

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ГЛАВНАЯ (ПУЛКОВСКАЯ) АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи



Князева Ирина Сергеевна

**АНАЛИЗ И ДИАГНОСТИКА  
ФОТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
СОЛНЦА ПО MDI ДАННЫМ МЕТОДАМИ  
СТОХАСТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Главной (Пулковской) Астрономической обсерватории  
РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
**Макаренко Николай Григорьевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
**Соколов Дмитрий Дмитриевич**  
доктор физико-математических наук,  
**Наговицын Юрий Анатольевич**

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн  
ИЗМИРАН

Защита состоится “14” мая 2010 года в 15 часов на заседании диссертационно-  
го совета Д 002.120.01 при Главной (Пулковской) астрономической обсерва-  
тории РАН, расположенной по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское  
ш, д. 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ГАО РАН*.

Автореферат разослан “13” апреля 2010 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.120.01

кандидат физико-математических наук



*Е. В. Милецкий*

## Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию геометрии и топологии фотосферных магнитных полей Солнца по временным последовательностям MDI магнитограмм. Магнитограммы представляют собой высококонтрастные цифровые изображения, на которых фотометрическая мера кодирует радиальную компоненту магнитного поля Солнца с пространственным разрешением  $2''$  ( $\sim 1700$ ) км/пиксел и временным дискретом  $96^m$ . Основными методами, которые использовались в работе, являются мультифрактальный анализ, математическая морфология и вычислительная топология.

**Актуальность темы.** Исследование магнитного поля Солнца на уровне фотосферы представляет большой интерес. Оно важно в теории, для понимания механизма динамо и процессов происходящих в конвективной зоне. Теоретические модели трудно верифицировать. Динамика подфотосферных слоев рассматривается обычно в приближении тонких ( $\sim 10^2$  км.) магнитных трубок [С1]. Приблизительно с такими же шкалами имеют дело и численные модели [С2]. Однако, доступные пока прямым наблюдениям масштабы магнитных полей на порядок больше; они составляют  $\sim 1500-2000$  км. Существует интересная возможность статистического восстановления мелкозернистой геометрии поля из наблюдаемых крупномасштабных магнитных структур. Она основана на соображениях о полностью развитой турбулентности в плазменных структурах Солнца, для которых магнитное число Рейнольдса  $> 10^7$ . Турбулентные вихри прямого (от больших вихрей, к малым), или обратного каскадов обеспечивают свойство статистического самоподобия. Иначе говоря, крупномасштабные структуры являются коллажем своих уменьшенных копий. Это свойство, выраженное в терминах меры, называют мультифрактальностью. Оно позволяет, при некоторых предположениях, восстановить статистическую геометрию „в малом“, по ее крупнозернистой наблюдаемой версии. Уже известны первые попытки достичь „сверхразрешения“ для изображений Солнца [С3]. *Однако, для успешных экспериментов по сверхразрешению важно получить надежные оценки мультифрактального скейлинга данных.*

С практической точки зрения, важной проблемой гелиофизики является динамика предвспышечных сценариев на Солнце. Мощные солнечные вспышки и сопутствующие им выбросы коронального вещества определяют состояние околоземного космического пространства, геомагнитные возмущения и радиационную обстановку в магнитосфере и ионосфере Земли. Не исключено даже их влияние на процессы атмосферного переноса воздушных масс.

Главную роль в происхождении и реализации активных солнечных явлений играет магнитное поле Солнца. Именно поэтому, уже в первых системах мониторинга вспышек, предвестники опирались на идеи сложности магнитного поля, такие как длина нейтральной линии, число особых точек поля, максимальные значения градиента АО и ее кинематические признаки [С4, С5]. Располагая этой информацией и достаточным опытом, можно с удовлетворительной точностью предсказать вспышку или их серию на интервале 1 – 3 дня. Прогноз на меньших интервалах является нерешенной задачей.

Серии вспышек в АО удобно рассматривать как стохастический процесс, в котором вероятность события определяется, по видимому, несколькими независимыми динамическими сценариями. Каждый из них предполагает высокий уровень сложности магнитного поля. Очевидно, что в этой ситуации и предвестник может быть только стохастическим.

Сложность магнитного поля *эмергентна*: она не является простой суммой описывающих ее признаков. Отсюда следует, интересная особенность статистических предвестников: высокие корреляция признаков с уровнем вспышечной активности *в статистическом ансамбле* АО [С5], не означают их большой значимости в применении к конкретной АО. Иначе говоря, вопросы о полноте и оптимальности статистических признаков, выбранных в ансамбле остаются полностью открытыми.

Следовательно, необходимы не статистические, а *динамические* признаки сложности поля. Они должны быть основаны не на феноменологии, а на *морфометрии* - т.е. *измерении форм* магнитных паттернов. Иными словами, нужны не признаки, а „описатели“ или дескрипторы, полученные в рамках строгого формализма из наблюдательных данных. Они должны иметь ясный физический смысл и обладать минимальным набором полезных свойств.

Можно ограничиться, например, инвариантностью относительно сдвигов и поворотов изображения, аддитивностью и непрерывностью дескрипторов на практически интересной временной шкале. *Построение такого формализма для описания сложности имеет несомненную актуальность.*

С динамической сложностью тесно связана проблема обнаружения нового магнитного потока, который предшествует большей части эруптивных событий [С6]. Для практики, *наиболее актуальной является проблема предсказания появления нового магнитного потока*, «до тех пор пока он не будет явно виден на поверхности».

Резюмируя описанные выше соображения можно выделить следующие *актуальные* проблемы в описании сложности магнитного поля: мультифрактальная диагностика магнитных структур; поиск динамических дескрипторов; поиск эффективных методов обнаружения всплывающих потоков по наблюдательным данным.

Формальным контекстом, который допускает все эти исследования и выбран в диссертации является геометрия случайных полей [С7]. Физический контекст исследований основан на попытке извлечения явных знаний *непосредственно* из наблюдаемых данных.

**Целью настоящей работы** является диагностика эволюции фотосферных магнитных структур по *MDI* данным методами стохастической геометрии. Имеют место следующие ограничения: пространственное разрешение данных  $2''$  или  $\geq 1700$  км/пиксел, временной диапазон (прохождение АО по диску) составляет  $\sim 6 - 8$  суток и дискрет по времени между смежными изображениями  $96^m$ .

Анализировались два типа фрагментов MDI, размером  $150 \times 150$  пикселей. Первый тип не содержал АО и называется ниже просто *фон*. Второй - содержал пятна и окружающие их структуры. Для краткости он назван *полем АО* или просто *АО*. В первую очередь, искались ответы на следующие вопросы:

- Справедлива ли гипотеза о масштабной инвариантности магнитных структур АО и фона?

- Какие дескрипторы могут быть положены в описание сложности полей АО и фона?
- Какими моделями случайных полей можно описать MDI данные для АО и фона?
- Как меняется динамическая сложность полей АО во времени и связаны ли ее изменения с вспышками?

Для исследования использовались мультифрактальный формализм, геометрия случайных полей, математическая морфология и вычислительная топология. Основными дескрипторами служили два функционала Минковского, определенные на MDI: периметр и характеристика Эйлера. Они вычислялись для черно-белых изображений, полученных как множество выбросов магнитного поля на MDI, выше заданного уровня. Суммарный периметр линий уровня оценивает полную вариацию  $B_z$  поля. Характеристика Эйлера описывает топологическую сложность векторного поля на множестве выбросов. Она равна сумме числа максимумов и минимумов за вычетом седловых точек. Дополнительным дескриптором служил индекс несвязности из вычислительной топологии. Он позволяет описать свойства связности изображения в зависимости от разрешения.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Существует масштабная инвариантность MDI-магнитограмм в диапазоне  $\sim 3000 - 5000$  км. Найденный мультифрактальный скейлинг можно интерпретировать либо как проявление полностью развитой турбулентности плазмы на уровне фотосферы, либо как следствие универсального статистического самоподобия природных высококонтрастных изображений.
2. Установлена негауссовость фотосферных магнитных полей по MDI: зависимость характеристики Эйлера от уровня для множества выбросов фона и АО асимметричны. Топология выбросов АО определяется главным образом ее межпятенной компонентой; поля пятен определяют по-

ведение хвостов характеристики. Асимметрию магнитной топографии можно объяснить моделью перемежаемого случайного поля.

3. Эволюция характеристики Эйлера и периметра для АО демонстрируют синхронные депрессии на уровнях ( $\leq 500$ Гц). Они как правило предшествуют или сопутствуют увеличению вспышечной активности АО. На уровнях, соответствующих „пятенной компоненте“, периметр растет с ростом вспышечной активности.
4. Разработан новый метод раннего обнаружения всплывающего потока на MDI магнитограммах. Метод основан на оценке числа несвязных элементов относительно емкости Шоке полученной для цифрового изображения. Возрастание числа несвязных компонент во всех исследованных случаях предваряет или сопровождает вспышки.

**Научная новизна** исследований заключается в следующем:

1. Методы математической морфологии, в применении к фотосферным магнитным полям позволили получить новые выводы о моделях случайных полей, аппроксимирующих наблюдаемые фотосферные структуры в АО и фоне.
2. Для описания динамической геометрии магнитных полей активной области предложены два функционала Минковского: периметр и связность. Они легко и однозначно вычисляются по множеству выбросов MDI и дают точный инструмент описания и диагностики полей активных областей.
3. Предложен новый метод обнаружения всплывающего магнитного потока в окрестности АО, основанный на понятии топологической связности MDI данных. Предложенный алгоритм позволяет получать оценки в режиме мониторинга.

**Практическая ценность.** Методы и алгоритмы математической морфологии и вычислительной топологии предложенные в работе могут быть с

успехом использованы для анализа и диагностики цифровых изображений в любой области знания.

**Личный вклад автора.** Соискательница принимала участие в постановке задачи, отборе и подготовке экспериментальных данных. Современные методы математической морфологии и топологии были доработаны, расширены и адаптированы к данной задаче автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Соискательницей был создан программный комплекс, позволяющий осуществлять анализ магнитограмм, с помощью которого была проведена вся численная обработка данных.

**Апробация работы.** Результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: 6-я Открытая всероссийская конференция: „Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса“ (Москва, ноябрь 2008); Problems of Geocosmos (Санкт-Петербург, СПбГУ, 23-27 мая 2006, 26 - 30 мая 2008); XI Пулковская Международная конференция: „Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических явлений.“ (Пулково, июль 2007); Всероссийские ежегодные конференции по физике Солнца в Пулкове (7-12 июля 2008 и 5-11 июля 2009); V Конференция молодых ученых „Фундаментальные и прикладные космические исследования“ (8-9 апреля 2008, ИКИ РАН, Москва); EGU General Assembly 2009 (19-24 апреля, Austria, Vienna). Результаты докладывались на семинарах в СПбГУ и в ГАО РАН.

**Публикации.** По результатам диссертации имеются 9 публикаций из них две журнальных из списка рекомендуемого ВАК [1, 2] и 7 в сборниках трудах конференций [3–9].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, приложения, в котором приведен графический материал для всех проанализированных АО и списка литературы.

#### **Краткое содержание работы.**

Во **введении** диссертации обоснована актуальность и перспективность темы исследования, сформулированы цель работы, основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, кратко изложено содержание работы.



В **первой главе** описываются мультифрактальные свойства магнитных полей на Солнце. В п. 1.1 кратко мотивируется поиск мультифрактальности в магнитограммах. Магнитные поля в солнечной плазме связаны с магнито-гидрогиномической турбулентностью. Так, на уровне фотосферы магнитное число Рейнольдса достигает значений ( $R_m \sim 10^8$ ), так что следует ожидать явлений так называемой высокоразвитой турбулентности или, как часто говорят, статистической перемежаемости. Феноменология такой турбулентности в солнечной атмосфере предполагает собой наличие широкого диапазона возбужденных масштабов, а также их иерархическую самоорганизацию в различных вариантах каскадов. В этом случае, наблюдаемые параметры должны наследовать свойства статистического самоподобия или мультифрактальности. Она должна проявляться в наличии различных степенных законов - скейлингах в наблюдаемых данных.

В п. 1.2 изложены основные идеи мультифрактального формализма и обсуждаются возможные подходы к численной оценке мультифрактальных спектров. Рассмотрена адаптация этих подходов к анализу высококонтрастных изображений и приводятся результаты оценки спектров для магнитограмм Солнца. Для оценки мультифрактального спектра мы использовали прямой подход [С8]. Основной проблемой является выбор подходящей вероятностной меры на носителе для магнитограмм. В диссертации, вместо традиционной фотометрической меры, используется так называемая ISO емкость Шоке нормированная на площадь бокса. Будем считать что два пиксела  $i$  и  $j$  из области  $\Omega$  эквивалентны  $p_\varepsilon(i) \approx p_\varepsilon(j)$ , если значения в них не различаются с точностью до заданного порога  $|p(i) - p(j)| < \varepsilon$ . Назовем емкостью Шоке  $\mu_{iso}$  число пикселей в  $\Omega$  неразличимых с точностью до  $\varepsilon$  относительно центрального пиксела  $c(\Omega)$  в области :

$$\mu_{iso}(\Omega) = \#\{i \in \Omega : p_\varepsilon(i) \approx p_\varepsilon(c(\Omega))\}$$

где символ  $\#$  означает целое количество пикселей.

Используя  $\mu_{iso}$  нам удалось получить полную кривую спектра для фрагментов магнитограмм. Заметим, что мультифрактальные спектры являются би-Липшиц инвариантными функциями и следовательно не зависят от пер-

спективных искажений магнитограмм.

На Рис. 1 и Рис. 2 представлены типичные спектры для фрагментов фонового поля и АО

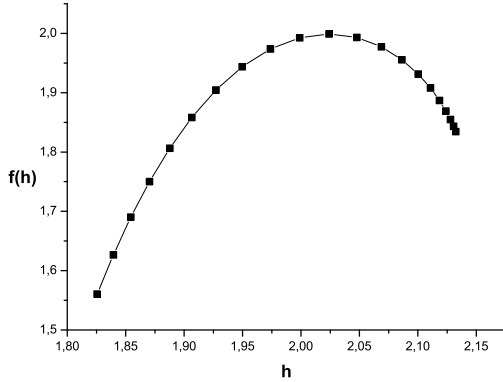


Рис. 1. Типичный мультифрактальный спектр для фонового поля.

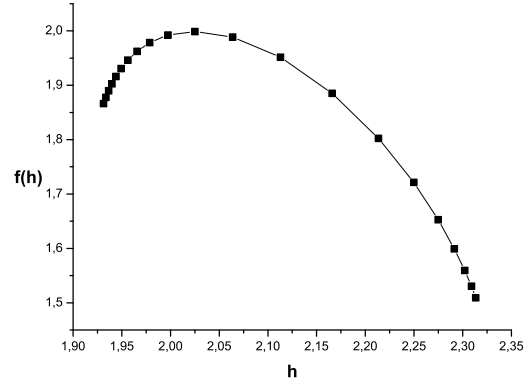


Рис. 2. Типичный мультифрактальный спектр для АО.

Анализ прогностических особенностей спектров привел к отрицательным результатам: форма спектров практически не менялась перед, во время и после вспышки. Как отмечалось выше, в Солнечной физике принято связывать мультифрактальные свойства с существованием высокоразвитой турбулентности. В качестве альтернативы, в диссертации приводится и другое объяснение. Для изображений природных ландшафтов, полученных с высоким разрешением, самоподобие является универсальным свойством. В главе 1 приводятся примеры спектров, полученных для объектов, не связанных ни с магнитными полями ни с турбулентностью.

В п. 1.3 описана основная идея модели бесконечно делимых каскадов, как способа моделирования мультифрактальных структур с заданными свойствами. Отличие и преимущество бесконечно-делимого каскада от мультифрактальных схем заключается в том, что он является „мультискейлинговым“. Он адаптирован для работы в заданном диапазоне масштабов  $\varepsilon_{min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{max}$ , в отличие от мультифрактальной схемы, которая справедлива в пределе  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Бесконечно делимые каскады в диссертации использованы во второй главе для моделирования наблюдаемых случайных полей.

**Вторая глава** посвящена применению методов математической морфологии и топологии к описанию магнитных полей Солнца. В п. 2.1 кратко описаны традиционные подходы к анализу сложности магнитных полей. Подход предлагаемый в диссертации позволяет анализировать и диагностировать эволюцию магнитного поля в форме числовых характеристик, дескрипторов, однозначно вычисляемых по магнитограммам.

В п. 2.2 приведено краткое описание методов геометрии случайных полей. Техника их анализа основана на морфологических функционалах, которые берут начало в интегральной геометрии. Теория была развита в работах Р.Адлера [С7] и К.Ворслея [С9], которые исходили из идей Стефана Райса, который еще в 1944 году предложил исследовать случайные процессы, рассматривая выбросы графика процесса за некоторый заданный уровень. В этом случае, полезными статистиками являются среднее время пребывания графика над заданным уровнем, т.е. продолжительность выброса и число выбросов на единицу времени. Эти статистики вычисляются аналитически для ряда процессов гауссовского типа.

Двухмерный случайный процесс или 2D поле, визуализируются как изображение с помощью цифровой функцией  $I(x) \rightarrow R; x \in R^2$ , где  $I(x)$  - фотометрическая яркость или контраст. Удобнее перейти к черно-белым изображениям, к которым адаптировано большинство методов анализа. Введем для этого некоторый уровень яркости или контраста и рассмотрим множество выбросов  $A_h(\Omega) = \{x \in \Omega | I(x) \geq h\}$ . Маркируя принадлежащие ему пиксели черным, а остальные пиксели - белым цветом, мы получим бинарное изображение. Изменение уровня позволяет преобразовать весь диапазон яркости в набор черно-белых изображений.

Бинарное, изображение можно рассматривать как коллаж, состоящий из отдельных пикселей и их конечных объединений. В математической морфологии, они рассматриваются как элементы кольца выпуклости  $\mathcal{B}$ , содержащее выпуклые подмножества из  $R^2$ , их конечные объединения и пустое множество  $\emptyset$ . Над кольцом можно определить три функционала  $W_0, W_1, W_2$ , которые позволяют описать практически все формы на изображении и называют функционалами Минковского [С10]. Основным из них является *характеристика*

Эйлера  $W_2 = \chi$ , которая, грубо говоря, равна числу кластеров за вычетом дыр в них. Два других функционала это суммарный периметр  $W_1$  кластеров и их площадь  $W_0$ . Они и являются основой морфологического анализа бинарных изображений.

В п. 2.3 представлены результаты применения морфологического подхода к MDI данным. Исследовались выборки фрагментов фона и десяти групп АО, из 23-го цикла солнечной активности. Они отличались наибольшей активностью по вспышкам класса  $M$  и  $X$ . Каждая АО была представлена  $\sim 80$  фрагментами магнитограмм размером  $150 \times 150$  пикселей. Функционалы вычислялись для множеств уровней в трех диапазонах: низкие  $\leq 200$  Гс, средние  $< 500$  Гс и высокие значения  $\geq 1000$  Гс напряженностей. Кроме использования абсолютных значений напряженности, уровни выбирались в единицах дисперсии, чтобы редуцировать эффекты проекции при движении АО по диску Солнца. В тексте диссертации приведены лишь примеры анализа отдельных АО: результаты по всей выборке помещены в Приложение.

Использовались два функционала Минковского: характеристика Эйлера ( $\chi$ ), которая согласно теории Морса связана с числом критических точек поля и периметр ( $W_1$ ), который измеряет полную вариацию поля. С помощью этих функционалов исследовалась пространственная и временная динамика геометрии множества уровней.

В результате пространственного анализа было обнаружено, что формы кривых  $\chi(u)$  для АО и фона практически совпадают, с точностью до масштабного множителя. На Рис. 3 приведены типичные кривые для характеристики Эйлера фрагментов АО и фона, а на Рис. 4 для сравнения добавлена кривая, которая соответствует модели гауссовского типа.

Для обоих полей характерна асимметрия характеристики в области малых значений. Топология выбросов поля в АО и фонового поля отличаются от моделей гауссовского поля и удовлетворительно аппроксимируется моделью логнормального поля.

Эволюция геометрии фона по графикам  $\chi(u, t)$  и  $W_1(u, t)$  представляет собой хаотические флуктуации. В качестве примера, на (Рис. 5) приведено типичное поведение Эйлеровой характеристики для одного из фрагментов

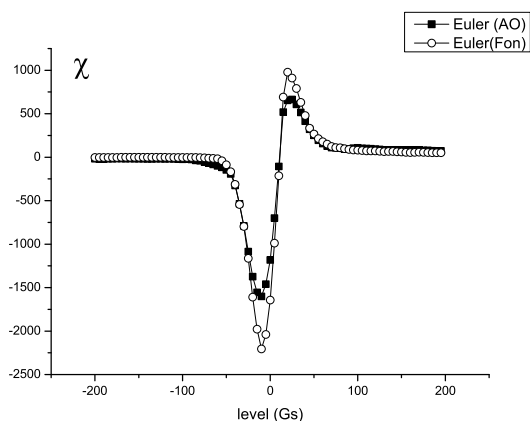


Рис. 3. Типичный вид кривой  $\chi$  для фрагментов АО и фона.

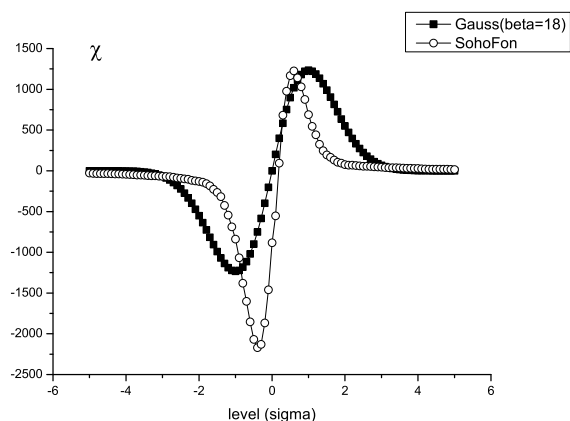


Рис. 4. Типичный вид кривой  $\chi$  для фрагмента фона и гауссовского поля.

фона.

Динамическая геометрия полей АО по морфологическим характеристикам демонстрируют разные сценарии. В отличие от фона, графики  $\chi(u, t)$  и  $W_1(u, t)$  для АО имеют значительные, синхронизованные на разных уровнях напряженности скачки в характеристиках. Пример приведен на (Рис. 6), на котором кривая  $\chi(u, t)$  для АО 9236 сопоставляется гистограмме вспышечной продуктивности. Последняя показана столбиками по оси  $x$ . Высота столбика маркирует бал вспышки умноженный на соответствующий коэффициент.

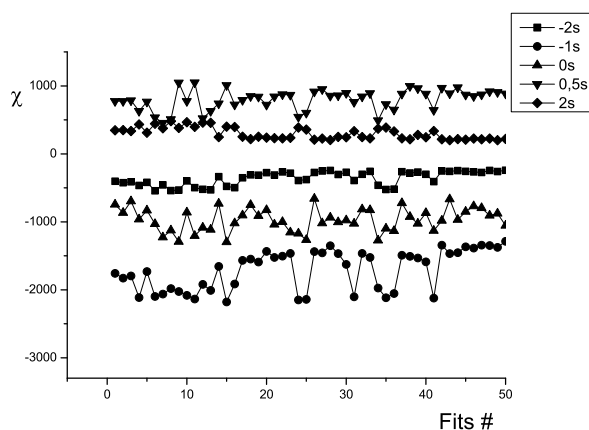


Рис. 5. Эволюция кривой  $\chi$  для фонового поля.

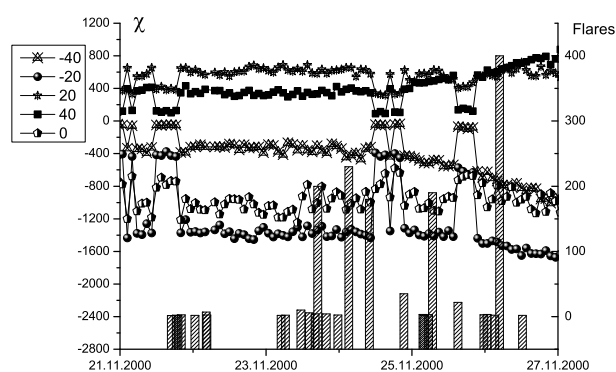


Рис. 6. Эволюция кривой  $\chi$  для АО 9236.

Мы ограничились лишь ретроспективным анализом связи между varia-

циями функционалов и вспышечной продуктивностью АО, потому что наша выборка АО слишком мала для прогностических исследований. Следует однако отметить, что наиболее характерные депрессии в наших характеристиках проявляются на уровнях напряженности  $< 500$  Гс. Таким образом, возможные предвестники следует искать в динамике межпятенного поля, а не полей самих пятен.

**В третьей главе:** предложен топологический метод обнаружения новых всплывающих потоков. На примерах АО из нашей выборки рассматриваются его прогностические возможности.

В п. 3.1 кратко приводятся современные представления о роли всплывающих магнитных потоков в эволюции АО. Фактически, все многообразие наблюдаемых магнитных структур, от самых малых образований до комплексов активности, можно рассматривать, как следы всплытия магнитных потоков, от величины которых зависят их размеры и время жизни. С другой стороны, известно, что росту вспышечной активности всегда предшествует появление *новых* магнитных потоков с большой скоростью всплытия. Именно поэтому так важна задача их раннего обнаружения.

В п. 3.2 изложены основные идеи топологической связности для множеств и предложен способ переноса этих идей для анализа изображений, основанный на так называемых емкостях Шоке. Эвристическая идея обнаружения нового всплывающего потока заключается в оценке *числа различимых пикселей*  $D(\varepsilon)$  на верхних границах фотометрической яркости (напряженности). Параметр  $\varepsilon$  задает порог различимости двух пикселей. Число  $D(\varepsilon)$  является синонимом понятия  $\varepsilon$  связности из вычислительной топологии. Если, с течением времени этот индекс начнет возрастать, то этот эффект можно интерпретировать как признак нового, всплывающего потока.

В п. 3.3 приводятся результаты применения подхода к нашей выборке АО. Для сравнения приведены результаты топологического анализа для АО не давшей вспышек. На Рис. 7 и Рис. 8 показано поведение  $D(\varepsilon)$  для двух АО, сопоставленное с их вспышечной продуктивностью. Рисунки показывают, что увеличение числа различимых элементов предвещает, либо сопутствует серии вспышек класса М и Х. Этот вывод оказался справедливым для всей нашей

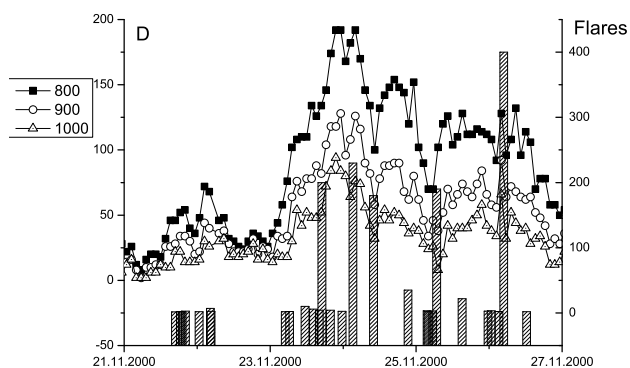


Рис. 7. Изменение компонент связности для АО 9236.

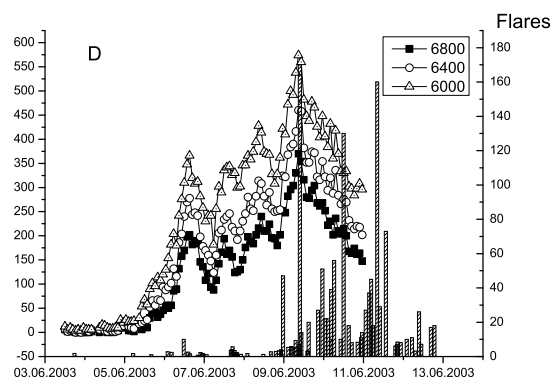


Рис. 8. Изменение компонент связности для АО 10375.

выборки. Для вспышечно-спокойных АО обнаруженное поведение отсутствует. Именно поэтому, разумно идентифицировать число  $D(\varepsilon)$  с элементами нового всплывающего потока.

**Заключение** резюмирует основные результаты работы.

1. Получены оценки 2D мультифрактальных спектров по MDI данным. Указывается на два альтернативных источника происхождения мультифрактального скейлинга. Первый - следствие высокоразвитой турбулентности в фотосферной плазме. Второй - проявление универсальных свойств самоподобия высоко контрастных изображений. Мы не обнаружили явной связи между формой спектра и вспышечной активностью АО.
2. Геометрия выбросов магнитных полей фона и АО отличаются от модели гауссовского поля. Поведение Эйлеровой характеристики  $\chi(u)$  асимметрично в области  $|B_z| < 500$  Гс. и хорошо аппроксимируются моделью логнормального поля. Этот вывод справедлив для независимых данных наземной обсерватории SOLIS.
3. Общим свойством эволюции морфологических характеристик АО является когерентные на разных уровнях напряженности депрессии в характеристиках. Депрессии часто предваряют или сопровождают уве-

личение вспышечной активности в АО. Для фоновых полей графики характеристик представляют собой хаотические флуктуации.

4. Анализ числа различных компонент связности для АО показал, что увеличение топологического индекса  $D(\varepsilon)$  предвещает, либо сопутствует серии вспышек класса М и Х. Для вспышечно спокойных АО этот эффект отсутствует.

### **Список публикаций по теме диссертации:**

1. Макаренко Н. Г., Князева И. С. Мультифрактальный анализ изображений // Изв.вузов, ПНД. 2009. Т. 17, № 4. С. 85–99.
2. Макаренко Н. Г., Каримова Л. М., Мухамеджанова С. А., Князева И. С. Система итеративных функций и марковский прогноз временных рядов // Изв.вузов, ПНД. 2006. Т. 14, № 6. С. 3–20.
3. Мильков Д. А., Князева И. С., Макаренко Н. Г. Мультифрактальный и топологический анализ сложности магнитного поля Солнца // Научная сессия МИФИ-2009. Сборник научных трудов. Т. 4. М.: МИФИ, 2009. С. 37–39.
4. Князева И. С., Мильков Д. А., Макаренко Н. Г. Морфологические характеристики вспышечно-активных областей Солнца // Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика-2009. СПб, Пулково: 2009. С. 239–242.
5. Мильков Д. А., Князева И. С., Каримова Л. М. Комплекс программ для оценки скейлинговых, топологических и морфологических характеристик цифровых изображений // Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика-2009. СПб, Пулково: 2009. С. 305–308.
6. Knyazeva I. S., Milkov D. A. Multifractal and topological analysis of solar magnetic field complexity // Proceedings of the 7th Int. Conference "Problems of Geocosmos". St. Petersburg (Russia): 2008. Pp. 340–344.



7. Мильков Д. А., Князева И. С., Макаренко Н. Г. Скейлинговые и топологические предвестники X-вспышек по MDI данным // Солнечная и солнечно-земная физика-2008. СПб, Пулковое: 2008. С. 171–174.
8. Князева И. С., Круглун О. А. Гельдеровская регулярность магнитограмм // Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических явлений. СПб, Пулковое: 2007. С. 205–206.
9. Knyazeva I., Makarenko N. Markovian forecast of extreme events by methods of symbolic dynamics // Geophysical Research Abstracts. Vol. 11. EGU2009-397-1, Vienna (Austria): 2009.

### **Цитированная литература:**

- C1. Fisher G. H., Fan Y., Longcope D. W. et al. The Solar Dynamo and Emerging Flux // Solar Physics. 2000. Vol. 192. Pp. 119–139.
- C2. Ruzmaikin A. Clustering of Emerging Magnetic Flux // Solar Physics. 1998. Vol. 181. Pp. 1–12.
- C3. Delouille V., Chainais P., Hochedez J. F. Quantifying and containing the curse of high resolution coronal imaging // Annales Geophysicae. 2008. Vol. 26, no. 10. Pp. 3169–3184.
- C4. Смит Д. Б. Наблюдения и прогноз солнечной активности. М.: Наука, 1976. 339 с.
- C5. Cui Y., Li R., Zhang L. et al. Correlation between solar flare productivity and photospheric magnetic field properties // Solar Phys. 2006. Vol. 237. Pp. 45–59.
- C6. Green L. M., Dèmoulin P., Mandrini C. H., Driel-Gesztelyi L. V. How are Emerging Flux, Flares and CMEs Related to Magnetic Polarity Imbalance in Midi Data? // Solar Physics. 2003. Vol. 215. Pp. 307–325.

- C7. Adler R. J. The Geometry of Random Fields. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1981. 290 pp.
- C8. Chhabra A. B., Jensen R. V. Direct determination of the  $f(a)$  singularity spectrum // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 62. Pp. 1327–1330.
- C9. Worsley K. J. Local maxima and the expected Euler characteristic of excursion sets of  $\chi^2$ , F and t fields // Advances in Applied Probability. 1994. Vol. 26. Pp. 13–42.
- C10. Serra J. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, 1988. 610 pp.