаточное для того, чтобы привести к вспышке. Результаты проведенных расчетов находятся в хорошем согласии с наблюдениями.

В рамках диссертационной работы впервые рассматривались изменения картины течения по мере развития вспышки, что позволило оценить характерные времена формирования системы ударных волн и провести полномасштабное сравнение с наблюдаемой кривой блеска. Результаты проведенного моделирования позволили предложить непротиворечивое объяснение сложного поведения кривой блеска во время вспышки, а именно поэтапного характера роста к максимуму, обнаруженного во время последней вспышки Z And. Проведенные расчеты показали, что наблюдаемая форма кривой блеска хорошо объясняется влиянием возникшего во время вспышки ветра от горячего компонента.

Кроме того, в рамках диссертации исследовался ряд моделей межзвездного поглощения с целью определить, какие из них и в каких случаях лучше использовать. По результатам проведенного исследования разработана программа для оценки величины межзвездного поглощения. Программа включает в себя ряд моделей межзвездного поглощения и позволяет сделать выбор наиболее подходящей в данном конкретном случае. Определены модели, наиболее пригодные для анализа наблюдений симбиотических звезд.

Практическая значимость

Основные результаты данной диссертации, определяющие ее практическую и научную значимость, опубликованы в авторитетных научных изданиях и применяются как у нас в стране, так и за рубежом. Предложенные в данной работе механизмы возникновения и развития вспышки используются при интерпретации наблюдений вспышек классических симбиотических звезд. Созданная программа для вычисления величины межзвездного поглощения по разным моделям поглощения является удобным инструментом, который может найти применение при решении широкого круга астрономических задач.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах Института астрономии РАН и семинаре ГАИШ. Результаты работы были представлены на следующих международных и российских конференциях:

1. Коллоквиум МАС (Комиссия 5), «International Cooperation in Dissemination of the Astronomical Data», Санкт-Петербург, Пулковско, июль 1996 г.
2. Международная конференция «Modern Problems of Stellar Evolution», Россия, Звенигород, 13-15 октября 1998 г.

4. Международная конференция «Variable Stars-2001», Украина, Одесса, август 2001 г.
5. Международная конференция «Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution», Ла Пальма, Испания, Май 2002 г.
6. Российско-японский симпозиум «Актуальные проблемы вычислительной механики», Санкт-Петербург, август 2002 г.
7. Международная конференция «Interacting Binary Stars-2003», Одесса, Украина, август 2003 г.
8. Международная конференция «Progress in Study of Astrophysical Disks: Collective and Stochastic Phenomena and Computational Tools», Волгоград, Россия, сентябрь 2003 г.
9. Международная конференция «Interacting Binaries: Accretion, Evolution and Outcomes», Чефалу, Италия, 4-10 июля 2004 г.
10. Международная конференция «The Astrophysics of Cataclysmic variables and related objects» Страсбург, Франция, 11-16 июля 2004 г.
11. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004, Москва, июнь 2004 г.
12. Международная конференция «Физика небесных тел», Украина, КрАО, 11-18 сентября 2005 г.
13. Международная конференция «Тесные двойные звезды в современной астрофизике», Москва, 22-24 мая 2006 г.

Кроме того, результаты работы регулярно докладывались на ежегодной конференции молодых ученых ИНАСАН (2001, 2002, 2003 и 2005 гг)

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Число страниц диссертации – 127, рисунков – 33, таблиц – 12, наименований в списке литературы – 98.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обсуждается актуальность темы диссертационной работы, описываются цели, поставленные при ее написании, формулируется постановка задачи, предмет и методы исследования. Дана общая информация о симбиотических звездах.

Глава 1 («Синтетическая карта межзвездного поглощения в Галактике») посвящена исследованию наиболее известных моделей и карт межзвездного поглощения в Галактике с целью определить, какие из них и в каких случаях лучше использовать. Особое внимание уделено выбору моделей, наиболее приемлемых для оценки поглощения для симбиотических звезд.

В параграфе 1.1 («Модели и карты поглощения») приводится описание моделей и карт межзвездного поглощения, использованных в данной работе.

Параграф 1.2 («Наблюдательные данные и сравнительный анализ моделей») посвящен описанию наблюдательных данных, использованных для анализа моделей. Приведены результаты сравнительного анализа моделей.

В параграфе 1.3 («Синтетическая карта межзвездного поглощения») представлена карта межзвездного поглощения, полученная в результате сравнительного анализа моделей. Эта карта позволяет определить наиболее пригодную модель поглощения для заданных галактической широты и расстояния. Приводится краткое описание программы, созданной по результатам проведенного исследования. Программа позволяет получать величину межзвездного поглощения разными способами, по всем исследованным моделям, а также в соответствии с предложенной синтетической моделью.

В параграфе 1.4 («Применение модели поглощения к симбиотическим звездам») даются рекомендации по использованию

моделей при оценке межзвездного поглощения для симбиотических звезд.

В главе 2 («Исследование при помощи двумерных и трехмерных моделей структуры течения вещества в разделенных двойных системах со звездным ветром. Определение условий формирования аккреционного диска») дано описание двумерных и трехмерных моделей, используемых в этой работе для проведения расчетов структуры течения вещества в классических симбиотических звездах. Приводятся результаты численного моделирования структуры течения вещества для разных значений параметров звездного ветра. Определены те значения параметров ветра звезды-донора, при которых в системе формируется аккреционный диск.

В параграфе 2.1 («Модель») описывается, как происходит обмен веществом в системах, где компоненты не заполняют полость Роша, и рассматриваются симбиотические звезды как класс таких систем. Приводится подробная информация о классической симбиотической звезде Z And, параметры которой использовались при проведении расчетов.

Дано описание математической модели. Течение вещества описывалось системой уравнений Эйлера. Общая структура течения вещества в системе с компонентами, не заполняющими полость Роша, определяется в первую очередь принятыми параметрами звездного ветра. Поскольку общепризнанного механизма ускорения газа в атмосферах холодных гигантов не существует, ускоряющая газ сила задавалась в параметрическом виде:

$$\mathbf{F} = \Gamma \frac{GM_1}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|},$$

где M_1 – масса звезды-донора, Γ – параметр.

Используемый параметр Γ изменялся в интервале от 0 до 1 и означал ослабление силы гравитационного притяжения донора на фактор $1-\Gamma$.

Приводится информация об используемых численных моделях. Двумерные расчеты были выполнены при помощи схемы Роу-Ошера. Трехмерные расчеты выполнены с помощью SFS-схемы (упрощенной схемы расщепления потоков).

В параграфе 2.2 («Результаты моделирования структуры течения вещества в системах с обменом веществом посредством звездного ветра») представлены результаты трехмерных расчетов для различных значений скорости звездного ветра от донора. Результаты показали, что при скоростях ветра, больших орбитальной наблюдается коническая ударная волна, обусловленная прямым потоком вещества от звезды-донора (т.н. аккреция из ветра). При этом, чем больше скорость ветра, тем меньше растров конуса и тем меньше угол наклона к оси, соединяющей центры компонентов двойной системы. При более низкой скорости ветра структура течения усложняется, в частности, в системе образуется отошедшая ударная волна и формируется аккреционный диск. Это подтверждает результаты более ранних исследований [6,7], однако использование более реалистичных трехмерных расчетов позволило уточнить особенности структуры течения.

В параграфе 2.3 («Определение параметров звездного ветра, соответствующих решению с диском») определены значения параметров (скорости ветра от донора и параметра Γ), при которых в системе возможно формирование аккреционного диска. Показано, что в классической симбиотической системе Z And образование диска возможно при значениях параметра Γ в интервале [0.85, 0.96] и значениях скорости ветра, меньших 25 км/с.

В главе 3 («Механизм перехода к активному состоянию в классических симбиотических звездах») представлены результаты двумерных и трехмерных расчетов структуры течения вещества в классической симбиотической звезде на примере Z And. Предложен механизм перехода между спокойным и активным состояниями в классических симбиотических звездах. Показано, что рост темпа

аккреции при смене режима аккреции (перехода от дисковой аккреции к аккреции из ветра) при незначительных вариациях скорости ветра от донора может обеспечить развитие вспышки в классических симбиотических звездах.

В параграфе 3.1 («Вспышки в симбиотических звездах») рассматриваются особенности вспышек в симбиотических звездах, описываются типы вспышек. В классических симбиотических звездах вспышки обусловлены изменением режима горения на поверхности белого карлика вследствие возрастания темпа аккреции и превышения диапазона значений, при которых возможно устойчивое горение.

В параграфе 3.2 («Решение для значения скорости ветра $V_w=20$ км/с») приводятся результаты двумерных и трехмерных расчетов для случая, когда скорость ветра от донора на 5 км/с меньше наблюдаемого значения 25 км/с. Показано, что в этом случае в системе формируется аккреционный диск. Определена величина темпа аккреции ($4.5-5 \times 10^{-8} M_{\text{sun}}/\text{год}$) и оценены размеры диска ($\sim 50-60 R_{\text{sun}}$). Показано, что полученное значение темпа аккреции находится внутри интервала устойчивого горения для массы белого карлика $0.6 M_{\text{sun}}$, принятой для Z And.

В параграфе 3.3 («Решение для значения скорости ветра $V_w=30$ км/с») приведены результаты расчетов для значения скорости ветра, на 5 км/с большего, чем наблюдаемое. Показано, что в этом случае аккреционный диск не образуется и имеет место аккреция из ветра. Определены параметры картины течения для решения без диска.

В параграфе 3.4 («Переход от решения с диском к решению с аккрецией из ветра») рассматривается переход от решения с диском к решению с аккрецией из ветра. Для этого в качестве начального взято стационарное решение с диском ($V_w=20$ км/с), а затем вычисления продолжены с увеличенной скоростью ветра ($V_w=30$ км/с). Исследуется процесс разрушения диска, начинающийся, когда ветер

с увеличенной скоростью достигает окрестности белого карлика, а именно расположенной перед ним отошедшей ударной волны. Показано, что процесс разрушения диска сопровождается высыпанием содержавшегося в нем вещества на поверхность аккретора, при этом наблюдается скачок в темпе аккреции примерно в 2.0-2.2 раза. Полученный рост скорости аккреции оказывается достаточным для вывода системы за пределы диапазона устойчивого горения и ее перевода в активное состояние. Время, в течение которого в расчетах наблюдался повышенный темп аккреции, находится в хорошем согласии с наблюдениями.

Глава 4 («Исследование процесса развития вспышки в классической симбиотической звезде Z And в рамках модели сталкивающихся ветров») описывает результаты двумерного моделирования газодинамики течения вещества в Z And на активной стадии системы. Предполагается, что после того как в соответствии с механизмом, описанным в главе 3, происходит разрушение аккреционного диска и темп аккреции выходит за пределы диапазона стационарного горения, начинается вспышка. В некоторый момент развития вспышки возникает ветер от горячего компонента. Наличие ветра от горячего компонента вносит вклад в светимость системы и, следовательно, меняет вид кривой блеска. Два ветра - от донора и от аккретора - сталкиваются в пространстве между компонентами, образуя картину течения с ударными волнами в области столкновения. Результаты выполненного моделирования позволяют объяснить особенности кривой блеска Z And в активном состоянии.

В параграфе 4.1 («Ветры от компонентов в симбиотической системе Z And на активной стадии. Модель сталкивающихся ветров») приводятся данные наблюдений, свидетельствующие о существовании ветра от горячего компонента во время вспышки в симбиотических звездах. Дается краткое описание модели сталкивающихся ветров. Для включения в расчет ветра от горячего компонента параметры газа на поверхности аккретора изменялись

таким образом, чтобы обеспечить соответствие модельной и наблюдаемой скоростей ветра. В качестве начального условия было взято стационарное решение до момента вспышки, после чего расчет продолжался с измененными граничными условиями на поверхности аккретора.

В параграфе 4.2 («Особенность роста кривой блеска Z And во время вспышки») описывается поведение кривой блеска Z And во время вспышки 2000 года. Детальные кривые блеска, полученные во время этой вспышки показывают, что рост к максимуму блеска в этой системе происходит не равномерно, а в три этапа, разделенных двумя плато [5].

В параграфе 4.3 («Процесс развития вспышки с учетом вклада ветра от горячего компонента») показано, что процессы аккреции не в состоянии обеспечить наблюдаемую энергетику вспышки. В качестве возможного механизма развития вспышки рассматривается комбинированный случай, когда увеличение скорости аккреции вследствие разрушения диска приводит к изменению темпа горения вещества. Рассматриваются процессы, которые могут вносить вклад в изменение блеска системы во время развития вспышки: i) расширение псевдофотосферы; ii) высокотемпературная область туманности, образуемая распространяющимся горячим ветром от белого карлика, и iii) формирующаяся в результате столкновения ветров структура ударных волн. Показано, что предлагаемый на основе проведенного моделирования сценарий развития вспышки обеспечивает очень хорошее совпадение с наблюдаемой кривой блеска по временной шкале и амплитуде.

В параграфе 4.4 («Сравнение с наблюдениями. Анализ вклада ударной волны в общий блеск системы») приводится сравнение полученных результатов с данными наблюдений [8]. Анализ наблюдательных данных показывает, что поэтапное изменение блеска в ходе развития вспышки хорошо объясняется в рамках рассматриваемой модели сталкивающихся ветров. Предложенный

сценарий обеспечивает объяснение поведения кривой блеска, не противоречащее имеющимся данным наблюдений (соответствие наблюдается по времени, амплитудам и степени ударной ионизации).

В Заключении перечисляются основные положения, выносимые на защиту, обсуждается новизна и научная значимость полученных результатов, приводится список опубликованных статей по теме диссертации, а также конференций, где были представлены основные результаты. Отмечается личный вклад автора в совместных работах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработана программа для оценки величины межзвездного поглощения. Программа включает в себя ряд моделей межзвездного поглощения и позволяет осуществить выбор наиболее подходящей в каждом конкретном случае. Определены модели, наиболее пригодные для симбиотических звезд.
2. По результатам трехмерных газодинамических расчетов определены условия формирования аккреционного диска в системах с обменом веществом посредством звездного ветра. Показано, что при скорости ветра меньше орбитальной, в системе формируется аккреционный диск, а при больших скоростях ветра имеет место аккреция из ветра. Это означает, что для классических симбиотических звезд, где значение скорости ветра от донора лежит близко к значению орбитальной скорости аккретора, возможно существование двух режимов - с аккреционным диском и с аккрецией из ветра. Для классической симбиотической звезды *Z And* диск образуется при параметрах звездного ветра $\Gamma \in [0.85, 0.96]$ и значениях скорости ветра меньше 25 км/с.

3. На основании результатов проведенных двумерных и трехмерных расчетов предложен механизм перехода от спокойного к активному состоянию в классических симбиотических звездах. Суть данного механизма состоит в том, что даже незначительного увеличения скорости ветра от звезды-донора достаточно для того, чтобы вызвать смену режима аккреции, а именно переход от дисковой аккреции к аккреции из ветра. При этом в момент перехода между этими режимами, а именно в процессе разрушения диска темп аккреции скачкообразно возрастает и выходит за верхний предел диапазона значений, для которых возможно устойчивое горение на поверхности белого карлика, что и приводит к развитию вспышки.
4. При помощи двумерного газодинамического моделирования структуры течения вещества проведено исследование процесса развития вспышки в симбиотической системе Z And. Показано, что поэтапный характер роста кривой блеска в период развития вспышки может быть объяснен в рамках модели сталкивающихся ветров от компонентов системы. Предложен сценарий развития вспышки, обеспечивающий очень хорошее совпадение моделируемых изменений светимости с наблюдаемой кривой блеска по временной шкале, амплитуде и оценке ударной ионизации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В совместных работах участие автора в постановке задачи, проведении расчетов и анализе результатов равное с другими соавторами. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. *Kilpio E., Malkov O.* Development of a Synthetic Model of Interstellar Extinction // *Baltic Astronomy* – 1997 – Vol. 6 – № 2 – P. 358
2. *Кильпио Е.Ю., Малков О.Ю.* Исследование межзвездного поглощения в Галактике // *Астрон. журн.* – 1997 – Т. 74 – С. 15
3. *Kilpio E.* Reclassification of spectra and calculation of interstellar extinction for the objects of HIPPARCOS catalogue // *Proceedings of the Conference Modern Problems in Stellar Evolution.* Edited by D. S. Wiebe, Moscow: GEOS – 1998 – P.268
4. *Kilpio, E. Yu.* 2D Modelling of the Gas Flow Structure in the Symbiotic Star Z Andromedae // *Odessa Astronomical Publications* – 2001 – Vol. 14, P. 41-43
5. *Malkov O., Kilpio E.* A synthetic map of the galactic interstellar extinction // *Astrophys. Space. Sci.* – 2002 – Vol. 280 – P. 115-118
6. *Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кильпио Е.Ю., Кузнецов О.А.* Структура течения вещества в Z And в спокойном состоянии и во время вспышки // *Астрон. журн.* – 2002 – Т. 79 – С.1131.
7. *Bisikalo D., Boyarchuk A., Kilpio E., Kuznetov O.* A Possible Transition Mechanism between Quiescent and Active Stages in Z And // *Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution*, Edited by R. L. M. Corradi et al., ASP Conference Proceedings, - 2003 - Vol. 303 – P. 218
8. *A.A.Boyarchuk, D.V.Bisikalo, E.Yu.Kilpio, O.A.Kuznecov* Gas Flow Structure in Binary Systems with Mass Exchange Driven by

Stellar Wind // *Computational Fluid Dynamics Journal* – 2003 – Vol. 11 – №4 – P. 532-540

9. Kilpio E. Yu., Bisikalo D.V., Boyarchuk A.A., Kuznetsov O.A. Modeling of Gas Flow Structure in Symbiotic Star Z And in Quiescent and Active States // *Interacting Binaries: Accretion, Evolution and Outcomes, AIP Conference Proceedings* – 2005. – Vol. 797 – P. 573

10. Kilpio E. Yu., Bisikalo D.V., Boyarchuk A.A., Kuznetsov O.A. Morphology of Gas Flows in Z And in Quiescent and Active States // *The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects, ASP Conference Proceedings* – 2005. – Vol. 330 – P. 457

11. Митсумото М., Джаханара Б., Матсуда Т., Ока К., Бисикало Д.В., Кильпио Е.Ю., Боффин Г.М.Дж., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. Трехмерные газодинамические расчеты изменения структуры течения при переходе от спокойного к активному состоянию в симбиотических звездах // *Астрон. Журн.* – 2005. – Т. 82 – № 11 – С. 990 – 998.

12. E.Yu.Kilpio, D.V.Bisikalo, A.A.Boyarchuk, O.A.Kuznetsov The Morphology of Gaseous Flows in Z And in the Active State // *Astrophysical Disks; Collective and Stochastic Phenomena*, Eds. A.M. Fridman et al., Kluwer Acad. Publ – 2006 – P. 329-336

13. Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кильпио Е.Ю., Томов Н.А., Томова М.Т. Исследование процесса развития вспышки в классической симбиотической звезде Z And в рамках модели сталкивающихся ветров // *Астрон. Журн.* – 2006. – Т. 83, № 9 – С. 809-820.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *А.А. Боярчук* Спектрофотометрическое исследование Z And в 1960-1965 гг // *Изв. КрАО* – 1967 – Т. 38 – С. 155
2. *Yungelson L., Livio M., Tutukov A., Kenyon S.J.* A Model for the Galactic Population of Symbiotic Stars with White Dwarf Accretors // *Astrophys. J.* – 1995 – Vol. 117 – P. 656
3. *B. Paczynski, B. Rudak* Symbiotic stars - Evolutionary considerations // *Astron. and Astrophys.* – 1980 – Vol. 82, P. 349-351
4. *J. Mikolajewska, S.J. Kenyon* On the nova-like eruptions of symbiotic binaries // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 1992 – Vol. 256 – Pp. 177-185.
5. *Sokoloski J.L., Kenyon S.J., Espey B.R. et al.* A “Combination Nova” Outburst in Z Andromedae: Nuclear Shell Burning Triggered by a Disk Instability // *Astrophys. J.* – 2006 – Vol. 636 – Pp. 1002-1019
6. *Бисноватый-Коган Г.С., Каждан Я.М., Клыпин А.А. и др.* Аккреция на быстро вращающийся гравитирующий центр // *Астрон. Журн.* – 1979 – Т.56 – С.359
7. *Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А., Попов Ю.П., Четкин В.М.* Влияние граничных параметров звездного ветра на структуру течения вещества в двойных системах с компонентами, не заполняющими полость Роша // *Астрон. Журн.* – 1994 – Т.71, С.560
8. *Tomov N.A., Taranova O.G., Tomova M.T.* Mass ejection by the symbiotic binary Z And during its 2000-2002 outburst // *Astron. and Astrophys.* – 2003 – Vol. 401, P. 669.