

На правах рукописи

ГОЛОВЧАНСКАЯ Ирина Владимировна

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ВЫСОКОШИРОТНОЙ
МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЙ СИСТЕМЕ**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Апатиты - 2013

Работа выполнена в государственном бюджетном учреждении науки
Полярном геофизическом институте Кольского научного центра РАН
Российской академии наук (ПГИ КНЦ РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Пастухов Владимир Павлович
(НИЦ “Курчатовский институт”)

доктор физико-математических наук
Шкляр Давид Рувимович
(ИКИ РАН)

доктор физико-математических наук
Похотелов Олег Александрович
(ИФЗ им. О.Ю. Шмидта)

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

Защита состоится “ 11 ” октября 2013 г. в 11 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 в ИКИ РАН
по адресу 117997, Москва, Профсоюзная ул., д.84/32
(проезд на метро до станции “Калужская”)
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
космических исследований РАН

Автореферат разослан “ ” _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.03
кандидат физико-математических наук

Буринская Т.М.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию по экспериментальным данным и развитию теории магнитосферно-ионосферного взаимодействия на малых пространственных масштабах, проявляющегося в виде широкополосных возмущений электрических и магнитных полей в верхней ионосфере и ближней магнитосфере Земли (область высот вдоль высокоширотных магнитных силовых линий от 300 км до 3-4 R_E). Возмущения регистрируются спутниками, ракетами и радаром в авроральной зоне (с меньшими амплитудами – в полярной шапке).

Широкополосные возмущения в магнитосферно-ионосферной системе высоких широт (рис.1) – явление, наблюдаемое столь же регулярно, сколь магнитосферная конвекция или токи Биркеланда. Они развиваются для широкого диапазона условий в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле (ММП), при любом угле наклона земного диполя, во всех секторах MLT, при любом уровне геомагнитной возмущенности, однако по сравнению с конвекцией и продольными токами изучены значительно хуже. Отчасти это связано с высокими требованиями, предъявляемыми к аппаратуре, регистрирующей широкополосные поля. В первую очередь это касается динамического диапазона, разрешения и чувствительности измерительных приборов. Кроме того, область высот верхней ионосферы и ближней магнитосферы (под ближней магнитосферой подразумеваются высоты $< 3-4 R_E$, на которых физика контролируется присутствием сильного внешнего магнитного поля \mathbf{B}_0), где наблюдается это явление, до последнего времени не исследовалась системами спутников (типа Cluster или THEMIS). Интерпретация же данных одиночного спутника связана с известными трудностями в случае необходимости различать временные и пространственные вариации.

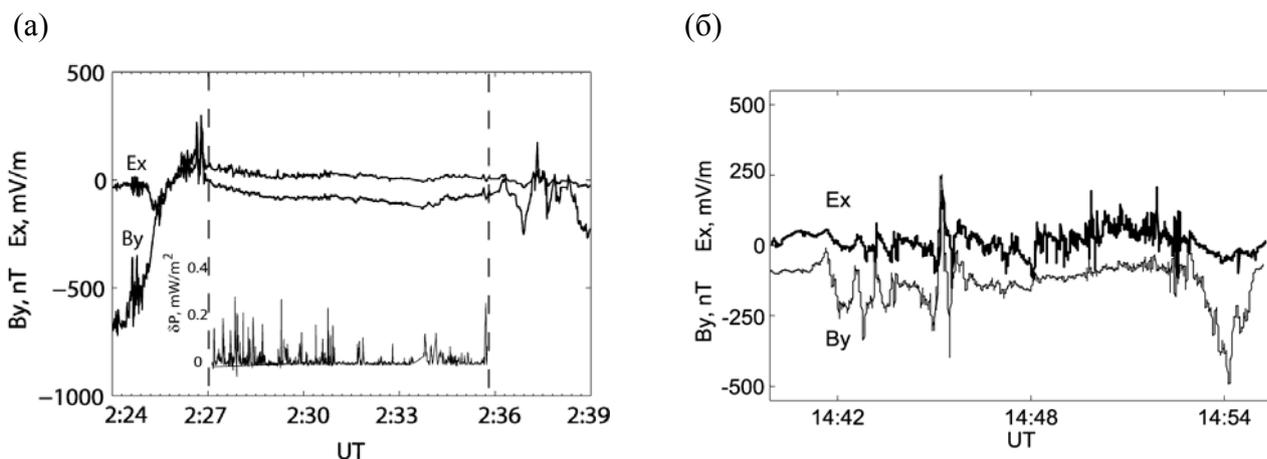


Рис.1 Примеры событий широкополосных возмущений, наблюдаемых спутником DE-2 в пролётах через высокоширотную ионосферу в периоды (а) южной и (б) северной компоненты B_z ММП; азимутальная компонента B_y ММП присутствует в обоих случаях.

Недостаточная исследованность явления приводила к неопределённостям в его названии. Термин “широкополосная турбулентность” не является строгим, поскольку турбулентные свойства флуктуаций полей, к которым относятся масштабная инвариантность (иначе: масштабирование, скейлинг), негауссовы функции плотности вероятности, перемежаемость и другие, до последнего времени не были надёжно установлены. Кроме того, наблюдаемая “широкополосная турбулентность” никогда не сравнивалась с классическими теориями турбулентности. Не является точным и термин “альвеновская турбулентность”. Он отражает присутствие в широкополосных возмущениях как электрической, так и магнитной компонент, перпендикулярных друг другу и лежащих в поперечной к \mathbf{B}_0 плоскости – отличительная черта возмущений альвеновского типа. Однако частотный диапазон широкополосных сигналов может простирается (в системе отсчёта спутника), по крайней мере, до 1 кГц. При этом уже на частотах $\geq 30\text{-}50$ Гц меняется характер спектра, магнитная компонента практически отсутствует, и сигнал становится электростатическим (в этой области частот на него часто ссылаются как на “широкополосный электростатический шум”). Понятно, что отождествлять такое возмущение только с альвеновской модой, даже с учётом в ней кинетических эффектов, вряд ли возможно. В диссертации, в основном, исследуется составляющая широкополосного возмущения, представляющая собой собственно “альвеновскую турбулентность”. Вместе с тем, подчёркивается генетическая связь с ней электростатического шума и, исходя из этого, предложена его вероятная интерпретация.

В мировой литературе рассматриваемое в диссертации явление известно как “широкополосная ELF турбулентность” (broadband ELF turbulence, BBELF turbulence). Используя такое название, нужно иметь в виду, что частоты ULF, ELF диапазонов в спектре возмущения наблюдаются в системе отсчёта спутника. В системе отсчёта плазмы частота альвеновской турбулентности оказывается близкой к нулю.

Актуальность проблемы

Актуальность изучения широкополосных возмущений (BBELF турбулентности) определяется важностью нескольких физических процессов, в которых они играют принципиальную роль:

- (1) Поперечное ускорение ионов в верхней ионосфере Земли в большинстве случаев связано с широкополосными электрическими полями [André et al., 1998]. Поскольку в пробочной конфигурации магнитного поля передача частицам поперечной энергии ε_{\perp} приводит к их последующему выталкиванию в магнитосферу, обусловленному трансформацией ε_{\perp} в продольную энергию ε_{\parallel} и образованию в пространстве скоростей распределений типа

коников, можно считать, что именно широкополосные электрические поля ответственны за поступление в магнитосферу ионосферных ионов.

- (2) Электрическая изменчивость является дополнительным источником джоулева нагрева проводящего слоя высокоширотной ионосферы [Codrescu, 1995; Golovchanskaya, 2008]. На недостаточность нагрева, связанного только с регулярной составляющей электрического поля, указывали систематические расхождения температур термосферы, рассчитанных в моделях глобальной термосферной циркуляции, с наблюдениями.
- (3) Для альвеновской турбулентности частоты в спектрах регистрируемых спутником сигналов оказываются связанными с эффектом Доплера при пересечении им пространственных структур. В первом приближении переход от частот f к масштабам s осуществляется по формуле $f = \frac{v_s}{s}$, где v_s - скорость спутника (например, скорость спутника FAST на высотах 1000-2000 км составляет ~ 7 км/с). Соответственно, пространственные масштабы альвеновской турбулентности охватывают диапазон от ~ 100 м до первых десятков или сотни км. Для высот спутника FAST масштаб 100 м в несколько раз меньше локальной инерционной длины электрона λ_e (первые сотни м), но больше гирорадиуса иона ρ_i (несколько десятков метров). Как известно, авроральное структурирование имеет место в том же диапазоне масштабов. Есть и другие черты сходства в проявлениях альвеновской турбулентности и тонкой структуры аврорального свечения, позволяющие предположить причинно-следственную связь между ними [Borovsky, 1993].

Заметим также, что наиболее интенсивные ULF-ELF возмущения электрических и магнитных полей в магнитосферно-ионосферной системе проявляются именно в виде широкополосных сигналов шумового типа. Их амплитуды существенно превосходят характерные амплитуды периодических (или квазипериодических) вариаций, к которым относятся, например, геомагнитные пульсации.

Интерпретация широкополосных полей актуальна для уточнения существующих представлений о механизмах магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Две противоположные точки зрения на природу этого взаимодействия, выразившиеся, соответственно, в электростатических [Weimer et al., 1985] и волновых [Gurnett et al., 1984] моделях, сохраняются уже около тридцати лет, причём каждая из них находит всё новых сторонников.

За последние десять лет были существенно развиты представления о физике сложного поведения (complexity), которое проявляет космическая плазма. В частности, в работе [Chang et al., 2004] были сформулированы идеи о бимодальном состоянии плазмы, в котором распространяющиеся моды (волны) сосуществуют с не распространяющимися пространственно-временными флуктуациями, так называемыми когерентными структурами,

причём нелинейное взаимодействие когерентных структур приводит к проявлениям, характерным для перемежающейся турбулентности. Представлялось актуальным выяснить, можно ли применить эти представления для интерпретации BBELF турбулентности.

Пониманию механизма широкополосных возмущений в верхней ионосфере (ближней магнитосфере) Земли, наряду с недостатком фундаментальных идей, препятствовало отсутствие работ, где бы данный феномен был рассмотрен в целом, с разных точек зрения: как электродинамическое явление, как статистический процесс, как результат нелинейной динамики, как способ магнитосферно-ионосферного взаимодействия и т.д. Восполнению этого пробела посвящена настоящая диссертация.

Цели и задачи работы

Целью работы является исследование широкополосных возмущений электрических и магнитных полей в магнитосферно-ионосферной системе высоких широт по экспериментальным данным и на основе полученных результатов развитие теории этого явления.

В связи с этим можно сформулировать следующие основные задачи работы:

- (1) Исследовать ключевые экспериментальные факты, касающиеся широкополосных возмущений в верхней ионосфере (ближней магнитосфере) Земли, которые могут способствовать развитию их теории. К таким фактам относятся: характер вейвлет спектров возмущений, соотношение амплитуд электрической и магнитной компонент, поляризация, направление вектора Пойнтинга, зависимость от проводимости ионосферы (сезонная вариация), связь с межпланетным магнитным полем, связь с крупномасштабными продольными токами и магнитосферной конвекцией, присутствие (или отсутствие) возмущений данного типа в полярной шапке, связь (или отсутствие связи) с изменчивостью солнечного ветра и другие.
- (2) Феноменологическими методами статистической физики и вейвлет анализа установить, обладают ли флуктуации электрических и магнитных полей в широкополосных возмущениях масштабно-инвариантными свойствами, и если да, получить их количественные характеристики, которые затем сопоставить с предсказаниями классических теорий турбулентности.
- (3) Используя численное моделирование, выяснить, могут ли основные экспериментально наблюдаемые особенности альвеновской турбулентности быть объяснены в модели нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур.
- (4) Идентифицировать (как плазменную моду) электростатическую составляющую широкополосного возмущения.
- (5) Сопоставить проявления альвеновской турбулентности в ионосферных электрических и магнитных полях с её проявлениями в авроральных свечениях. Чтобы сделать такое

Методы исследования

Основными методами исследования, используемыми в диссертации, являются вейвлет анализ спутниковых измерений, построение статистических распределений, численное моделирование. Численные алгоритмы реализованы в виде программ.

Научная новизна

- 1) Впервые широкополосные возмущения электрических и магнитных полей в магнитосферно-ионосферной системе исследованы с применением современных методов обработки сигналов, основанных на вейвлет анализе, а также методов статистической физики и численного моделирования. Это позволило получить вытекающие из наблюдений факты, которые явились определяющими для интерпретации данного явления.
- 2) Впервые продемонстрированы масштабно-инвариантные свойства и другие проявления сложного поведения в широкополосных электрических и магнитных полях на масштабах от ~ 100 м до 100 км в верхней ионосфере Земли, получены их количественные характеристики и показано, что они не совпадают с предсказаниями классических теорий турбулентности.
- 3) Впервые предложено объяснение альвеновской турбулентности как результата коллективного взаимодействия когерентных альвеновских структур.
- 4) Впервые показано, что для согласующейся с наблюдениями интерпретации широкополосных возмущений необходимо, наряду с альвеновской модой, привлекать электростатическую ионно-циклотронную моду, именно её разновидность, в возбуждении которой существенную роль играют локализованные электрические поля.
- 5) Впервые получены корректирующие поправки на эффект ракурсных искажений при наблюдениях авроральных структур наземными оптическими средствами, что позволило перейти к прямому сравнению проявлений сложного поведения в электродинамике и в оптике.
- 6) Впервые продемонстрировано качественное сходство временной динамики характеристик масштабирования когерентных альвеновских структур, полученных в численном моделировании, и авроральных возмущений, наблюдаемых в начале взрывной фазы суббури.

Достоверность результатов

Достоверность полученных оценок характеристик масштабирования широкополосных электрических и магнитных возмущений в магнитосферно-ионосферной системе подтверждается их близким совпадением при использовании данных различных спутников, а также различных методов оценивания. Достоверность результатов математического моделирования подтверждена численными тестами. Достоверность интерпретации подтверждается близостью модельных и наблюдаемых характеристик исследуемого явления, а также аналогичной временной динамикой индексов масштабирования когерентных альвеновских структур в численном моделировании и авроральных возмущений, наблюдаемых в начале взрывной фазы суббури.

Научная и практическая ценность

Научную ценность работы представляет впервые предложенный сценарий развития одного из наиболее характерных возмущений в околоземной космической плазме, основанный на экспериментальных данных и уточняющий наши представления о магнитосферно-ионосферном взаимодействии на малых пространственных масштабах. Полученные в диссертации результаты также позволили существенно продвинуться в понимании электродинамических явлений, приводящих к структурированию в полярных сияниях. Практическую ценность представляет комплекс алгоритмов и программ, позволяющих исследовать широкополосные возмущения современными методами обработки сигналов, а также численно моделировать нелинейные переходные процессы, связанные с коллективными взаимодействиями в плазме, методом частиц в ячейках (particles-in-cells). Кроме этого, практическую ценность представляет развитая в диссертации методика, позволяющая использовать наземные оптические наблюдения для изучения свойств масштабирования флуктуаций аврорального свечения.

Положения, выносимые на защиту

- (1) Ключевые экспериментальные сведения о широкополосных возмущениях электрических и магнитных полей в высокоширотной магнитосферно-ионосферной системе, полученные из анализа спутниковых наблюдений. Турбулентность альвеновского типа и электростатический КНЧ шум как две составляющие широкополосных возмущений;
- (2) Масштабная инвариантность полей альвеновской турбулентности и её количественные характеристики;
- (3) Модель альвеновской турбулентности как результата нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур в ближней магнитосфере Земли;
- (4) Идентификация широкополосного электростатического шума как разновидности электростатических ионно-циклотронных волн, в возбуждении которых

- (5) Алгоритм введения корректирующих поправок на эффект ракурсных искажений, позволивший количественно исследовать свойства масштабирования (скейлинг) структурированных полярных сияний;
- (6) Вывод о соответствии проявлений альвеновской турбулентности в электродинамике и в авроральном структурировании;

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, были представлены на следующих конференциях: 33d Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (2006 г., Кируна, Швеция), 34th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (2007 г., Andenes, Норвегия), международная конференция «Проблемы геокосмоса» (2008, 2010 гг., Санкт-Петербург), конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (2010, 2012, 2013 гг., Москва), Всероссийский ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений" (2002-2013 гг., Апатиты).

Полученный автором результат по сезонной вариации альвеновской турбулентности вошёл в число важнейших результатов РАН за 2008 г. Цикл работ “Сложное поведение высокоширотной космической плазмы: методы описания и теоретические следствия” (совместно с Б.В. Козеловым) был отмечен дипломом лауреата конкурса институтов КНЦ РАН в 2010 г.

Личный вклад

Постановка задач, разработка методов решений, обработка данных и получение результатов выполнены автором или при лидирующей роли автора. Все статьи по теме диссертации написаны автором диссертации.

Вместе с тем, автор выражает признательность сотрудникам Полярного геофизического института Б.В. Козелову, О.В. Мингалёву и Ю.В. Федоренко, многолетнее сотрудничество с которыми способствовало появлению настоящей работы. Их вклад отражён в соавторстве в соответствующих публикациях.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения, содержит 266 страниц текста и список литературы из 279 наименований. Работа иллюстрирована 114 рисунками и включает 8 таблиц.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 25 публикациях, 20 из которых в ведущих российских и зарубежных изданиях из перечня ВАК.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* формулируются цель и задачи работы, обосновывается её актуальность, обсуждаются научная и практическая ценность полученных результатов и излагается краткое содержание последующих глав.

В *главе 1*, после краткого описания измерительной аппаратуры, приводятся ключевые экспериментальные сведения о широкополосных возмущениях электрических и магнитных полей в верхней ионосфере высоких широт, полученные из анализа наблюдений спутников Dynamics Explorer 2 (DE-2) и FAST, выполненного автором. В частности,

- Впервые к исследуемым возмущениям применён вейвлет анализ [Golovchanskaya et al., 2006]. Установлено, что на частотах f от 0.2 Гц до 30-60 Гц в системе отсчёта спутника (масштабы $s \sim 0.1-40$ км в системе отсчёта плазмы) мощность вейвлет коэффициентов как электрической, так и магнитной компонент меняется в зависимости от масштаба по степенному закону (турбулентность альвеновского типа). С ростом частоты характер спектра меняется, в сигнале усиливается относительный вклад электрической компоненты, не сопровождающейся соответствующим магнитным возмущением (электростатический шум) [Головчанская и др., 2012];
- Поляризация альвеновской турбулентности оказывается в плоскости перпендикулярной к \mathbf{B}_0 и, как правило, имеет нерегулярный характер (рис.2) [Golovchanskaya et al., 2011];

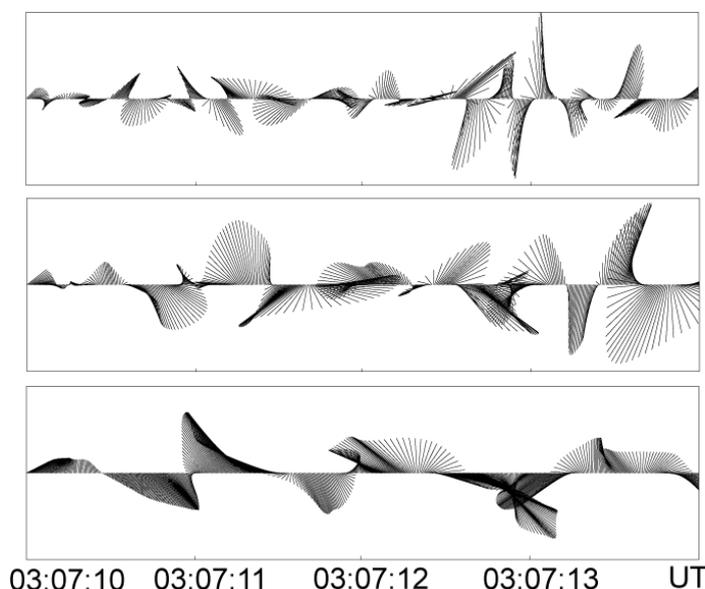


Рис.2 Годограммы перпендикулярного магнитного поля $b_{\perp} = (b_N, b_E)$, измеренного спутником FAST в событии альвеновской турбулентности 24 апреля 1998, UT = 07:03:10-07:03:14 и отфильтрованного в полосах частот 4-8 Гц (вверху), 2-4 Гц (в центре), и 1-2 Гц (внизу).

- Установлено (раздел 1.5), что как в авроральной зоне, так и в полярной шапке, альвеновская турбулентность обнаруживает сезонную вариацию (рис.3), характер которой соответствует генератору продольного тока $j_{||}$. Предложена её интерпретация, основанная на особенностях замыкания турбулентных продольных токов [Golovchanskaya, 2007].

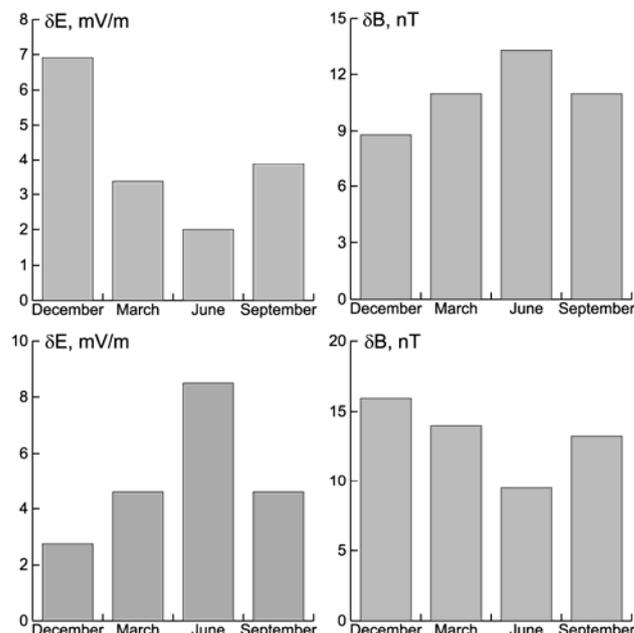


Рис.3 Усреднённые по области $ILAT > 75^\circ$ электрические поля (слева) и магнитные поля (справа) на масштабах < 100 км, измеренные спутником DE-2, в зависимости от месяца года, для северного полушария (верхние панели) и южного полушария (нижние панели)

Подобная зависимость от сезона, именно, усиление в несколько раз электрического поля в зимний период по сравнению с летним периодом, найдена и в широкополосном электростатическом шуме (рис.4) [Golovchanskaya et al., 2013];

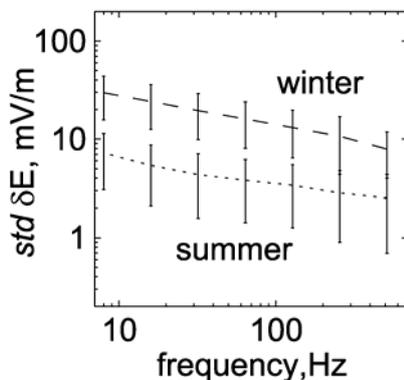


Рис.4 Стандартное отклонение флуктуаций электрического поля δE на частотах от 8 Гц до 512 Гц, наблюдаемых спутником FAST в авроральной зоне в 100 событиях широкополосных возмущений в зимний сезон (штриховая линия) и в 100 событиях в летний сезон (пунктирная линия).

- На большой статистике событий показано, что продольная компонента вектора Пойнтинга, связанного с альвеновской турбулентностью, направлена из магнитосферы в ионосферу [Golovchanskaya and Maltsev, 2004]. Это свидетельствует о том, что возмущение не является проявлением положительной обратной ионосферной связи;
- Продемонстрирована зависимость широкополосных возмущений от межпланетного магнитного поля (ММП), а также установлено, что они преимущественно развиваются в областях крупномасштабных продольных токов/сдвигов скорости магнитосферной конвекции [Golovchanskaya et al., 2002, 2006];

В разделе 1.9 оценен вклад электрической изменчивости в джоулев нагрев проводящего слоя ионосферы для наблюдаемых в реальности функций распределения изменчивых E -полей [Golovchanskaya, 2008]. Оказалось, что он сопоставим, а при некоторых ориентациях межпланетного магнитного поля ($B_z > 0$, $B_y \neq 0$) может превышать вклад регулярного электрического поля.

В *главе 2* выясняется, какому статистическому процессу соответствуют электрические и магнитные поля альвеновской турбулентности. Ранее, ряд исследователей считали их окрашенными шумами, например, фликкером, а иногда просто гауссовым белым шумом. Более внимательно исследовать этот вопрос автора диссертации заставило обнаружение масштабной инвариантности флуктуаций аврорального свечения [Урицкий, 2005; Козелов, 2008] и понимание, что во многих случаях она может быть простым следствием скейлинга в полях и токах, приводящих к структурированной авроре.

В разделах 2.3-2.7 рассмотрены основные методы обнаружения и исследования масштабной инвариантности случайных процессов, к которым относятся (а) метод обобщённых структурных функций, (б) метод нормализации функций плотности вероятности, (в) метод регрессионных кривых $\log(\sigma)-\log(s)$ и $\log P(0,s)-\log(s)$, где P – функция плотности вероятности амплитуд флуктуаций случайной величины на масштабе s и σ – стандартное отклонение для того же масштаба, и (г) метод логарифмических диаграмм, и проиллюстрировано их применение к наблюдениям электрического и магнитного полей альвеновской турбулентности в высокоширотной ионосфере.

В частности, в разделе 2.4 свойство масштабной инвариантности данных исследуется методом анализа функций плотности вероятности амплитуд флуктуаций (инкрементов) $\delta X = X(x+s) - X(x)$ на разных масштабах s (здесь x – пространственная координата, вдоль которой рассматривается случайная величина X). При статистической самоаффинности флуктуаций в некотором диапазоне масштабов (или в случаях близких к ней), оказывается возможным путём нормировки привести функции плотности вероятности $P(\delta X, s)$ к единой кривой, не зависящей от масштаба. Это свойство известно как коллапс нормализованных функций плотности

вероятности на одну кривую [Hnat et al., 2005]. Поскольку в случае самоаффинности процесса стандартное отклонение флуктуаций электрического поля σ зависит от масштаба как $\sigma \sim s^\gamma$, где γ – показатель масштабирования, нормализованные функции плотности вероятности P_s , полученные из соотношения

$$P_s(\delta X / \sigma) = \sigma \cdot P(\delta X, s) \quad (1)$$

не должны зависеть от масштаба, то есть, должно иметь место их стягивание к единой кривой.

Рис. 5 иллюстрирует примеры коллапса нормализованных функций плотности вероятности, построенных для флуктуаций амплитуды электрического поля, наблюдаемого вдоль траектории спутника DE-2 во время его пролёта через авроральную зону (рис.5a) и полярную шапку (рис.5b) на фоне события альвеновской турбулентности 12 ноября 1981, UT = 02:24-02:39. Флуктуации рассматривались на масштабах $s = 0.5$ км, 1.9 км, 5.6 км и 15 км [Golovchanskaya and Kozelov, 2010].

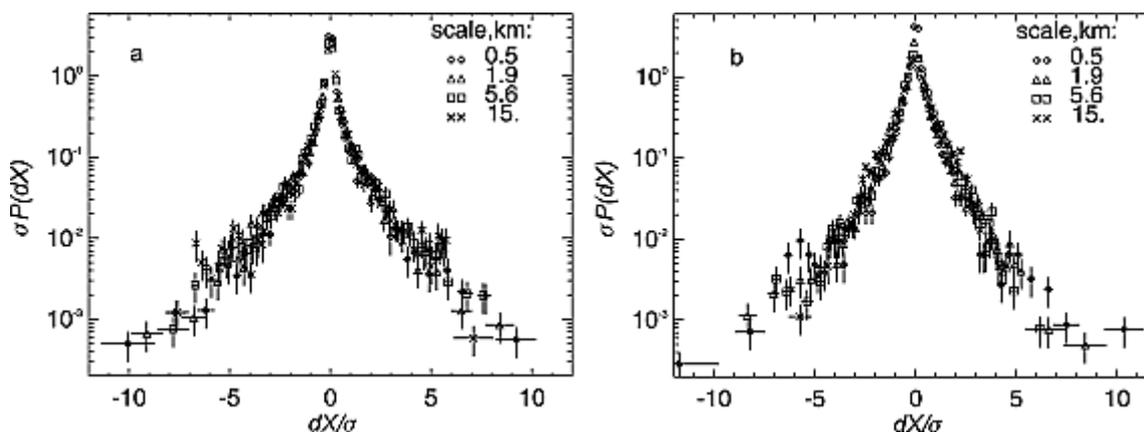


Рис.5. Коллапс нормализованных функций плотности вероятности флуктуаций электрического поля на масштабах 0.5-15 км по наблюдениям спутника DE-2 (а) в авроральной зоне и (б) в полярной шапке.

Идеальный коллапс нормализованных функций плотности вероятности $P_s(\delta X / \sigma)$ на одну кривую мог бы иметь место лишь в случае точной самоаффинности (монофрактальности) данных. В действительности, коллапс всегда имеет приближённый характер. Более тонкие эффекты, связанные с отклонением от точной самоаффинности из-за перемежаемости, всегда присутствующей в наблюдениях, обсуждаются в разделе 2.10.

В разделе 2.8 подробно рассмотрен метод *Abry et al.* [2000] построения логарифмических диаграмм (<http://www.cubinlab.ee.unimelb.edu.au/~darryl/Publications/wwbook.pdf>), который основан на теории анализа сигнала с переменным разрешением и является одним из наиболее совершенных методов обнаружения и исследования скейлинга случайных процессов. С его

помощью разные проявления скейлинга могут быть эффективно идентифицированы и количественно оценены в рамках единого подхода, основанного на дискретном вейвлет преобразовании данных. Такая эффективность в значительной степени обусловлена тем, что в качестве базисных функций при анализе сигнала используются вейвлеты, которые сами по себе обладают свойством масштабной инвариантности. В отличие от временного пространства, где процесс $X(t)$ может включать дальние взаимодействия и нестационарность, в вейвлет пространстве мы имеем дело со стационарными процессами с ближними взаимодействиями $d_X(j, \dots)$ для каждого уровня разрешения сигнала (октавы j), причём каждый из этих процессов имеет нулевое среднее, благодаря условию допустимости материнского вейвлета ψ_0 . Стационарность делает осмысленным усреднение по ‘времени’ при нахождении второго момента (дисперсии) детализирующих вейвлет коэффициентов дискретного вейвлет преобразования $d_X(j, \dots)$ при заданном j в выражении

$$\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_X(j, k)|^2 = 2^{\alpha j} c_f C(\alpha, \psi_0) \quad (2)$$

где n_j - число детализирующих вейвлет коэффициентов при заданном j .

Благодаря тому, что значения μ_j для разных j слабо связаны друг с другом, результаты анализа сигнала на разных масштабах являются независимыми. Таким образом, рассмотрение зависимости второго момента процесса $X(t)$ от масштаба сводится к изучению зависимости μ_j от j . При этом индекс масштабирования α оценивается из наклона регрессионных (или взвешенных регрессионных) кривых

$$y_j \equiv \log_2(\mu_j) \propto j \quad (3)$$

в которых μ_j определяются из (2) и которые называются *логарифмические диаграммы* второго порядка (далее ЛД). Полученная из наклона логарифмической диаграммы оценка индекса масштабирования α , в отличие от его оценок традиционными методами (из спектров Фурье, анализа коррелограмм и др.), является несмещённой.

Пример обнаружения и идентификации скейлинга в измерениях широкополосного электрического поля в послеполуночной авроральной зоне спутником FAST с разрешением 512 с^{-1} (14 м), приведён на рис.6 [Головчанская и др., 2010]. При построении ЛД (рис.6с) использовались вейвлеты семейства Добеши, которые сконструированы таким образом, что вейвлет Добеши порядка N_w обращает в ноль первые N_w моментов распределения (начиная с нулевого). Это позволяет эффективно устранять тренды, которые обычно присутствуют в данных. Порядок вейвлета последовательно увеличивался, начиная с $N_w = 1$. При $N_w = 5$ была достигнута стабилизация наклона α , означающая, что тренды устранены из сигнала. Степенной (линейный в *log-log* координатах) вид ЛД и значение индекса масштабирования $\alpha = 2.05 \pm 0.05$, попадающее в промежутке (1,3), позволяют идентифицировать сигнал как самоподобный со

стационарными инкрементами (H_{sssi} – процесс) [Abry et al., 2000]. В рамках статистики второго порядка математической моделью такого сигнала может служить обобщённое броуновское движение (fractal Brownian motion, fBm).

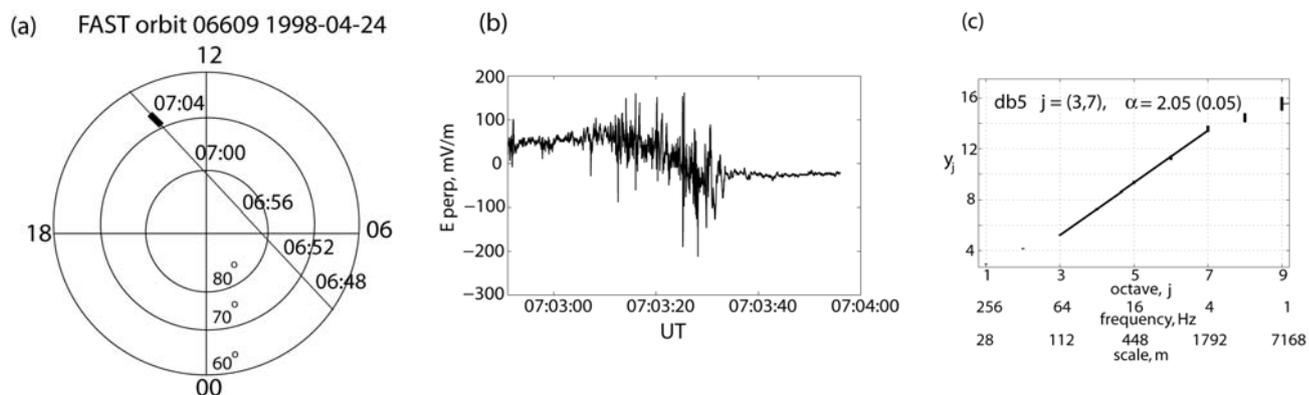


Рис.6. (a) Проекция орбиты 06609 спутника FAST в координатах ILAT-MLT полярной ионосферы северного полушария; (b) dc электрическое поле, измеренное с разрешением 512 c^{-1} на выделенном участке орбиты; (c) ЛД, построенная методом Abry et al., [2000].

На рис.7 приведены примеры ЛД, построенных для магнитных полей, измеренных спутником FAST в трёх событиях альвеновской турбулентности в авроральной зоне в разные часы MLT [Golovchanskaya et al., 2011]. Можно видеть, что на октавах $j > 4$ ЛД имеют явно выраженный степенной вид, который характеризуется значениями α от 1.8 до 2.3.

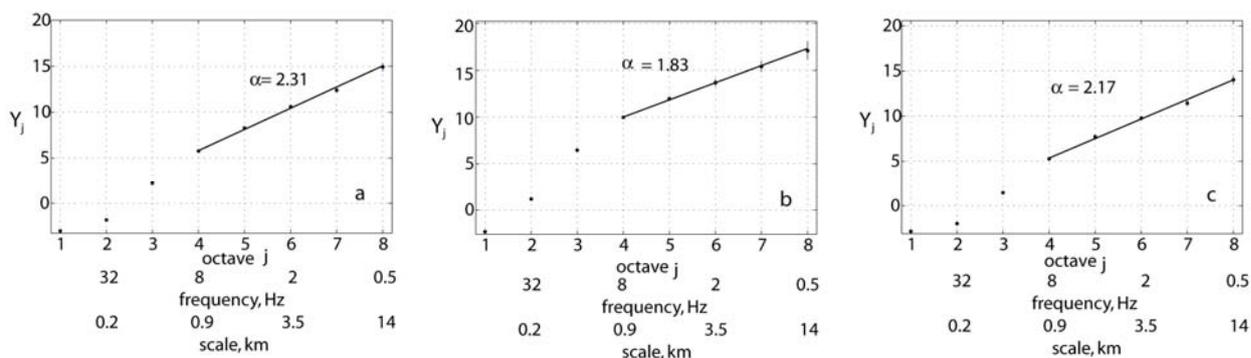


Рис.7. Логарифмические диаграммы, построенные для азимутальной магнитной компоненты, измеренной спутником FAST в событиях альвеновской турбулентности (a) в утренней авроральной зоне, (b) в послеполуденной авроральной зоне, (c) в дневном каспе.

В главе 3 выполнено сравнение наблюдаемых характеристик альвеновской турбулентности (наклона логарифмических диаграмм α , показателя масштабирования γ , диапазона масштабов, где имеет место степенная зависимость мощности полей от масштаба) с предсказаниями классических теорий турбулентности Колмогорова, Крайхнана, Ирошникова-Крайхнана и других, которые кратко описаны в разделах 3.1-3.3. Для того чтобы выполнить подобное

сравнение, проведено исследование характеристик масштабирования анализируемых возмущений, с разделением наблюдений в авроральной зоне и полярной шапке, на статистике в несколько десятков событий. Табл.1 из работы [Golovchanskaya and Kozelov, 2010] содержит результаты исследования для 15 событий

Табл.1 Характеристики электрических полей на замкнутых (CFLs) и открытых (OFLs) магнитных силовых линиях в 15 событиях альвеновской турбулентности, зарегистрированных спутником DE-2;

	YY/ DDD	CFLs, UT	CFLs, points	OFLs, UT	OFLs, points	IMF By, nT	IMF Bz, nT	IMF σ , nT	n_{sw} σ , cm ⁻³	CFLs, LD α	OFLs, LD α	CFLs, std γ	OFLs, std γ
1	81/316	00.75-00.85; 01.04-01.08	7212	00.85- 01.04	10939	-15.9	-6.7	0.6	--	2.04 ^{+0.11} _{-0.13}	2.45 ^{+0.11} _{-0.10}	0.54	0.65
2	81/316	02.38-02.45; 02.60-02.66	7487	02.45- 02.60	8640	8.2	-8.0	6.9	2.0	2.08 ^{+0.19} _{-0.28}	2.19 ^{+0.10} _{-0.29}	0.53	0.56
3	81/327	22.40-22.47; 22.64-22.68	5528	22.48- 22.63	8640	1.8	-5.2	0.9	--	1.85 ^{+0.13} _{-0.17}	2.05 ^{+0.12} _{-0.12}	0.53	0.56
4	81/329	22.80-22.86; 22.98-23.07	8350	22.86- 22.98	6486	-3.8	-3.9	2.7	0.6	2.00 ^{+0.13} _{-0.21}	2.32 ^{+0.11} _{-0.21}	0.69	0.75
5	81/332	21.73-21.79; 21.93-21.98	6335	21.80- 21.90	5436	-4.5	-2.5	2.6	0.4	1.91 ^{+0.16} _{-0.09}	1.80 ^{+0.24} _{-0.14}	0.71	0.65
6	81/332	23.33-23.41; 23.54-23.60	8064	23.42- 23.53	6326	-3.8	-2.1	1.3	0.4	2.23 ^{+0.16} _{-0.37}	1.66 ^{+0.13} _{-0.12}	0.73	0.48
7	81/333	23.53-3.60; 23.68-23.75	8351	23.60- 23.66	3451	-4.3	-0.1	3.0	--	1.86 ^{+0.11} _{-0.16}	1.76 ^{+0.11} _{-0.15}	0.57	0.56
8	81/337	22.56-22.67; 22.75-22.83	11103	22.68- 22.75	4032	3.2	-2.2	2.9	1.1	2.46 ^{+0.16} _{-0.27}	1.75 ^{+0.26} _{-0.73}	0.63	0.59
9	81/340	23.05-23.11; 23.23-23.28	6336	23.14- 23.21	4032	3.3	-0.8	2.7	0.5	2.26 ^{+0.12} _{-0.21}	1.62 ^{+0.22} _{-0.62}	0.57	0.50
10	81/341	10.24-10.31; 10.43-10.49	7488	10.33- 10.42	5184	4.9	-1.5	1.8	--	2.09 ^{+0.15} _{-0.30}	1.74 ^{+0.11} _{-0.21}	0.70	0.58
11	81/284	14.65-14.71; 14.97-15.00	5184	14.71- 14.97	14976	7.8	-9.0	2.0	--	2.05 ^{+0.26} _{-0.32}	1.74 ^{+0.22} _{-0.31}	0.39	0.35
12	81/296	02.14-02.21; 02.40-02.44	6336	02.21- 02.40	7032	5.2	-4.4	4.3	--	2.09 ^{+0.35} _{-0.34}	2.24 ^{+0.42} _{-0.26}	0.64	0.68
13	81/298	02.70-02.73; 02.93-02.98	4608	02.73- 02.93	8857	7.1	-4.6	2.7	--	2.00 ^{+0.22} _{-0.21}	1.85 ^{+0.67} _{-0.46}	0.49	0.62
14	81/311	06.07-06.10; 06.23-06.32	6912	06.10- 06.23	7488	5.2	-5.4	3.9	--	2.00 ^{+0.22} _{-0.25}	1.82 ^{+0.59} _{-0.34}	0.51	0.56
15	81/311	20.60-20.67; 20.81-20.87	9216	20.67- 20.81	8064	4.6	-3.0	2.8	--	2.15 ^{+0.44} _{-0.35}	1.94 ^{+0.22} _{-0.59}	0.65	0.53

Можно видеть, что наклон логарифмических диаграмм полей альвеновской турбулентности (погрешность оценок α в отдельных событиях рассчитывалась с применением процедуры бутстрепа) примерно совпадает на открытых и замкнутых магнитных силовых линиях при последовательном пересечении их спутником, однако достаточно сильно меняется

от события к событию и при этом не согласуется с предсказаниями классических теорий турбулентности. Сделан вывод о том, что альвеновская турбулентность скорее отражает нелинейный переходный процесс, чем установившийся турбулентный режим.

Кроме этого, в главе 3 по экспериментальным данным проверяются более ранние объяснения исследуемого явления: как проявление турбулентности в солнечном ветре [Abel et al., 2006], как проявление турбулентных электрических полей, спроектированных из плазменного слоя магнитосферы [Weimer et al., 1985], и другие. Показано, что они не согласуются с наблюдениями.

Глава 4 посвящена теоретическому рассмотрению широкополосных возмущений. В разделе 4.1 обсуждаются трудности интерпретации альвеновской турбулентности в терминах инерционных альвеновских волн в рамках линейного анализа, предложенной в работе [Stasiewicz et al., 2000a] и доминирующей в течение последнего десятилетия. В разделе 4.4 изложены основополагающие идеи Т. Чанга [Chang et al., 2004] о бимодальном состоянии космической плазмы и нелинейном взаимодействии когерентных структур того или иного типа, сопровождающемся проявлениями, характерными для перемежающейся турбулентности. Отмечено, что строгое решение для когерентных альвеновских структур, являющихся результатом параметрического распада инерционных альвеновских волн конечной амплитуды в ближней магнитосфере (область, где плазменный параметр $\beta \ll m_e/m_i$), получено в работе [Pokhotelov et al., 2003].

В разделе 4.5 с привлечением экспериментальных сведений, полученных в главах 1-3 диссертации, сформулирована постановка задачи о генераторе альвеновской турбулентности и предложено её решение в модели нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур. Предполагается, что в когерентных структурах присутствует магнитостатическая компонента (связанная с продольными токами), что обеспечивает их коллективное взаимодействие под действием силы Ампера. Временная эволюция системы таких структур численно моделируется методом частиц в ячейках [Birdsall and Langdon, 1991].

В начальный момент времени макрочастицы задаются как субсеточные продольные токи, случайно распределённые по области моделирования. Каждой макрочастице приписывается продольный ток величины $j_{||0}$. В расчёте, который иллюстрируется на рис.8, число макрочастиц M положительной (+) и отрицательной (-) полярности полагалось одинаковым (для сетки размером 512×512 оно составляло $\sim 10^6$). Эффективная диффузия присутствует в алгоритме неявно, за счёт предположения о нарушении условия вмороженности на малых (субсеточных) масштабах, на которых макрочастицы могут свободно перемещаться под действием силы Ампера. По известному распределению макрочастиц положительной и отрицательной

полярности, локализованных, соответственно, в точках $(x_{m^{(+)}, y_{m^{(+)}}})$ и $(x_{m^{(-)}, y_{m^{(-)}}})$, рассчитывается продольный ток j_z в узлах сетки (x_k, y_k)

$$j_z(x_k, y_k, t) = j_{\parallel 0} \cdot \left(\sum_{m^{(+)}} F(x_{m^{(+)}} - x_k, y_{m^{(+)}} - y_k) - \sum_{m^{(-)}} F(x_{m^{(-)}} - x_k, y_{m^{(-)}} - y_k) \right) \quad (4)$$

причём в качестве форм-фактора F макрочастицы используется PQS взвешивание по четырём узлам сетки [Hockney and Eastwood, 1981]

$$F(\mathbf{r}) = W_4(r_1) \cdot W_4(r_2) \quad (5)$$

где

$$W_4(r) = \begin{cases} 0, & |r/h| \geq 2 \\ \frac{1}{6h} \left(2 - \frac{|r|}{h} \right)^3, & 1 \leq |r/h| \leq 2 \\ \frac{1}{h} \left(\frac{2}{3} - \frac{|r|^2}{h^2} + \frac{1}{2} \frac{|r|^3}{h^3} \right), & |r/h| \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

По известным в узлах сетки значениям продольных токов находится векторный потенциал A как решение уравнения Пуассона

$$\nabla_{\perp}^2 A(x, y, t) = j_z(x, y, t) \quad (7)$$

с периодическими граничными условиями, которые обычно задаются, когда нужно минимизировать влияние границ сетки на решение и приблизить рассмотрение к рассмотрению в безграничной плазме. Численное решение уравнения (7) находилось с использованием метода четвёртого порядка точности.

По известному векторному потенциалу определяются компоненты магнитного поля в узлах сетки

$$\mathbf{B}(x, y, t) = \nabla A \times \mathbf{e}_z \quad (8)$$

а затем компоненты самосогласованного магнитного поля $\mathbf{B}_m = B_{m,x} \cdot \mathbf{e}_x + B_{m,y} \cdot \mathbf{e}_y$ в точках нахождения макрочастиц

$$\mathbf{B}_m = \sum_k \mathbf{B}(x_k, y_k, t) \cdot F(x_m - x_k, y_m - y_k) \quad (9)$$

после чего рассчитывается изменение скорости каждой макрочастицы, согласно уравнению

$$\frac{d\mathbf{v}_m^{(\pm)}}{dt} = \frac{\pm j_{\parallel 0}}{\rho_0} [\mathbf{e}_z \times \mathbf{B}_m] \quad (10)$$

и макрочастицы перемещаются в соответствии с изменёнными скоростями. Численное интегрирование уравнения (10) осуществлялось по явной схеме с использованием метода четвёртого порядка точности.

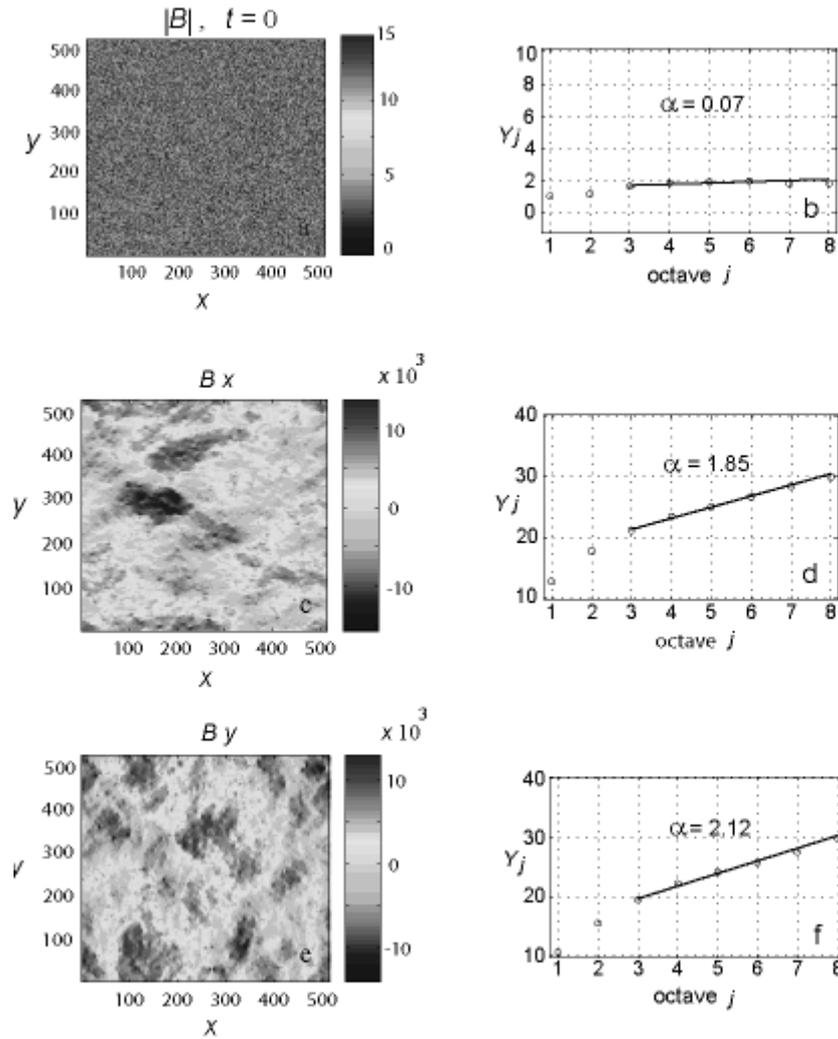


Рис.8. Распределения в поперечной к магнитному полю \mathbf{B}_0 плоскости: (a) модуля $|B|$ магнитных возмущений, связанных с когерентными альвеновскими структурами, заданными в $t = 0$, а также модельных (c) B_x и (e) B_y магнитных компонент на стадии эволюции когерентных альвеновских структур, близкой к насыщению. (b), (d), (f) Логарифмические диаграммы, построенные для магнитных возмущений на рис. (a), (c), (e), соответственно.

Показано, что численные решения, полученные в моделировании, воспроизводят основные черты альвеновской турбулентности, наблюдаемые в реальности: наклоны ЛД, характер поляризации, вид функций плотности вероятности флуктуаций турбулентных полей, коллапс нормализованных функций плотности вероятности на одну кривую и другие [Golovchanskaya et al., 2011].

На рис.8а приведены абсолютные значения $|B|$ поперечных к \mathbf{B}_0 магнитных возмущений, которые создают в узлах сетки случайно распределённые в $t = 0$ макрочастицы. Начальное распределение $|B|$ близко к белому шуму, что подтверждается плоским характером логарифмической диаграммы, построенной для начального распределения (рис. 8b). Расстояния x и y нормированы на шаг сетки, магнитные поля - на величину $\tilde{B} = \mu_0 j_{\parallel 0} h$, где $j_{\parallel 0}$ - абсолютная величина продольного тока макрочастицы, h – шаг сетки, время t - на величину $\tilde{t} = \left(\frac{h \rho_0}{j_{\parallel 0} \tilde{B}} \right)^{1/2}$.

Для характерных параметров задачи время, которому соответствуют численные решения, показанные на рис. 8с и 8е, составляет 3-4 мин. За этот временной интервал продольные токи перераспределились таким образом, что их магнитные возмущения возросли примерно на три порядка величины, а логарифмические диаграммы возмущённых магнитных полей B_x и B_y , (рис.8d и 8f) на больших октавах приобрели степенной вид, при этом значения индекса масштабирования α оказываются близки к наблюдаемым (см. рис.7). Из результатов моделирования также следует, что, начиная с некоторого момента времени, процесс слияния продольных токов одинаковой полярности существенно замедляется, так что на временах, превышающих несколько минут, эволюцию системы когерентных альвеновских структур можно считать близкой к насыщению.

В разделе 4.6 диссертации предложен наиболее вероятный с точки зрения экспериментальных фактов физический механизм широкополосного электростатического шума, сопровождающего альвеновскую турбулентность в более высокочастотной области спектра (до ~ 1 кГц). Механизм основан на теории генерации широкополосных электростатических волн неоднородными поперечными квазистатическими электрическими полями [Ganguli et al.1985a,b; Gavrishchaka et al., 1996]. Показано, что неоднородные электрические поля альвеновской турбулентности могут дестабилизировать разновидность электростатических ионно-циклотронных (EIC) волн, которые получаются как неустойчивые решения нелокального дисперсионного уравнения для EIC возмущений и свойства которых существенно отличаются от свойств классических EIC волн [Kindel and Kennel, 1971]. При этом естественным образом объясняются наблюдаемая сезонная асимметрия широкополосного электростатического шума (рис. 4), а также его дестабилизация исключительно в неоднородных фоновых конфигурациях, отмеченная во многих работах.

В главе 5 диссертации исследуются проявления альвеновской турбулентности в авроральном структурировании. Замечено, что в последнее время всё больше авторов обращают внимание на то, что, несмотря на интенсивные спутниковые исследования, до сих пор не удалось найти прототип дискретных авроральных структур в магнитосферном плазменном слое. Начинает преобладать точка зрения, что, хотя источник энергии оптической авроры

может находиться в удалённых областях магнитосферы, к авроральному структурированию приводят неустойчивости и нелинейные процессы в ближней магнитосфере. Турбулентность когерентных альвеновских структур – один из таких процессов.

Несмотря на очевидные ограничения оптических наблюдений, связанные с узким полем зрения и недостаточно высокой разрешающей способностью камер, геометрическими искажениями, контаминирующими эффектами светимости звёзд, тумана и прочих факторов, авроральные изображения (имиджи) дают единственную возможность получить представление о двумерной пространственной картине турбулентности в заданный момент времени. Во введении к главе 5 отмечается, что признаки сложного поведения во флуктуациях интенсивности аврорального свечения были уверенно продемонстрированы в более ранних работах [Uritsky et al., 2002; Kozelov et al., 2004]. Однако надёжные количественные характеристики масштабной инвариантности авроральных форм стало возможным получить только после работы [Kozelov and Golovchanskaya, 2010]. В ней с помощью модельных расчётов было показано, как учесть эффект искажений характеристик самоподобия в поперечной к магнитному полю плоскости из-за вытянутости авроральных структур вдоль магнитного поля.

В разделе 5.2 обсуждаются результаты численного моделирования, выполненного в [Kozelov and Golovchanskaya, 2010], которые позволили получить поправки на эффект ракурсных искажений при определении характеристик масштабирования авроральных форм по наземным наблюдениям вблизи ($\pm 60^\circ$) от магнитного зенита.

В моделировании методом смещения средней точки генерировались случайные фрактальные броуновские поверхности (fractal Brownian surfaces, fBs) с заданным показателем Хёрста H . Рассматривались три группы самоподобных поверхностей размером 512×512 (по двадцать реализаций в каждой группе) с показателями H равными 0.3, 0.5 и 0.7 (при этом индекс масштабирования $\alpha = 2H + 1$). Пример реализации fBs (далее имидж) с $H = 0.3$ приведён на рис.9а. В модельных расчётах задавались два вида распределения высыпающихся электронов по энергиям: (i) максвелловское распределение со средней энергией $\langle \varepsilon \rangle = 10$ кэВ, которое приводит к узкому высотному профилю авроральной светимости, и (ii) распределение, убывающее с ростом энергии как $\sim \varepsilon^{-2}$, которое даёт авроральные лучи с постоянной светимостью в диапазоне высот от 100 км до 190 км. Тот же имидж, что на рис. 9а, но с искажениями за счёт ракурсного эффекта для случаев узкого и широкого высотных профилей авроральной светимости, показан на рис. 9b и 9c, соответственно.

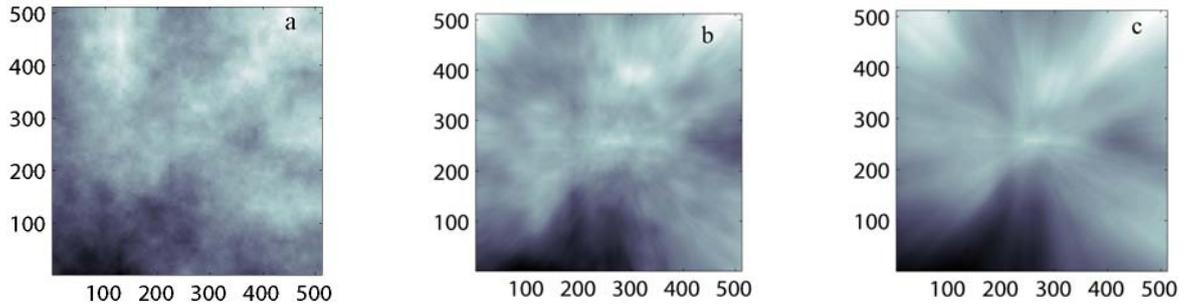


Рис.9. (a) Синтезированный самоподобный имидж с $H = 0.3$ ($\alpha = 1.6$), (b, c) тот же имидж, но с искажениями за счёт ракурсного эффекта в случаях узкого и широкого профилей светимости.

Было проверено, что для неискажённых имиджей метод *Abry et al.* [2000] даёт (в среднем по 20 реализациям) оценку индекса α близкую к его заданному значению, и таким образом, является эффективным методом оценивания. Для имиджей с искажениями оценка индекса α' существенно превышала истинное значение, как для узкого, так и для широкого высотных профилей светимости. Были построены линейные регрессионные зависимости α' от α , которые оказались мало отличающимися для профилей светимости разного вида, и найдены их коэффициенты (табл.2).

Табл.2 Коэффициенты линейных регрессионных зависимостей α' от α для узкого и широкого высотных профилей светимости

	C_0	C_1
Узкий высотный профиль		
α'	1.17 ± 0.02	0.88 ± 0.01
Широкий высотный профиль		
α'	1.11 ± 0.04	0.98 ± 0.02

Все модельные параметры в табл.2 являются правдоподобными, согласно критерию χ^2 .

Указаны $\pm 1 \sigma$ пределы неопределённости параметров.

Из табл.2 следует, что справедливо соотношение: $\alpha' \approx \alpha + 1$. Таким образом, истинный показатель Хёрста H связан с “видимым” индексом масштабирования α' как

$$H \approx (\alpha' - 2)/2 \quad (11)$$

Для наблюдений вблизи ($\pm 60^\circ$) магнитного зенита эту формулу удаётся обосновать теоретически. На основе выполненного анализа, в заключение раздела 5.2 приведены рекомендации экспериментатору, который намерен изучать фрактальные свойства авроральных свечений по данным наземных наблюдений.

Корректирующие формулы позволили перейти от видимых характеристик масштабирования, ранее известных из наблюдений системы Auroral Large Imaging System (ALIS) [Golovchanskaya *et al.*, 2008] (пример приведён на рис.10), к их истинным значениям. Оказалось, что группы авроральных пятен и системы дуг, наблюдаемые в суббуревых условиях, характеризуются показателем масштабирования H , который меняется в разных событиях от 0.07 до 0.21 (соответственно, индекс масштабирования α_A , где индекс 'A' означает 'авроральный', лежит в пределах 1.14-2.42). Например, группа пятен на рис.10 характеризуется видимым показателем масштабирования $\gamma' = 0.71$, и, следовательно, истинным показателем масштабирования $H = 0.21$ ($\alpha_A = 1.42$).

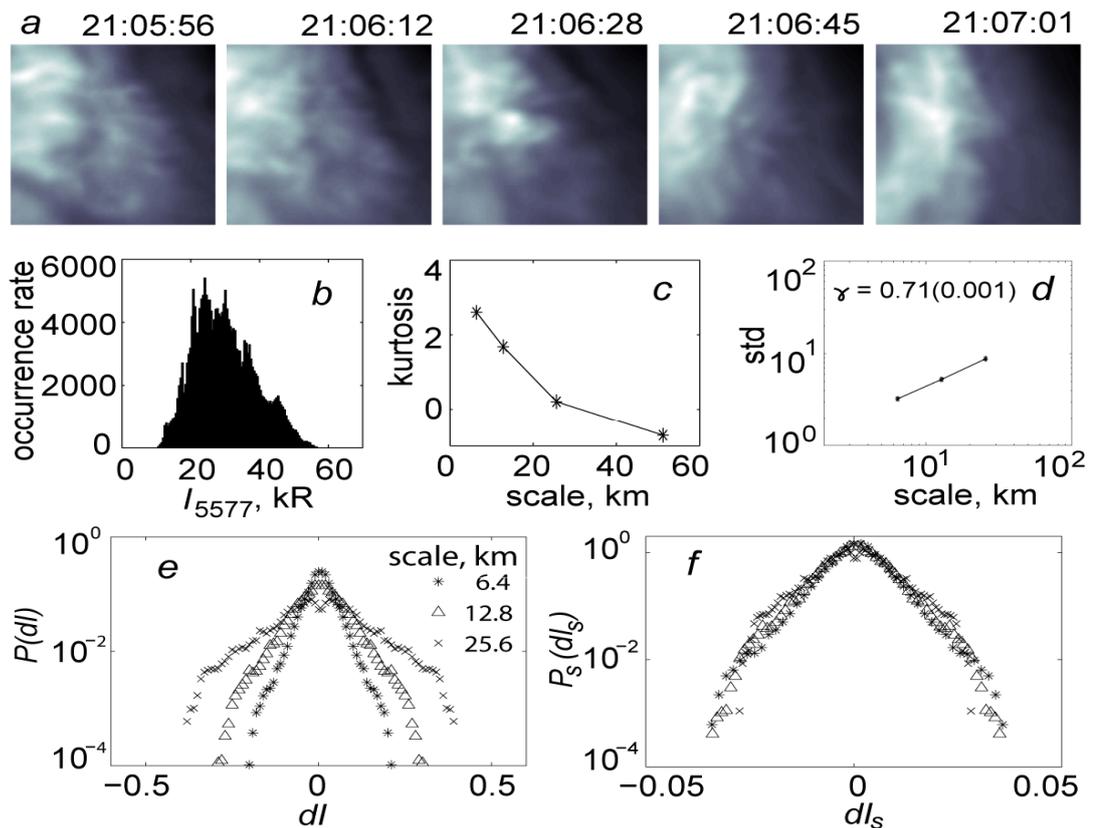


Рис.10. Последовательность имиджей, полученных системой ALIS в зелёной линии 557.7 нМ в условиях суббури. Имиджи содержат группу авроральных пятен, характеризующуюся видимым показателем масштабирования $\gamma' = 0.71$.

Таким образом, стало возможным осуществить прямое сопоставление авроральных и электродинамических проявлений турбулентности. Это было сделано в разделе 5.3.

Чтобы выполнить количественное сравнение авроральных и электродинамических характеристик масштабирования, необходимо перейти от продольных токов к плотности энергии высыпающихся электронов ε , поскольку именно эта величина определяет интенсивность свечения I . Как известно, плотность энергии высыпающихся электронов ε во многих случаях можно считать пропорциональной j_{\parallel}^p , где показатель степени $p = 1.5-2.0$ [Lyons, 1979]. На основе результатов моделирования продольных токов в главе 4, нами была рассчитана временная эволюция индекса масштабирования α_{ε} плотности энергии высыпающихся электронов, которая показана на рис.11а для $p = 1.5$ и на рис.11б для $p = 2.0$. В данном случае индекс масштабирования α_{ε} находился как $2H+1$, где показатель масштабирования H , в свою очередь, определялся из наклона структурной функции второго порядка.

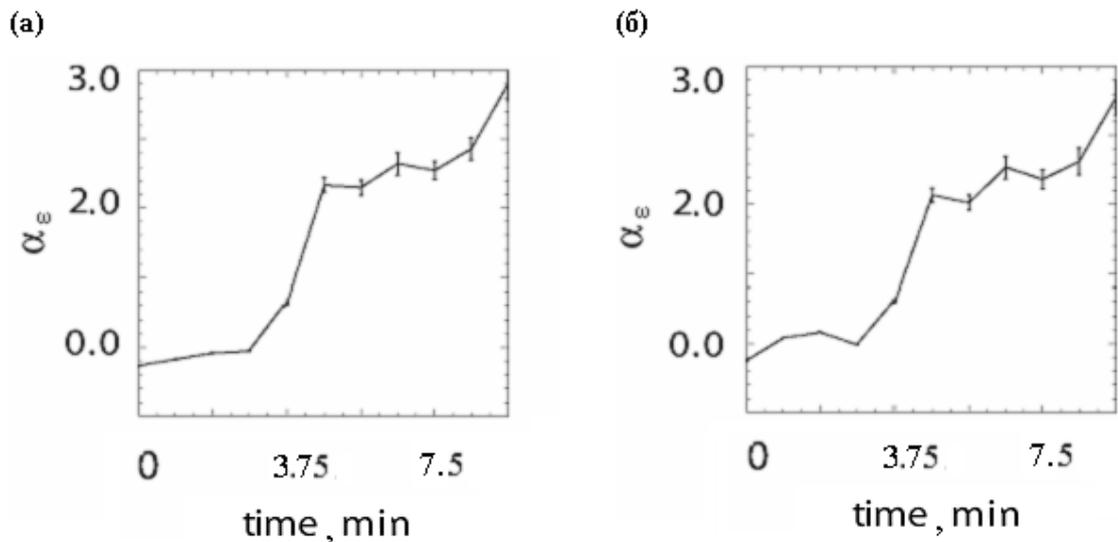


Рис.11. Временная эволюция индекса масштабирования α_{ε} плотности энергии высыпающихся электронов ε , рассчитанной как $\sim j_{\parallel}^p$, где (а) $p = 1.5$ и (б) $p = 2.0$, продольный ток j_{\parallel} получен в численном моделировании нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур.

Можно видеть, что значения индекса масштабирования α_{ε} плотности энергии высыпающихся электронов хорошо согласуются со значениями индекса масштабирования авроральных структур во время суббури ($\alpha_A = 1.14-2.42$) по наблюдениям системы ALIS.

В разделе 5.4 исследована временная эволюция индекса масштабирования авроральных структур в начале взрывной фазы суббури по наблюдениям UVI имиджера спутника Polar. Показано, что она обнаруживает качественное сходство с временной эволюцией индекса масштабирования когерентных альвеновских структур, полученных в численном моделировании. Это может служить аргументом в пользу того, что альвеновская активность, всплеск которой наблюдается при переходе к взрывной фазе суббури, сопровождается развитием альвеновской турбулентности в ближней магнитосфере.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В приложении рассмотрены свойства вейвлетов Добеши (в основном, способность устранять из данных тренды различных порядков), сделавшие их наиболее привлекательными для использования в настоящем исследовании.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Широкополосные возмущения электрических и магнитных полей в высокоширотной верхней ионосфере Земли идентифицированы как класс возмущений, обнаруживающих устойчиво повторяющиеся свойства. Показано, что они включают две составляющие: турбулентность альвеновского типа (частоты от десятых долей Гц до ~ 100 Гц в системе отсчёта спутника) и широкополосный электростатический КНЧ шум (частоты до 1 кГц);
2. С применением вейвлет анализа установлено, что мощность электрических и магнитных полей альвеновской турбулентности степенным образом зависит от масштаба, $\propto s^\alpha$. Поля, как правило, обнаруживают хаотичную поляризацию. Характер их зависимости от проводимости ионосферы указывает на генератор мелкомасштабных продольных токов $j_{||}$. Связанный с турбулентными полями вектор Пойнтинга направлен из магнитосферы в ионосферу. Турбулентность преимущественно развивается в областях крупномасштабных токов Биркеланда.
3. Оценен вклад электрической изменчивости в джоулев нагрев проводящего слоя ионосферы. Показано, что он сопоставим, а при некоторых ориентациях межпланетного магнитного поля ($B_z > 0$, $B_y \neq 0$) превышает вклад регулярной составляющей электрического поля.
4. Продемонстрированы и количественно исследованы масштабно-инвариантные свойства полей альвеновской турбулентности. Методом логарифмических диаграмм (ЛД) *Abry et al.* [2000], основанном на дискретном вейвлет преобразовании данных, показано, что поля относятся к классу самоподобных со стационарными инкрементами (наклон ЛД α лежит в пределах (1,3)). В рамках статистики второго порядка их математической

5. Различными статистическими методами установлено постоянное присутствие перемежаемости в электрическом и магнитном полях альвеновской турбулентности.
6. Показано, что альвеновская турбулентность развивается как в авроральной зоне, так и в полярной шапке, и обнаруживает примерно одинаковые свойства масштабирования в этих двух высокоширотных областях. Альвеновская турбулентность в полярной шапке не связана с изменчивостью солнечного ветра и не отражает структуру турбулентных флуктуаций в солнечном ветре. Как и в авроральной зоне, она преимущественно развивается в областях продольных токов (токи зоны 0 на открытых магнитных силовых линиях). Минимальный масштаб турбулентных полей лежит между локальными значениями гирорадиуса иона ρ_i (порядка 10 м на высоте 1000 км) и инерционной длины электрона λ_e (100 м). Максимальный масштаб обычно составляет 20-30 км, иногда порядка 100 км.
7. С помощью численного моделирования методом частиц-в-ячейках продемонстрировано, что основные свойства альвеновской турбулентности (степенной вид логарифмических диаграмм, наблюдаемые значения индекса масштабирования α и его изменения от события к событию, вид функций распределения, характер поляризации, характер сезонной вариации и другие) могут быть объяснены нелинейным взаимодействием когерентных альвеновских структур в ближней магнитосфере.
8. Исследован сопровождающий альвеновскую турбулентность широкополосный электростатический шум. Показано, что он генетически связан с альвеновской турбулентностью и может быть идентифицирован как разновидность электростатических ионно-циклотронных волн, в возбуждении которых существенную роль играют неоднородные электрические поля (поперечные сдвиги скорости) альвеновской турбулентности.
9. Для того чтобы сделать возможным количественное исследование проявлений масштабной инвариантности в полярных сияниях, с помощью модельных расчётов показано, как ввести корректирующие поправки на эффект ракурсных искажений, обусловленных вытянутостью авроральных структур вдоль геомагнитного поля, при наблюдении наземными оптическими камерами. Получены формулы, связывающие видимые и истинные показатели масштабирования авроральных структур в поперечной к \mathbf{B}_0 плоскости, для наблюдений вблизи ($\pm 60^\circ$) магнитного зенита.

10. Установлено, что с точки зрения структурных свойств, электродинамические и авроральные проявления турбулентности находятся в количественном соответствии.
11. Продемонстрировано качественное сходство временной динамики характеристик масштабирования когерентных альвеновских структур, полученных в численном моделировании, и авроральных возмущений, наблюдаемых в начале взрывной фазы суббури.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пудовкин М.И., Ляцкая А.М., **Головчанская И.В.** Структура продольных токов над полосой повышенной проводимости в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т.26. № 5. С. 767-773. 1986.
2. Пудовкин М.И., **Головчанская И.В.**, Николаев Н.В. О движении полосы повышенной проводимости в ионосфере относительно магнитосферной конвекции // Геомагнетизм и аэрономия. Т.29. № 1. С. 130-131. 1989.
3. Мальцев Ю.П., Гомзикова С.С., **Головчанская И.В.** Перестановочная неустойчивость как механизм распада тока хвоста магнитосферы на восстановительной фазе магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т.46. № 5. С. 651-656. 2006.
4. **Головчанская И.В.** Крупномасштабные и мелкомасштабные электрические поля и токи в высокоширотной ионосфере. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том 1-3 "Ионосферная плазма", Часть 1, Глава 6. С.280-296. -М.:ЯНУС-К, 2008.
5. **Головчанская И.В.**, Козелов Б.В., Федоренко Ю.В. Скейлинг мелкомасштабных ионосферных электрических полей по данным спутника FAST // Тр. научн. конференции «Состояние и перспективы развития геофизических исследований в высоких широтах». С.101-103. 2010.
6. **Головчанская И.В.** и Козелов Б.В. Свойства электрической турбулентности в ионосфере полярной шапки // Геомагнетизм и аэрономия. Т.50. № 5. С. 603-615. 2010.
7. **Головчанская И.В.** Широкополосная ULF-ELF турбулентность в магнитосферно-ионосферной системе высоких широт: текущее состояние эксперимента и теории. // Тр. XXXIV ежегодного семинара «Физика авроральных явлений». С. 61-70. 2011.
8. **Головчанская И.В.**, Козелов Б.В., Дэспирак И.В. Исследование широкополосной ELF турбулентности по данным спутника FAST // Геомагнетизм и аэрономия. Т.52, №4, С. 501-509. 2012.
9. Козелов Б.В., Мингалёв О.В., **Головчанская И.В.**, Мельник М.Н. Пространственный скейлинг авроральных высыпаний: численное моделирование и сравнение с наблюдениями // Тр. XXXV ежегодного семинара «Физика авроральных явлений». С. 56-58. 2012.

10. **Golovchanskaya I.V.**, Maltsev Y.P., and Ostapenko A.A. High-latitude irregularities of the magnetospheric electric field and their relation to solar wind and geomagnetic conditions. *J. Geophys. Res.*, 107, doi: 10.1029/2001JA900097, 2002.
11. **Golovchanskaya I.V.** and Maltsev Y.P. On the direction of the Poynting flux related to the mesoscale electromagnetic turbulence at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 109, A10203, doi:10.1029/2004JA010432, 2004.
12. **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.*, 111, A12301, doi: 10.1029/2006JA011835, 2006a.
13. Kozelov B.V. and **Golovchanskaya I.V.** Scaling of electric field fluctuations associated with the aurora during northward IMF, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20109, doi:10.1029/2006GL027798, 2006.
14. **Golovchanskaya I.V.**, Kullen A., Maltsev Y.P., and Biernat H. Ballooning instability at the plasma sheet-lobe interface and its applications for polar arc formation, *J. Geophys. Res.*, 111, A11319, doi:10.1029/2006JA011976, 2006b.
15. **Golovchanskaya I.V.** On the seasonal variation of electric and magnetic turbulence at high latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13103, doi:10.1029/2007GL030125, 2007.
16. **Golovchanskaya I.V.** Assessment of Joule heating for the observed distributions of high-latitude electric fields, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16102, doi:10.1029/2008GL034413, 2008.
17. **Golovchanskaya I.V.**, Kozelov B.V., Sergienko T.I., Brändström U., Nilsson H., and Sandahl I. Scaling behavior of auroral luminosity fluctuations observed by Auroral Large Imaging System (ALIS), *J. Geophys. Res.*, 113, A10303, doi:10.1029/2008JA013217, 2008.
18. 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.*, 113, A03308, doi:10.1029/2007JA012575, 2008.
19. Chernouss S.A., **Golovchanskaya I.V.**, Kirillov A.S., Kornilov I.A., Kornilova T.A., Kozelov B.V., Safargaleev V.V., et al. In the light of aurora // Optical auroral research in northernmost Europe, Editor Ingrid Sandahl – Copenhagen, Nordic Council of Ministers, TemaNord 2009:557, ISBN 978-92-893-1900-3, 91pp., 2009.
20. **Golovchanskaya I.V.** and Kozelov B.V. On the origin of electric turbulence in the polar cap ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 115, A09321, doi: 10.1029/2009JA014632, 2010.
21. Kozelov B.V. and **Golovchanskaya I.V.** Derivation of aurora scaling parameters from ground-based imaging observations: Numerical tests, *J. Geophys. Res.*, 115, A02204, doi: 10.1029/2009JA014484, 2010.

22. **Golovchanskaya I.V.**, Kozelov B.V., Mingalev O.V., Fedorenko Y.V., and Melnik M.N. Magnetic perturbations in the events of broadband ELF turbulence observed by FAST, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17103, doi:10.1029/2011GL049003, 2011a.
23. **Golovchanskaya I.V.**, Kozelov B.V., and Fedorenko Y.V. Polarization of small-scale magnetic perturbations in the topside auroral ionosphere in the events of broadband ELF turbulence, *Proc.XXXIV seminar „Physics of auroral phenomena“*, 47-50, 2011b.
24. Kozelov B.V., **Golovchanskaya I.V.**, and Mingalev O.V. Inverse cascade in the structure of substorm aurora and non-linear dynamics of field-aligned current filaments, *Ann. Geophys.*, 29, 1349-1354, 2011.
25. **Golovchanskaya I.V.**, Kozelov B.V., and Despirak I.V. Seasonal asymmetry in the broadband ELF electric fields observed by the FAST satellite, *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.12.011>, 2013.