

На правах рукописи

УДК 524.3

Кузьмин Николай Михайлович

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ
ФОРМИРОВАНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ СТРУКТУР
В МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТАХ

01.03.02 — “Астрофизика и радиоастрономия”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз — 2008

Работа выполнена на кафедре теоретической физики и волновых процессов
Волгоградского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Муцовой Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Афанасьев Виктор Леонидович,
кандидат физико-математических наук,
Кайгородов Павел Вячеславович.

Ведущая организация: Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, Москва.

Защита состоится “_____” _____ 2008 г. в _____ часов на заседании диссер-
тационного совета Д 002.203.01 при Специальной астрофизической обсервато-
рии 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,
кандидат физико-математических наук

Е.К. Майорова

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы и предмет исследования. Как показали наблюдения последних двадцати лет, аккреционно-струйные системы достаточно широко распространены в астрофизике. В них реализуется ситуация, когда падающее на гравитирующий центр вещество образует быстро вращающийся диск, и одновременно с этим характерным видом течения — дисковой аккрецией — присутствует отток газа (outflows) в виде струйных выбросов (джетов), происходящих в направлениях, перпендикулярных плоскости симметрии диска, и, как правило, биполярных (т.е. истечение происходит в обоих направлениях). Особенностью астрофизических струй является существенно сверхзвуковой характер течения. Это приводит к тому, что коллективные явления приобретают в них характер ударных волн, формирующих регулярную упорядоченную пространственную структуру в струе и сопровождающихся интенсивным высвечиванием. Указанные структуры различны в различных объектах: наблюдаются или периодически расположенные вдоль оси симметрии струи яркие излучающие узлы с объемным заполнением (светимость растет с приближением к центру узла), или винтовые спирали, светимость в которых локализована к границе струи, или же комбинация (суперпозиция) первых двух узоров. Струйные выбросы оканчиваются ярким объектом, представляющим собой ударную волну большой интенсивности (bow shock), образованную вторжением существенно сверхзвукового выброса в окружающую аккреционно-струйную систему среду. Головная часть джетов поэтому оказывается окруженной коконом горячего и сильно турбулизованного газа, прошедшего через этот ударный фронт.

К аккреционно-струйным системам относятся протозвездные и молодые звездные системы с джетами, релятивистские струи из двойных систем, подобных SS-433, джеты в окрестностях активных ядер галактик и, возможно,

протяженные джеты из радиогалактик.

Исторически сложилось так, что изучение динамики молодых звездных систем начиналось в двух направлениях — с исследования линейной стадии развития гидродинамической неустойчивости в струях (как правило, плоских, цилиндрических, или, в редких исключительных случаях, постоянного угла раствора) и численного нелинейного моделирования этого процесса, либо с численного моделирования возбуждения головной ударной волны (bow shock), возникающей при вторжении сверхзвуковой струи в однородную невозмущенную окружающую среду околозвездного облака. Это было связано с относительно слабыми возможностями приборов, из-за чего наблюдались только наиболее яркие объекты, а именно — излучающие узлы в струях и головные части внешних ударных волн в расширяющихся оболочках.

Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца и резонансно-акустические моды джетов. В работах [1–3] показано, что в астрофизических струях развивается неустойчивость Кельвина–Гельмгольца. При этом развивается как осесимметричная (пинчевая) мода, так и неосесимметричные (винтовые) с различным индексом симметрии m (числом рукавов винтовой спирали на поперечном срезе струи). Очень быстро затем пришло осознание того факта, что струя представляет собой волновод, в котором наряду с указанными выше основными модами должны существовать и их высшие гармоники, различающиеся числом нулей возмущенных величин по радиусу струи. Как оказалось, при отвечающих наблюдаемым параметрах джетов, для таких гармоник развитие неустойчивости происходит значительно интенсивнее, чем для основных мод. При этом обусловленные ими излучающие узлы характеризуются объемным, а не поверхностным заполнением, что хорошо согласуется с наблюдениями.

Механизм неустойчивости отражательных гармоник подробно анализиро-

вался в [4–7]. Как показано в [8–11], сглаживание скачка скорости между струей и окружающей средой не только не устраняет усиления волн, но и приводит к появлению новых неустойчивых мод (так называемые “дрезиновские моды”), связанных с излучением энергии из критического слоя, в котором скорость потока и скорость фазы волны вдоль нее совпадают, — эффект, обратный затуханию Ландау [12].

Влияние гравитации центрального тела на неустойчивые моды струй.

Хотя анализу устойчивости джетов посвящено уже сравнительно большое число работ, где рассматриваются достаточно сложные и подчас весьма экзотические модели (см., например, [13–15]), остался ряд нерешенных принципиальных вопросов. Так например, хотя практически все наблюдаемые струйные выбросы конические, теоретических работ по устойчивости астрофизических струй с постоянным углом раствора практически нет. Исключение составляет работа [16], однако в ней равновесные градиенты термодинамических параметров вещества струи никак не привязываются к гравитационному полю источника выброса. В то же время понятно, что зарождение и рост возмущений, создающих впоследствии наблюдаемую крупномасштабную волновую структуру джетов, происходит во внутренних, близких к источнику выброса областях, где влияние гравитации центрального объекта на моды джетов может оказаться существенным.

Ранее нами были построены равновесные стационарные модели сверхзвуковых конических струй с постоянным углом раствора, находящихся в балансе по давлению с окружающей средой в поле тяжести центрального массивного объекта [17–19], и было показано, что параметры течения в таких струях не произвольны, а однозначно определяются параметрами окружающей среды. Отметим, что последнее заставляет усомниться в возможности широкой распространенности таких струй.

Проведенное в рамках предложенной модели исследование устойчивости показало, что учет гравитации приводит к появлению дополнительных неустойчивых мод струи — волноводно-резонансных внутренних гравитационных с аналогичным описанному в предыдущем пункте механизмом раскачки, обусловленным свертотражением волн этого типа от границ струи. Кроме того, в сравнении с однородным вдоль струи случаем, существенно меняется закон дисперсии возмущений.

Влияние внешнего нагрева и охлаждения высвечиванием на резонансно-неустойчивые моды струй. Дальнейшая логика исследований потребовала учета еще одного усложняющего фактора — внешнего нагрева излучением звезды и динамического охлаждения высвечиванием. Последний эффект рассматривался в работе [20], но в модели цилиндрической струи, однородной вдоль оси симметрии. В то же время понятно, что зарождение и рост возмущений, создающих впоследствии наблюдаемую крупномасштабную волновую структуру джетов, происходит во внутренних, близких к источнику выброса областях, где влияние гравитации центрального объекта и создаваемых ей градиентов равновесных термодинамических параметров и скорости на моды джетов может оказаться существенным. Проведенное нами численное нелинейное моделирование полностью подтверждает это предположение.

Эруптивные выбросы как механизм формирования излучающих узлов и высокоскоростных джетов. Все проведенное выше рассмотрение относится к наиболее популярной среди теоретиков модели струй, находящихся в балансе по давлению с окружающим газом; при построении равновесных моделей мы делаем вывод, что последнее требование, с учетом влияния гравитационного поля источника выброса, накладывает крайне жесткие ограничения на равновесные параметры таких струй, что заставляет усомниться в их повсеместной распространенности. Вместе с тем, существует альтернативная точка зрения

о том, что излучающие узлы джетов обусловлены не развитием гидродинамических неустойчивостей в непрерывных струях до стадии ударных волн, а являются ударными волнами, возникающими при вторжении в окружающую среду отдельных сгустков газа, квазипериодически выстреливаемых из ядра протозвезды (эруптивные выбросы) [21–23, 23–26].

Завершая обсуждение, следует сделать вывод об однозначной необходимости рассмотрения самосогласованных моделей аккреционно-струйных систем, поскольку исключение из рассмотрения хотя бы одной компоненты системы радикально изменяет всю физическую картину ее эволюции.

Цель работы. Основной целью диссертационной работы является изучение принципиальной возможности и характерных особенностей гидродинамических механизмов формирования наблюдаемых структур в молодых звездных объектах, исследование влияния различных параметров на эволюцию таких систем, выявление возможности согласования процессов, протекающих в газовых подсистемах молодых звездных объектов, развитие теории аккреционно-струйных систем, находящихся в поле гравитационного потенциала центрального тела и объяснение наблюдаемых феноменов на основе проведенного анализа.

Научная новизна. Впервые показано, что за формирование наблюдаемых регулярных структур в конических джетах из молодых звездных объектов в случае интенсивного охлаждения высвечиванием могут быть ответственны только поверхностные неустойчивые моды Кельвина–Гельмгольца и медленные (распространяющиеся по веществу струи к источнику) волноводно-резонансные энтропийные моды. Скорости этих мод вдоль границ струи превышают характерную скорость звука в окружающей атмосфере, что позволяет предполагать возможность их эволюции в ударные волны. Разработан и апробирован численный код для моделирования нелинейной

эволюции струй из молодых звездных объектов на фоне их стационарной модели [18] в сферической системе координат. Впервые показано, что, наблюдаемый угол раствора струй из молодых звездных объектов закономерно оказывается меньшим, чем реальный. Открыт и исследован механизм, благодаря которому сложная картина течений, возникающая после начального выброса из молодой звезды, будет эволюционировать в структуру, сходную с так называемыми НН-объектами. Примечательно, что этот механизм является чисто гидродинамическим, без необходимости привлечения магнитных полей и иных внешних эффектов. Предложено объяснение наблюдающихся в ряде массивных протозвездных облаков, содержащих одновременно несколько молодых звездных объектов, квазипараллельных джетов развитием в этих облаках антициклонических вихрей Россби с последующим формированием в этих вихрях протозвезд из-за развития гравитационной неустойчивости.

Научная и практическая значимость. Полученные в диссертации результаты могут представлять интерес как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения применений для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами астрономии, астрофизики, газодинамики и численного моделирования в таких учреждениях, как Институт Астрономии РАН, Астрономический институт СПбГУ, Институт космических исследований РАН, Государственный астрономический институт им. Штернберга, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Московский, Санкт-Петербургский, Ростовский, Калмыцкий, Уральский госуниверситеты и т.д.

В целом полученные результаты развивают важное направление современной астрофизики — теорию аккреционно-струйных систем.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. За формирование наблюдаемых регулярных структур в конических джетах из молодых звездных объектов в случае интенсивного охла-

ждения высвечиванием могут быть ответственны только поверхностные неустойчивые моды Кельвина–Гельмгольца и медленные (распространяющиеся по веществу струи к источнику) волноводно-резонансные энтропийные моды. Скорости этих мод вдоль границ струи превышают характерную скорость звука в окружающей атмосфере, что позволяет предполагать возможность их эволюции в ударные волны.

2. Разработан и апробирован численный код для моделирования нелинейной эволюции струй из молодых звездных объектов на фоне их стационарной модели [18] в сферической системе координат, с помощью которого показано, что оцениваемый по размеру излучающих узлов угол раствора струй из молодых звездных объектов закономерно оказывается меньшим, чем реальный, а развитие первой отражательной гармоник струи приводит к формированию внутри джета излучающих узлов с морфологией, отвечающей данным наблюдений — с пространственной периодичностью узлов $\lambda_r \approx (1 \div 4)d$.
3. Открыт и исследован механизм, благодаря которому сложная картина течений, возникающая после начального выброса из молодой звезды, будет эволюционировать в структуру, сходную с так называемыми НН-объектами. Примечательно, что этот механизм является чисто гидродинамическим, без необходимости привлечения магнитных полей и иных внешних эффектов.
4. Предложено объяснение наблюдающихся в ряде массивных протозвездных облаков, содержащих одновременно несколько молодых звездных объектов, квазипараллельных джетов развитием в этих облаках антициклонических вихрей Россби с последующим формированием в этих вихрях протозвезд из-за развития гравитационной неустойчивости.

Достоверность результатов и выводов диссертации определяется физической обоснованностью используемых моделей и применением при решении поставленных задач строгих математических методов, проверкой согласования полученных в работе приближенных аналитических асимптотических решений с точными численными решениями в широких диапазонах значений параметров, сравнением результатов линейного анализа с результатами нелинейного моделирования, тщательным тестированием применяемых для этого моделирования численных схем, а также совпадением в частных и предельных случаях полученных результатов с известными ранее и с данными наблюдений реальных объектов.

Апробация работы. Материалы настоящей диссертации докладывались на международных студенческих научных конференциях “Физика Космоса” (Свердловская обл., Коуровская астрономическая обсерватория, январь–февраль 2002 г., февраль 2003, 2004 гг., январь–февраль 2005, 2006 гг.), межвузовских конференциях студентов и молодых ученых г. Волгограда и Волгоградской области (Волгоград, ноябрь 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 гг.), международных научных семинарах “Физика Солнца и звезд” (Элиста, октябрь 2003, февраль 2005 г., май–июнь 2006 гг.), общем семинаре Специальной астрофизической обсерватории РАН (Нижний Архыз, март 2004 г.), международной научной конференции “Геометрический анализ и его приложения” (Волгоград, май 2004 г.) и на Всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 “Горизонты Вселенной” (Москва, июнь 2004 г.).

Основные публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах общим объемом 141 страница, 17 работ написаны совместно с другими авторами.

1. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В., Храпов С.С. Исследование дисперсионных свойств малых возмущений в струйных выбросах из молодых звезд.

- // Вестник ВолГУ, сер. 1: “Математика. Физика”, 2002, Вып. 7, с. 76–93.
2. Манджиев В.Б., Кузьмин Н.М. О возможном механизме образования отражательных туманностей. // Тез. докл. 32-й междунар. студ. науч. конф. “Физика Космоса”, Екатеринбург, 2003, С. 221.
 3. Кузьмин Н.М., Манджиев В.Б. О возможном механизме образования отражательных туманностей типа туманности “Муравей”. // VII Межвузовская конференция студентов и молодых ученых г. Волгограда и Волгоградской области. Вып. 4: Физика и математика: Тезисы докладов. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2003, с. 25–26.
 4. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В., Храпов С.С. Гидродинамический механизм формирования высокоскоростных джетов в молодых звездных системах. // “Физика Солнца и звезд”. Труды международного научного семинара. — Элиста: Калмыцкий госуниверситет, 2003. с. 168–173.
 5. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В. Влияние начальных и граничных условий на развитие возмущений в плоской сверхзвуковой струе. // “Физика Солнца и звезд”. Труды международного научного семинара. — Элиста: Калмыцкий госуниверситет, 2003. с. 216–221.
 6. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В., Севостьянов А.В., Храпов С.С. Аккреционно-струйные системы: история, результаты, перспективы. // Обзорные лекции по астрономии: “Физика Космоса”: 33-я междунар. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2004. С. 119–133.
 7. Кузьмин Н.М. Расширяющиеся оболочки в молодых звездных системах: численное моделирование // Тез. докл. 33-й междунар. студ. науч. конф. “Физика Космоса”, Екатеринбург, 2004. С. 244.

8. Кузьмин Н.М. Гидродинамический механизм формирования джетов в расширяющихся оболочках. // VIII Межвузовская конференция студентов и молодых ученых г. Волгограда и Волгоградской области. Вып. 4: Физика и математика: Тезисы докладов. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2004, с. 24–26.
9. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В., Храпов С.С. Теория аккреционно-струйных систем. I. // “Геометрический анализ и его приложения”: Тезисы докладов международной школы-конференции. — Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2004. С. 98–100.
10. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В., Храпов С.С. Теория аккреционно-струйных систем. II. // “Геометрический анализ и его приложения”: Тезисы докладов международной школы-конференции. — Волгоград: Издательство Волгоградского государственного университета, 2004. С. 100–101.
11. Кузьмин Н.М., Мусцовой В.В., Севостьянов А.В., Храпов С.С. Эволюция оболочек и формирование струй в молодых звездных системах. // Труды Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга, Т. 75, М., 2004, С. 133.
12. Кузьмин Н.М., Мовсесян Т.А., Мусцовой В.В., Храпов С.С. Волны и вихри Россби в астрофизике. // Обзорные лекции по астрономии: “Физика Космоса”: 34-я междунар. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2005. с. 97–110
13. Кузьмин Н.М. Дисперсия волн Россби малой амплитуды в массивных протозвездных облаках. // IX Межвузовская конференция студентов и молодых ученых г. Волгограда и Волгоградской области. Вып. 4: Физика и математика: Тезисы докладов. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2005, с. 35–37.

14. Кузьмин Н.М., Кузьмина Е.А., Мусцевой В.В., Семенюк А.И., Храпов С.С. Формирование наблюдаемой морфологии аккреционно-струйных систем. // 3-й Международный научный семинар “Физика Солнца и звезд” 29 мая — 2 июня 2006 г., Калмыцкий государственный университет, Элиста. Тезисы докладов. — Элиста: КалмГУ, 2006. С. 23.
15. Кузьмин Н.М. Определение относительного вклада гравитационного потенциала околозвездного диска в общий потенциал аккреционно-струйной системы. // X Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Вып. 4. Физика и математика: тез. докл. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2006, с. 17–19.
16. Кузьмин Н.М., Мусцевой В.В., Храпов С.С. Закономерности эволюции расширяющихся оболочек в молодых звездных системах. // “Физика Солнца и звезд”. Труды II-го международного научного семинара. — Элиста: Калмыцкий госуниверситет, 2006. с. 82–100.
17. Кузьмин Н.М., Мусцевой В.В., Храпов С.С. Сопоставление ударных фронтов наблюдаемым регионам узких запрещенных линий при обработке результатов численного моделирования. // “Физика Солнца и звезд”. Труды II-го международного научного семинара. — Элиста: Калмыцкий госуниверситет, 2006. с. 101–113.
18. Мовсесян Т.А., Кузьмин Н.М., Мусцевой В.В., Храпов С.С. Дисперсия волн Россби малой амплитуды в массивных протозвездных облаках и формирование квазипараллельных джетов. // “Физика Солнца и звезд”. Труды II-го международного научного семинара. — Элиста: Калмыцкий госуниверситет, 2006. с. 115–122.
19. Говорухин И.В., Кузьмин Н.М., Кузьмина Е.А., Мусцевой В.В., Храпов С.С. Формирование наблюдаемой морфологии аккреционно-

струйных систем. // “Физика Солнца и звезд”. Труды III-го международного научного семинара. — Элиста: Калмыцкий госуниверситет, 2006. с. 114–124.

20. Кузьмин Н.М., Мусцевой В.В., Храпов С.С. Численное моделирование эволюции неустойчивых мод джетов, выходящих из молодых звездных объектов. // *Астрономический журнал* — 2007. — Т. 84, № 12. — с. 1089–1098.

Личный вклад автора. Основными соавторами в статьях, написанных по теме диссертации, являются научный руководитель автора, д.ф.-м.н. В.В. Мусцевой и к.ф.-м.н. С.С. Храпов. Идеи и постановки задач принадлежат преимущественно В.В. Мусцевому. Примерно половина аналитических и около двух третей численных результатов получено автором. Разработка и отладка вычислительных программ для ЭВМ проводились С.С. Храповым и автором примерно в равных долях. Обработка результатов численных расчетов выполнена преимущественно автором. Участие в обсуждении результатов и написании статей В.В. Мусцевого, С.С. Храпова и автора равноправное.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 90 источников. Общий объем работы составляет 122 страницы и включает в себя 29 рисунков.

Краткое содержание работы

Во **введении** описано историческое развитие взглядов на природу и закономерности, присущие молодым звездным аккреционно-струйным системам; приведен краткий литературный обзор по исследуемой области астрофизики; представлены актуальность проблемы и предмет исследования, цель работы, научная новизна, научная и практическая значимость, достоверность полу-

ченных результатов, апробация работы, основные публикации по теме диссертации, личный вклад автора, объем и структура работы; приведено краткое содержание работы.

В **первой главе** построены равновесные модели обжимаемых внешним давлением конических струйных выбросов вещества, находящихся в гравитационном поле источника выброса, и проведен их линейный анализ устойчивости. Показана возможность развития в таких струях дискретного набора волноводных неустойчивых акустических и энтропийных мод, различающихся азимутальным номером m — числом рукавов винтовой спирали. Проведенный анализ показывает, что развитие неустойчивых пинчевых возмущений способно приводить к формированию излучающих узлов джетов.

Во **второй главе** описаны результаты численного моделирования излучающих узлов в струях из молодых звездных объектов. Рассмотрено развитие фундаментальной и первой отражательной гармоник струи на существенно нелинейной стадии. Впервые показана возможность формирования излучающих узлов с диаметром меньше диаметра струи. Описан разработанный численный код, для данного класса задач позволяющий точно поддерживать стационарный баланс по радиальной координате и минимизировать дисбаланс сил, возникающий при переносе стационарных распределений по меридиональной координате на расчетную сетку.

В **третьей главе** представлены результаты численного моделирования эволюции объектов, сходных по морфологии с планетарными туманностями типа Mz 3 “Муравей” и AFGL 2688 “Тыква”. Показана закономерность формирования структур, сходных с наблюдаемыми в подобных объектах, вследствие начального выброса вещества из внутренних областей. Предложены причины, вследствие которых может формироваться несимметричная форма планетарных туманностей. Описан механизм, благодаря которому сложная картина течений, возникшая после начального выброса, будет эволюциониро-

вать в структуру, сходную с так называемыми НН-объектами. Примечательно, что этот механизм является чисто гидродинамическим, без необходимости привлечения магнитных полей и иных внешних эффектов.

В **четвертой главе** предложено объяснение наблюдающихся в ряде массивных протозвездных облаков, содержащих одновременно несколько молодых звездных объектов, квазипараллельных джетов развитием в этих облаках антициклонических вихрей Россби с последующим формированием в этих вихрях протозвезд из-за развития гравитационной неустойчивости. Проведенный предварительный линейный анализ устойчивости показал, что такая ситуация вполне возможна.

В **заключении** приведены основные положения, выносимые на защиту.

Литература

1. *Ferrari A., Trussoni E., Zaninetti L. // Astron. Astrophys.* — 1978. — Vol. 64. — P. 43.
2. *Hardee P. E. // Astrophys. J.* — 1979. — Vol. 234. — P. 47.
3. *Ferrari A., Trussoni E., Zaninetti L. // MNRAS.* — 1981. — Vol. 196. — P. 1054.
4. *Payne D. G., Cohn H. // Astrophys. J.* — 1985. — Vol. 291. — P. 655.
5. *Hardee P. E. // Ibid.* — 1987. — Vol. 318. — P. 78.
6. *Hardee P. E., Norman M. L. // Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 334. — P. 70.
7. *Norman M. L., Hardee P. E. // Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 334. — P. 80.
8. *Bluman W. // J. Fluid Mech.* — 1970. — Vol. 40. — P. 769.
9. *Bluman W., Drazin P. G., Billings D. F. // J. Fluid Mech.* — 1975. — Vol. 71. — P. 305.
10. *Drazin P. G., Davey A. // Ibid.* — 1977. — Vol. 82. — P. 255.
11. *Колыхалов П. И.* — Препринт ИКИ АН СССР. — 1983.
12. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. — Москва: Наука, 1988.
13. *G. Bodo, R. Rosner, A. Ferrari, E. Knobloch // Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 341. — P. 631.
14. *P. E. Hardee, R. E. White, M. L. Norman et al. // Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 387. — P. 460.
15. *Smith M. D. // Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 421. — P. 400.

16. *Hardee P. E.* // *Astrophys. J.* — 1982. — Vol. 257. — P. 509.
17. *Левин К. А., Мусцовой В. В., Храпов С. С.* // *Известия РАН.* — 1998. — № 9. — С. 1795. — Сер. Физическая.
18. *Левин К. А., Мусцовой В. В., Храпов С. С.* // *Астрон. журн.* — 1999. — Т. 76, № 2. — С. 126.
19. *Кузьмин Н. М., Мусцовой В. В., Храпов С. С.* // *Вестник ВолГУ.* — 2002. — № 7. — С. 76. — Сер. 1: Математика. Физика. Вып. 7.
20. *Norman M. L., Stone J. M.* // *Astrophys. J.* — 1997. — Vol. 483. — P. 121.
21. *Norman C. A., Silk J.* // *Astrophys. J.* — 1979. — Vol. 228. — P. 197.
22. *Reipurth B.* — ESO Scient. Prepr. No. 763. — 1989.
23. *Мовсесян Т. А.* // *Письма в астрон. журн.* — 1992. — Т. 18. — С. 748.
24. *Raga A. C., Kofman L.* // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 386. — P. 222.
25. *Stone J. M., Norman M. L.* // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 413. — P. 210.
26. *Gouveia Dal Pino E. M., Benz W.* // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 435. — P. 261.

Подписано в печать “_____” _____ 2008 г. Формат 60 × 84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1.0.

Тираж 100 экз. Заказ _____ .

Издательство Волгоградского государственного университета.

400062, г. Волгоград, просп. Университетский, 100.