

На правах рукописи

Мизева Ирина Андреевна

МГД турбулентность в межзвездной среде: модели и анализ карт
поляризованного радиоизлучения

01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2008

Работа выполнена в Институте Механики Сплошных Сред УрО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Фрик Петр Готлобович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Черепанов Анатолий Александрович

кандидат физико-математических наук,
с.н.с.
Мызникова Бэла Исаковна

Ведущая организация: Государственный Астрономический Институт
имени П.К. Штернберга МГУ

Защита состоится 27 ноября 2008г. в ____ ч. ____ мин. на заседании Диссертационного совета Д 004.012.01 в Институте Механики Сплошных Сред УрО РАН по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева 1, www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМСС УрО РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, просьба направлять по указанному адресу в двух экземплярах не позднее, чем за две недели до защиты.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2008.

Учёный секретарь Диссертационного совета

Березин И. К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы. Среди известных природных объектов, обладающих собственным магнитным полем, наиболее крупными являются галактики. Магнитное поле, с одной стороны, возникает в результате движения межзвездной среды, а, с другой стороны, оказывает существенное влияние на эволюцию самой галактики. При этом, наряду с крупномасштабным магнитным полем, структура которого изучена относительно хорошо, существенны и мелкомасштабные магнитные поля, возникающие вследствие интенсивного турбулентного движения межзвездной среды (речь идет о масштабах, существенно меньших толщины галактического диска).

Основным источником информации о галактических магнитных полях является поляризованное радиоизлучение, наблюдения которого интенсивно проводятся в последние десятилетия. Благодаря созданию современных радиотелескопов с высокой разрешающей способностью становится возможным наблюдение и мелкомасштабного поля. Параллельно с развитием наблюдательной базы совершенствуются методы обработки результатов наблюдения, в частности, карт поляризованного радиоизлучения. Такие карты содержат небольшое количество независимых точек и сильно зашумлены, так что помехи и ошибки измерений могут существенно исказить статистические свойства наблюдаемых величин. Важно выяснить, являются ли те или иные свойства следствием ошибок, помех и особенностей наблюдения или же они характеризуют реальную турбулентность в межзвездной среде. Актуальной задачей является разработка новых методов анализа наблюдательных данных и детальное изучение влияния различных факторов на результаты статистического анализа наблюдаемых полей.

Наряду с анализом наблюдений, важную роль в изучении галактических магнитных полей играют численные модели. Основные результаты, касающиеся эволюции крупномасштабных полей, получены в рамках теории динамо средних полей. Свойства мелкомасштабных полей изучаются на основе прямого численного счета, который при характерных для галактик числах Рейнольдса (R) и магнитного числа Рейнольдса (R_m) требует компьютерных мощностей, недостижимых в настоящее время. По этой причине актуальной задачей является разработка маломодовых моделей развитой турбулентности, способных адекватно воспроизводить статистические свойства развитой магнитогидродинамической турбулентности. В области численного расчета гидродинамических турбулентных течений накоплен значительный опыт использования каскадных моделей, разрабатываемых с 1970-х годов. В течение последнего десятилетия каскадные модели начали применяться и к магнитогидродинамической (МГД) турбулентности. Было показано, что каскадные модели

способны правильно воспроизводить базовые свойства МГД турбулентности. Важно адаптировать эти модели для случая галактической турбулентности и изучить с их помощью специфику каскадных процессов в условиях, характерных для межзвездной среды.

Целью работы является комплексное исследование мелкомасштабных свойств МГД турбулентности в межзвездной среде, включая разработку методов анализа характеристик турбулентных магнитных полей в межзвездной среде по данным наблюдения поляризованного радиоизлучения и разработку каскадных моделей для описания МГД турбулентности при очень больших значениях гидродинамического и магнитного чисел Рейнольдса, а также изучение с их помощью особенностей каскадных процессов в МГД турбулентности.

Научная новизна. В диссертационном исследовании получены следующие новые результаты:

1. Показано, что процедуры предобработки карт существенным образом изменяют статистические свойства наблюдаемых величин, что может существенным образом повлиять именно на мелкомасштабные свойства. Даже такая процедура, как абсолютная калибровка, изначально изменяющая только крупномасштабные структуры параметров Стокса, при вычислении интенсивности поляризованного излучения может оказать существенное влияние на весь диапазон масштабов.
2. Разработаны новые методы исследования результатов наблюдений поляризованного излучения, в частности, метод выделения характерных структур на картах поляризованного радиоизлучения ("каналов") и определения их статистических характеристик. Показана возможность появления "каналов" на картах поляризованного радиоизлучения, связанная со способом получения таких карт и конечным разрешением телескопов.
3. Выявлено тип структур, который может быть идентифицирован при помощи метода изоконтурной статистики. Показан критерий, по которому можно определить размерность структуры на изображении, проведено исследование влияния шума на этот критерий.
4. Построена каскадная модель МГД турбулентности, учитывающая локальные взаимодействия и отличающаяся от предыдущих способом описания магнитной спиральности. На основе каскадной модели изучено влияние вносимого уровня корреляций пульсаций магнитного поля и поля скорости на свойства МГД турбулентности. Показано, что при высоком уровне корреляции в системе повышается средний уровень энер-

гии (происходит накопление энергии потоком) и изменяется степенной закон для спектральной плотности энергии.

Научная и практическая ценность работы определяется разработанными новыми алгоритмами анализа двумерных изображений и методами анализа карт поляризованного излучения, проведенным анализом влияния процедур предобработки карт поляризованного излучения на их статистические свойства, построением и результатом изучения каскадной модели турбулентности.

Работа выполнялась в рамках госбюджетных тем "Эволюция турбулентных потоков в проводящей и непроводящей жидкости под действием вихревых и спиральных сил" (№ гос. рег. 01.200.117926) и "Взаимодействие мелкомасштабной турбулентности и крупномасштабных полей в течениях проводящей и непроводящей жидкости" (№ гос.рег. 01.2.007 00735), совместного проекта РФФИ-ННИО 03-02-04031 с институтом Радиоастрономии общества М.Планка (Германия, Бонн), а также проектов РФФИ 07-01-96007, МНТЦ-3726, CRDF REC-009.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается тщательным тестированием всех используемых алгоритмов и методов и сравнением результатов, где это возможно, с результатами других авторов.

Апробация работы. Основные результаты, приводимые в диссертации, докладывались и обсуждались: на всероссийских конференциях молодых ученых "Математическое моделирование физико-механических процессов", Россия, Пермь, на Всероссийской астрономической конференции, Россия, Казань 2007, на конференциях молодых ученых научно образовательного центра REC-009, на 13 и 14 зимних школах, Пермь 2006, 2007, на открытом Немецко-Российском совещании "Turbulence in the magnetized interstellar medium", Россия, Пермь, 2006, на совещании "Turbulent Transport Under high Reynolds and magnetic Reynolds numbers", Россия, Пермь 2008, на семинарах Института механики сплошных сред, Пермь, 2004-2008, семинарах институт Радиоастрономии общества М.Планка (Германия, г. Бонн) (2004-2005), гидродинамическом семинаре Пермского Государственного Университета (Пермь, 2008), семинаре Пермского государственного технического университета (Пермь 2008)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (116 наименований). Работа содержит 52 рисунка и 3 таблицы. Общий объем диссертации составляет 141 страницу.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководите-

лю П.Г. Фрику за руководство работой, а также Д.Д. Соколову и Р.А. Степанову за полезные обсуждения и помощь в работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, а также описана структура диссертации.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. Представлен обзор публикаций, близких к теме диссертации. Также в обзор включены работы, результаты которых являются наиболее существенными для понимания обсуждаемых вопросов. На основании обзора даны характеристика современного состояния вопроса и обоснование актуальности исследований, представленных в диссертации.

Вторая глава посвящена анализу карт поляризованного радиоизлучения. Важным является вопрос об интерпретации таких карт, развитии методик изучения их статистических свойств. Интерпретация существенно осложняется тем, что наблюдаемыми величинами являются параметры Стокса поляризованного излучения, а физический смысл имеет косвенный результат наблюдений - интенсивность поляризованного радиоизлучения (PI) и поляризационный угол. Наблюдения поляризованного радиоизлучения - сложная и трудоемкая процедура, и в наблюдениях присутствуют систематические ошибки. В работе впервые проводится детальное исследование процедур предобработки на основе стандартных методов анализа изображения. Наиболее удачным методом спектрального анализа для данных такого рода (ограниченных и сильно зашумленных) является вейвлет анализ, поэтому основные выводы строились на результатах исследования вейвлет спектров.

Для исследования выбраны 3 характерных области из обзора EMLS (Effelsberg Medium Latitude Survey), полученные при помощи 100 метрового телескопа в Эффельсберге, и результаты наблюдения внешней галактики M31 (туманность Андромеды), полученные при помощи интерферометрического телескопа VLA (Very Large Array). К наблюдаемым величинам применены процедуры абсолютной калибровки, удаления источников, процедуры восстановления структуры шума ("денойзинг"). На рис.1, на примере области в плоскости галактики, противоположной ее центру, показаны поэтапно все процедуры предварительной обработки. При увеличении разрешения телескопа уменьшается точность в определении крупных масштабов, поэтому в результирующих картах крупномасштабные поля карт с высоким разрешением заменяют на аналогичные изображения, полученные телескопами с низкой разрешающей способностью, в некоторых случаях применяется дополнительное

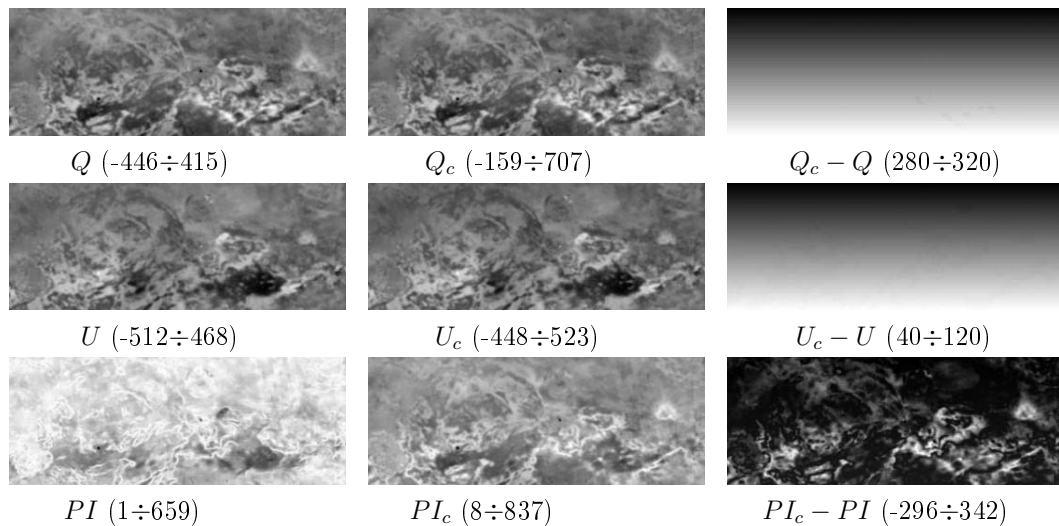


Рис. 1. Пример наблюдаемых (левая колонка) и калиброванных (центральная колонка) данных для Q , U и PI . В правой колонке показана разность соответствующих калиброванных и исходных данных. Шкала оттенков серого линейна, минимальной интенсивности излучения соответствует белый цвет, максимальной - черный. Для каждой карты максимальная и минимальная интенсивность отмечены под картой.

моделирование. Показано, что абсолютная калибровка данных, добавляющая структуры больших масштабов в карты параметров Стокса, влияет лишь на крупномасштабную часть их спектра (рис.2 а). При использовании калибровки на спектрах удается избежать максимумов, определяемых разрешением телескопа, и пронаблюдать участок спектра, соответствующий инерционному интервалу в бóльшем диапазоне масштабов. Спектры абсолютно калиброванных карт PI в бóльшей степени отличаются от спектров наблюдаемых карт (рис.2 б). Поэтому при изучении мелкомасштабных свойств турбулентности предпочтительней работа с абсолютно калиброванными картами параметров Стокса Q и U , а не с вычисленными по ним картами PI .

При регистрации излучения в поле зрения антенны попадает излучение от всех источников, находящихся на данном луче зрения, в том числе, и не принадлежащих исследуемому объекту. Удаление ярких радиоисточников на картах PI обычно заключается в замене этого источника функцией Гаусса. Яркие радиоисточники, при небольшом их количестве, влияют лишь на мелкомасштабную часть спектра (рис.2 б). В случае применения анализирующего вейвлета плохо локализованного в пространстве Фурье, диапазон масштабов, подверженных изменению, увеличивается, что приводит к изменению наклона спектра. Помимо масштаба, соответствующего размеру источника, появляются масштабы, связанные с расстоянием между источниками. Эти факторы, при большом числе ярких радиоисточников, могут привести к тому, что результи-

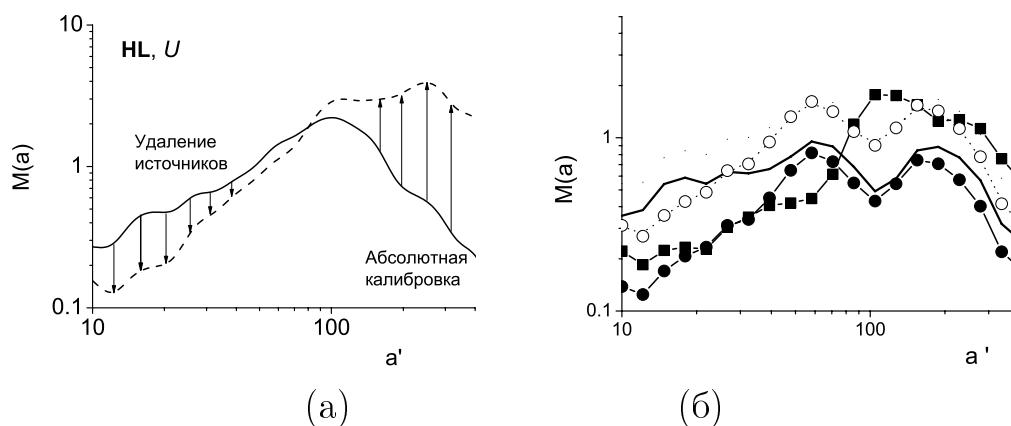


Рис. 2. Вейвлет спектр карт поляризованного излучения высокоширотной области, а - параметра Стокса U , сплошной линией обозначен спектр наблюдаемого поля величины U , пунктирной - после применения процедур абсолютной калибровки и удаления источников. б - интенсивности поляризованного излучения PI , сплошной линией обозначен спектр наблюдаемого поля, кругами - с удаленными источниками, квадратами - абсолютно калиброванные, пунктирной - спектр после применения процедуры "денойзинг".

рующий спектр будет соответствовать спектру поля источников, а не слабого поля диффузного излучения.

В наблюдаемых параметрах Стокса шум имеет нормальную функцию распределения. После вычисления PI структура шума становится несимметричной, близкой к распределению Райса. Для восстановления структуры шума вслед за работой ¹ применяют процедуру "денойзинг", которая приводит к появлению нефизических отрицательных значений PI . Она существенным образом не изменяет спектр, однако влияет на функцию распределения вероятностей, особенно на моменты высших порядков.

Из трех исследованных областей небосвода только в высокоширотной области, менее всего насыщенной структурами, удается установить признак инерционного интервала. В этой области расположено небольшое количество ярких радиоисточников и структур различного происхождения. Интенсивность поляризованного излучения в большей степени определяется именно магнитным полем. Наклон спектра близок к « $-5/3$ ». По всей видимости, наблюдается малая часть инерционного интервала, который, по оценкам, должен занимать несколько порядков. Определить границы инерционного интервала из этих наблюдений невозможно, в области мелких масштабов карты ограничены разрешением телескопа, в области больших масштабов размером карты. Спектр карт областей вблизи галактической плоскости более пологий, чем спектр

¹Wardle J.F.C. and Kronberg P.P. The linear polarization of quasi-stellar radio sources at 3.71 and 11.1 centimeters// Astrophysical journal, 1974, V. 194, P.249-255.

высокоширотной области. Малый наклон спектра карт областей вблизи галактической плоскости ($\approx 0.9-1.2$) связан со структурами крупномасштабного магнитного поля.

Третья глава посвящена разработке специальных методов анализа карт PI . Внимание исследователей было обращено на то, что карты поляризованного излучения содержат узкие (меньше ширины диаграммы направленности антенны), вытянутые, резко отделенные от окружающего фона области, где интенсивность поляризованного излучения близка к нулю. Такие области получили название "каналы", и существуют различные теории их возникновения. В работе [2] выдвинута гипотеза о связи среднего расстояния между каналами с тейлоровским масштабом турбулентности. Для верификации этой гипотезы был разработан и алгоритмизирован метод поиска каналов и оценки среднего расстояния между ними. Рассчитанный при помощи такого алгоритма характерный размер хорошо согласуется с визуальными оценками других авторов и может быть использован для анализа карт. Поскольку «каналы» являются линиями нулевой интенсивности PI , то данную теорию можно развить на изолинии любой интенсивности. Для этого был изучен и алгоритмизирован метод изоконтурной статистики. Метод основан на оценке среднего количества пересечений секущей с линиями заданного уровня на единицу длины. На тестах было показано, что при использовании метода изоконтурной статистики можно определить размерность структур в изображении. Однако, на реальных картах, на которых присутствуют каналы, установить существование одномерных структур не удалось.

Карты интенсивности поляризованного излучения строятся по наблюдаемым параметрам Стокса. Диаграмма направленности антенны телескопа представляет собой гауссиану, которой сглаживается регистрируемое излучение. Нередко на размер порядка ширины диаграммы направленности при визуализации приходится несколько точек, то есть изображение получается сглаженным, что приводит к появлению каналов на вычисленных картах PI . В работе этот факт проиллюстрирован сравнением модельных карт с нормальным распределением шума (рис. 3 сверху) и карт сглаженных гауссианой (рис. 3).

Параметры Стокса поляризованного радиоизлучения являются двумя его перпендикулярными компонентами. Они несут информацию об одних и тех же свойствах среды, тем не менее корреляции между этими параметрами обнаружено не было. Это может быть связано с недостатками методов изучения корреляций. Так, если градиент магнитного поля постоянен и направлен

²Shukurov A., Berkhuijsen E.M., Faraday ghosts: depolarization canals in the Galactic radio emission// Mont.Not.Royal Acad. of Science, 2003, V.345, N.4, P.1392-1392

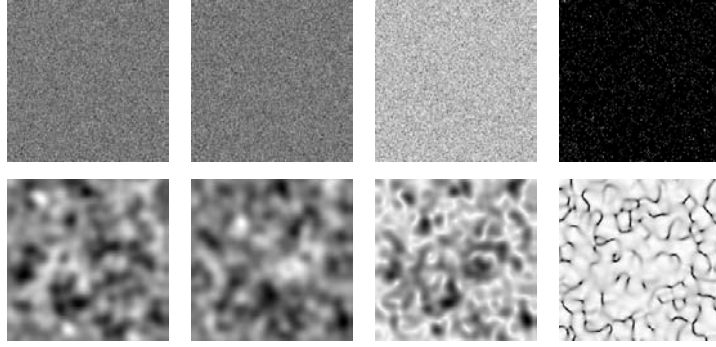


Рис. 3. Модельные карты. Слева направо: параметры Стокса Q и U , PI ($PI = \sqrt{Q^2 + U^2}$), последняя карта - величина градиента угла поляризации. Вверху - параметры Стокса представляют собой дельтакоррелированный шум, внизу - тот же шум, сглаженный гауссианой с полушириной 5 пикселей.

перпендикулярно лучу зрения, то параметры Стокса в плоскости наблюдения представляют собой двумерные функции синуса и косинуса, направление которых совпадает с проекцией градиента магнитного поля на плоскость наблюдения. Даже в таком простейшем случае, когда параметры Стокса несомненно скоррелированы, обнаружить корреляцию методом поточечной корреляции невозможно. В этой главе разработан и исследован на тестовых изображениях метод анизотропной корреляции. Коэффициент корреляций r^I изотропной выписан в следующем виде:

$$r^I(a) = \frac{\iint W_f(a, \vec{x}) W_g^*(a, \vec{x}) d\vec{x}}{[M_f(a) M_g(a)]^{1/2}}. \quad (1)$$

Здесь $W_f(a, \vec{x})$ и $W_g(a, \vec{x})$ - вейвлет образы полей f и g , полученные при помощи изотропного вейвлет разложения, а $M(a)$ - энергия заданного масштаба.

Выражение для коэффициента анизотропной вейвлет корреляции $r^A(a)$ определено как:

$$r^A(a) = \frac{\Sigma(\tilde{W}_f \tilde{W}_g \cos 2(\phi_f - \phi_g))}{\sqrt{\Sigma |\tilde{W}_f|^2 \Sigma |\tilde{W}_g|^2}}, \quad (2)$$

где

$$\tilde{W}(a, \vec{x}) = \max_{\theta} \{|W(a, \theta, \vec{x})|\} \quad (3)$$

есть максимальное значение вейвлет коэффициентов, полученных при разложении исходного изображения при помощи анизотропного вейвлета для заданного масштаба и положения, а ϕ есть значение угла θ , при котором этот максимум достигается.

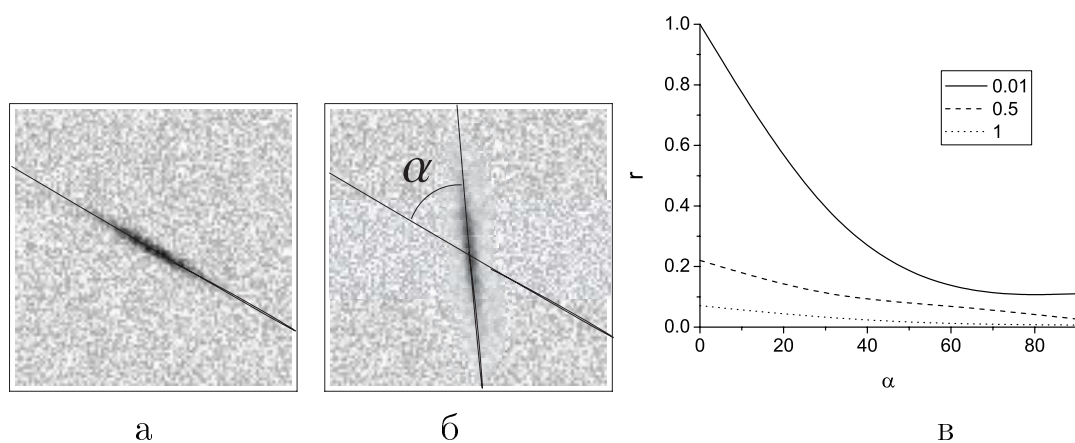


Рис. 4. Тестовый пример : а и б - исходная пара изображений угол α может быть произвольным; в - поточечная корреляция в зависимости от угла α поворота структуры для различного уровня шума (отношение амплитуды шума к амплитуде сигнала - 0.01, 0.5, 1).

Анализ тестовых распределений показывает высокую эффективность применения вейвлет корреляций в задачах различной степени сложности. Залогом успеха является возможность разложения исходных сигналов по различным структурным компонентам и проведения после этого корреляционного анализа этих компонент. Вейвлеты позволяют отдельно изучать корреляцию полей по масштабу, по фазе, углу анизотропии. Пример пары изображений, при анализе которых эффективна предложенная методика, показан на рис.4а,б. Изображения представляют собой вытянутые структуры, повернутые друг относительно друга на угол α (рис.4 а и б). На рис.4в показан коэффициент поточечной корреляции в зависимости от угла поворота, для различного уровня шума. Корреляция даже для изображений в отсутствие шума уменьшается с увеличением угла. Результаты расчета вейвлет корреляции представлены на рис.5. Необходимо заметить, что энергонесущим в этом случае является масштаб порядка 0.06, и на этом масштабе метод изотропной вейвлет корреляции не дает убедительного результата. Однако, при анализе реальных наблюдательных данных выявить корреляцию параметров Стокса этими методами также не удалось.

Четвертая глава посвящена изучению мелкомасштабных свойств МГД турбулентности на основе разработанной в диссертации каскадной модели. В силу больших числа Рейнольдса и магнитного числа Рейнольдса прямое численное моделирование не представляется возможным. Эффективным инструментом исследования статистических свойств развитой мелкомасштабной турбулентности зарекомендовали себя каскадные модели. По аналогии с каскадными моделями гидродинамики, была построена модель МГД турбулент-

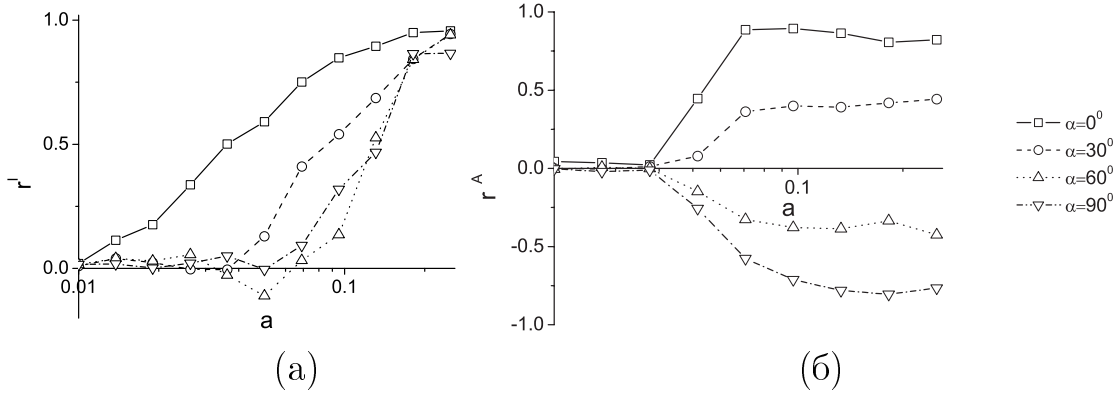


Рис. 5. Вейвлетные кросскорреляции для различных углов α : изотропная r^I (а) и анизотропные r^A (б). Символами обозначены углы, на которые развернуты структуры друг относительно друга

ности ³, которая хорошо воспроизводит основные известные свойства МГД турбулентности и мелкомасштабного динамо. Однако, эта модель унаследовала основной недостаток каскадных моделей, связанный со способом описания спиральности (в этих моделях спиральность разного знака приписывается оболочкам с четными или нечетными номерами n). В данной работе разработана новая модель, которая получена обобщением на случай МГД модели, предложенной в работе ⁴ для спиральной турбулентности. Уравнения модели имеют вид

$$\begin{aligned} d_t U_n &= ik_n (\Lambda_n(U, U) - \Lambda_n(B, B)) - \frac{k_n^2 U_n}{R} + f_n, \\ d_t B_n &= ik_n (\Lambda_n(U, B) - \Lambda_n(B, U)) - \frac{k_n^2 B_n}{Rm}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \Lambda_n(X, Y) &= \lambda^2 (X_{n+1} Y_{n+1} + X_{n+1}^* Y_{n+1}^*) - X_{n-1}^r Y_n \\ &- X_n Y_{n-1}^r + i\lambda (2X_n^* Y_{n-1}^i + X_{n+1}^r Y_{n+1}^i - X_{n+1}^i Y_{n+1}^r) \\ &+ X_{n-1} Y_{n-1} + X_{n-1}^* Y_{n-1}^* - \lambda^2 (X_{n+1}^r Y_n + X_n Y_{n+1}^r) \\ &+ i\lambda (2X_n^* Y_{n+1}^i + X_{n-1}^r Y_{n-1}^i - X_{n-1}^i Y_{n-1}^r), \end{aligned}$$

звезда означает сопряжение, а верхние индексы r, i - действительную и мнимую части. В отсутствие диссипации уравнения сохраняют полную энергию $E^T = \sum (|U_n|^2 + |B_n|^2)/2$, перекрестную спиральность $H = \sum (U_n B_n^* + B_n U_n^*)/2$ и магнитную спиральность $H_m = \sum k_n^{-1} ((B_n^*)^2 - B_n^2)/2$. Именно способом

³Frick P., Sokoloff D. Cascade and dynamo action in a shell model of magnetohydrodynamic turbulence// Physical Review E, 1998, V.57, N.4, P.4155-4164.

⁴Melander M.V. Helicity Causes Chaos in a Shell Model of Turbulence//Physical review letters 1997, V.78, N.8, P.1456-1459

задания магнитной спиральности построенная модель отличается от предыдущих. Если магнитное поле равно нулю, то сохраняется гидродинамическая спиральность $H_h = \sum k_n ((U_n^*)^2 - U_n^2)/2$. Отличительной особенностью модели является возможность описания спиральности произвольного знака в любом интервале волновых чисел.

Во всех расчетах число Рейнольдса и магнитное число Рейнольдса $R = Rm = 10^6$, а ширина спектральных оболочек $\lambda = 1.618$. Безразмерные единицы времени, равны времени оборота вихря на максимальном масштабе. Сила f_n действует только в двух старших ярусах (наибольших масштабах), обеспечивая постоянную подкачку кинетической энергии $\varepsilon = 1$ и заданную подкачку перекрестной спиральности χ .

Модель была протестирована на задачах о свободном вырождении и стационарно возбуждаемой МГД турбулентности, решения которых известны из работ других авторов. Было получено, что в отсутствие внешних сил в МГД турбулентности нарастают корреляции пульсаций поля скорости и магнитного поля. Мерой корреляции магнитного и гидродинамических полей C является отношение перекрестной спиральности к общей энергии E ($C = \langle UB \rangle / E = H_c / E$). Обычно при изучении МГД турбулентности эта величина полагается малой, но в случае астрофизических задач она может принимать и конечные значения.

В работе изучено влияние корреляции пульсаций поля скорости и магнитного поля на каскадные процессы и спектральные свойства МГД турбулентности. Показано, что вносимая в поток перекрестная спиральность приводит к замедлению каскадного переноса и накоплению энергии в потоке (рис.ба). Это накопление происходит до тех пор, пока интенсификация вихрей не компенсирует убывающую эффективность нелинейных взаимодействий. Если $C = 1$, то в уравнениях МГД сокращаются нелинейные слагаемые и каскад энергии от крупных масштабов к мелким блокируется. Для среднего уровня энергии стационарной турбулентности получена оценка:

$$E \approx \frac{(\varepsilon L)^{2/3}}{(1 - \chi/\varepsilon)^{4/3}}. \quad (5)$$

Численные исследования с помощью каскадных уравнений модели (4) показали, что при внесении в поток перекрестной спиральности меняется поведение системы: 1) изменяется характер эволюции - некоторое время система накапливает энергию (рис.ба, врезка); 2) суммарная энергия системы в стационарном состоянии тем больше, чем выше уровень вносимой спиральности (рис.ба, точками показаны результаты расчета, линией оценок по формуле (5)); 3) При $\chi = 0$ спектральный индекс близок к «-5/3», при увеличении χ

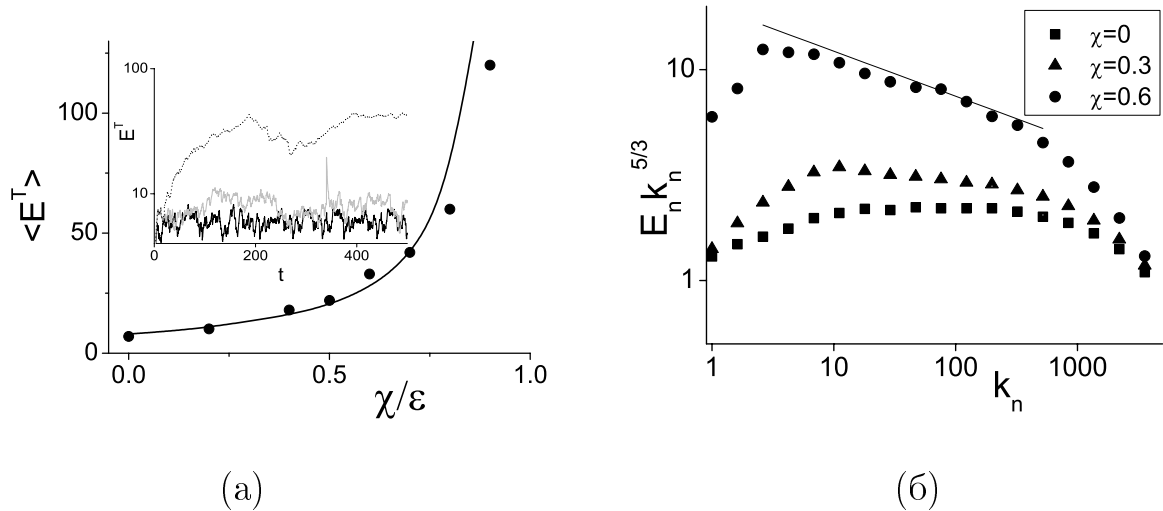


Рис. 6. а - зависимость средней энергии стационарно возбуждаемой МГД турбулентности от вносимой перекрестной спиральности χ/ϵ . На врезке показана эволюция энергии при $\chi = 0$ – толстая линия, $\chi = 0.3$ – серая линия, $\chi = 0.6$ – тонкая линия. б - компенсированные спектры энергии (спектр с наклоном в «-5/3» в таком представлении - горизонтальная прямая)

спектр становится круче (рис.6б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Для корректного статистического анализа свойств магнитного поля в межзвездной среде необходимы процедуры предобработки карт поляризованного излучения, такие как удаление ярких радиоисточников и калибровка крупномасштабного поля. Анализ влияния процедур предобработки на спектральные свойства сигнала показал, что абсолютная калибровка в основном изменяет крупномасштабную, а удаление источников - мелкомасштабную часть спектров параметров Стокса, не оказывая влияния на среднюю часть их спектров. Однако, при расчете физически интерпретируемой величины - интенсивности поляризованного излучения, изменения касаются всего диапазона масштабов, что требует осторожности при применении этих процедур.
2. Показано, что нелинейные преобразования, используемые при построении карт поляризованного радиоизлучения по наблюдаемым параметрам Стокса, могут приводить к формированию структур аналогичных наблюдаемым на картах «каналам».
3. Разработана каскадная модель развитой МГД турбулентности, отличающаяся от известных каскадных моделей МГД турбулентности способом описания спиральностей. Модель позволяет адекватно описать распределение спиральностей по спектру и сохраняет работоспособность при

сколь угодно высоком уровне спиральностей.

4. Показано, что перекрестная спиральность препятствует каскадному переносу энергии и приводит к накоплению энергии в системе. Это накопление происходит до тех пор, пока интенсификация вихрей не компенсирует падающую эффективность нелинейных взаимодействий. Получена формула для оценки средней энергии турбулентности при заданном отношении подводимой спиральности к энергии. Существенно, что при низком уровне вносимой перекрестной спиральности турбулентность накапливает ее - интегральный коэффициент корреляции существенно превосходит отношение вносимой спиральности к вносимой энергии. Показано, что с ростом уровня перекрестной спиральности наклон спектра постепенно возрастает от $5/3$ до 2 .

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Mizeva I., Reich W., Frick P., Beck R. and Sokoloff D. Statistical properties of polarized radio continuum emission and effects of data processing // *Astronomische Nachrichten*, 2007, Vol.328, №1, P.80–91.
2. Мизева И.А., Степанов Р.А., Фрик П.Г. Вейвлетные кросс-корреляции двумерных полей // *Вычислительные методы и программирование*, 2006, Т.7. С.172-179.
3. Mizeva I., Stepanov R., Frick P. Role of cross-helicity in fully developed mhd turbulence // *Proceedings of PAMIR Conference*, 2008, Vol.2, P.581-585.
4. Мизева И.А., Фрик П.Г. Каналы на картах поляризованного радиоизлучения // *Сборник статей XV зимней школы по механике сплошных сред*, Пермь, 2007, Ч.3, С.21-24.
5. Мизева И.А., Бек Р., Райх В. Фрик П.Г. Соколов Д.Д. Статистические свойства радиополяризационных наблюдений континуума и влияние обработки данных // *Труды всероссийской астрономической конференции ВАК-2007*, Казань, 2007, С. 349-351.
6. Мизева И.А., Фрик П.Г. Моделирование каскадных процессов в спиральной МГД-турбулентности // *Материалы всероссийской конференции молодых ученых Неравновесные процессы в сплошных средах*, Пермь, 2007, С.318-321.

7. Mizeva I., Beck R., Frick P., Reich W., Sokoloff D. Statistical analysis of polarized radio maps // Abstracts of German-Russian Open Workshop "Turbulence in the magnetized interstellar medium", Russia, Perm, 2006, P.12.
8. Мизева И.А., Мизев А.И. Фурье и вейвлет анализ оптических изображений//Тезисы докладов на Всероссийской научно-методической конференции «Информационные технологии в учебном процессе», Нижегородский Государственный Технологический Университет, 2003, С. 264-266.
9. Мизева И.А., Патрикеев И.А., Фрик П.Г. Применение вейвлет-анализа и метода дельта-вариаций для спектрального и корреляционного анализа галактических изображений// тезисы докладов XIII зимней школы по механике сплошных сред, Пермь, 2003, С.263.
10. Мизева И.А. Степанов Р.А. Фрик П.Г. Вейвлет анализ данных поляризованного радиоизлучения галактических и внегалактических изображений// Тезисы докладов конференции Математическое моделирование в естественных науках, Пермь, 2005, С.48.
11. Мизева И.А., Фрик П.Г. Изучение статистических свойств межзвездной среды по картам поляризованного радиоизлучения // Тезисы докладов XIV зимней школы по механике сплошных сред, Пермь, 2005, С.225.
12. Мизева И.А. Степанов Р.А. Фрик П.Г. Использование вейвлет-анализа для вычисления кросскорреляции// Тезисы докладов конференции молодых ученых "Неравновесные процессы в сплошных средах", Пермь, 2006, С.40-41.
13. Фрик П.Г., Мизева И.А., Носков В.И., Попова Е.Н., Степанов Р.А., Чупин А.В., Шестаков А.В. МГД-турбулентность и ее вклад в динамо средних полей // В сборнике "Региональный конкурс РФФИ-Урал", Ч.1, Пермь-Екатеринбург, 2008, С.139-143.

Подписано в печать 15.10.2008. Формат 60x84/16.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ .

Типография Пермского государственного университета
614990, г.Пермь, ул.Букирева, 15.