

*На правах рукописи*

КОЗЕЛОВ Борис Владимирович

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ СИСТЕМЕ**

01.03.03 – физика Солнца

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук



Апатиты - 2008

Работа выполнена в Полярном геофизическом институте  
Кольского научного центра РАН

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
Милованов Александр Владимирович  
(ИКИ РАН)

доктор физико-математических наук  
Макаренко Николай Григорьевич  
(ГАО РАН, Санкт-Петербург)

доктор физико-математических наук  
Иудин Дмитрий Игоревич  
(ФГНУ НИРФИ, Нижний Новгород)

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский институт ядерной  
физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им.  
М.В.Ломоносова.

Защита состоится " 11 " ноября 2008 г. в 11 часов 00 минут  
на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 в ИКИ РАН  
(117997, г. Москва, ГСП-7, Профсоюзная ул., д. 84/32)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических ис-  
следований РАН.

Автореферат разослан "     "                     2008 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.113.03  
кандидат физико-математических наук



Буринская Т. М.

## **I. Общая характеристика работы**

Работа посвящена исследованию характеристик и моделированию нелинейных переходных процессов в магнитосферно-ионосферной системе Земли, проявляющихся в виде динамичных форм полярных сияний и дискретных КНЧ-ОНЧ эмиссий.

### ***Актуальность проблемы***

Большинство природных систем являются открытыми нелинейными диссипативными системами вдали от состояния равновесия. Управляющие внешние условия для них обычно являются не стационарными, а скорее случайными, со значительной долей «шума». Известно, что даже простейшие примеры моделей таких систем демонстрируют весьма разнообразное сложное поведение, при описании которого обычно используются такие термины, как: фрактальность, пространственно-временной хаос, перемежаемость, турбулентность, самоорганизация и т.п. Простое морфологическое описание явлений в таких системах заведомо не охватывает все возможные случаи и не является полным.

Теоретическое описание таких систем также имеет особенности. Большинство традиционных методов классической физики (описание дифференциальными уравнениями, достаточно гладкими функциями) применимы в лучшем случае только к некоторым частям таких систем, причем с большими оговорками. Кроме того, такого рода описанию поддаются в основном только стационарные (или псевдо-стационарные) явления. Однако динамические режимы, переходные процессы до недавнего времени не находили должного внимания. Поэтому разработка методов исследования характеристик и моделирование нелинейных переходных процессов в открытых диссипативных системах в настоящее время является актуальной проблемой для многих областей науки и техники.

Магнитосфера Земли, т.е. область околоземного космического пространства, образуемая в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли, несомненно, является открытой нелинейной диссипативной системой. Солнечный ветер, характеристики которого являются для этой системы внешними управляющими параметрами, имеет довольно сложную пространственно-временную структуру. В магнитосфере происходят разнообразные переходные процессы, в ходе которых магнитосфера стремится «адаптироваться» к изменяющимся внешним условиям. Важную роль в этих процессах играет ионосфера, поэтому имеет смысл говорить о единой магнитосферно-ионосферной системе Земли.

Многие процессы, происходящие в магнитосферно-ионосферной системе, отражаются в разнообразных, часто весьма живописных и динамичных формах полярных сияний. Для исследования этих процессов по их авроральным проявлениям необходимо рассматривать как временные, так и простран-

венные изменения. Телевизионная техника дает возможность регистрировать авроральные формы с хорошим временным и пространственным разрешением. Интегрированием кадров по некоторой области можно выделить временные вариации интенсивности свечения. Однако, информация о пространственной динамике авроральных явлений до сих пор используется далеко не полностью, хотя эта информация является уникально-детальной для всей ионосферно-магнитосферной системы. С появлением цифрового анализа изображений, для его широкого использования является актуальной разработка методов анализа, позволяющих численно охарактеризовать авроральные формы и их динамику.

Диссипация энергии плазмы, происходящая в результате циклотронного взаимодействия энергичных частиц с низкочастотными волнами является распространенным явлением и активно изучается как теоретически, так и с помощью спутниковых и наземных наблюдений. Часто это взаимодействие приводит к генерации отдельных дискретных элементов, разделенных сравнительно длительными промежутками, в течение которых генерация отсутствует. Наиболее интенсивным явлением такого типа являются КНЧ-ОНЧ хоровые эмиссии, которые представляют собой последовательность повышающихся по частоте элементов в диапазоне частот  $10^2 - 10^4$  Гц длительностью 0.1 – 1 с. Механизм генерации хоров основан на циклотронном взаимодействии энергичных (10-100 кэВ) электронов радиационных поясов с низкочастотными волнами в экваториальной области. Циклотронный механизм генерации хоров объясняет многие свойства хоров, такие как корреляция частоты хоров с гирочастотой на экваторе, максимум интенсивности хоров на экваторе, связь хоров с высыпаниями энергичных электронов. Однако, принципиальный вопрос генерации хоров, как формируется последовательность дискретных хоровых элементов, до настоящего времени не решен. Поэтому анализ экспериментальных данных и построение моделей, которые могут помочь в решении данного вопроса являются важными не только для геофизики, но и для физики плазмы.

Одна из важнейших открытых проблем магнитосферных исследований - это выяснение природы магнитосферных суббурь, включающих в себя широкий круг явлений, протекающих в ионосфере и магнитосфере. К настоящему времени предложено несколько основных моделей, однако каждая из них объясняет только некоторую часть характерных особенностей суббури. Необходимы дальнейшие комплексные исследования явлений, охватываемых магнитосферной суббурей. Наиболее актуальным подходом к данной проблеме представляется активно развиваемый в настоящее время метод динамических аналогий, то есть сравнение наблюдаемой динамики в магнитосфере с динамикой модельной системы. Особенно интересными являются аналогии с большими интерактивными системами, обычно моделируемыми клеточными автоматами. Аналогии с переходными процессами в таких моделях должны способствовать

формулировке "сценария" функционирования магнитосферы, как системы с самоорганизацией.

### ***Цель и задачи работы***

Целью работы является исследование характеристик и построение динамических моделей наиболее характерных переходных процессов в магнитосферно-ионосферной системе Земли. В связи с этим, выделяются следующие основные задачи:

1) Разработка методики, позволяющей численно охарактеризовать пространственное распределение аврорального свечения, наблюдаемое телевизионными камерами.

2) Исследование динамики пространственно-временного распределения аврорального свечения, связанного с различными явлениями (переходными процессами) в магнитосферно-ионосферной системе (авроральные брейкапы и псевдобрейкапы, пульсирующие пятна).

3) Исследование динамических характеристик дискретных «хоровых» эмиссий с привлечением данных наземных и спутниковых измерений. На основе современных представлений о циклотронном взаимодействии энергичных частиц с низкочастотными волнами построение численных моделей, воспроизводящих такую динамику.

4) Построение набора (иерархии) моделей магнитосферно-ионосферной системы, ответственной за явление магнитосферной суббури, как большой интерактивной системы с элементами самоорганизации. С использованием этих моделей классификация переходных процессов в такой системе и анализ влияния различных параметров и связей.

### ***Методы исследования***

Основными методами исследования, разработанными и примененными в диссертации, являются цифровой анализ изображений, построение статистических распределений, численное моделирование. Численные алгоритмы реализованы в виде программ.

### ***Научная новизна***

1) Впервые разработана и обоснована методика, позволяющая численно охарактеризовать наблюдаемое с Земли пространственное распределение аврорального свечения на основе представлений фрактальной геометрии.

2) Впервые проведен анализ динамики аврорального свечения, связанного с различными явлениями, с учетом его пространственного распределения.

3) Впервые показано, что пространственно-временное распределение аврорального свечения во время взрывной фазы суббури имеет (на пространственных и временных масштабах 2-100 км и 1-100 сек, соответственно) масштабно-

инвариантные свойства, характерные одновременно как для систем в состоянии самоорганизованной критичности, так и для турбулентных систем.

4) Впервые по наземным и спутниковым данным показано, что распределение интервалов между дискретными хоровыми элементами в диапазоне 0.1-10 сек имеет степенной вид с показателем степени  $\sim 1.2-2.5$ .

5) Впервые предложена численная модель формирования последовательности хоровых элементов, основанная на режиме перемежаемости «включено-выключено» в генераторе типа ЛОВ (лампы обратной волны).

6) Впервые проведена классификация переходов от предварительной к взрывной фазе суббури на основе аналогии со спонтанными и стимулированными переходными процессами в системе с самоорганизацией.

7) Впервые проанализирована роль положительной обратной связи - аналога магнитосферно-ионосферной связи - в динамике суббуревой модели с самоорганизацией.

8) Впервые в рамках детерминированной клеточной модели обтекания магнитосферы солнечным ветром, в которой учтена конечная скорость распространения возмущения внутри магнитосферы и магнитосферно-ионосферная обратная связь, показано, что для динамики такой системы характерен набор переходов (бифуркаций) между различными динамическими режимами.

### ***Достоверность результатов***

Достоверность методики получения фрактальной характеристики пространственного распределения аврорального свечения обосновывается тестированием на модельных изображениях. Статистические характеристики аврорального структурирования, полученные по ТВ данным сравниваются с результатами, полученными по наблюдениям других приборов (сканирующий фотометр, ALIS, спутник POLAR). Анализ распределения интервалов между дискретными хоровыми элементами проводился с использованием различных спутниковых и наземных экспериментальных данных, что подтверждает его достоверность. Достоверность проводимых аналогий между процессами в магнитосферно-ионосферной системе и переходными процессами в модельных системах подтверждается аналогичными статистическими и морфологическими характеристиками.

***Научная и практическая ценность.*** Научную ценность представляют полученные в диссертации характеристики аврорального структурирования и динамики дискретных ОНЧ эмиссий. В частности, полученные в диссертации результаты должны быть использованы при построении динамической модели авроральных возмущений. Численная модель формирования последовательности хоровых элементов, основанная на режиме перемежаемости «включено-выключено», позволяет с использованием спутниковых данных проводить оценки параметров потоков резонансных частиц. Полученные в диссертации

результаты анализа наблюдений и динамики численных моделей могут быть использованы при построении моделей, описывающих влияние межпланетной среды на околоземное пространство и биосферу.

### ***Апробация работы***

Результаты, вошедшие в данную работу, докладывались на следующих международных конференциях: 5 International Conference on Substorms (2000 г., Санкт-Петербург), 6 International Conference on Substorms (2002 г., Сиэтл, США), 7 International Conference on Substorms (2004 г., Леви, Финляндия), 8 International Conference on Substorms (2006 г., Банф, Канада), 9 International Conference on Substorms (2008 г., Сеггау около Граца, Австрия), Assembles of EGS 2001-2003 гг. (Ница, Франция), Cospar-Colloquium (2001 г., Польша), 28 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (2001 г., Оулу, Финляндия), 31-st Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, (2004 г., Ambleside, Великобритания), 33-st Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (2006 г., Кируна, Швеция), 34 Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (2007 г., Andenes, Норвегия), Международная конференция «Проблемы геокосмоса» – 2000, 2002, 2004 и 2008 гг. (Санкт-Петербург), Conference S-RAMP (2000 г., Япония); Fysikermøtet 2007 (Собрание Норвежского физического общества, Tromso, Norway); Conference “Complexity in plasma and geospace systems”, Geilo, Norway, 2007; 6-th Annual International Astrophysical Conference, Oahu, Hawaii, 2007; 2007 AGU Fall Meeting; Conference ‘International Heliophysical Year 2007: New Insights into Solar-Terrestrial Physics (IHU2007–NISTP)’, 2007, Zvenigorod, Russia, а также на Всероссийском ежегодном Апатитском семинаре "Физика авроральных явлений" (2000-2008 гг.).

***Личный вклад.*** Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Вместе с тем получению этих результатов в значительной степени способствовали обсуждения и содействие со стороны коллег: Т.В.Козеловой, Е.Е.Титовой, В.Ю. Трахтенгерца, А.Г.Демехова, И.В.Головчанской, В.М.Урицкого, А.Клаймаса, К.Рипдала, А.А.Остапенко, И.А.Корнилова, Т.А.Корниловой. Их вклад отражен в соавторстве в соответствующих публикациях.

***Благодарности.*** Работы, результаты которых вошли в диссертацию, были полностью или частично поддержаны грантами: РФФИ 01-05-64827, РФФИ 01–05–64382, ИНТАС 99-0078, ИНТАС 99-0502, ИНТАС 03-51-4132, EST.CLG 975144, программой ОФН-16 Отделения физики Российской Академии наук.

### ***Структура и объем работы***

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения, содержит 298 страниц, в том числе 130 рисунков и 285 ссылок в списке литературы.

## II. Содержание работы

Во введении сформулированы цели работы, обоснована актуальность поставленных задач и приведено краткое содержание последующих глав

**Глава 1.** Целью данной главы является развитие методов описания пространственной структуры полярных сияний на основе представлений фрактальной геометрии. Для этого сначала коротко рассмотрены современные представления о происхождении полярных сияний, проведено сравнение существующих методов наблюдений и подходов к описанию структуры полярных сияний. Далее, в качестве характеристики пространственного распределения свечения, предлагается использовать *спектр размерности изолиний*  $D(I)$ , определяемый как зависимость фрактальной размерности  $D$  изолинии равной интенсивности  $L(I)$  от уровня свечения  $I$ . Как оценка фрактальной (сеточной) размерности  $D(I)$  изолинии  $L(I)$  принимается угловой коэффициент графика зависимости  $\ln N(\delta, I)$  от  $\ln \delta$ , где  $N(\delta, I)$  - число квадратов с ребром размера  $\delta$ , занятых изолинией  $L(I)$ . Изолиния для интенсивности  $I_0$  строится, как граница области, в которой  $I \geq I_0$ .

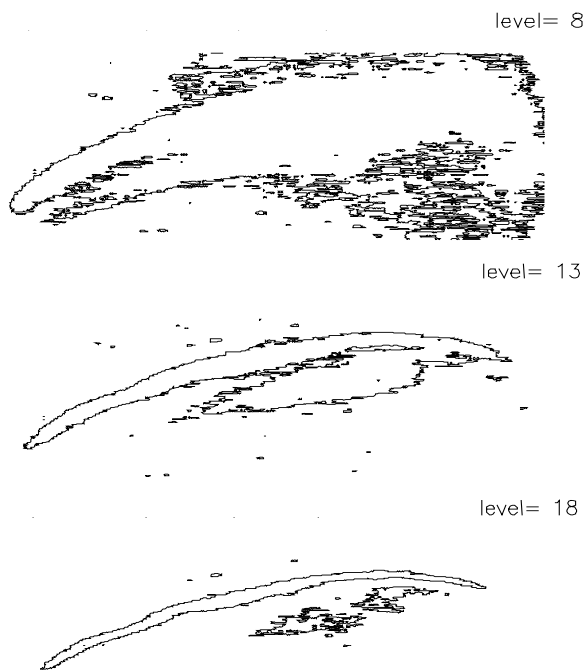


Рис.1. Изолинии для уровней интенсивности  $I = 8, 13, 18$ .

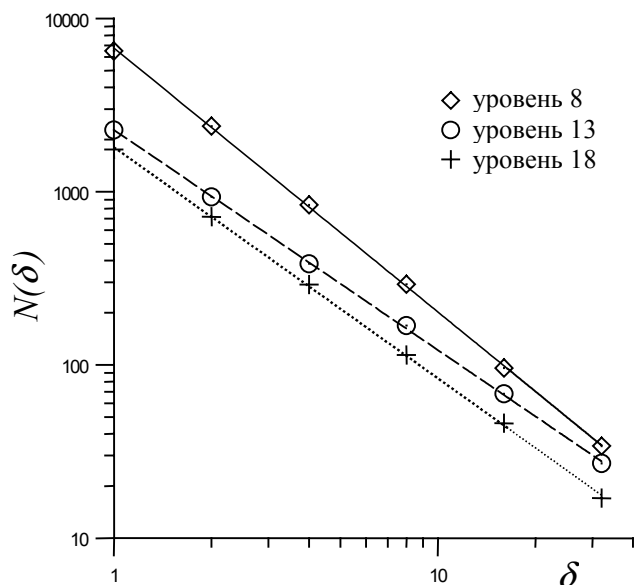


Рис.2. Число ячеек сетки, содержащих элементы изолинии, в зависимости от размера ячейки для изолиний, представленных на Рис.1.

Алгоритм оценки фрактальной (сеточной) размерности тестировался на модельных изображениях, имеющих известные фрактальные характеристики.



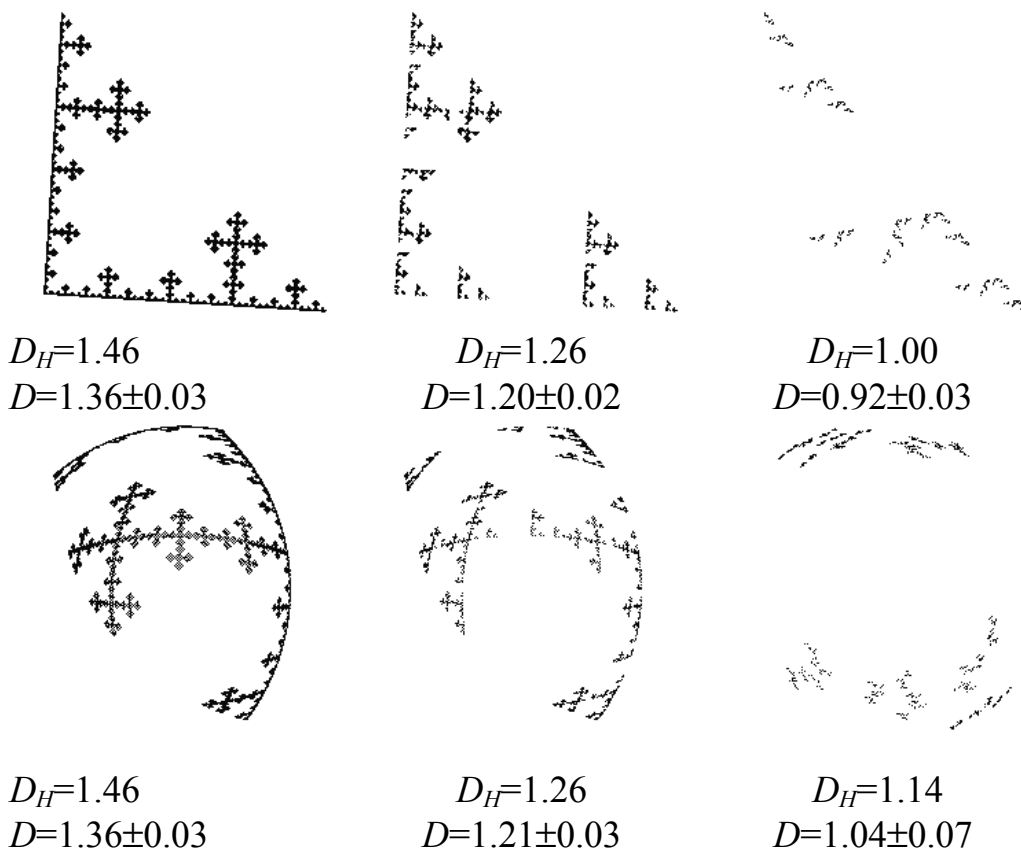


Рис.3. Результаты тестирования сеточного алгоритма на изображениях регулярных предфракталов (верхний ряд) и на изображениях искаженных предфракталов (нижний ряд).  $D_H$  - теоретическая размерность,  $D$  - размерности, рассчитанные по модельному изображению.

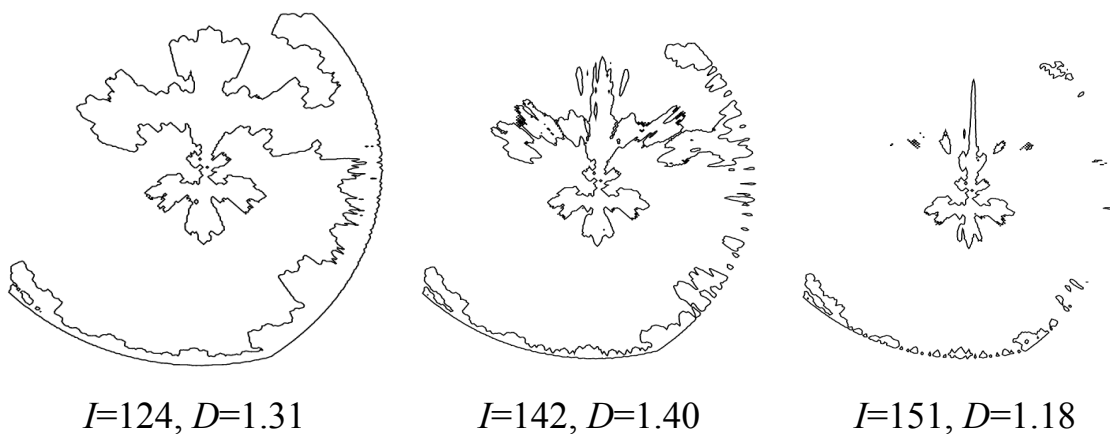


Рис.4. Примеры изолиний, полученных по модельным изображениям с учетом высотного профиля и шума.

Пример типичной зависимости  $D(I)$  показан на Рис.5. Исходный кадр содержит область свечения, состоящую из спокойной линейной дуги и диффузной полосы (см. Рис.1). Ниже уровня  $I=9$  на кадре имеется только мелкая структура, соответствующая фоновому свечению атмосферы, звездам и аппаратному шуму. Далее, с ростом  $I$  выше уровня 9, из шума локализуется область аврорального свечения. Эта область имеет четкие границы, в спектре размерности изолиний образуется минимум при  $I=13$ . Изолиния  $I=13$  отделяет область, заполненную фоновым шумом, от области аврорального свечения. Для интенсивностей, соответствующих авроральному свечению, наиболее существенным является наличие локального максимума, в данном случае при  $I=18$ . Эту интенсивность называем наиболее структурированной (MSI - most structured intensity).

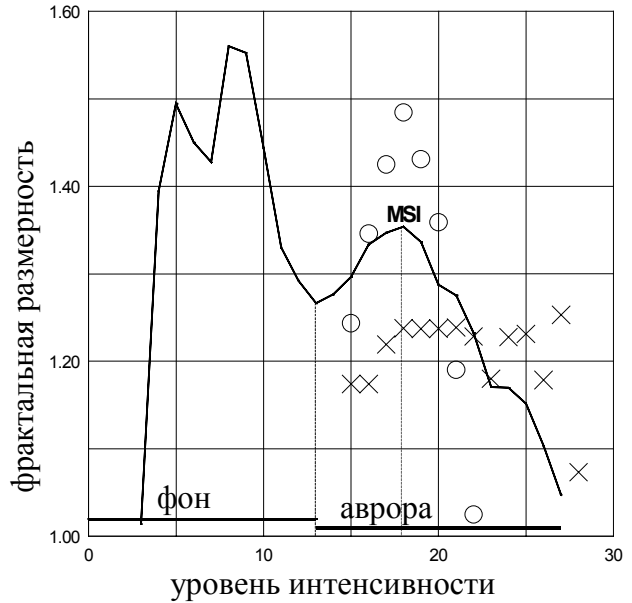


Рис.5. Зависимость размерности изолинии от уровня интенсивности для кадра, содержащего линейную дугу и диффузную полосу. Крестики - зависимость отдельно для дуги, кружки - для полосы.

Известно, что фрактальная размерность объединения нескольких фрактальных множеств равна максимальной из размерностей этих множеств. Однако это справедливо в пределе при  $\delta \rightarrow 0$ . Для сеточной размерности, определяемой для ограниченного диапазона масштабов доказано следующее утверждение:

Утверждение. Пусть  $S_1$  и  $S_2$  - фрактальные непересекающиеся множества, а  $D_1$  и  $D_2$  - фрактальные (сеточные) размерности этих множеств. Если для сетки масштаба  $\delta$  число ячеек, содержащих элементы этих множеств, есть  $N_1(\delta)$  и  $N_2(\delta)$ , соответственно, то для сеточной размерности объединения множеств  $S_1$  и  $S_2$  справедлива оценка:

$$D_{1+2}(\delta) \approx \frac{N_1(\delta)D_1 + N_2(\delta)D_2}{N_1(\delta) + N_2(\delta)}$$

Приведены примеры обработки серий ТВ изображений различных форм полярных сияний, получены следующие выводы: 1. Для всех рассмотренных серий кадров спектры размерности изолиний ( $D(I)$ ) для соседних кадров меняются плавно, что позволяет использовать зависимости  $D(I, t)$  для описания динамики областей свечения. 2. Максимумы на зависимости  $D(I)$  связаны с определенными структурами на изображении, при этом изменение величины мак-

симумов и соответствующих им интенсивностей от кадра к кадру отражает динамику форм полярных сияний. 3. Полученные максимальные размерности изолиний для разных авроральных форм имеют ожидаемую тенденцию: диффузные формы имеют размерность выше, чем дискретные.

В **Главе 2** строится модификация метода Грассбергера-Прокаччи, которая позволяет анализировать динамику области аврорального свечения с учетом ее пространственной структуры. В первом параграфе главы приводится краткое описание процедуры вложения Такенса [Takens F., *Lect. Notes in Math.*, V.898, 336-381, 1981] и метода Грассбергера-Прокаччи [Grassberger P., *Procaccia I., Phys. Rev. Lett.*, V.50, 346-349, 1983] вычисления корреляционной размерности для временных рядов. Из экспериментального временного ряда  $x(t)$ , состоящего из эквидистантных выборок, образуются  $m$ -мерные векторы, координаты которых состоят из выборок  $x$  с последовательно возрастающими сдвигами, кратными времени сдвига  $\tau$ , т.е.  $\mathbf{X}_i = \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)\}$ . По построенному набору  $\{\mathbf{X}_n\}$  рассчитывается корреляционный интеграл, определяющий вероятность того, что расстояние между парой векторов меньше, чем заданное расстояние  $r$ :

$$C(r, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \theta(r - |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j|),$$

где  $\theta$  - функция Хевисайда,  $N$  - число векторов в наборе. Если корреляционный интеграл зависит от  $r$  по степенному закону  $C(r) \sim r^b$ , то показатель степени представляет собой корреляционную размерность процесса  $b = D_c$ . Эта размерность является оценкой снизу для размерности Хаусдорфа-Безиковича  $D$ :  $D_c \leq D$ . Практически, для определения  $D_c$  необходимо построить зависимости  $\ln C(r)$  от  $\ln r$  при различных возрастающих значениях размерности пространства вложения  $m$ . Расчет заканчивается, если наклон графика перестает меняться с ростом  $m$ . Полученное значение  $D_c$  можно считать надежным, если оно не меняется вплоть до  $m = 2D_c + 1$ .

Далее предложено и обосновано обобщение этого метода для рядов, состоящих из последовательности изображений полярных сияний, с учетом их специфики. Используется следующая процедура введения расстояния (метрики) на множестве ТВ кадров: 1) выделяется уровень интенсивности, на котором хорошо видна структура, динамику которой надо исследовать; 2) пиксели, для которых значения интенсивности меньше данного уровня, заполняются значением 0, остальные пиксели заполняются 1; 3) расстоянием между двумя кадрами считаем число пикселей, имеющих разное значение  $d(A, B) = \sum_{i,j} A_{ij} \oplus B_{ij}$ ,

где  $A$  и  $B$  - матрицы значений пикселей, соответствующие двум кадрам,  $\oplus$  - операция "исключающее или", суммирование производится по всем значениям  $i$  и  $j$ . Для выбора уровня интенсивности, по которому проводится сортировка

изображения, использовался динамический спектр размерности изолиний, построение которого описано в Главе 1. При расчете корреляционного интеграла в алгоритме Грассбергера-Прокаччи использовалась супренум-норма для векторов в пространстве вложений.

Приведены примеры анализа динамики полярных сияний двух типов: пульсирующих пятен и активизаций типа брейкапов и псевдо-брейкапов. Показано, что динамика всей области, занятой на кадре пульсирующими пятнами, характеризуется корреляционной размерностью 7.0. В то же время динамика отдельного пятна в основном характеризуется корреляционной размерностью  $\sim 2$ , что типично для периодических режимов. Показано, что нет заметного различия корреляционных размерностей ( $D_c = 2.7-2.8.$ ) для случаев брейкапов и псевдо-брейкапов. Однако, с увеличением интенсивности авроральной активизации проявляется рост относительного диапазона масштабов, в котором имеется самоподобие траектории системы в фазовом пространстве.

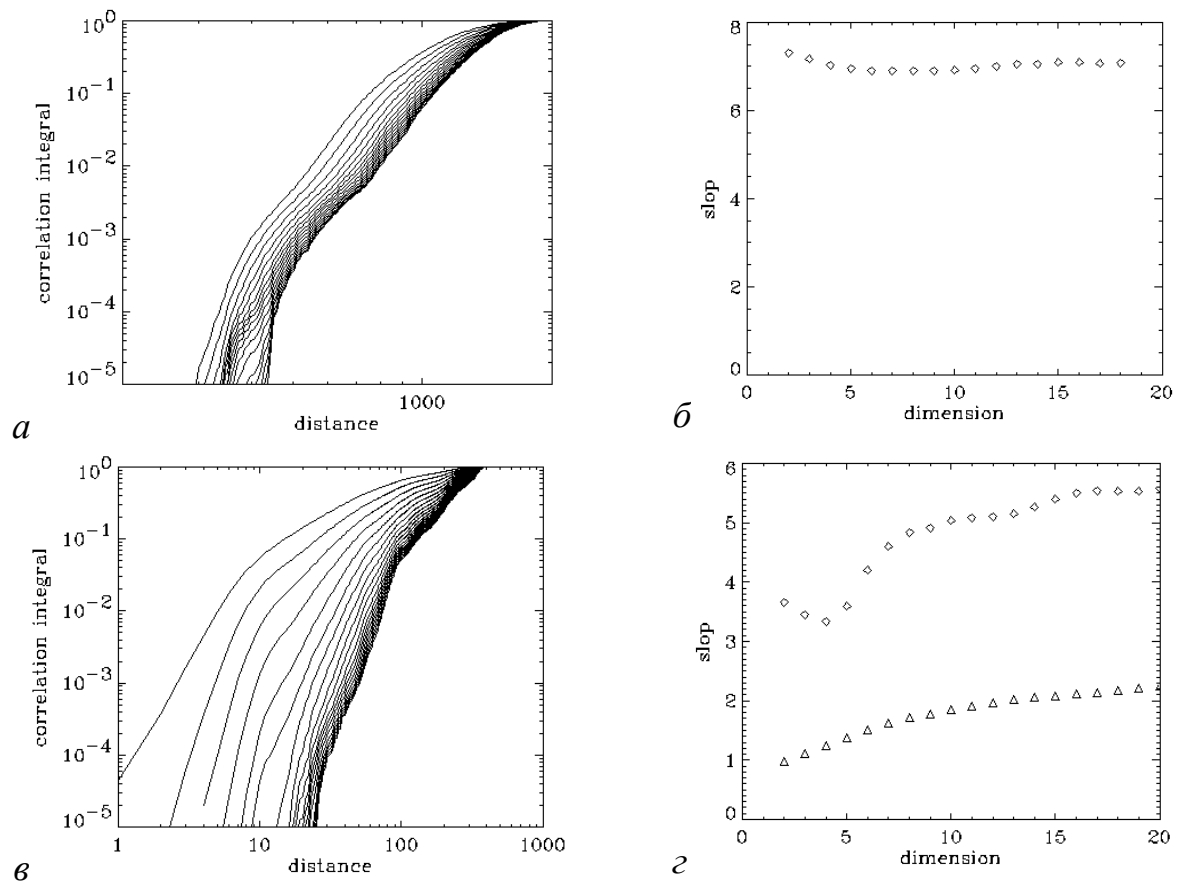


Рис.6. Результаты обработки случая пульсирующих сияний: *а, б* - для полных кадров; *в, г* - для центральной части кадра; *а, в* - зависимости  $C(r)$  для  $d=2,3,\dots,18$ ; *б, г* - зависимость показателя степени на степенных участках  $C(r)$  от размерности пространства вложения  $d$ .

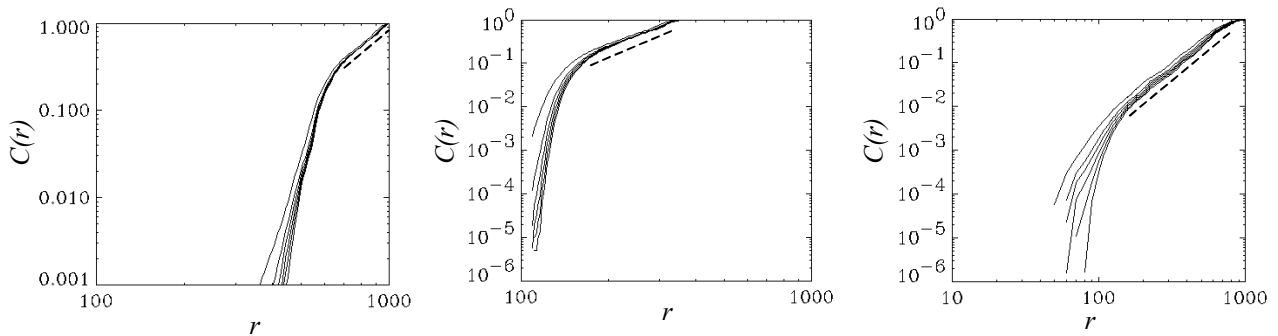


Рис.7. Корреляционный интеграл в зависимости от расстояния для трех рассмотренных случаев авроральных активизаций. Сплошные линии (сверху-вниз) - зависимости для размерностей пространства вложения  $d=2,6,9,12,15,18$ . Пунктиром отмечены степенные участки.

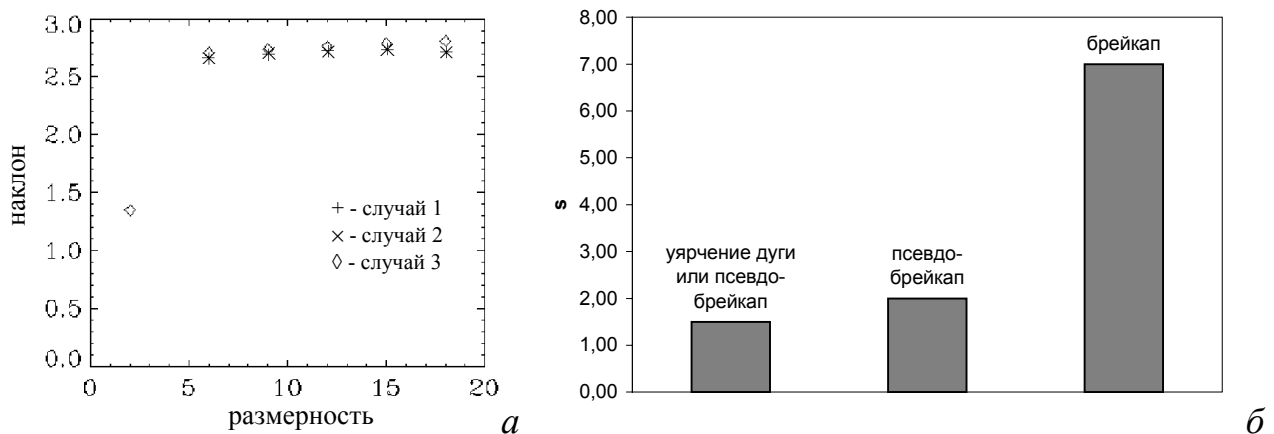


Рис.8. *а* - зависимость показателя степени на степенных участках графиков Рис.7 от размерности пространства вложения; *б* - сравнение относительного диапазона самоподобия фазовой траектории для трех случаев авроральных активизаций.

**Глава 3** посвящена исследованию пространственно-временного распределения аврорального свечения во время взрывной фазы суббури на основе представлений о состояниях самоорганизованной критичности (СК) [Bak P. *How nature works. The science of self-organized criticality*, Oxford Univ. Press, 1997] и турбулентности [Frisch, U.: *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*, Cambridge Univ. Press, 1995]. Эти два подхода к описанию сложного поведения кратко обсуждаются в п. 3.1. Отмечено, что каждый из этих подходов опирается на набор базовых моделей и, в общем случае, приводит к тем или иным масштабно-инвариантным статистическим свойствам характеристик переходных процессов. Однако формализм моделей СК и турбулентности сильно отличается, разнятся также обсуждаемые в рамках этих парадигм характеристики.

В п.3.2 анализируются данные ТВ наблюдений взрывных фаз суббурь на высокоширотной станции Баренцбург. В поле зрения выделялись индивидуальные области свечения, превышающие определенный уровень интенсивно-

сти, прослеживалась их пространственно-временная динамика, и определялись их характеристики, см. Рис.9 и Таблицу 1. Показано, что статистические распределения характеристик областей аврорального свечения имеют степенной вид, что свидетельствует о возможном наличии состояния самоорганизованной критичности в магнитосферно-ионосферной плазме. Полученные распределения хорошо согласуются с аналогичными характеристиками, полученными в [Uritsky et al., *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1426, 2002] для больших масштабов по данным спутника POLAR, Рис.10. В пп.3.3.-3.4 показано, что полученные степенные показатели статистических распределений связаны друг с другом характерными для критических явлений соотношениями, а показатели для 2-D областей свечения и их 1-D сечений – с фрактальными характеристиками, полученными в Главе 1.

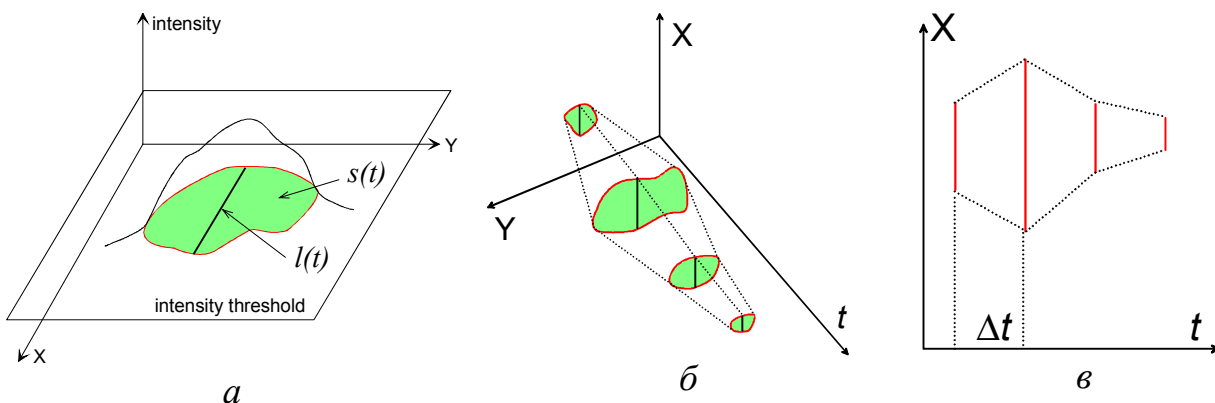


Рис.9. Определение характеристик областей аврорального свечения.

Таблица 1.

Характеристика	2-D	1-D
Интегрированный размер	$S = \int_{\{T\}} s(t)dt$	$L = \int_{\{T\}} l(t)dt$
Полная диссипируемая энергия	$E = \int_{\{T\}} w(t)dt$	$E = \int_{\{T\}} w_l(t)dt$
Максимальных размер	$A = \max_{\{T\}} s(t)dt$	$L_{\max} = \max_{\{T\}} l(t)dt$
Максимальная диссипируемая мощность	$W = \max_{\{T\}} w(t)dt$	$W = \max_{\{T\}} w_l(t)dt$

В п.3.5 на том же наборе ТВ данных показано, что пространственное распределение аврорального свечения обладает рядом свойств, типичных для перемежающейся турбулентности: степенной вид обобщенной структурной функции, универсальный негауссов вид распределений флуктуаций интенсивности на разных масштабах, рост эксцесса с уменьшением масштаба. Анало-

гичные выводы о наличии признаков турбулентности получены в п. 3.6 из анализа данных CCD камеры системы ALIS, имеющей значительно меньший уровень аппаратного шума, чем ТВ камеры.

В п.3.7 показано, что развитие аврорального возмущения сопровождается увеличением степени упорядоченности (по Климонтовичу). Относительная степень упорядоченности определялась согласно S-теореме Ю.Климонтовича [Климонтович Ю.Л., *Статистическая теория открытых систем, Т.1, Москва, 1995*], как разность эффективных энтропий, определяемых из наблюдаемых распределений аврорального свечения. При этом экспериментальные распределения перенормировались с помощью канонического преобразования к одинаковому значению средней энергии.

Различные проявления самоподобия в оптических и других данных (в частности, в наблюдениях флуктуаций электрического поля на низковысотных спутниковых), а также связь между ними обсуждается в п.3.8.

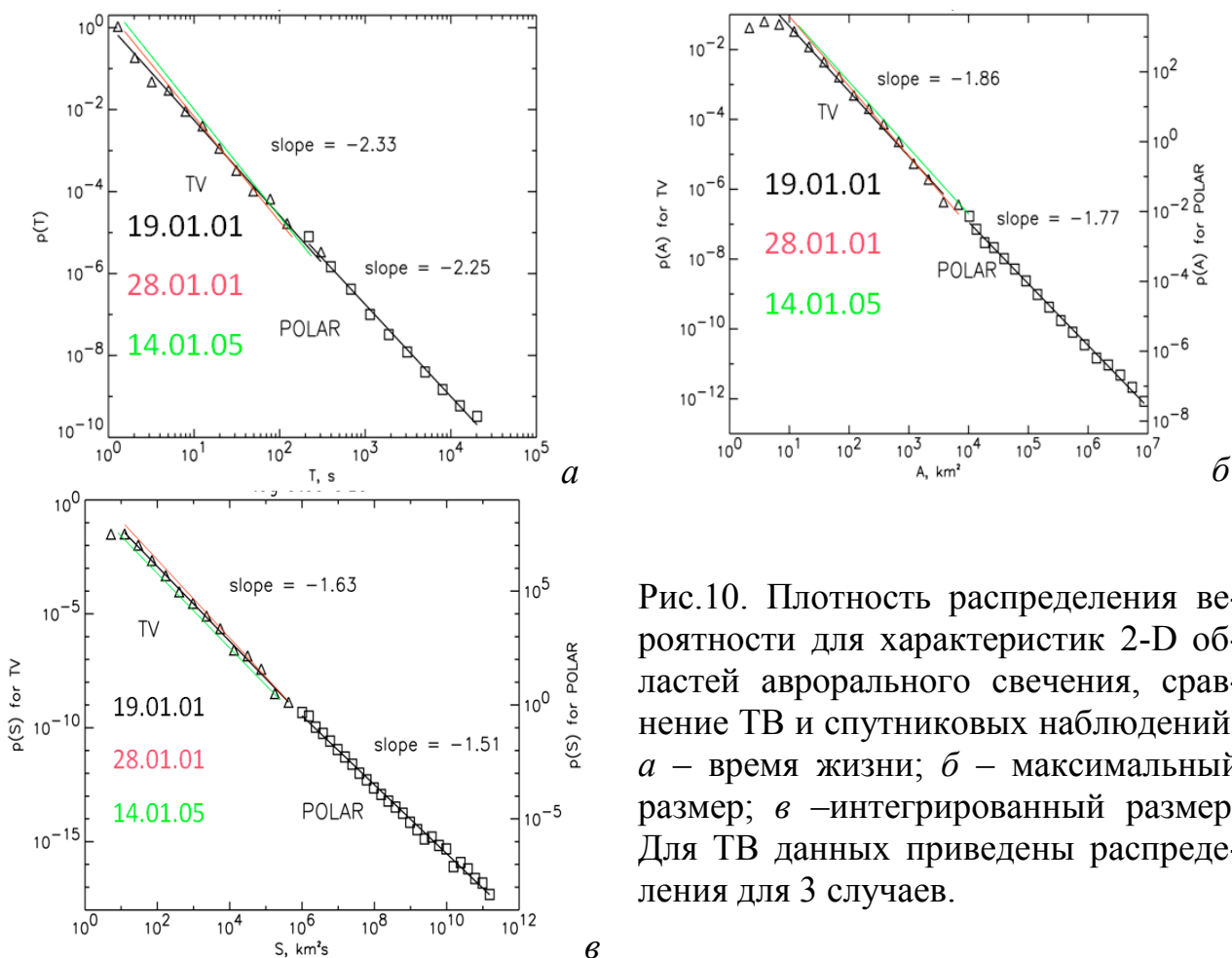


Рис.10. Плотность распределения вероятности для характеристик 2-D областей аврорального свечения, сравнение ТВ и спутниковых наблюдений: а – время жизни; б – максимальный размер; в –интегрированный размер. Для ТВ данных приведены распределения для 3 случаев.

**Глава 4** посвящена исследованию динамических режимов генерации дискретных ОНЧ эмиссий на основе обработки данных спутниковых и наземных наблюдений. Современные представления о морфологии хоровых эмис-

сий и существующие проблемы в объяснении их происхождения кратко изложены в первом параграфе главы.

Одной из характерных особенностей хоровых эмиссий является то, что, несмотря на хаотичность появления отдельных элементов, динамические спектры в ОНЧ диапазоне при разных масштабах по оси времени выглядят весьма схоже. Это может свидетельствовать о некотором самоподобии (самоаффинности), которое должно проявляться в виде степенных участков на распределениях интервалов между отдельными элементами. Данное предположение проверяется с использованием наблюдений ОНЧ волн на Земле и внутри магнитосферы, на разных удалениях от экваториальной области.

Функции распределения временных интервалов между хоровыми элементами определялись двумя методами, которые дали аналогичные результаты, см Рис.11. Во-первых, моменты начала и окончания, а также соответствующие им частоты каждого хорового элемента выделялись на динамическом спектре. Строились распределения интервалов между моментами появления последовательных элементов. Для второго метода выделения хоровых элементов использовалась зависимость от времени амплитуды огибающей сигнала в узкой полосе частот ( $\Delta f \approx 10^2$  Гц). При этом появление хоровых элементов соответствует увеличению амплитуды выше некоторого фонового значения.

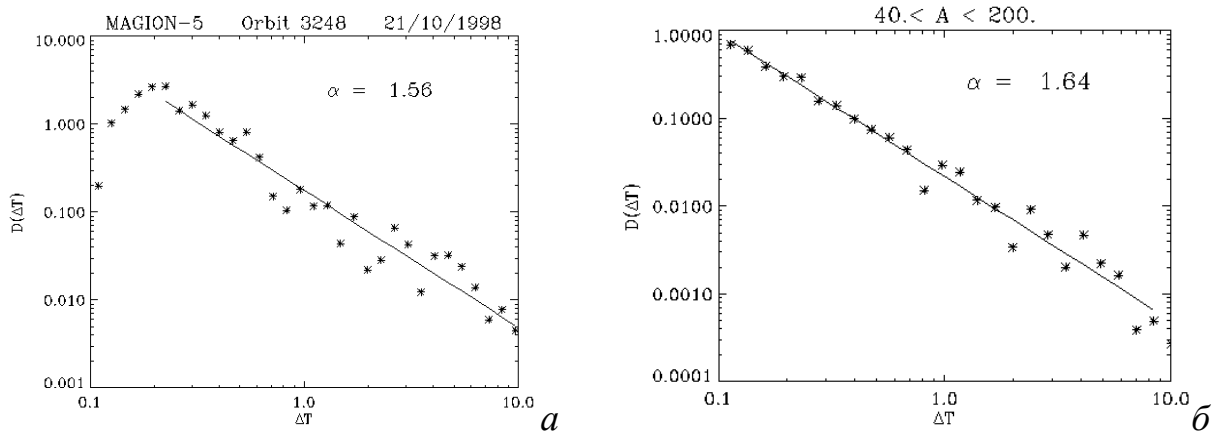


Рис.11. Сравнение распределений интервалов между хоровыми элементами, построенных разными методами по данным MAGION-5, орбита 3248: *a* – элементы выделялись в диапазоне 3.0-4.0 кГц первым методом; *б* – элементы выделялись вторым методом на частоте 3.5 кГц. Линии - аппроксимации степенной функцией.

Распределения, полученные по данным разных спутников и по наземным данным, приведены на Рис.12. Во всех случаях наблюдается степенной участок в диапазоне от 0.2 до нескольких секунд. Таким образом, показано, что *генерация последовательности ОНЧ хоров происходит с определенной упорядоченностью, проявляющейся в степенном виде распределений интервалов времени*



между последовательными дискретными элементами. При этом показатель степени варьируется от случая к случаю в диапазоне от 1.2 до 2.5.

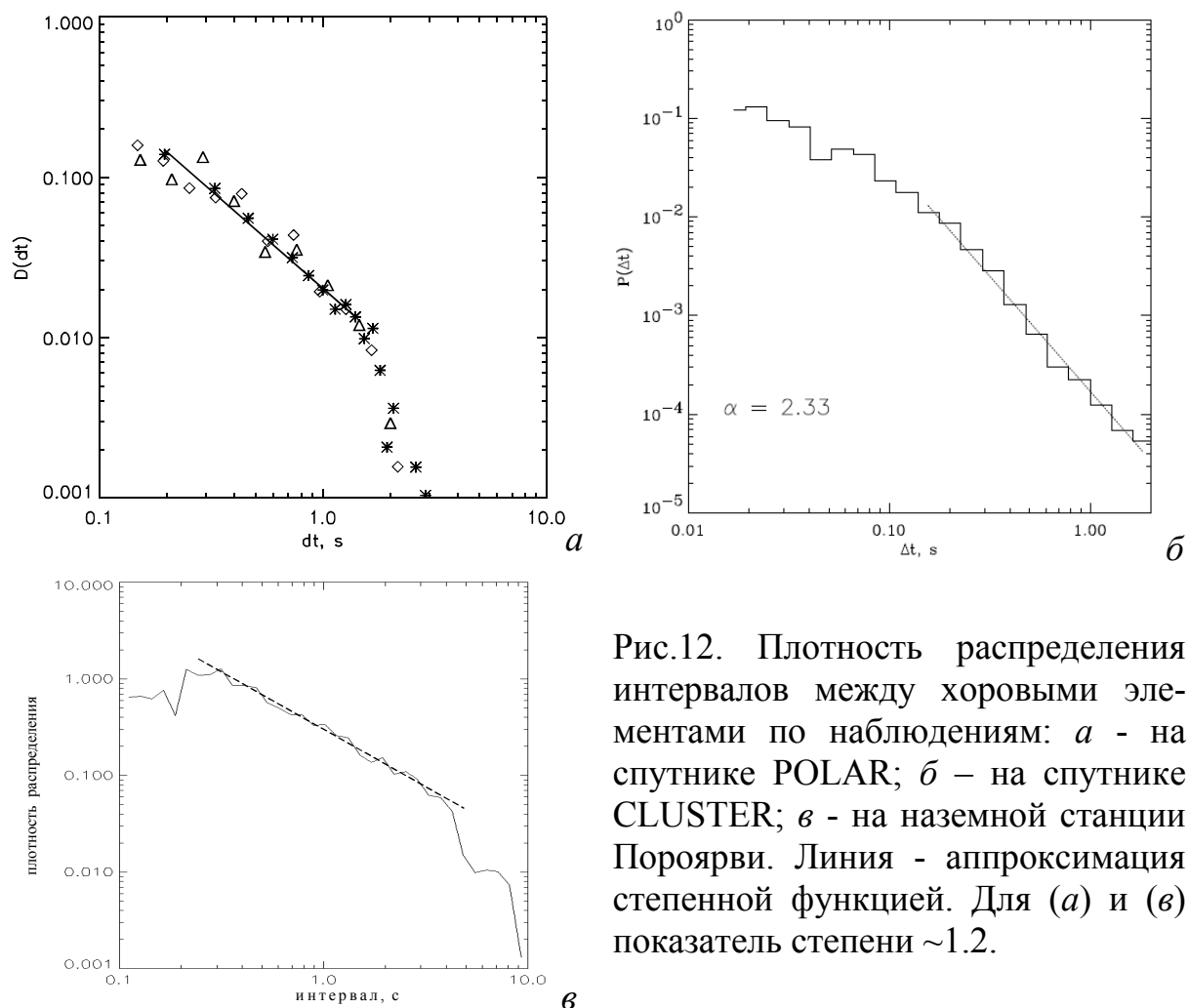


Рис.12. Плотность распределения интервалов между хорowymi элементами по наблюдениям: *а* - на спутнике POLAR; *б* - на спутнике CLUSTER; *в* - на наземной станции Пороярви. Линия - аппроксимация степенной функцией. Для (*а*) и (*в*) показатель степени  $\sim 1.2$ .

**Глава 5.** В этой главе на основе современных физических представлений о происхождении естественных КНЧ-ОНЧ излучений строятся динамические численные модели, которые воспроизводят динамику, характерную для дискретных хорowych эмиссий и исследованную по экспериментальным данным в предыдущей главе. Построения основаны на развитых в работах В.Ю.Трахтенгерца [Trakhtengerts V.Y., *J. Geophys. Res.* V.100. №A9, P.17205, 1995; *Ann. Geophys.* V.17. P.95. 1999] представлениях о том, что генерация хорowych элементов происходит в магнитосферном циклотронном лазере в режиме лампы обратной волны (ЛОВ). ЛОВ режим генерации был открыт в электронных приборах, и детально генератор ЛОВ рассматривался в работе [Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. *Релятивистская высокочастотная электроника. Горький. ИПФ АН СССР. С.101-143. 1981*]. В первом параграфе главы кратко излагаются основные физические положения теории ЛОВ режима генерации дискретных хорowych элементов. Отмечено, что некоторые связи между усредненными наблюдаемыми параметрами хорowych эмиссий, предсказанные моде-

лю Люб, действительно нашли экспериментальное подтверждение [Titova et al., *Ann. Geophys.* V.21, №5. P.1073, 2003; Trakhtengerts et al., *Phys. Plasma*, V.11(4), P.1345, 2004; Kozelov et al., *J. Geophys. Res.*, 113, A06216, 2008]. Однако какой именно динамический режим реализуется в случае хоровых эмиссий, до последнего времени оставалось не вполне ясно.

В принципе, даже простейшая дискретная численная модель электронного генератора, описываемая уравнением  $A(t) = \lambda [A(t-T_0) - A^3(t-T_0)]$  (здесь  $A$  – амплитуда,  $T_0$  - время задержки в цепи обратной связи) при надлежащем выборе управляющего параметра  $\lambda$  имеет режимы, имеющие степенные распределения интервалов между пиками амплитуды. Это режимы перемежаемости I, II и III типа [Шустер Г. *Детерминированный хаос. Мир, 1988*]. Однако эти динамические режимы не могут объяснить широкий диапазон полученных значений показателей степени и не обладают необходимой в данном случае "грубостью", то есть не обладают устойчивостью к малым изменениям управляющего параметра. Кроме того, значения управляющего параметра  $\lambda$ , необходимые для этих режимов перемежаемости, не имеют никаких очевидных свойств, которые бы выделяли их из всего множества значений. Поэтому трудно ожидать, что данные режимы реализуются в магнитосфере настолько часто.

Наблюдения на спутниках свидетельствуют о достаточно протяженной области генерации ОНЧ хоров в экваториальной плоскости, составляющей в среднем  $\sim 10^3$ – $10^4$  км, хотя поперечные к магнитному полю размеры области генерации индивидуального хорового элемента составляют порядка 100 км. Поэтому принципиальным является вопрос, происходит ли генерация хоров в системе независимых магнитных трубок (дактов), или локальные нелинейные связи и эффекты взаимного влияния (эффекты самоорганизации) между ними существенно влияют на динамику хоровых излучений и обусловленных ими высыпаний энергичных электронов.

В п.5.2 поиск ответа на этот вопрос ведётся с использованием опыта анализа широко обсуждаемых в последнее время открытых распределенных систем с локальными нелинейными связями, которые, как известно, демонстрируют универсальные свойства самоорганизации, слабо зависящие от их внутреннего устройства [Bak P. *How nature works. The science of self-organized criticality, Oxford Univ. Press, 1997*]. Дискретный режим генерации хоровых элементов напоминает лавинообразные переходные процессы в таких системах. Из известных базовых моделей, как наиболее близкая, выбрана модель "периодически нарушаемого равновесия" (ПНР) [Bak P., Sneppen K., *Phys. Rev. Lett.* V.24. P.4083, 1993]. Наличие ПНР в системе предполагает существование большого числа взаимодействующих между собой ячеек. Учитывая механизм генерации хоров, естественно предположить, что в качестве такой ячейки может выступать дакт с повышенной плотностью фоновой плазмы. В возмущенных условиях внешняя плазмосфера неоднородна, и такие дакты могут плотно

заполнять область генерации. Пульсирующие высыпания обусловлены циклотронным взаимодействием КНЧ/ОНЧ волн с электронами, попадающими в волокно повышенной плотности в процессе магнитного дрейфа. Взаимодействие между ячейками-дактами может осуществляться через захваченные геомагнитным полем энергичные электроны, которые в процессе магнитного дрейфа попадают из одной ячейки в соседние с ней, а также через возбуждаемые в дактах свистовые волны, которые частично могут просачиваться в соседние дакты. Излучение возбуждается в каждом дакте посредством развития циклотронной неустойчивости, обусловленной поперечной анизотропией энергичных электронов. Если исходить из модели генерации хоров, основанной на режиме ЛОВ, то количественной мерой неустойчивости каждой ячейки может служить крутизна и высота ступеньки на функции распределения электронов, а также плотность холодной плазмы в дакте. Развитие неустойчивости в каждом отдельно взятом дакте может зависеть от того, что происходит в соседних дактах, причем это влияние во многом носит случайный характер (в силу случайного расположения этих дактов в пространстве, разброса значений фоновой плотности в них и т.п.)

Исходя из этих физических представлений, рассмотрена следующая численная модель (модель цепочки дактов). Модельная система одномерна и состоит из  $N=40$  ячеек-дактов.  $g_i(k)$  - это количественная характеристика устойчивости  $k$ -ой ячейки на  $i$ -том шаге по времени,  $g_i(k)$  принимает значения в пределах  $0 \leq g_i \leq 1$ . Динамика системы во времени определяется выражением:

$$g_{i+1}(k) = g_i(k) - \delta + \varphi_i + A \{ \eta_i(k-1) + \eta_i(k+1) \}$$

Здесь:  $\delta$  - постоянная,  $\delta \ll 1$ , описывающая систематического уменьшение устойчивости за счет поступающих в дакт в новых энергичных электронов;  $\varphi_i$  - случайная величина, равномерно распределенная от 0 до  $\varepsilon(g_i(k))$ , описывающая внутренние процессы релаксации неустойчивости;  $\eta_i(j)$  - случайная величина, равномерно распределенная от  $-\varepsilon(g_i(j))$  до  $+\varepsilon(g_i(j))$ ,  $j \in \{k-1, k+1\}$ , описывающая влияние соседних ячеек;  $A$  - коэффициент связи соседних ячеек. Зависимость  $\varepsilon(g)$  имеет вид  $\varepsilon(g) = (1 - g)^p$ . Нелинейная функция  $\varepsilon(g)$  обеспечивает большую активность ячеек с меньшей устойчивостью. Можно ожидать, что при достаточно большом  $p$  эта зависимость обеспечит динамические свойства, близкие к исходной модели ПНР.

Исследование динамики модели показало, что плотность распределения интервалов между активизациями выделенного дакта имеет степенной вид при *нелинейной* зависимости  $\varepsilon(g) = (1 - g)^p$ , т.е. при  $2 \leq p$ , см. Рис.14-а. Однако *вза-*

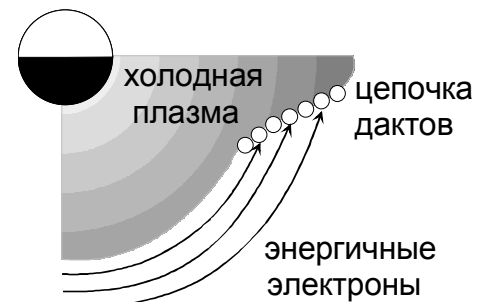


Рис.13. Схема модели цепочки дактов.

имное влияние ячеек практически не сказывается на виде этого распределения, см. Рис.14-б.

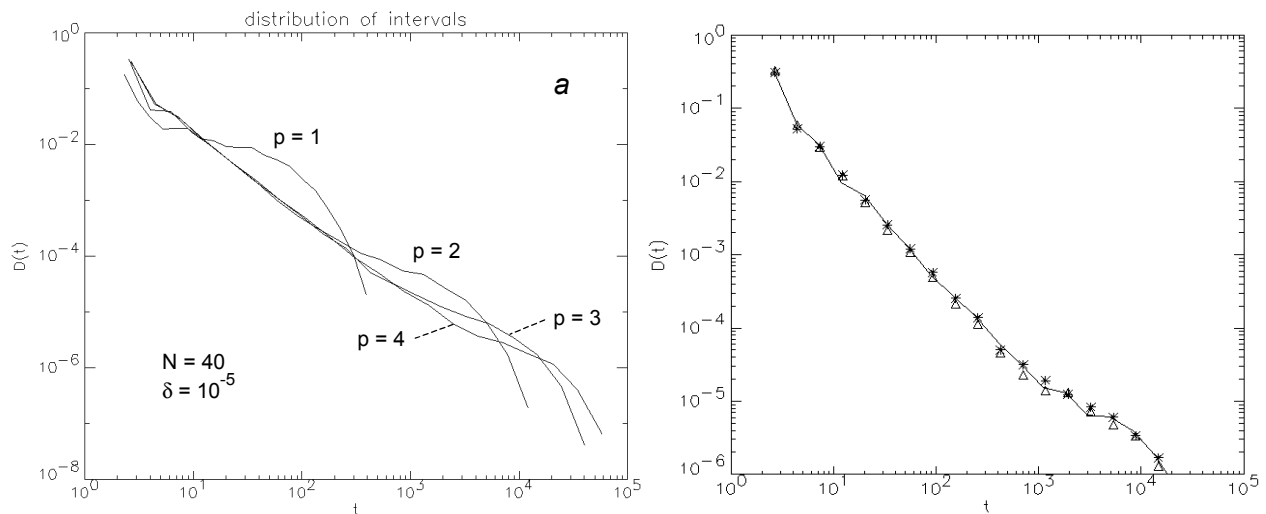


Рис.14. Плотность распределения интервалов между активизациями выделенного дакта для различных значений: (а) - параметра  $p$ ; (б) - параметра  $A$ : линия -  $A=0$ , звездочки -  $A=1$ , треугольники -  $A=15$ . Остальные параметры модели:  $N=40$ ,  $\delta=10^{-4}$ ,  $p=3$ .

Математические модели, обеспечивающие степенное распределение интервалов времени между активизациями, интенсивно обсуждались в связи со всплесками в рентгеновском излучении Солнца [Wheatland et al., *Astrophysical J.* V.509, P.448, 1998]. Наиболее интересным является режим перемежаемости "включено-выключено" (или "переключающая перемежаемость") [Heagy et al., *Phys. Rev. E.* V.49, №2, P.1140, 1994]. В отличие от других известных типов перемежаемости, перемежаемость "включено-выключено" является истинно динамической, то есть проявляется при случайном (шумовом) изменении управляющего параметра, а не его фиксации при определенном специфическом значении. При этом изменение управляющего параметра может быть как стохастическим с бесконечным числом степеней свободы, так и детерминированно-хаотическим с малым числом степеней свободы. В обзоре [Ланда П.С. *Нелинейные колебания и волны, Физматлит, 1997*] этот динамический режим отнесен к шумоиндуцированным фазовым переходам в нелинейных системах.

В п.5.3 обосновывается и анализируется численная модель генерации последовательности хоровых элементов, основанная на реализации режима перемежаемости «включено-выключено» в ЛОВ. Генератор ЛОВ описывается разностным уравнением вида:

$$A(t) = \lambda [A(t-T_0) - A^3(t-T_0)] + \delta, \quad (1)$$

где  $T_0$  - время задержки в цепи обратной связи,  $\lambda$  имеет смысл коэффициента усиления в линейном ( $A \ll 1$ ) режиме при разомкнутой цепи обратной связи;  $\delta=10^{-8}$  - начальная фоновая волна.  $\lambda$  зависит от времени в общем случае как:

$$\lambda(t) = C_0 + C_1 \xi(T_1, t) + C_2 \sin(2\pi t/T_2) + C_3 t \quad (2)$$

Здесь  $C_0, C_1, C_2, C_3, T_1, T_2$  - постоянные,  $\xi(T_1, t)$  - псевдо-случайное число, равномерно распределенное от 0 до 1, причем значение  $\xi(T_1, t)$  будем считать постоянным в течение некоторого случайного промежутка времени со средним значением  $T_1$ . Таким образом, в зависимости от значений постоянных  $C_1$  и  $C_2$ , в изменении  $\lambda(t)$  может преобладать стохастический или периодический член. Физически периодический член может отражать внешнюю модуляцию свойств плазмы в ЛОВ. При  $C_3 \neq 0$  зависимость  $\lambda(t)$  будет иметь общий тренд.

Следует иметь в виду, что вышеприведенные формулы справедливы, если выполняются неравенства  $\omega_0 \gg \gamma_{st} > T_1^{-1}, T_0^{-1}$ . Здесь,  $\omega_0$  - несущая частота,  $\gamma_{st}$  - инкремент нарастания волны при взаимодействии со ступенькой на функции распределения энергичных электронов. Из экспериментальных данных для энергичных электронов и холодной плазмы можно оценить  $\gamma_{st}$ . В частности, полагая для  $L = 6$  плотность потока энергичных электронов  $S = 3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ ,  $v_0 = 6 \times 10^9 \text{ см/сек}$  и  $N_c = 10 \text{ см}^{-3}$ , в случае  $\Delta N_{st} = 0.1(S/v_0) = 5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$  будем иметь:  $\gamma_{st} = 2.5 \times 10^{-3} \omega_{BL} \approx 60 \text{ сек}^{-1}$ . Для  $T_0$  при  $l \approx 2000 \text{ км}$  и  $v_g \approx 2 \times 10^9 \text{ см/сек}$  получим значение  $T_0 \approx 0.1 \text{ сек}$ . Из наземных наблюдений имеем характерное время  $T_2 \approx 4 \text{ сек}$ , поэтому ограничиваемся рассмотрением случая  $T_2 \gg T_1$ .

Около точек бифуркаций в (1) при отличном от нуля шумовом слагаемом в (2) порог режима перемежаемости типа «включено-выключено» определяется из условия  $\langle \ln \lambda \rangle = 0$ . Ограничиваясь двумя слагаемыми в (2) при равномерном распределении  $\xi$  от 0 до 1, приходим к выражению:

$$\langle \ln \lambda \rangle = \frac{1}{C_1} \int_{C_0}^{C_0+C_1} \ln(C_0 + C_1 x) dx = \frac{1}{C_1} [(C_0 + C_1) \ln(C_0 + C_1) - C_1 - C_0 \ln C_0] = 0 \quad (3)$$

Значения  $C_1$  и  $C_0$ , при которых выполнено условие (3), приведены на Рис.15 в виде зависимости  $C_1(C_0)$ . Режим перемежаемости возникает при значениях параметров, соответствующих точкам, лежащим выше этой кривой. В этом режиме формируются пики активности сравнительно большой амплитуды на фоне продолжительных промежутков, в течение которых амплитуда мала. Примеры зависимости амплитуды от времени в этом режиме генерации, а также при дополнительной периодической модуляции приведены на Рис.16.

*Вблизи порога перемежаемости  $\lambda_{thr}$  промежутки между пиками имеют степенное распределение. В работе проанализирована зависимость показателя степени в зависимости от параметров модели. Кроме того известно, что средний интервал между всплесками (пиками) активности  $\langle t_{ст} \rangle$  в режиме перемежаемости «включено-выключено» обратно пропорционален удалению средней величины  $\lambda$  от точки  $\lambda_{thr}$ ,  $\langle t_{ст} \rangle \sim (\langle \lambda \rangle - \lambda_{thr})^{-1}$ . То есть, с ростом  $\langle \lambda \rangle$  количество всплесков активности увеличивается. Приведены примеры применения предложенной численной модели при анализе наземных и спутниковых наблюдений. Предложенная численная модель позволяет воспроизвести наблюдаемые*

особенности динамики ОНЧ хоров и естественно дополняет современные представления о процессах генерации дискретных эмиссий в магнитосфере.

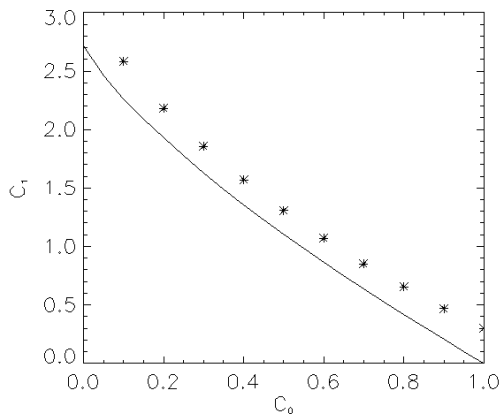


Рис.15. Сплошная линия - значения параметров  $C_1$  и  $C_0$ , удовлетворяющие условию возникновения режима перемежаемости. Звездочки - пары значений параметров  $C_0$  и  $C_1$ , при которых средний интервал между пиками с амплитудой  $>0.4$  равен 1.5 сек.

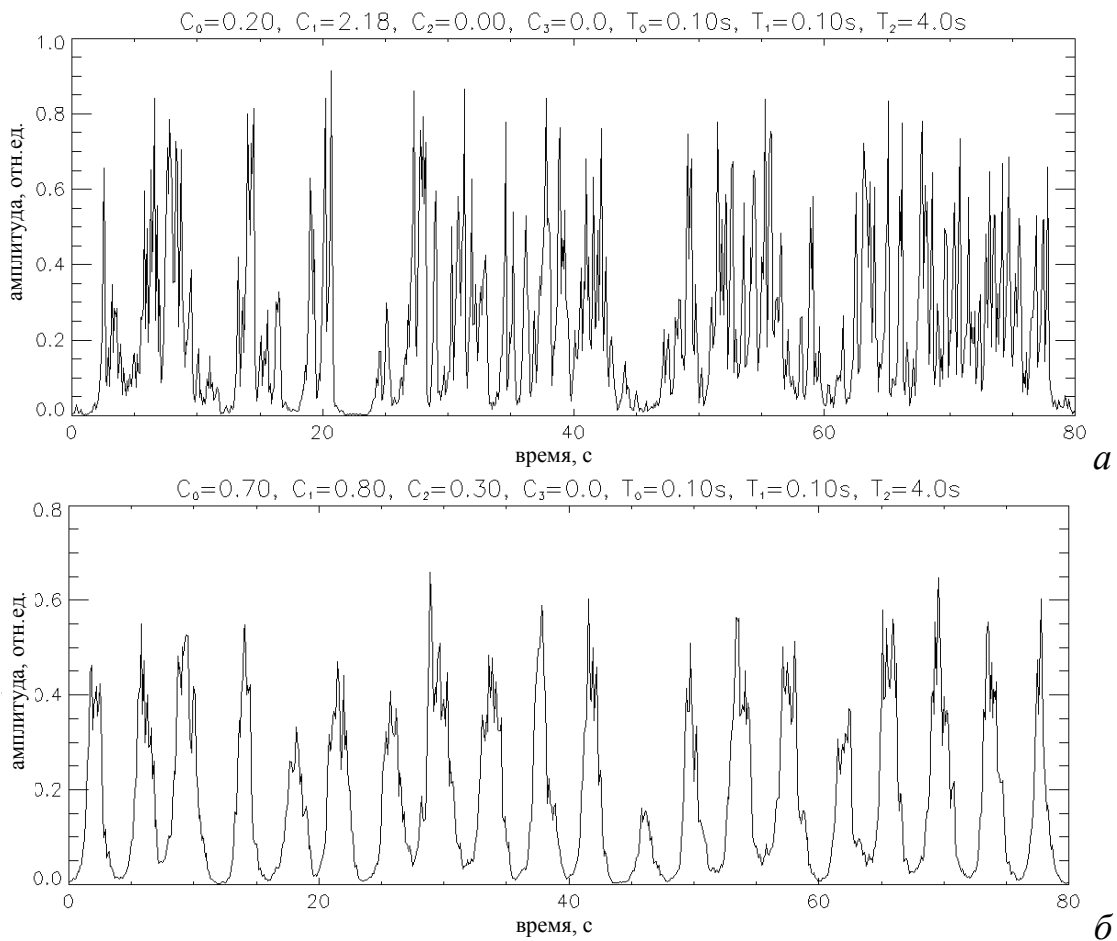


Рис.16. Зависимость амплитуды от времени: *а* - для режима перемежаемости «включено-выключено»; *б* - при наличии внешней модуляции.

**Глава 6.** Глава посвящена исследованию явления магнитосферной суббури на основе метода динамических аналогий. В первом параграфе главы сделан краткий обзор моделей суббуревой активности магнитосферы, как основанных на аналогиях с динамическими системами малой размерности, так и на

аналогиях с системами в состоянии самоорганизованной критичности (СК) [Bak P. *How nature works. The science of self-organized criticality*, Oxford Univ. Press, 1997]. В последующих параграфах представлен набор (иерархия в порядке усложнения) моделей магнитосферно-ионосферной системы, ответственной за явление магнитосферной суббури, как большой интерактивной системы с элементами самоорганизации. Приложения парадигмы СК к магнитосферной динамике в основном ограничивались обсуждением вопроса существования СК состояния. Между тем, динамика больших интерактивных систем вдали от равновесия не сводится только к СК состоянию. Более интересным объектом исследования являются переходные процессы в таких системах, даже если система не находится в СК состоянии (в строгом смысле).

В п.6.2 на основе аналогии с простой моделью динамической системы, в которой возможна самоорганизация в критическое состояние (будем называть ее СК системой), приводится классификация типов перехода от подготовительной к взрывной фазе суббури, как переходных процессов в такой системе. Численная модель (клеточный автомат) строится в рамках физической аналогии, в основном совпадающей с использованной в работе [Урицкий В.М., Пудовкин М.И. *Геомагнетизм и аэрономия*. Т.38, №3, С.17, 1998]. Токовый слой хвоста магнитосферы представляется в виде прямоугольного массива элементов, каждый из которых обладает некоторым запасом энергии. Можно считать, что каждый элемент этого массива соответствует в магнитосфере ячейке с размером, близким к характерному размеру флуктуаций в магнитосферной плазме [Milovanov et al., *J.Geophys.Res.* V.101, P.19903, 1996]. В отличие от [Урицкий В.М., Пудовкин М.И. *Геомагнетизм и аэрономия*. Т.38, №3, С.17, 1998], в качестве базового использован вещественнозначный вариант клеточного автомата с непрерывным управлением [Hwa and Kardar, *Phys. Rev. A*, V.45, P.7002, 1992].

Состояние элемента с координатами  $(i,j)$  в момент времени  $t$  характеризуется условной энергией  $E_i(i,j)$ . Время также считается дискретным, при этом на каждом шаге по времени в случайно выбранный элемент массива добавляется энергия  $dE$ . До тех пор, пока величина энергии  $E_i(i,j)$  не превышает некоторого критического уровня  $E_{max}$ , элемент  $(i,j)$  остается устойчивым. При превышении этого порогового уровня элемент переходит в возбужденное состояние, и вся энергия этого элемента распределяется поровну между четырьмя соседними элементами. Таким образом, в системе происходит локальная передача энергии, причем непосредственно связаны друг с другом только соседние элементы, а процесс их взаимодействия нелинеен. Далее, энергия соседних ячеек, с учетом энергии, перешедшей от исходной ячейки, может превысить  $E_{max}$ . Тогда эти ячейки в свою очередь передают энергию своим соседям. Так как в данном случае каждая ячейка (кроме крайних) имеет четыре соседних ячеек, то возможно возникновение "цепной реакции" передачи энергии, которая продолжается до тех пор, пока в массиве не останется возбужденных ячеек.

Такую "цепную реакцию" принято называть "лавиной". Считаем, что границы системы открытые, то есть при достижении границы массива энергия теряется.

Анализировался отклик модельной системы на разного вида изменения внешних по отношению к системе параметров  $dE$  и  $E_{max}$ . Значение параметра  $E_{max}$  в каждый момент времени считалось *глобальным*, т.е. одинаковым для всех элементов системы. Предполагается, что величина ( $-E_{max}$ ) является аналогом  $z$ -компоненты межпланетного магнитного поля ( $B_z$  ММП). Эта аналогия основывается на результатах работы [Iyemori T., *SUBSTORM-4, Edited by S.Kokubun and Y.Kamide, Kluwer Academic Publishers. P.99, 1998*]. Параметр  $dE$  считается *локальным*, то есть в каждый момент времени его значение влияет только на один элемент системы. Его аналогом является величина  $vB_z$  (здесь  $v$  - скорость солнечного ветра), определяющая скорость поступления энергии из солнечного ветра в магнитосферу. Выделяются следующие типы переходных процессов:

1. При постоянных  $dE$  и  $E_{max}$  пустая одиночная ячейка переполняется за время  $E_{max}/dE$ , поэтому даже изначально пустая система из  $N$  ячеек неизбежно переполнится за время не более  $N * E_{max}/dE$ . Начавшюся в этом случае лавину можно назвать *истинно спонтанной*, так как она не вызывается каким-либо изменением внешних параметров, а является результатом ограниченности внутренней характеристики системы.

2. Если система уже находится в критическом состоянии при заданных постоянных  $dE$  и  $E_{max}$ , то при уменьшении  $E_{max}$  окажется, что часть элементов системы имеют энергию выше нового значения  $E_{max}$ . Это приведет к переходу системы в суперкритическое состояние, т.е. большая часть системы одновременно охватывается лавиной, поэтому такое событие (лавины) можно назвать *глобально стимулированным*.

3. Если на фоне постоянных  $dE$  и  $E_{max}$  в какой-то момент времени  $dE$  имеет большее значение, то стимулируется одна ячейка системы. Отклик системы на такое воздействие, как аналог спонтанной магнитосферной суббури, обсуждался в работе [Урицкий В.М., Пудовкин М.И. *Геомагнетизм и аэронавигация. Т.38, №3, С.17, 1998*]. СК система усиливает такое локальное воздействие, т.е энергия возникающей лавины значительно больше начального воздействия. Такое событие можно рассматривать как *локально стимулированное*, или *глобально спонтанное*, т.к. для всех, кроме одной, ячеек системы параметры  $dE$  и  $E_{max}$  не меняются.

Показано, что должна существовать зависимость величины внешнего возмущения, при котором начинается суббуря, от внутреннего состояния магнитосферы в том смысле, что в более наполненной энергией магнитосфере суббуря может начаться при малом внешнем воздействии, а для стимуляции менее наполненной магнитосферы необходимо более сильное внешнее воздей-



ствие. Этот вывод согласуется с экспериментальными результатами работы [Козелова и др., *Геомагнетизм и аэрономия*, Т.18, №6, С.910, 1989].

В рамках данной аналогии получили объяснения статистические результаты ряда работ относительно поведения  $B_z$  компоненты ММП вблизи начала взрывной фазы суббури. Показано, что на усредненной зависимости  $B_z$  ММП начало роста  $\langle B_z \rangle$  происходит до момента начала взрывной фазы и не связано со стимулированным или спонтанным характером суббури. Показано, что вывод на основе статистики о том, что часть суббурь происходит при положительной  $B_z$  может быть результатом процедуры обработки.

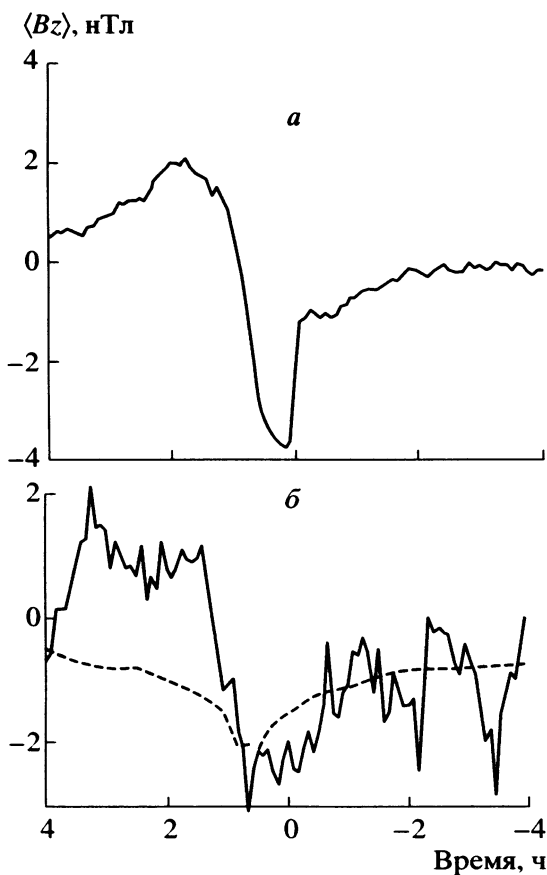


Рис.17. а - Усредненное поведение  $B_z$  вблизи начала лавины (модельный расчет); б - Усредненное поведение  $B_z$  ММП вблизи начала суббури. Сплошная линия - из [Maltsev, Proc. XXI Ann. Seminar. "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, P.75, 1998], пунктир - из [Caan et al., Planet. Space Sci V.26, P.269, 1978].

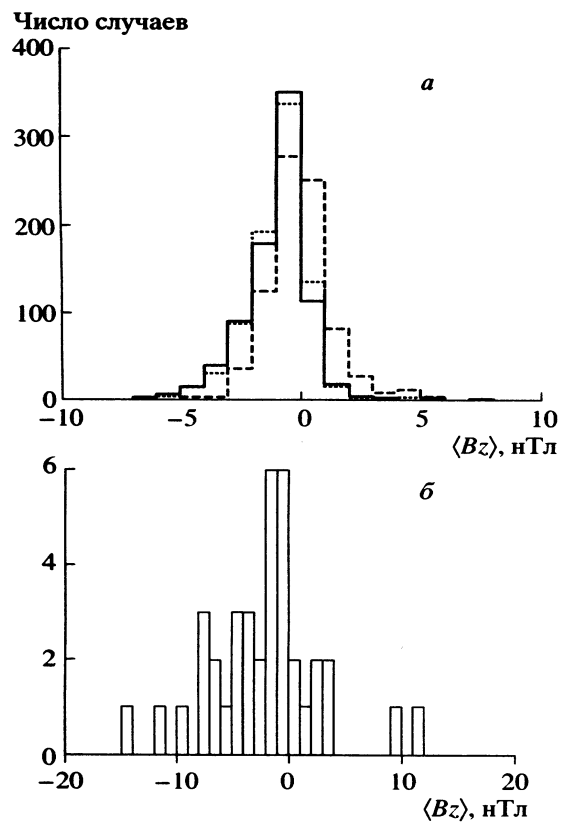


Рис.18. а - распределение средних значений  $-E_{max}=B_z$  около начала лавины (всего 835 лавин). Сплошная линия -  $\pm 2$  шага (10 мин) по времени, точечная -  $\pm 6$  шагов (30 мин), пунктирная -  $\pm 36$  шагов (3 часа); б - распределение средних значений  $B_z$  ММП около начала суббури (из работы [Maltsev, Proc. XXI Ann. Seminar. "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, P.75, 1998]).

В п.6.3 численная модель дополнена введением аналога локальной (внутри каждой магнитной силовой трубки) магнитосферно-ионосферной связи. Теперь, кроме запасенной энергии  $E_t(i,j)$ , с каждой ячейкой связана еще одна величина,  $C_t(i,j)$ . Эта величина считается аналогом проводимости ионосферы в данной магнитной силовой трубке, см. Рис.19.

Алгоритм "магнитосферной" части остается прежним. Однако теперь при превышении порога, когда ячейка переходит в активное состояние, только некоторая часть запасенной в ней энергии  $\Delta E = E_t(i,j) - E_{\min}$  перераспределяется поровну между ее четырьмя ближайшими соседями. Величина  $E_{\min}$  для каждой ячейки определяется состоянием её "ионосферной" части, характеризуемой величиной  $C_t(i,j)$ . В дискретной форме уравнение для «проводимости»  $C_t(i,j)$  имеет вид:

$$C_{t+1}(i,j) = a C_t(i,j) + b,$$

Здесь  $(1-a)$  при  $a < 1$  имеет смысл «коэффициента рекомбинации», а второй член (источник ионизации) определен как

$$b = \begin{cases} 0, & \text{при } E_t(i,j) < E_{\max} \\ E_{t+1}(i,j) - E_t(i,j), & \text{при } E_t(i,j) \geq E_{\max} \end{cases}$$

Предполагается, что рост ионосферной проводимости выше некоторого уровня  $C_{\max}$  приводит к изменению условий перераспределения энергии в токовом слое (за счет формирования продольных токов). В модели это влияние учтено как зависимость величины  $E_{\min}$  от  $C_t(i,j)$ :

$$E_{\min,t+1}(i,j) = \begin{cases} k E_{\max}, & \text{при } C_t(i,j) < C_{\max} \\ 0, & \text{при } C_t(i,j) \geq C_{\max} \end{cases}$$

Здесь  $k < 1$  и  $C_{\max}$  - параметры. Таким образом, возникает положительная обратная связь между магнитосферной и ионосферной характеристиками ячейки.

Динамика модели анализируется при постоянных управляющих параметрах ( $E_{\max}$  и  $dE$ ), а также при управлении  $B_z$  ММП при условиях

$$\begin{aligned} E_{\max} &= -B_z, \quad dE = -B_z/10 \quad \text{при } B_z \leq 0; \\ E_{\max} &= dE = 0 \quad \text{при } B_z > 0 \end{aligned}$$

Т.е. энергия в системе начинает накапливаться только при южном направлении  $B_z$ , что упрощенно отражает ситуацию в магнитосфере.

Результаты анализа динамики модели использованы для интерпретации экспериментальных распределений мощности авроральных пятен, полученных в [Lui et al., Phys.Res.Lett. V.27, P.911, 2000]. Показано, что:

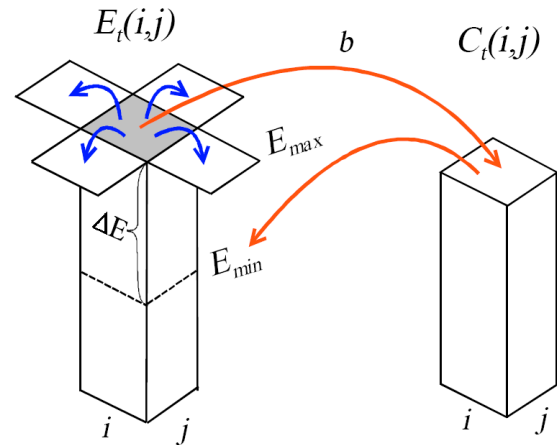


Рис.19. Схема положительной обратной связи между магнитосферной и ионосферной характеристиками ячейки в модели.

1) Распределение мощности лавин, в отличие от распределений многих других характеристик в СК-системе без обратной связи, не имеет степенного вида.

2) Добавление положительной обратной связи в СК-модель при постоянных управляющих параметрах ( $E_{\max}$  и  $dE$ ) приводит к расширению распределения мощности лавин в сторону больших значений мощности. Эти большие значения мощности соответствуют моментам активизации положительной обратной связи. Однако в этом случае распределение мощности также не имеет степенного вида.

3) Для модели с положительной обратной связью, управляемой  $B_s$  ММП, распределение мощности лавин для моментов, когда обратная связь активна ( $C_t > C_{\max}$ ), подобно распределению мощности авроральных пятен во время суббурь, полученному в [Lui et al., Phys.Res.Lett. V.27, P.911, 2000]: имеется характерный максимум при больших значениях мощности и область со степенной зависимостью при малых значениях. Аналогичное распределение для моментов, когда обратная связь не активна ( $C_t < C_{\max}$ ), не имеет максимума при больших значениях мощности, что соответствует экспериментальному распределению мощности авроральных пятен в спокойное время.

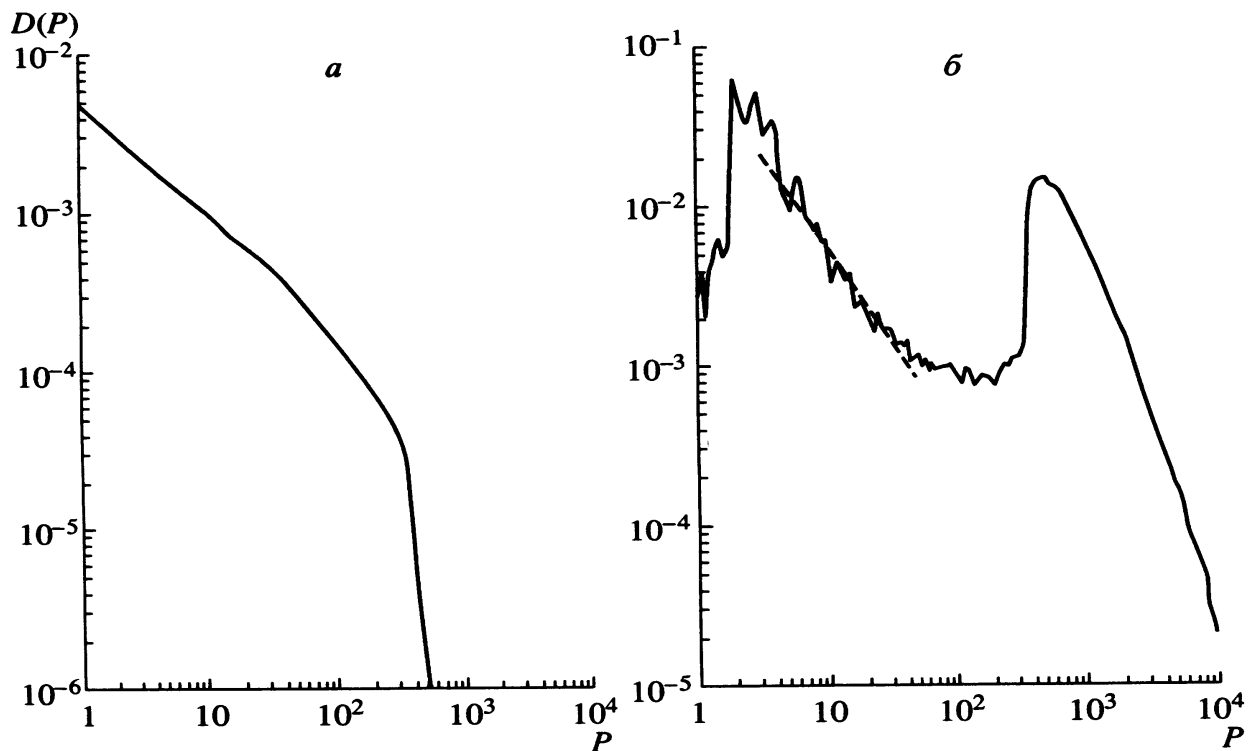


Рис.20. Плотность вероятности мощности лавин в модели с обратной связью, при управлении значениями  $B_z$  ММП: *a* - для моментов, когда для всех ячеек системы обратная связь не активна; *б* - для моментов, когда в системе есть ячейки с активной обратной связью.

Дальнейшие изменения модели, которые проведены в п.6.4, сводятся к следующим: 1) учтено наличие выделенного направления - от Земли в хвост магнитосферы; 2) учтена конечная скорость распространения возмущения в солнечном ветре и в магнитосфере; 3) из модели исключен внутренний источник стохастичности - случайный выбор ячейки. В динамике модели обнаружен набор переходов между различными режимами (нет генерации - периодическая генерация - хаотическая генерация). Для режима генерации характерно возникновение в системе крупномасштабных самоорганизованных переходных процессов (Рис.21), причем степень упорядоченности поведения системы (по Климонтовичу) растет с ростом внешнего воздействия. Развитие каждого нового переходного процесса сопровождается увеличением степени упорядоченности, а уход его из модельного массива приводит к уменьшению упорядоченности. Получены зависимости характеристик режима периодической генерации от значения управляющего параметра. Эти зависимости (Рис.22) согласуются с аналогичными характеристиками магнитосферной суббуревой активности: а) смещение начальной точки переходного процесса при уменьшении  $B_z$  аналогично понижению широты аврорального овала; б) уменьшение периода генерации согласуется с сокращением предварительной фазы суббури при уменьшении  $B_z$ .

В заключении сформулированы основные результаты работы. В приложении приведен обзор основных понятий и математических определений, используемых в работе.

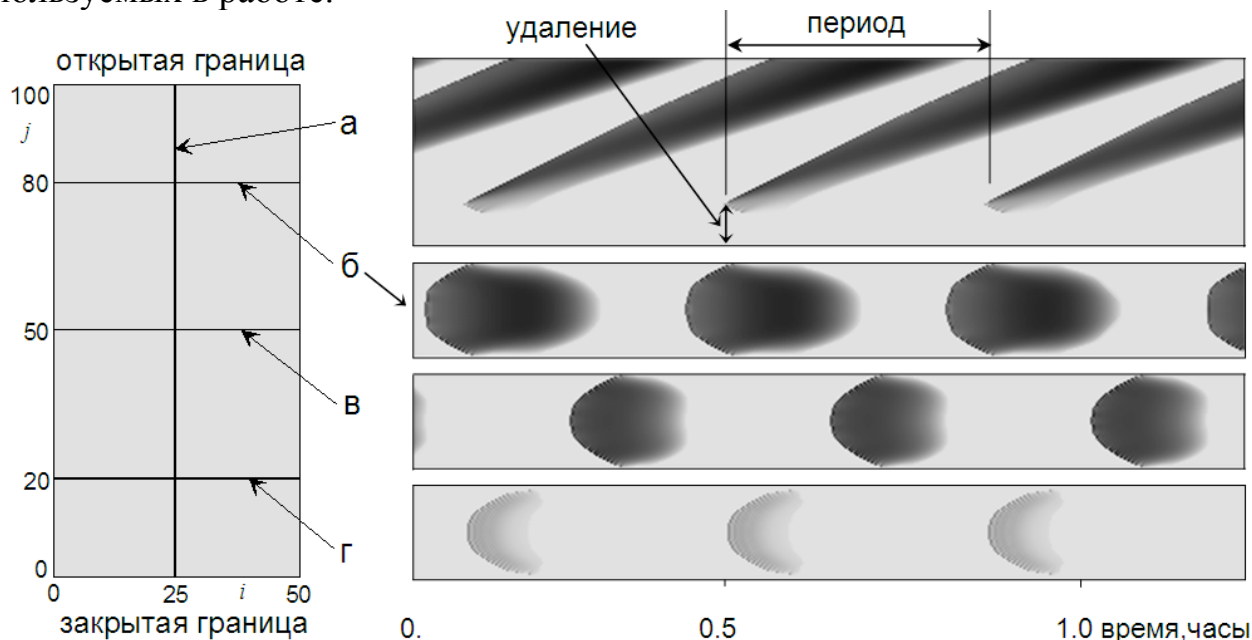


Рис.21. Кеограммы переходных процессов в периодическом режиме при постоянном  $B_z = -3$  нТл. Сечения массива ячеек, использованные при построении кеограмм, показаны слева.

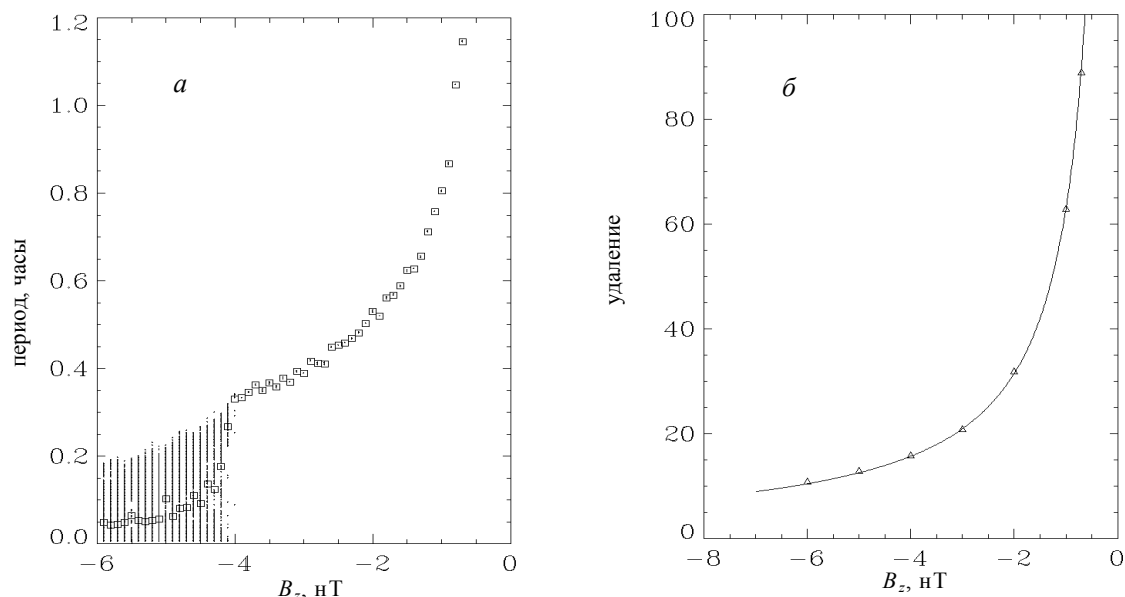


Рис.22. Характеристики псевдо-периодического режима при постоянном управляющем параметре  $B_z$  в зависимости от значения  $B_z$ : *a* - точками отмечены интервалы времени между началами переходных процессом, квадраты - средние периоды; *б* - удаление начальной ячейки переходных процессов от закрытой границы, линия - аппроксимация согласно выражению  $d = - [63 / B_z]$ .

### III. Основные результаты

1) Предложена и обоснована методика обработки телевизионных наблюдений полярных сияний - построение динамического спектра размерностей изолиний, позволяющая:

- а) локализовать авроральную форму из фонового свечения;
- б) численно охарактеризовать пространственную структуру полярных сияний;
- в) выделить диапазон интенсивностей свечения, связанных с наиболее развитыми структурами в авроральной форме;
- г) проследить за динамикой развития структуры области аврорального свечения.

2) Предложен математически корректный способ введения метрики на множестве телевизионных изображений (кадров), позволяющий при исследовании динамики полярных сияний по алгоритму Грассбергера-Прокаччи учитывать информацию о пространственном распределении свечения.

3) По данным ТВ наблюдений пульсирующих полярных сияний в обсерватории Ловозеро около полуночи получено, что:

- а) динамика отдельного пульсирующего пятна характеризуется корреляционной размерностью  $\sim 2.0$ ;

б) динамика области, заполненной пульсирующими пятнами, характеризуется корреляционной размерностью  $\sim 7.0$ .

4) По данным ТВ наблюдений полярных сияний в обсерваториях Ловозеро и Пороярви получено, что:

а) динамика областей аврорального свечения во время брейкапов и псевдо-брейкапов характеризуется корреляционной размерностью  $\sim 2.7-2.8$ ;

б) в динамике областей аврорального свечения (как в динамическом спектре размерностей изолиний, так и в значении корреляционной размерности) нет четкой границы между брейкапами и псевдо-брейкапами;

в) пространственные масштабы аврорального свечения (определенные по длине степенного участка на зависимости корреляционного интеграла от расстояния в пространстве вложения) для псевдо-брейкапов меньше, чем для брейкапов.

5) По данным ТВ наблюдений полярных сияний в обсерватории Баренцбург показано, что пространственно-временное распределение аврорального свечения во время взрывной фазы суббури имеет (на пространственных и временных масштабах 2-100 км и 1-100 сек, соответственно) масштабнo-инвариантные свойства, характерные одновременно как для систем в состоянии самоорганизованной критичности, так и для турбулентных систем.

6) По данным спутниковых (MAGION-5, POLAR, CLUSTER) и наземных наблюдений ОНЧ эмиссий показано, что распределение интервалов между дискретными хоровыми элементами в диапазоне 0.1-10 с имеет степенной вид с показателем степени  $\sim 1.2-2.5$ .

7) Построена численная модель формирования последовательности хоровых элементов, основанная на режиме перемежаемости «включено-выключено» в генераторе типа ЛОВ (лампы обратной волны). Модель описывает следующие свойства ОНЧ хоров, наблюдаемые в эксперименте:

а) степенное распределение интервалов времени между хоровыми элементами;

б) увеличение среднего числа хоровых элементов с ростом интенсивности хисса на более низкой частоте;

в) переход от режима генерации дискретных элементов к режиму непрерывной генерации при больших значениях интенсивности низкочастотного хисса;

г) при внешней периодической модуляции группировка дискретных элементов в группы с внешним периодом.

8) На основе аналогии с моделью динамической системы, в которой возможна самоорганизация в критическое состояние:

а) Проведена классификация типов перехода от подготовительной к взрывной фазе суббури как переходных процессов в такой системе при изменениях внешних по отношению к системе параметров;

б) Отмечена принципиальная возможность истинно спонтанных событий, то есть не вызванных каким-либо изменением внешних параметров, а являющихся результатом ограниченного "объема" системы.

в) Выделены глобально стимулированные события, вызванные внешним воздействием на все элементы системы, и локально стимулированные, которые с глобальной точки зрения можно считать спонтанными.

г) Показано, что должна существовать зависимость величины внешнего возмущения, при котором начинается суббуря, от внутреннего состояния магнитосферы.

д) Получили объяснения статистические результаты ряда работ относительно поведения  $z$ -компоненты ММП вблизи начала взрывной фазы суббури. Показано, что на усредненной зависимости  $B_z$  ММП от времени начало роста  $\langle B_z \rangle$  происходит до момента начала взрывной фазы и не связано со стимулированным или спонтанным характером суббури.

9) Построена дискретная модель (клеточный автомат) как аналог динамической магнитосферно-ионосферной системы, связанной с суббуревой активностью. В модели учтена локальная (в пределах каждой силовой трубки) положительная обратная связь между элементом токового слоя хвоста магнитосферы и соответствующей областью ионосферы. Показано, что при управлении  $B_s$  ММП, распределения мощности и размера переходных процессов для моментов, когда обратная связь активна, подобны экспериментальным распределениям мощности и размера авроральных пятен во время суббурь: имеется характерный максимум при больших значениях мощности (размера) и область со степенной зависимостью при малых значениях. Аналогичные распределения для моментов, когда обратная связь не активна, не имеют максимума при больших значениях, что соответствует экспериментальным распределениям для авроральных пятен в спокойное время.

10) Показано, что для динамики детерминированной клеточной модели обтекания магнитосферы солнечным ветром, в которой учтена конечная скорость распространения возмущения внутри магнитосферы и магнитосферно-ионосферная обратная связь, характерен набор переходов (бифуркаций) между различными режимами динамики системы (нет генерации - периодическая генерация - хаотическая генерация). Для режима генерации характерно возникновение в системе крупномасштабных самоорганизованных коллективных переходных процессов. Получены зависимости характеристик режима периодической генерации от значения управляющего параметра. Эти зависимости согласуются с аналогичными характеристиками магнитосферной суббуревой активности.

### ***На защиту выносятся***

- 1) Методика получения характеристики пространственного распределения аврорального свечения - спектра размерности изолиний.
- 2) Результаты анализа низко-размерной динамики пространственного распределения аврорального свечения при суббуревых интенсификациях (брейкапы и псевдобрейкапы) и в пульсирующих сияниях.
- 3) Результаты статистического анализа пространственно-временного распределения аврорального свечения при суббуревых интенсификациях, свидетельствующие о возможном наличии в магнитосферно-ионосферной плазме одновременно состояний самоорганизованной критичности и турбулентности.
- 4) Численная модель формирования последовательности хорových элементов, основанная на режиме перемежаемости «включено-выключено» в генераторе типа ЛОВ (лампы обратной волны).
- 5) Результаты анализа роли положительной обратной связи - аналога магнитосферно-ионосферной связи - в динамике модели с самоорганизацией при постоянных внешних параметрах и при управлении внешним хаотическим сигналом (солнечным ветром).
- 6) Результаты анализа динамики детерминированной клеточной модели обтекания магнитосферы солнечным ветром, в которой учтена конечная скорость распространения возмущения внутри магнитосферы и магнитосферно-ионосферная обратная связь, при постоянных внешних параметрах и при управлении внешним хаотическим сигналом (солнечным ветром).

### **IV. Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 37 научных работах, 18 из которых - в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных журналах и изданиях (11 - из перечня ВАК).

1. Козелов Б.В. Применение методов фрактального анализа к данным наземных наблюдений. В.кн.: Приборы и методика геофизического эксперимента, ПГИ КНЦ РАН, 1997, с. 107-118.
2. Kozelov B.V. Fractal approach to dynamics of auroral TV images, Proc. XXII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 45-48, 1999.
3. Kozelov B.V., Titova E.E., Trakhtengerts V.Y., Jiricek F., Triska P. Search of self-organized criticality in VLF chorus observed by MAGION-5. Proc. XXIII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 38-41, 2000
4. Kozelov B.V. and T.V.Kozelova, Spontaneous and stimulated events in SOC system and their analogy with substorm onsets. Proc. XXIII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 25-28, 2000



5. Kozelov B.V., Kozelova T.V. Spontaneous and stimulated events in SOC system and their analogy with substorm onsets. Proc. 5th International Conference on Substorm, St.Petersburg, 16-20 May 2000. (ESA SP-443, July 2000) 169-172.
6. Козелов Б.В. Фрактальные характеристики пространственной структуры полярных сияний. В кн. "Физика околоземного космического пространства", -Апатиты: изд. КНЦ РАН, 2000, с. 572-597.
7. Козелов Б.В., Титова Е.Е., Трахтенгерц В.Ю., Иржичек Ф., Триска П. Коллективная динамика "хоровых" излучений по данным спутника MAGION-5. Геомагнетизм и аэрномия, Т.41, № 4, 477-481, 2001.
8. Козелов Б.В., Козелова Т.В., Спонтанные и стимулированные события в системе с самоорганизацией и их аналогия с магнитосферными суббурями. Геомагнетизм и аэрномия, 2002. Т.42 №1. С.59-66.
9. Kozelov B.V. Dynamic cell models of VLF chorus generation, Adv. Space Res., V. 30/7, 1663-1666, 2002.
10. Kozelov B.V., Kozelova T.V. Sandpile model analogy of the magnetosphere-ionosphere substorm activity, Adv. Space Res., V. 30/7, 1667-1670, 2002.
11. Козелов Б.В., Козелова Т.В., Положительная обратная связь в модели с самоорганизацией как аналогия магнитосферно-ионосферной связи во время суббури. Геомагнетизм и аэрномия. Т.42, No. 4, С.460-467, 2002.
12. Kozelov B.V. and Kozelova T.V. Cellular automata model of magnetospheric-ionospheric coupling, Annales Geophysicae, V. 21, P. 1931-1938, 2003.
13. Kozelov B.V. Fractal approach to description of the auroral structure, Annales Geophysicae, V. 21, P. 2011-2023, 2003.
14. Titova E. E., B. V. Kozelov, F. Jiricek, J. Smilauer, A. G. Demekhov, and V. Yu. Trakhtengerts, Verification of the backward wave oscillator model of VLF chorus generation using data from MAGION 5 satellite, Annales Geophysicae, V.21, N.5, P.1073 - 1081, 2003.
15. Козелов Б.В., Титова Е.Е., Любчик А.А., Трахтенгерц В.Ю., Маннинен Ю. Переключаемость типа «включено-выключено» как возможный режим формирования последовательности КНЧ-ОНЧ-хоров. Геомагнетизм и аэрномия. Т.43, No. 5, С. 635-644, 2003.
16. Trakhtengerts V. Yu., Demekhov A. G., Titova E. E., Kozelov B. V., Santolik O., Gurnett D., and M. Parrot. Interpretation of Cluster data on chorus emissions using the backward wave oscillator model. Phys.Plasma, V.11(4), P.1345-1351, 2004
17. Kozelov B. V., V. M. Uritsky, and A. J. Klimas, Power law probability distributions of multiscale auroral dynamics from ground-based TV observations, Geophys. Res. Lett., V. 31, L20804, doi:10.1029/2004GL020962, 2004.
18. Kozelov B. V., N. Y. Vjalkova, Search of temporal chaos in TV images of aurora. Int. J. Geomagn. Aeron., V. 5, GI3005, doi:10.1029/2005GI000102, 2005.

19. Kozelov B.V., Titova E.E., Lubchich A.A., Trakhtengerts V.Y., Manninen J. "On-off" intermittency as a dynamical analogy of VLF chorus generation, Proc. XXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 73-76, 2002.
20. Kozelov B.V., Kozelova T.V. Cellular model analogy of the magnetosphere-ionosphere substorm activity driven by solar wind with finite velocity of penetration into magnetosphere, Proc. XXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 17-20, 2002.
21. Kozelov B.V., Kozelova T.V., Kornilova T.A. Developing of auroral intensification as an output of magnetosphere-ionosphere dynamical system, Proc. XXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 47-50, 2002.
22. Kozelov B.V., Kozelova T.V., Kornilova T.A. Dynamics of auroral intensification as an output of magnetosphere-ionosphere system, Proc. Sixth International Conference on Substorms, University of Washington, Seattle, March 25-29, 2002, P.432-437.
23. Kozelov B.V., Kozelova T.V. Modelling of the substorm activity by discret model with magnetosphere-ionosphere feedback, Proc. Sixth International Conference on Substorms, University of Washington, Seattle, March 25-29, 2002, P.508-513.
24. Kozelov B.V., and Kozelova T.V. Fractal analysis of the magnetic fluctuations near local dipolarization at 5-7 Re, Proc. XXV Annual Seminar Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, p.29-32, 2003.
25. Kozelov B.V., and Titova E.E. 'Absolute' and 'convective' instabilities in the numerical model of VLF emissions generation, Proc. XXV Annual Seminar Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, p.107-110, 2003.
26. Kozelov B.V., Uritsky V.M. Scale-free statistics of spatiotemporal auroral emissions obtained from groundbased optical observations. Proc. of the 7-th International Conference on Substorms, Edited by Natalia Ganushkina and Tuija Pulkkinen, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, 2004, P.160-163.
27. Kozelov B.V. Calibration of TV all-sky data by simultaneous observations of scanning photometer. Proc. XXVII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, pp. 35-38 , 2004.
28. Kozelov B.V. Calibration of TV all-sky data by simultaneous observations of scanning photometer. Proceedings of 31-st Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, Ambleside, 22-28 August 2004. P.37-41, 2005.
29. Kozelov B. V., Golovchanskaya I. V. Scaling of electric field fluctuations associated with the aurora during northward IMF. Geophys. Res. Lett., V. 33, L20109, doi:10.1029/2006GL027798, 2006
30. Golovchanskaya I. V., Ostapenko A. A., and Kozelov B. V. Relationship between the high-latitude electric and magnetic turbulence and the Birkeland

- field-aligned currents. *J. Geophys. Res.*, V. 111, A12301, doi:10.1029/2006JA011835, 2006
31. Kozelov B.V. and Rypdal K. Intermittence in auroral fluctuations during substorm. "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXIX Annual Seminar, Apatity, ISBN 5-91137-009-3, pp.48-51, 2006.
  32. Kozelov B.V. and Rypdal K. Spatial scaling of optical fluctuations during substorm-time aurora. *Ann. Geophys.*, 25, 915–927, 2007
  33. Kozelov B. V. and Rypdal K. Relative order of auroral structure during substorm activation. Proceedings of 30th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, 27 February-2 March 2007, ISBN 5-91137-032-8, P.38-41, 2007.
  34. Rypdal K., Rypdal M., Kozelov B.V., Servidio S., Zivkovic T. Complexity in astro and geospace systems: the turbulence versus SOC controversy. AIP Conference Proceedings 932, Turbulence and Nonlinear Processes in Astrophysical Plasmas - 6-th Annual International Astrophysical Conference, Oahu, Hawaii, 16-22 March 2007, Edited by D.Shaikh and G.P.Zank, P.203-208, 2007.
  35. Kozelov B. V., Golovchanskaya I. V., Ostapenko A. A., and Fedorenko Y. V. Wavelet analysis of high-latitude electric and magnetic fluctuations observed by the Dynamic Explorer 2 satellite. *J. Geophys. Res.*, V.113, A03308, doi:10.1029/2007JA012575, 2008
  36. Kozelov, B. V., A. G. Demekhov, E. E. Titova, V. Y. Trakhtengerts, O. Santolik, E. Macusova, D.A. Gurnett and J.S. Pickett, Variations in the chorus source location deduced from fluctuations of the ambient magnetic field: comparison of CLUSTER data and the backward-wave oscillator model, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2007ja012886, 2008.
  37. Golovchanskaya, I. V. , B. V. Kozelov, T. I. Sergienko, U. Brändström, H. Nilsson, I. Sandahl, Scaling behavior of auroral luminosity variations observed by ALIS, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JA013217, 2008.

