

На правах рукописи

КОЗЫРЕВА Ольга Васильевна

ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ БУРЬ

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН).

Официальные оппоненты:

Савин Сергей Петрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва;

Шалимов Сергей Львович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва;

Леонович Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк.

Защита диссертации состоится *12 декабря 2013 г. в 14 часов* на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123995, Москва, Д-242, Б. Грузинская ул., 10, 3-й этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте института www.ifz.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор физико-математических наук



О.Г. Онищенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена экспериментальному исследованию ультра-низкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний в околоземном пространстве. Особое внимание уделено специфике волн и излучений, возбуждающихся в магнитосфере и ионосфере Земли во время магнитных бурь и суббурь.

Актуальность темы. Магнитосфера, представляя собой внешнюю оболочку Земли, постоянно находится под воздействием солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). В результате этого взаимодействия в околоземной среде происходит возбуждение как иррегулярных магнитных вариаций (магнитных бухт) с временными масштабами 15–60 минут, так и электромагнитных волн различной природы в очень широком диапазоне частот от долей миллигерц (УНЧ диапазон) до десятков килогерц (ОНЧ диапазон). УНЧ волны (Ultra Low Frequency в западной терминологии), также называемые геомагнитными пульсациями, имеют периоды от долей секунд до десятков минут. По своей физической природе пульсации $Pc3-5$ ($f \sim 1-100$ мГц), принадлежащие к низкочастотной части УНЧ диапазона, являются магнитогидродинамическими (МГД) волнами в околоземной плазме, проникающими через ионосферу к земной поверхности.

Исследование физической природы УНЧ волн является одной из актуальных проблем современной геофизики. Эти волны имеют большое значение для изучения процессов в околоземном пространстве, подобно тому, как сейсмические волны важны для изучения строения земной коры и мониторинга сейсмической активности. Возбуждение геомагнитных пульсаций сопровождается многими геофизическими явлениями, такие как магнитные бури и суббури, полярные сияния. Геомагнитные пульсации играют важную роль в процессах передачи энергии в системе солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера и представляют собой неотъемлемую составляющую “космической погоды”. Наиболее значительная передача энергии от СВ в магнитосферу Земли происходит во время магнитных бурь, что определяет важность изучения

именно “буревых” пульсаций.

Прикладное значение изучения УНЧ волн связано с тем, что они являются естественным зондирующим сигналом для магнитотеллурического зондирования земной коры и диагностики магнитосферы. Кроме того, изучение УНЧ волн и геомагнитных вариаций необходимо для понимания механизмов и прогнозирования развития магнитных бурь, несущих потенциальную опасность для высокотехнологичной инфраструктуры. Во время магнитных бурь индуцированные токи оказывают негативное влияние на работу наземных технологичных устройств (линии электропередачи, трубопроводы и др.), а ускоренные до релятивистских энергий потоки магнитосферных электронов выводят из строя электронику космических аппаратов. Механизмы этого ускорения полностью не выяснены, но эмпирически установлена связь между УНЧ волновой активностью и интенсивностью потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе.

Источником магнитных бурь являются возмущения межпланетного пространства выбросами солнечной корональной массы (*CME*) или высокоскоростными потоками солнечной плазмы из корональных дыр (*CIR*). Суббури являются наиболее интенсивным элементом магнитной бури, создающим в ночном секторе резкое возмущение магнитного поля, усиление магнитосферно-ионосферных токов, уярчение полярных сияний, хотя суббури могут развиваться и без магнитных бурь. Развитие магнитных бурь и суббурь формально во многом подобно возникновению землетрясений. Так же как при сейсмическом процессе, энергия тектонических движений длительное время накапливается и высвобождается в моменты землетрясений, энергия потока солнечной плазмы накапливается в хвосте магнитосферы и спорадически высвобождается во время магнитных бурь и суббурь. Развитие как магнитных бурь, так и суббурь проходит через несколько фаз: подготовительную, главную и восстановительную. Механизмы магнитных бурь и суббурь до сих пор окончательно не выяснены, но построение их "волнового портрета" - выявление пространственно-временных закономерностей различных типов МГД волн,

служит одним из основных подходов к их пониманию.

Для физики околоземного пространства особое значение имеют сверхсильные магнитные бури ("супербури"). Каждая супербуря является уникальным явлением, сочетающим как некоторые общие закономерности, так и индивидуальные черты. Выяснение особенностей волновой активности во время супербурь, бурь и суббурь должно опираться на детальное знание общих закономерностей в магнитоспокойные периоды. Проведение комплексного пространственно-временного и спектрально-временного анализа большого массива данных одновременных наблюдений на глобальной сети наземных обсерваторий и на космических аппаратах, создание феноменологической картины волновой динамики сильных магнитных бурь и магнитоспокойных периодов необходимы для решения фундаментальной проблемы геофизики околоземного пространства – определения механизма передачи энергии в системе СВ – магнитосфера - ионосфера - Земля.

Геомагнитные пульсации диапазона $Pc5$ (периоды порядка нескольких мин), являясь наиболее мощным электромагнитным волновым процессом в околоземной среде, вносят заметный вклад в баланс энергии системы солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера, особенно во время геомагнитных возмущений. Однако ни один из существующих геофизических индексов не отражает уровень УНЧ волновой активности. Для количественной оценки интенсивности УНЧ волн назрела необходимость разработки специального геомагнитного индекса.

Цель диссертации. На основе комплексного пространственно-спектрального анализа данных геомагнитных наблюдений на глобальной сети наземных обсерваторий и на космических аппаратах выявить общие закономерности УНЧ волновой активности в разные фазы магнитных бурь и создать феноменологическую картину волновой динамики развития магнитных бурь и суббурь.

Задачи диссертации можно сформулировать следующим образом:

- анализ глобального распределения по земной поверхности спектральной мощности пульсаций диапазона *Pc5* на разных фазах магнитной бури, в зависимости от ее источника, параметров ММП и СВ, и построение феноменологического "волнового портрета" всех фаз магнитной бури;
- разработка нового УНЧ индекса, характеризующего мощность волн *Pc5* диапазона на земной поверхности, в магнитосфере и межпланетном пространстве, и применение этого индекса для анализа волновой активности в разные фазы магнитных бурь;
- определение специфики волновых возмущений на очень высоких широтах;
- выявление возможной взаимосвязи между квазипериодическими возмущениями геомагнитного поля и вариациями атмосферного электрического поля;
- анализ взаимодействия УНЧ волн, ОНЧ излучений и потоков энергичных частицами в магнитосфере.

Положения, выносимые на защиту

- Пульсации диапазона *Pc5-6* являются неотъемлемым элементом магнитных бурь, при этом на разных фазах бури механизмы возбуждения и физическая природа этих колебаний различны.
- На высоких широтах, являющихся проекциями пограничных областей магнитосферы – каспа, входных слоев, и полярной шапки, действуют специфические механизмы возбуждения особых типов УНЧ колебаний.
- УНЧ волны могут вызывать модуляцию потоков захваченных и высыпающихся энергичных магнитосферных электронов и их ускорение до релятивистских энергий, при этом флуктуирующие потоки высыпающихся электронов приводят к модификации E-слоя ионосферы и генерации геомагнитных колебаний.

- Высокоширотные УНЧ колебания являются агентом, осуществляющим связь между геомагнитными возмущениями и атмосферным электричеством.
- Геомагнитный волновой индекс, характеризующий уровень УНЧ волновой активности в околоземном пространстве, является важной характеристикой космической погоды.

Научная новизна

- Разработан новый геомагнитный индекс, характеризующий уровень УНЧ волновой активности на земной поверхности, магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве. Показано, что УНЧ индекс оказывается эффективным параметром для статистического анализа различных процессов в солнечно-земной физике: определения различий в отклике магнитосферы на разные типы магнитных бурь, волнового ускорения релятивистских электронов.
- Обнаружено, что на различных фазах больших магнитных бурь механизмы возбуждения *Pc5-6* колебаний оказываются различными. В начальную фазу бурь при большом динамическом давлении СВ возбуждается особый класс крупномасштабных *Pc5* пульсаций. В главную фазу бури при подходе ведущего края магнитного облака волновая активность резко перемещается из полярных широт в замкнутую магнитосферу. На восстановительной фазе супербурь происходит возбуждение качественно нового типа глобальных пульсаций *Pc5* с аномально большой амплитудой и глубоким проникновением в магнитосферу до низких широт.
- Выявлены эффекты контроля магнитосферных пульсаций нестационарными процессами в СВ: возбуждение *Pc4-6* пульсаций импульсами динамического давления и межпланетной ударной волной, внезапное прекращение генерации *Pc5-6* при подходе к Земле ведущего края межпланетного магнитного облака, триггерная стимуляция глобальных *Pc5* волн всплесками флуктуаций плотности СВ.

- Выделены специфические пульсации в высокоширотных областях (соответствующих ионосферной проекции входных слоев магнитосферы) и исследована их динамика во время магнитных бурь. В частности, обнаружен эффект резкого подавления дневных длиннопериодных колебаний в каспе во время начала суббури на ночной стороне.
- По наземным и спутниковым данным показана связь авроральных геомагнитных $Pc5-6$ и $Pi2-3$ пульсаций с пульсирующими высыпаниями электронов, возмущениями ионосферного электроджета, и полярными сияниями.
- Найден отклик вариаций атмосферного электрического поля на магнитосферные суббури, высокоширотные долгопериодные vlp и $Ps6$ геомагнитные пульсации, и резкое понижение интенсивности космических лучей во время магнитных бурь.
- Разработан специализированный пакет программ для анализа данных наземных и спутниковых магнитометров, включающий оригинальные методы спектральной оценки, расчета планетарного 1D и 2D распределения спектральной мощности УНЧ волн, динамических широтных диаграмм мощности.

Практическая значимость работы. Разработанные автором методики построения глобального пространственного и пространственно-временного распределения геомагнитных пульсаций на земной поверхности активно применяются для исследования колебаний разных частотных диапазонов и различной природы. Детальное знание пространственно-временных закономерностей УНЧ волн во время больших магнитных бурь исключительно важно для построения моделей динамики релятивистских электронов в околоземном пространстве. УНЧ индекс оказался полезен не только в геофизике, но и в медицине/биологии, где он используется для исследования влияния геомагнитных пульсаций на живые организмы. Экспериментально обнаруженные в ходе работы закономерности возбуждения УНЧ

электромагнитных волн в околоземной плазме представляют важный материал для теоретического моделирования.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены или автором, или при его активном участии в работе коллектива соавторов. В большинстве исследований отбор событий для анализа, формирование необходимой базы данных, разработка пакета компьютерных программ, обработка данных, анализ результатов и их обобщение выполнены лично автором.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, 3 приложений, списка литературы и списка публикаций автора. Общий объем работы составляет 312 страниц, в том числе 97 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 217 наименований.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены автором на многих отечественных и международных конференциях:

- Международный симпозиум «Полярные геомагнитные явления» Суздаль, 1986;
- Генеральные ассамблеи международного геофизического и геодезического союза (IUGG): XVIII (Гамбург, 1983), XIX (Ванкувер, 1987), XX (Вена, 1991), XXI (Боулдер, 1995), XXII (Бирмингем, 1999), XXIV (Перуджа, 2007);
- Ассамблеи Международной ассоциации по геомагнетизму и аэрономии (IAGA): Упсала, 1997; Ханой, 2001; Шопрон, 2009; Юкатан, 2013;
- Ассамблеи Европейского геофизического союза (EGU): Вена 2007, 2008;
- международные конференции по суббурям (ICS): Версаль, 1996; Санкт-Петербург, 1998; Леви, 2004; Калифорния, 2010, Люнебург, 2012;
- международные конференции «Проблемы Геокосмоса» (Санкт-Петербург): 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012.
- международные семинары по ОНЧ / КНЧ дистанционному зондированию ионосферы и магнитосферы (VERSIM): Соданкюла, 2006; Тихани, 2008;

- всероссийские семинары «Физика авроральных явлений» (Апатиты): с 1997 по 2012 г.;
- Международная конференция «Солнечные экстремальные события» (SEE): Москва, 2004; Ереван, 2006;
- Международный симпозиум памяти Ю.И. Гальперина «Авроральные явления и солнечно-земные связи», Москва, 2003;
- Международная конференция «Общества наук о Земле стран Азии и Океании» (AOGS): Бангкок, 2007;
- Международная конференция по атмосферному электричеству (ICAE): Пекин, 2007;
- Международный симпозиум по солнечно-земной физике (SCOSTEP): Берлин, 2010;
- Международный семинар «Низкочастотные волновые процессы в космической плазме» (Звенигород, 2007);
- Международная конференция «Плазменно-волновые процессы в магнитосферах, ионосферах и атмосферах Земли и планет», Н. Новгород, 2009;
- ежегодные всесоюзные конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН): с 2009 по 2013.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 75 публикациях в рецензируемых российских и зарубежных журналах, из них 72 статьи опубликованы в изданиях из списка ВАК РФ.

Благодарности. Автор выражает благодарность и признательность проф. Н.Г. Клейменовой, своему научному наставнику, в соавторстве с которой написаны большинство работ, представленных в диссертации. Автор глубоко признателен проф. В.А. Пилипенко за помощь и поддержку, плодотворные обсуждения материалов диссертации. Автор искренне благодарен своим коллегам – Н.В. Яговой, Е.Н. Федорову за неоценимую помощь и важные замечания к работе. Автор также признателен за годы совместной работы талантливым коллегам и прекрасным людям из ИФЗ и других институтов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** сформулированы актуальность, цели и задачи исследования, отмечена научная новизна полученных результатов, дана общая характеристика работы.

Глава 1. Обзор: магнитные бури, суббури и пульсации

В **Главе 1** представлен обзор, отражающий сегодняшнее состояние исследований низкочастотных электромагнитных колебаний (типа *Pc3-5*, *Pi3*, *ipcl* и др.), рассмотрены возможные механизмы их генерации. Особое внимание уделяется специфике геомагнитных пульсаций во время магнитных бурь и суббурь. Подчеркивается, что физика магнитосферных процессов во время типичных магнитных бурь и очень сильных магнитных бурь с $|Dst| > 300$ нТ, так называемых "супербурь", может быть различной. Отмечены нерешенные проблемы физики УНЧ волн, в частности: одинаковы ли механизмы возбуждения УНЧ волн при слабовозмущенных условиях и при сильных магнитных бурях? Как реагируют на возмущения космической погоды специфические высокоширотные колебания? Есть ли связь между геомагнитными возмущениями и атмосферным электричеством? Каким параметром можно было бы характеризовать общепланетарную УНЧ волновую активность? и др.

Глава 2. Исследование волнового почерка разных фаз магнитных бурь

Глава 2 посвящена исследованию особенностей длиннопериодных пульсаций диапазона *Pc5-6* ($T=5-20$ мин) в разные фазы магнитных бурь. Известно, что магнитные бури вызываются либо корональными выбросами солнечной массы (магнитными облаками), либо высокоскоростными потоками СВ. Взаимодействие возмущенного потока солнечной плазмы с магнитосферой Земли имеет сложный характер, что отражается в наличии разных фаз магнитной бури, и, соответственно, различными оказываются свойства УНЧ волн и механизмы их возбуждения. Анализ наблюдений пульсаций,

выполненный по данным глобальной сети наземных станций во время больших магнитных бурь, вызванных как межпланетными магнитными облаками, так и высокоскоростными потоками СВ, позволил нам установить волновой "почерк" этих бурь.

Традиционные представления о природе типичных $Pc5$ пульсаций основываются на следующей физической картине: периодические возмущения границы магнитосферы, возбуждаемые неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца (К-Г), ослабляются, распространяясь вглубь магнитосферы, но на резонансной оболочке, где частота возмущения совпадает с собственной частотой колебаний силовых линий, возбуждаются альвеновские колебания магнитной оболочки. В резонансной области амплитуда колебаний испытывает резкое частотно-зависимое усиление, а широтная зависимость фазы претерпевает резкое изменение. Резонансная структура $Pc5$ колебаний в ионосфере была обнаружена по данным системы когерентных радаров STARE и на земной поверхности - на плотной меридиональной сети магнитометров.

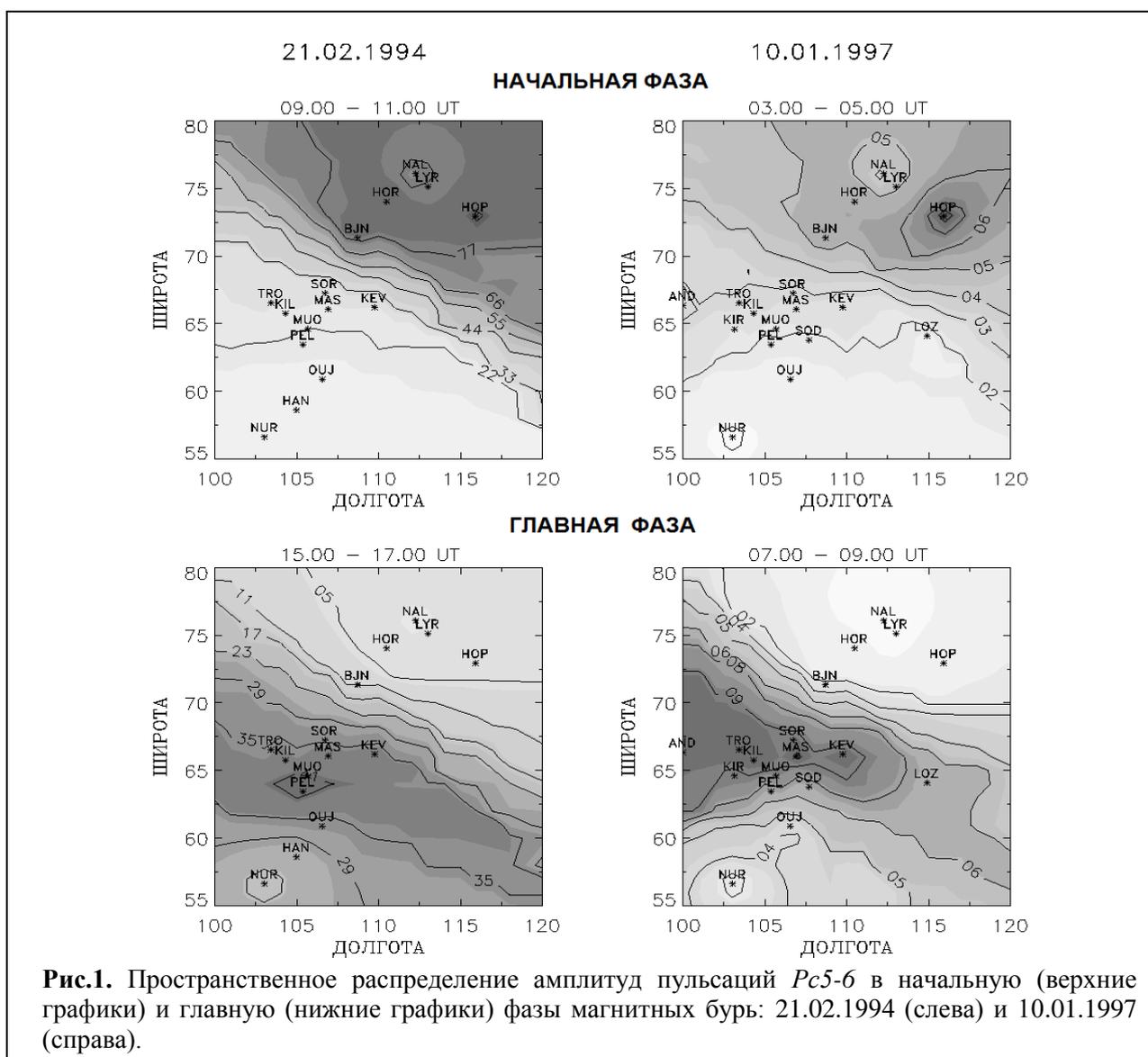
Важную информацию о природе колебаний можно получить из анализа особенностей распространения колебаний в азимутальном (долготном) направлении. Анализ данных наблюдений $Pc5$ пульсаций на сети обсерваторий на авроральных широтах $64-65^\circ$ показал, что: а) происходит усиление $Pc5$ колебаний по мере распространения сигнала от полуденного меридиана как на восток, так и на запад; б) фазовая скорость распространения волн на утреннем фланге почти в 4 раза меньше, чем на вечернем; в) волновые пакеты и частота колебаний в утреннем и вечернем секторах не совпадают. Таким образом, показано, что при распространении от полуденного меридиана к флангам магнитосферы фазовая скорость $Pc5$ волн определяется не скоростью СВ, а, по-видимому, свойствами магнитосферного МГД волновода.

2.1. Возбуждение УНЧ колебаний в начальную фазу магнитных бурь

Исследование волнового отклика магнитосферы в начальную фазу сильных магнитных бурь проведено для бурь, вызванных межпланетными магнитными облаками. Подход к орбите Земли переднего фронта облака сопровождается

усилением динамического давления СВ на дневную магнитосферу, что приводит к сжатию магнитосферы и развитию начальной фазы магнитной бури, а также к возбуждению длиннопериодных пульсаций $Pc5-6$ ($T=5-20$ мин). Установлено, что генерация этих пульсаций прекращается с подходом к Земле ведущего края магнитного облака. Несмотря на некоторые различия в деталях, проведенный анализ показал наличие общих типичных закономерностей пространственно-временного распределения $Pc5-6$ пульсаций в начальную фазу сильных магнитных бурь (Рис. 1):

- столкновение межпланетной ударной волны с магнитосферой (внезапное начало бури - SC) проявляется в возбуждении всплеска крупномасштабных



пульсаций диапазона $Pc5-6$ одновременно на всех широтах с наибольшей амплитудой в дневном секторе полярной шапки;

- во время прохождения Земли через турбулентную оболочку магнитного облака (начальная фаза бури) наиболее интенсивные $Pc5-6$ пульсации наблюдаются в полярных широтах;

- всплески $Pc5-6$ пульсаций на высоких широтах появляются синхронно с появлением аналогичных волновых пакетов в вариациях параметров ММП и СВ на переднем фронте магнитного облака;

- с подходом к магнитосфере ведущего края магнитного облака (главная фаза бури) волновая активность перемещается в замкнутую магнитосферу.

Обнаруженные закономерности позволяют предположить, что основным агентом, отвечающим за возбуждение $Pc5-6$ пульсаций в полярных широтах в начальную фазу магнитной бури, является проникновение МГД вариаций во внешнюю магнитосферу, как из межпланетной среды, так и из магнитослоя.

Другим источником пульсаций в высоких широтах могут быть флуктуации интенсивности продольных электрических токов зоны 1 между ионосферой и магнитосферой. Об этом свидетельствует наличие тонкой временной структуры полярной суббури в виде всплесков $Pc5-6$ пульсаций, развивающейся при прохождении переднего фронта магнитного облака и южном направлении Vz компоненты ММП. Наблюдаемые на земной поверхности $Pc5-6$ пульсации являются, предположительно, отражением появления в ионосфере квазипериодических неоднородностей проводимости, вызванных пульсирующими высыпаниями электронов в области вытекающих из ионосферы продольных токов. Модулирующим агентом интенсивности продольных токов могут быть флуктуации ММП и СВ или пульсирующее пересоединение силовых линий магнитосферного и межпланетного магнитных полей.

Резкое поджатие магнитосферы, вызванное межпланетной ударной волной, на земной поверхности проявляется как импульс SC - внезапное начало магнитной бури. В работе проанализированы события, в которых SC

оказывались триггером, стимулирующим суббурю и генерацию длительных (до нескольких часов) $Pc5$ пульсаций в долготном диапазоне от вечерних до полуденных часов. Такие эффекты представляют собой наглядный пример триггерных явлений в геофизике, при которых малые внешние возмущения стимулируют высвобождение внутренней энергии системы, находящейся в метастабильном состоянии. Было обнаружено, что в начальной фазе большой магнитной бури (например, 15.05.2005) развивается интенсивное (до ~ 1000 нТл) бухтообразное возмущение, амплитуда которого максимальна в раннем утреннем секторе. Эта магнитная бухта быстро перемещается от геомагнитных широт $\sim 65^\circ$ в полярную шапку. Морфологические характеристики этого возмущения не позволяют отнести его к категории классической магнитосферной суббури. Развитие магнитной бухты на фоне положительных значений B_z сопровождалось пульсациями, наиболее интенсивными в полярной шапке на тех же широтах, где регистрировался максимальный эквивалентный ионосферный ток. Это позволило предположить, что наблюдаемые пульсации являются отражением квазипериодических флуктуаций системы NBZ продольных электрических токов, возникающих при северном направлении B_z ($B_z > 0$). Отмечено подобие вейвлет-структуры пульсаций в полярной шапке и флуктуаций ММП, что может свидетельствовать о прямом проникновении и трансформации МГД вариаций из СВ в полярную шапку. Пульсации на частотах выше 4 мГц наблюдаются синфазно в большой области широт и долгот в утреннем и дневном секторах, что может быть связано с возбуждением объемных колебаний магнитосферной полости.

Стимулированные SC $Pc5-6$ пульсации на начальной фазе магнитной бури были локализованы вблизи предполагаемой проекции границы магнитосферы и имели спектральную структуру, отличающуюся от структуры пульсаций на более низких и более высоких широтах. Источником этих колебаний может быть неустойчивость К-Г на флангах магнитосферы, триггерно возбуждаемая SC при большой скорости СВ. Кроме того, высокоширотные пульсации могут

быть отражением генерации волн в турбулентном погранслое в области магнитосферной воронки (каспа).

Разновидность УНЧ волн - крупномасштабные $Pc5$ пульсации ($T \sim 8-10$ мин), была обнаружена в начальную фазу магнитных бурь при большом динамическом давлении СВ и $B_z > 0$ (например, 16.04.1999, 24.03.1991). В начальную фазу таких бурь пульсации диапазона $Pc5$ с дискретным спектром и малыми азимутальными волновыми числами $m \sim 1$ наблюдались не только в полярной шапке, а во всей магнитосфере от полярных до экваториальных широт, даже при отсутствии колебаний в ММП и СВ. Возможно этот тип $Pc5$ колебаний является периодическим откликом магнитосферы на процессы в турбулентном погранслое на внешней границе магнитосферы. Перечисленные выше возможные механизмы возбуждения пульсаций в полярных широтах в начальную фазу магнитной бури могут действовать как отдельно, так и одновременно в зависимости от конкретной геофизической ситуации.

Наряду с крупномасштабными квази-монохроматическими $Pc5$ пульсациями, на начальной фазе бурь в утреннем секторе высоких широт наблюдались широкополосные (квази-шумовые) колебания в полосе частот $\sim 2.5-3.5$ МГц с $m \sim 3-5$ и некогерентными в пространстве волновыми пакетами. Четкое временное и пространственное совпадение области максимальных амплитуд этих пульсаций и положения западного ионосферного электроджета позволяет предположить, что эти пульсации являются отражением вариаций интенсивности авроральной 3D токовой системы ("шум аврорального электроджета").

Для проблемы воздействия УНЧ волн на динамику внешнего радиационного пояса критическим является вопрос о глубине проникновения пульсаций типа $Pc5-6$ на низкие и экваториальные широты. Показано, что на этих широтах крупномасштабные $Pc5-6$ пульсации во время начальной фазы бурь возникают в виде отдельных пространственно-когерентных волновых пакетов с $m \sim 1$ на различных долготах. Спектры колебаний (с максимумом на $f < 2$ МГц) в каждом всплеске подобны и не зависят от широты и долготы. Вблизи экватора

происходит резкое усиление амплитуды волн, при этом наибольшее усиление отмечается вблизи полдня и уменьшается к утренним и вечерним часам. Это экваториальное усиление обусловлено, по всей вероятности, влиянием высокой каулинговской проводимости экваториальной ионосферы. Генерация всплесков пульсаций связана с подходом к Земле серии резких скачков динамического давления СВ или напряженности ММП. В то же время, подход к магнитопаузе ведущего края магнитного облака, сопровождаемого резким падением динамического давления СВ, возрастанием напряженности и сменой ориентации ММП, приводит к внезапному прекращению генерации *Pc5-6* пульсаций.

2.2. Геомагнитные пульсации главной фазы больших магнитных бурь

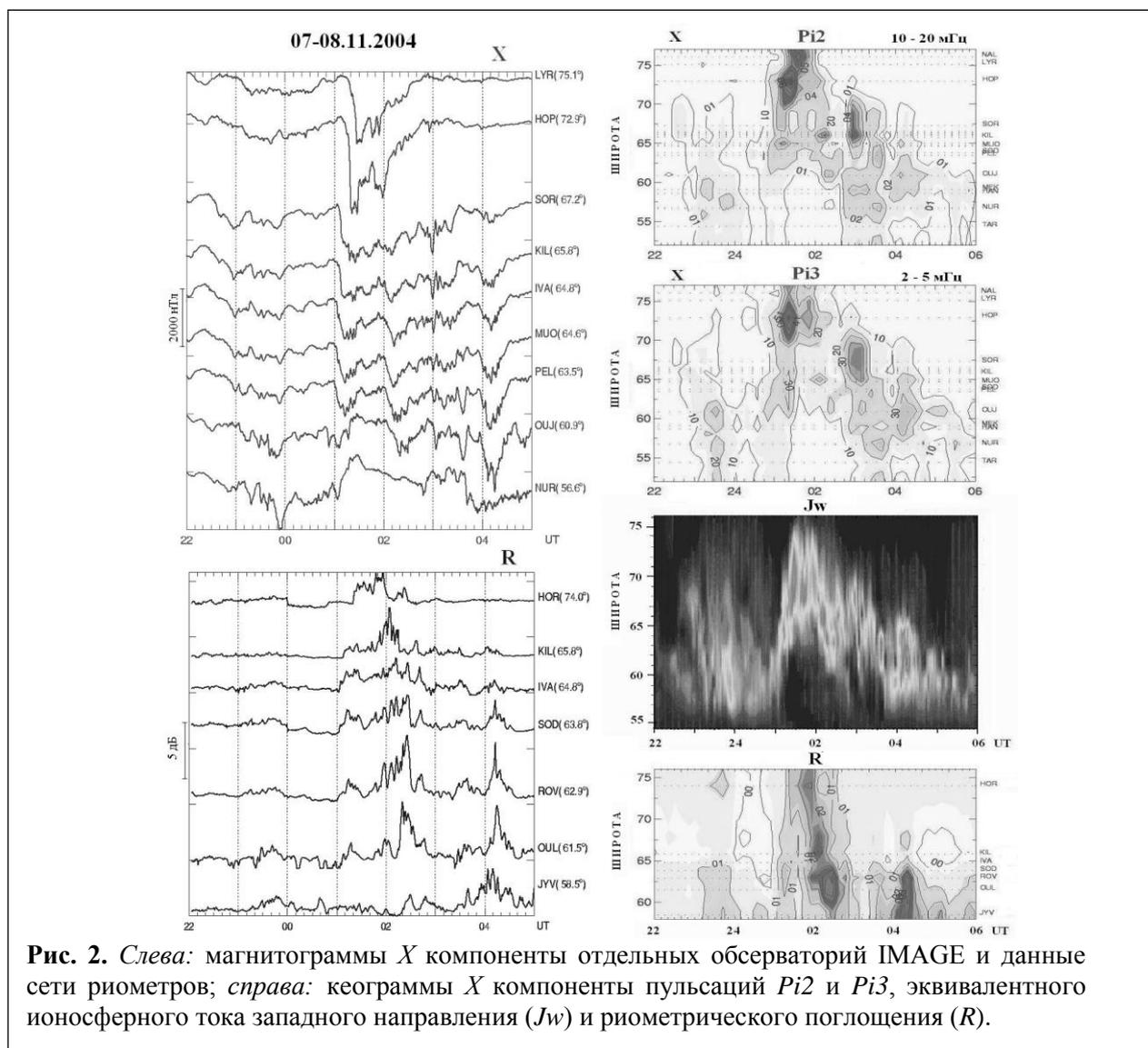
Главная фаза бури начинается с поворота V_z компоненты ММП на юг, что создает условия для пересоединения на магнитопаузе магнитосферного и межпланетного магнитных полей. На этой фазе развиваются суббури в ночном и раннем утреннем секторе на авроральных широтах, а в свою очередь развитие суббурь сопровождается возбуждением иррегулярных пульсаций *Pi3* ($T \sim 1-20$ мин). Наиболее интенсивные геомагнитные возмущения наблюдаются во время супербурь.

Рассмотрены особенности пространственно-временной динамики ночных *Pi3* и дневных *Pc5* пульсаций во время супербурь в октябре 2003 г. и ноябре 2004 г. Суббури во время этих событий сопровождались иррегулярными пульсациями *Pi3* с необычно большой амплитудой, превышающей типичные значения почти на порядок. Пульсации *Pi3* полностью отражали пространственно-временную динамику суббурь.

Обнаружено, что в главную фазу супербурь происходит необычно большое (на $\sim 10^\circ$) смещение геомагнитных возмущений на более низкие широты, а не к полюсу, как при обычных бурях. Так, после серии суббурь 30.10.2003 карты глобального распределения интенсивности пульсаций показывают положение полярной границы *Pi3* в ночном секторе на геомагнитной широте $\sim 60^\circ$ ($L \sim 4$).

По-видимому, эта граница является также полярной границей авроральной зоны.

В главную фазу супербури 7-8 ноября 2004 г. в ночном секторе наблюдалась быстрая экспансия геомагнитных возмущений к полюсу: от 65-66° до 74-75° с резким возрастанием амплитуд до 2000-2500 нТл и образованием двойного аврорального овала. Развитие авроральной суббури в полярной шапке сопровождалось высыпанием энергичных электронов (риометрическое поглощение) и генерацией пульсаций типа *Pi2-3*. Пространственная динамика западной электроструи, пульсаций *Pi2/Pi3* и высыпаний энергичных частиц подобна, что может свидетельствовать об их общем источнике (Рис. 2).



2.3. УНЧ волны на восстановительной фазе больших магнитных бурь

В восстановительную фазу бури интенсивный перенос энергии от СВ в магнитосферу, следовательно, и суббури, прекращаются, однако магнитосферные процессы продолжают развиваться. На этой фазе бури принципиальную роль в динамике бесстолкновительной околоземной плазмы начинают играть волновые процессы. В авроральных широтах утреннего сектора обычно наблюдаются пульсации типа $Pc5$. Особенности их пространственной структуры: узкая локализация по широте и резкое изменение хода фазы на широте максимума, указывают на резонансное возбуждение локальных альвеновских колебаний силовых линий источником во внешней магнитосфере. Однако характеристики пульсаций диапазона $Pc5$ на восстановительной фазе супербурь могут значительно отличаться от свойств «классических» Pc пульсаций. Так, на восстановительной фазе супербурь (31.10.2003, 21.11.2003, 15.05.2005) наблюдались пульсации $Pc5$ с очень большой (до 600 нТл!) амплитудой, более чем на порядок превышающей типичные значения. Свойства этих пульсаций не соответствуют особенностям обычных $Pc5$ пульсаций в слабозвущенные периоды, *Потаповым и др.* [*Adv. Space Res.*, 2006] их предложено было называть глобальными пульсациями:

- глобальные $Pc5$ пульсации более интенсивны после полудня, чем утром;
- структура глобальных $Pc5$ пульсаций не соответствует модели альвеновского резонанса силовых линий: колебания когерентны с сопоставимыми амплитудами в очень большом диапазоне широт, спектральные максимумы не зависят от широты, пространственные распределения плотности спектральной мощности на различных частотах подобны, не происходит резкого изменения хода фазы на широте максимальной амплитуды. Поляризация интенсивных (~ 200 нТл) дневных глобальных пульсаций в горизонтальной плоскости может меняться в течение события;
- глобальные карты распределения мощности $Pc5$ волн (Рис. 3) показывают необычно глубокое проникновение послеполуденных волн в магнитосферу

вплоть до средних широт $\Phi \sim 40-50^\circ$ с двумя областями усиления пульсаций, при этом в области минимума амплитуды (вероятно, на плазмопаузе) происходит переворот фазы волны;

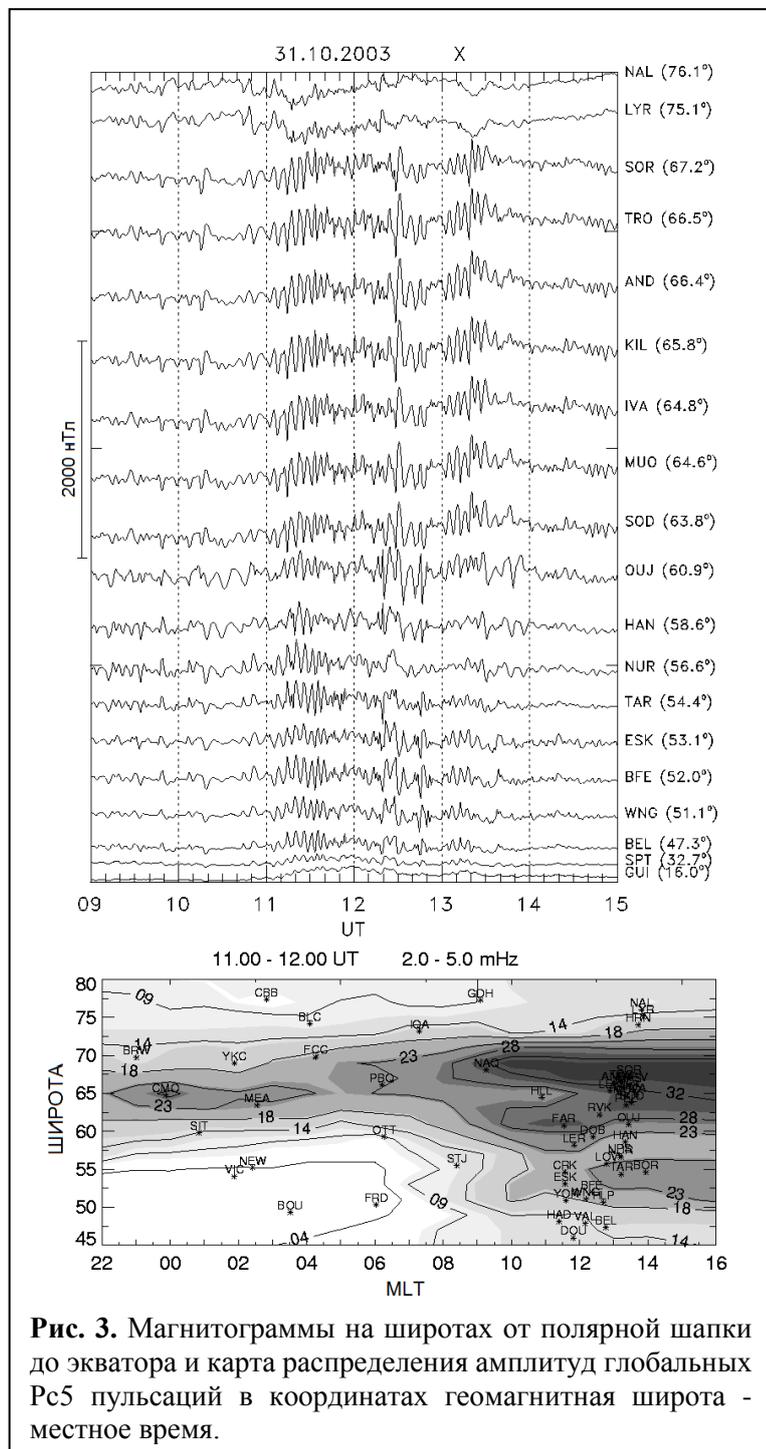


Рис. 3. Магнитограммы на широтах от полярной шапки до экватора и карта распределения амплитуд глобальных $Pc5$ пульсаций в координатах геомагнитная широта - местное время.

- Во время восстановительной фазы супербури наблюдается асимметрия генерации пульсаций относительно полдня: в утреннем секторе интенсивные $Pc5$ колебания регистрировались на авроральных широтах, а в послеполуденном – на субавроральных и средних широтах, при этом спектры пульсаций в утреннем и вечернем секторах разные. Это указывает на то, что источники волн в утреннем и послеполуденном секторах независимы.

Во всех событиях, когда наблюдались глобальные $Pc5$ колебания, скорость СВ очень высока (>1000 км/с), что казалось бы создает благоприятные условия для

развития неустойчивости К-Г и перманентной генерации волн. Однако усиление $Pc5$ активности происходило лишь эпизодически, и эти периоды (длительностью 2-3 часа) совпадают с подходом к магнитосфере иррегулярных всплесков плотности СВ. Таким образом, возбуждение глобальных $Pc5$

пульсаций на восстановительной фазе супербури может происходить триггерным образом, и таким триггером оказывается импульсивное повышение плотности СВ.

Во время восстановительной фазы супербури (15-17.07.2000) при положительной B_z компоненте ММП суббуриевая активность не прекращается, а резко перемещается из субавроральных в полярные широты. $Pc5$ пульсации, наблюдаемые в утреннем секторе на авроральных широтах после суббури на главной фазе и после полярной суббури на восстановительной фазе, были в общих чертах похожими. В амплитудных спектрах $Pc5$ пульсаций имелось два максимума: в полосе частот 1-2 мГц и 3-4 мГц. При этом наиболее интенсивные колебания в полосе 1-2 мГц наблюдались в утреннем секторе на авроральных широтах ($\Phi > 62^\circ$), а более высокочастотные (3-4 мГц) пульсации - в послеполуденном секторе на субавроральных и средних широтах ($\Phi < 62^\circ$). Эти пульсации могут соответствовать альвеновским резонансным колебаниям, возбуждающимся, соответственно, вне плазмопаузы (1-2 мГц) и внутри плазмосферы (3-4 мГц). Всплески $Pc5$ пульсаций наблюдались вплоть до низких и экваториальных широт, однако в спектре оставались лишь частоты в полосе 1-2 мГц.

Выводы, полученные в результате анализа УНЧ волновой активности во время супербури, позволили высказать следующие физические гипотезы:

- глобальные $Pc5$ волны оказываются не локализованными альвеновскими колебаниями силовых линий, а колебаниями магнитосферного МГД волновода;
- возбуждение глобальных $Pc5$ волн происходит благодаря совместному действию высокой скорости СВ и повышенных флуктуаций его плотности, вызывающих триггерное возбуждение неустойчивости К-Г;
- глобальные $Pc5$ волны важны для динамики околоземной плазмы тем, что переносят волновую энергию от высокоскоростных потоков СВ в магнитосферу на низкие L -оболочки в те периоды, когда пересоединение магнитосферного поля и ММП уже прекратилось. Отличие глобальных $Pc5$ пульсаций во время восстановительной фазы супербури от обычных $Pc5$ волн следует учитывать

при создании адекватной модели диффузии/ускорения релятивистских электронов МГД волнами.

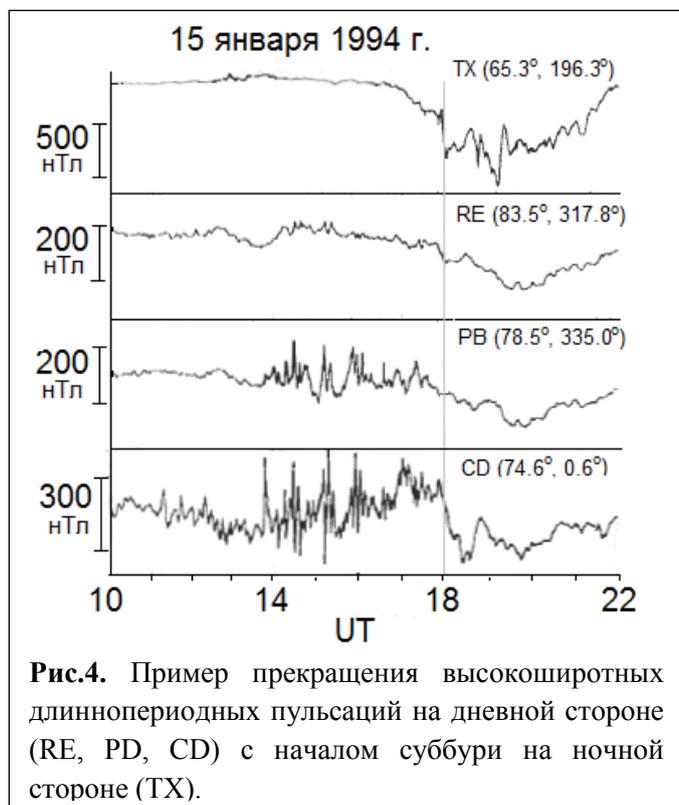
Глава 3. Специфические геомагнитные пульсации в высоких широтах

3.1. Длиннопериодные пульсации на широтах каспа

Высокие геомагнитные широты имеют особое значение для космической геофизики. В силу особенностей топологии околоземного магнитного поля именно эти широты геомагнитно сопряжены с пограничными областями магнитосферы, где происходят основные процессы взаимодействия СВ с магнитосферой Земли. Это взаимодействие имеет нестационарный и турбулентный характер, что обуславливает появление специфических иррегулярных возмущений на высоких широтах. В этой главе рассмотрены пространственно-временные характеристики таких высокоширотных пульсаций на станциях в Арктике и Антарктике. В одном и том же спектральном диапазоне (1-5 мГц) на высоких широтах ($\Phi > 70^\circ$) наблюдаются колебания с различными морфологическими свойствами и, соответственно, разной физической природы: *ipcl* (Irregular Pulsations at Cusp Latitudes) с $T \sim 3-30$ мин, *np* - высокочастотная часть *ipcl* с $T \sim 3-8$ мин, *Pi3* и *Pc5*, *vlp* (Very Long Period) с $T \sim 15-30$ мин. Однако теоретические модели, описывающие каждый тип колебаний, пока отсутствуют. Также мало исследовано влияние возмущений космической погоды на динамику этих высокоширотных колебаний.

Нами установлено, что волновые пакеты околополуденных *ipcl* пульсаций по данным антарктических станций ($\Phi \sim 80.5^\circ S$) распространяются в сторону хвоста, и, таким образом, их источник связан с СВ. На большом экспериментальном материале за различные годы было обнаружено внезапное замирание дневных пульсаций *ipcl* на широтах каспа во время резкого начала суббури в ночном секторе. Эффект прекращения *ipcl* имеет место не только на широте возможной проекции каспа, но и на всех широтах, где эти пульсации регистрировались до начала суббури (Рис. 4). Подавление дневных *ipcl* при начале суббури происходит в северном полушарии при ММП $B_y < 0$, в южном

полушарии этот эффект наблюдался только при $V_y > 0$. Обнаруженный эффект пока не получил адекватного теоретического объяснения, но указывает на то, что развитие суббури не локальный процесс в ночном секторе, а охватывает всю магнитосферу.



Для понимания продольной структуры возмущений вдоль геомагнитных силовых линий важно знание сопряженности колебаний между северным и южным полушариями. На широтах среднестатистического положения каспа в слабозмущенных условиях найдена четкая сезонная северо-южная асимметрия в интенсивности *ipcl* пульсаций: интенсивность в летнем полушарии в 3-4 раза выше, чем в зимнем. Этот

факт указывает на то, что источник *ipcl* пульсаций является, по-существу, генератором тока, и создает наибольшее возмущение в освещенной ионосфере.

Для выявления особенностей симметричного/асимметричного появления длиннопериодных *pr* пульсаций в противоположных полушариях, проведено исследование по данным наблюдений в Арктике и Антарктике на 6 парах сопряженных обсерваторий на высоких геомагнитных широтах (66°-80°). Внезапное начало магнитной бури (SC) сопровождается симметричным возбуждением пульсаций вблизи дневных полярных каспов с близкими амплитудами. В условиях ММП $B_z > 0$ и $V_y < 0$ квазипериодические вариации магнитного поля наблюдались только в северной полярной шапке. Когда B_z и V_y компоненты ММП близки к нулю, всплески пульсаций в обоих полушариях регистрировались одновременно, но отличались по спектральному составу и пространственному распределению. Максимум амплитуды колебаний в

северном полушарии наблюдался на более высоких широтах, чем в южном полушарии, при этом амплитуда в Арктике была выше, чем в Антарктике. Возможным объяснением этого факта может быть резкое отличие в географических и геомагнитных долготах и широтах в полярной шапке, что приводит к различной проводимости ионосферы, влияющей на амплитуду пульсаций, в геомагнитно-сопряженных областях.

Важную информацию о природе колебаний можно получить по свойствам их отклика на импульсное возмущение типа *SC*. Стимулированные *SC* длиннопериодные (*np*) пульсации в северном и южном каспах наблюдались симметрично и были подобными по амплитуде, вейвлет-структуре и длительности. Это свидетельствует о том, что эти пульсации являются собственными колебаниями последних замкнутых силовых линий вблизи экваториальной границы каспа. В отличие от них, интенсивные долгопериодные вариации магнитного поля с $T > 30$ мин наблюдались при ММП $B_z > 0$ и $B_y < 0$ только в северной полярной шапке.

3.2. Геомагнитные пульсации Pc3-4 на широтах каспа и полярной шапки

Касп является магнитосферной воронкой, где плазма из переходной области (магнитослой) имеет прямой доступ к ионосфере, и потому эта область наиболее чувствительна к импульсным воздействиям межпланетной среды. Обнаружено, что на широтах каспа межпланетные ударные волны (*SC*) возбуждают в магнитосфере Земли колебания диапазона *Pc4* (8-20 мГц). Эти колебания имеют глобальный характер: спектральный состав волновых пакетов подобен даже на станциях, разнесенных до 8 часовых поясов. Кроме того, пульсации *Pc4* в области утренней полярной шапки реагируют на подход к магнитосфере Земли переднего фронта межпланетного магнитного облака во время магнитной бури (10.01.1997). Всплески полярных пульсаций *Pc4* на утренней стороне сопровождалась интенсификацией полярных сияний, а их амплитуда контролировалась B_y компонентой ММП и скоростью СВ. Показано, что "буревые" полярные *Pc4* колебания не могут быть объяснены

результатом генерации ионно-циклотронных волн в форшоке, как обычные *Pc3-4* пульсации, а возбуждаются на ионосферных высотах в области интенсификации продольных электрических токов, направленных из ионосферы. Конкретные механизмы их генерации и формирования частотного состава остаются неизвестными.

Pc3 пульсации (20-50 мГц) - наиболее часто наблюдаемый тип УНЧ волн. Традиционно их источник связывается с УНЧ волнами в форшоковой области перед отошедшей ударной волной (upstream waves), которые затем неустановленным пока образом просачиваются через магнитослой во внутреннюю магнитосферу. Показано, что помимо среднеширотных *Pc3* пульсаций, с тем же источником связаны пульсации *Pc3-4* диапазона на касповых широтах. Однако основные каналы проникновения волновой энергии на средние и высокие широты предположительно различны: для высоких широт - это прямое проникновение в области входных слоев, для средних - распространение и резонансная трансформация в приэкваториальной плоскости магнитосферы. Анализ синхронных наблюдений пульсаций *Pc3* на обсерваториях в одном долготном секторе в полярных ($\Phi=80^\circ$) и средних ($\Phi=46^\circ$) широтах показал общий характер их активизации, при этом интенсивность пульсаций вблизи каспа в несколько раз выше, чем на средних широтах. Однако отдельные волновые пакеты в преобладающем числе случаев оказываются нескоррелированными.

Глава 4. Взаимодействие низкочастотных пульсаций *Pc5/Pi3* с энергичными частицами и КНЧ-ОНЧ излучениями

4.1. Высыпания энергичных электронов и полярные пульсации *Pc5/Pi3*

УНЧ волны тесно связаны с энергичными частицами, между ними могут происходить различные виды взаимодействий: возбуждение УНЧ волн в результате неустойчивости энергичных частиц; модуляция ионосферных полей и токов электрическим полем волны, квази-периодическое высыпание частиц и модификация ионосферы, модуляция потоков захваченных в магнитосферную

ловушку частиц волнами; ускорение экваториальных и авроральных электронов УНЧ волнами. Для выявления эффектов взаимодействия волна-частица по наземным наблюдениям, данные магнитометров должны быть дополнены данными риометрических наблюдений - измерениями степени поглощения в ионосфере космических радишумов, характеризующими уровень модификации плотности нижней ионосферы высыпающимися электронами с энергиями порядка нескольких десятков кэВ.

В этой главе рассмотрено магнитосферно-ионосферное взаимодействие на разных фазах магнитных бурь и суббурь по данным одновременных наблюдений геомагнитных вариаций и пульсаций, полярных сияний, высыпаний энергичных частиц и интенсивности ОНЧ излучений. Обнаружено, что появлению пульсирующих высыпаний предшествовало развитие суббури. При этом, если геомагнитные пульсации диапазона *Pc5* наблюдались как во время суббури, так и после нее, то пульсации в риометрическом поглощении регистрировались, как правило, только после окончания суббури. При этом возможны три различные ситуации: а) пульсации и пульсирующие потоки высыпающихся электронов синхронны; б) геомагнитные пульсации не сопровождаются подобными пульсациями в риометрическом поглощении; в) пульсации поглощения не сопровождаются геомагнитными с аналогичными периодами. Первая ситуация характерна для частот $f > 2$ мГц (Рис. 5), а две другие - для $f < 2$ мГц. В соответствии с теорией *Coroniti and Kennel (JGR, 1970)*, пульсации в риометрическом поглощении могут быть результатом модуляции инкремента электронно-циклотронной неустойчивости и коэффициента питч-угловой диффузии компонентой сжатия волн *Pc5* диапазона. Однако эта теория не объясняет обнаруженные особенности взаимодействия *Pc5* волн и энергичных электронов.

Физическая природа иррегулярных *Pi3* пульсаций ($T > 150$ с), возникающих при активизации суббуревой и авроральной активности, пока остается невыясненной окончательно. Важную информацию для решения этой проблемы могут дать одновременные наблюдения трех различных типов

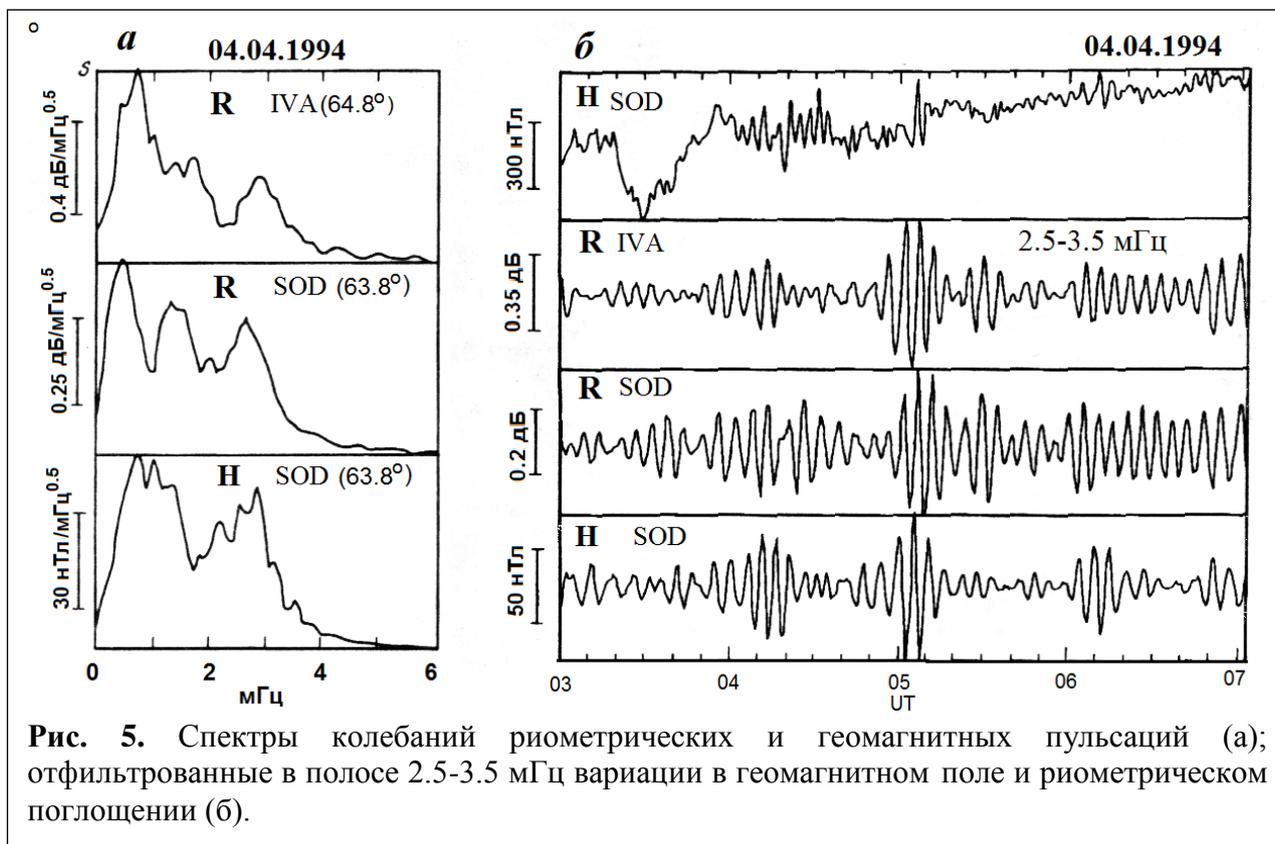


Рис. 5. Спектры колебаний риометрических и геомагнитных пульсаций (а); отфильтрованные в полосе 2.5-3.5 мГц вариации в геомагнитном поле и риометрическом поглощении (б).

явлений: полярных сияний, вариаций риометрического поглощения и геомагнитных *Pi3* пульсаций. Такой анализ показал, что всплески *Pi3* пульсаций очень локализованы на Земле, и они наблюдаются одновременно со всплесками риометрического поглощения. Магнитные и риометрические *Pi3* пульсации совпадают во времени и пространстве со взрывным уярчением (break-up) полярных сияний и вытекающим из ионосферы продольным током, а спектры риометрических и геомагнитных пульсаций подобны. Во время восстановительной фазы сильных магнитных бурь также обнаружена хорошая корреляция между геомагнитными вариациями, пульсациями магнитного поля и риометрического поглощения в диапазоне *Pi3* (Рис. 6). В этом событии (8-9 ноября 2004 г.) наблюдения полярных сияний показали наличие двойного аврорального овала и последовательность нескольких импульсных полярных сияний - стримеров.

Проведен анализ отклика длиннопериодных пульсаций, высыпаний энергичных частиц (по риометрическим данным) и интенсивности ОНЧ излучения на воздействие межпланетного магнитного облака на магнитосферу

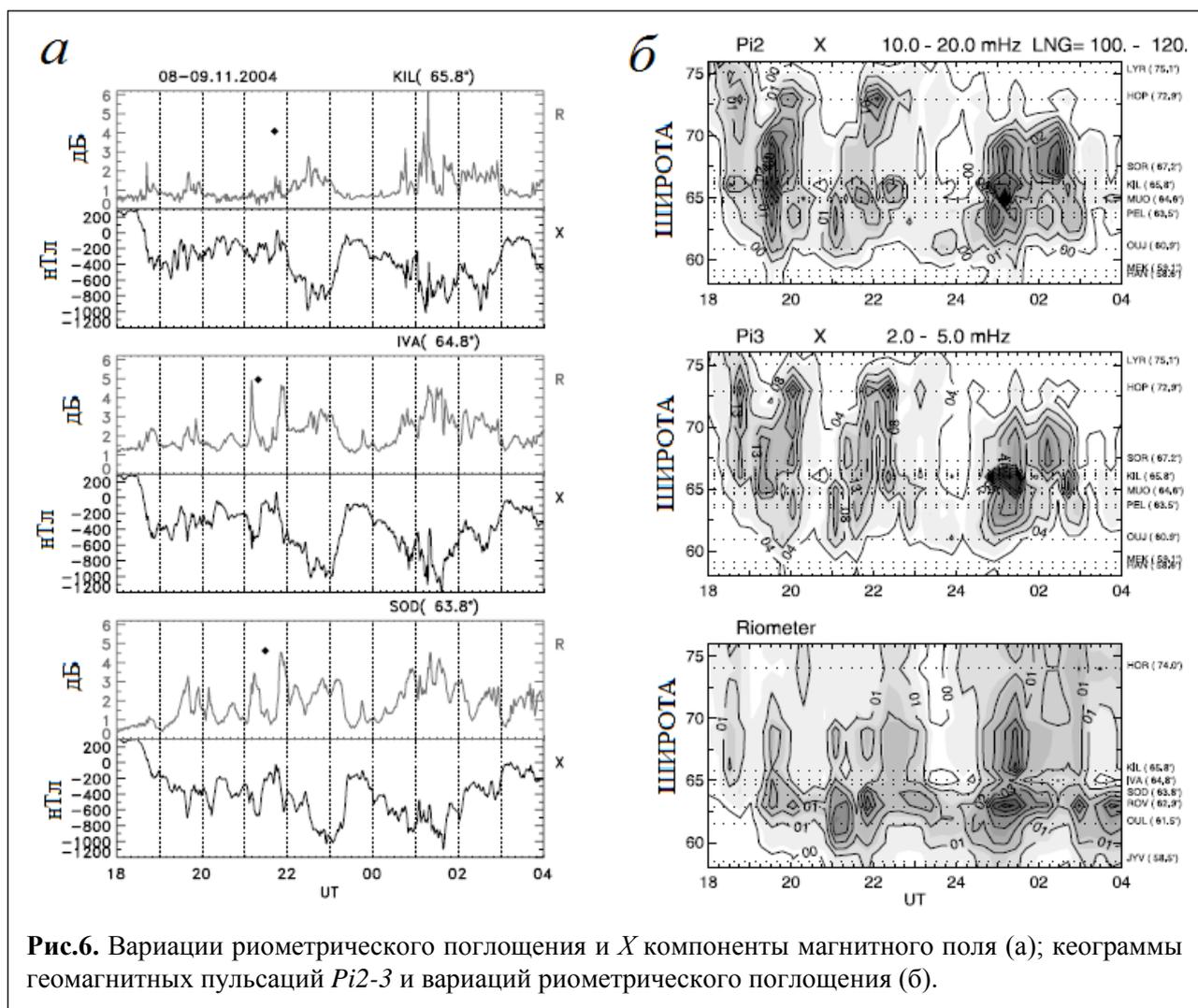


Рис.6. Вариации риометрического поглощения и X компоненты магнитного поля (а); кеограммы геомагнитных пульсаций Pi2-3 и вариаций риометрического поглощения (б).

Земли (10.01.1997). Передний край магнитного облака вызвал суббури и сияния в полярных широтах ($\Phi > 72^\circ$), сопровождаемые всплеском пульсаций диапазона 1-3 мГц в геомагнитном поле и высыпании электронов. Резкое падение динамического давления СВ привело к подавлению этих пульсаций. Наблюдаемые в высоких широтах пульсации, вероятно, возбуждаются модуляцией ионосферной проводимости за счет пульсирующего высыпания электронов вблизи проекции границы открытых/закрытых силовых линий. В отличие от типичных магнитных бурь, наиболее интенсивные Pc5 пульсации, всплески высыпающихся энергичных электронов и ОНЧ хоры в начальную фазу слабых рекуррентных бурь регистрировались одновременно в большом секторе долгот – от предполуночных до предполуденных.

Сопоставление потоков электронов с $E=300$ кэВ-1.5 МэВ, наблюдаемых в полярных областях на низко-орбитальном спутнике КОРОНАС-Ф, с

вариациями магнитного поля, риометрического поглощения и полярных сияний вблизи проекции орбиты спутника, выявило спорадические высыпания энергичных электронов вблизи полярной границы ночного аврорального овала. Эти высыпания сопровождались бухтообразными магнитными возмущениями, всплесками риометрического поглощения, геомагнитными $Pi3$ пульсациями и полярными сияниями. Этот эксперимент показал наличие спорадических возмущений даже в магнитоспокойные периоды на полюсной границе аврорального овала, предположительно вызванных динамическими процессами в магнитосферном хвосте.

4.2. Взаимодействие УНЧ пульсаций с КНЧ-ОНЧ излучениями

Высокие широты богаты разнообразными видами ОНЧ излучений с характерными частотами 1-10 кГц, имеющих вид на динамических спектрах либо шумового излучения в ограниченной частотной полосе, либо последовательности дискретных всплесков (хоры). Наиболее интенсивная генерация ОНЧ излучений происходит в периоды магнитных бурь и суббурь. В работе исследовано пространственное распределение областей генерации КНЧ-ОНЧ шумов в высоких широтах по данным наземных и спутниковых наблюдений. КНЧ шумы («полярные хоры») занимают пространство от плазмопаузы до каспа, где интенсивность шумов резко падает на 30-50 дБ. На обсерваториях, расположенных вблизи такого «скачка», интенсивность КНЧ шумов может отличаться в 2-3 раза на расстояниях ~250 км. Максимальные интенсивности КНЧ шумов наблюдаются вблизи ионосферной проекции входных слоев магнитосферы. Пространственные размеры области возбуждения высокоширотных КНЧ полярных хоров существенно изменяются с сезоном. Летом в полдень эта область занимает не менее 10° по широте, в долготном направлении на широте каспа эта область простирается до $40-60^\circ$, а на более низких широтах ($\sim 70^\circ$) - до $100-120^\circ$. В зимнее время излучения более локальны как по широте, так и по долготе.

Плазменные механизмы взаимодействия волн и частиц приводят к возможности в околоземной плазме взаимного влияния друг на друга волн, различающихся на несколько порядков по частоте, УНЧ и ОНЧ диапазонов. Такого рода эффекты проявились при проведенном нами исследовании модуляции ОНЧ хоров $Pc5$ волнами и их связи с квазипериодическими вариациями динамического давления СВ. Колебания на частоте ~ 2 мГц одновременно наблюдались в риометрическом поглощении, геомагнитных вариациях от авроральных до экваториальных широт, интенсивности ОНЧ хоров и динамическом давлении СВ. Таким образом, подтверждено, что $Pc5$ пульсации вызывают периодическую модуляцию риометрического поглощения и интенсивности ОНЧ хоров. Также исследована взаимосвязь между всплесками КНЧ излучения и пульсациями $Pc3-4$ на широтах каспа. В случае одновременного возбуждения КНЧ излучений и пульсаций $Pc3-4$ амплитуда шумов оказывается промодулированной с периодами пульсаций, что свидетельствует об эффективном взаимодействии гидромагнитных и свистовых волн в области экваториальной границы каспа.

Исследованы особенности необычных квазипериодических (QP) ОНЧ излучений в авроральных широтах ($L \sim 5$). Нетипичные ОНЧ излучения в виде коротких ($\sim 10-20$ с) QP всплесков шипений в полосе частот $\sim 3.5-6.0$ кГц наблюдались одновременно с более низкочастотными хорами. Как QP излучения, так и ОНЧ хоры, имеют, в основном, правую поляризацию, что свидетельствует о нахождении точки выхода волн из ионосферы относительно недалеко от пункта наблюдений. Область генерации QP излучений и ОНЧ хоров располагалась на разных магнитных оболочках: QP излучения на частотах $\sim 4-6$ кГц генерируются на магнитных оболочках $L < 5$, а хоры на частотах $\sim 1.5-3.5$ кГц – в области $L > 5$. Появление QP излучений совпадает по времени с возбуждением в магнитосфере квазимонохроматических пульсаций диапазона $Pc4$, период которых был близким к периоду повторения QP излучений. Большая глубина синхронных пульсаций геомагнитного поля и ОНЧ излучений свидетельствует не просто о модуляции электронов МГД

волной, а о возможности развития автоколебаний в радиационных поясах Земли.

Глава 5. Эффекты возмущений «космической погоды» в вариациях атмосферного электрического поля

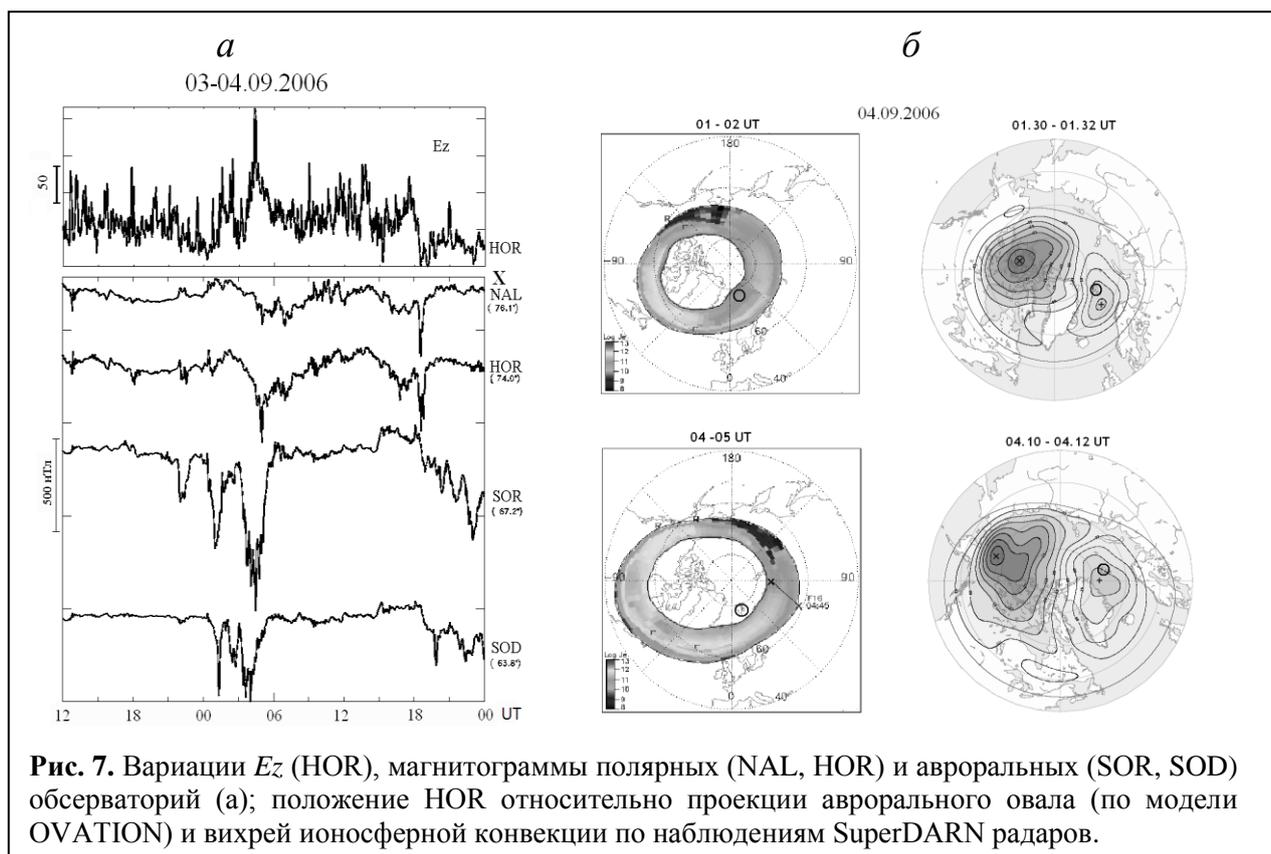
Основным генератором глобальной электрической цепи и вариаций приземного атмосферного электрического поля E_z является грозовая активность, мировые центры которой находятся в центральной части Африки, Азии и Америки. Глобальная атмосферная электрическая цепь замыкается через высокоширотную ионосферу, следовательно, на вариации E_z большое влияние могут оказывать магнитосферные и ионосферные возмущения. Однако исследования по геомагнетизму и по атмосферному электричеству развиваются в значительной степени независимо, и возможные эффекты влияния "космической погоды" на возмущения атмосферного электрического поля оставались малоизученными. Наиболее заметно это влияние должно проявляться в полярных и авроральных широтах. В работе анализировались нестационарные и периодические процессы в геомагнитном поле и атмосферном электричестве по данным магнитных станций и датчиков вертикального электрического поля E_z и тока J_z . Следует отметить, что данные по E_z и J_z сильно подвержены влиянию ветров, облачности, осадков и т.п., поэтому отбор условий "хорошей погоды" представляет собой отдельную сложную задачу.

5.1. Связь суббурь и длиннопериодных геомагнитных пульсаций с вариациями атмосферного электрического поля

Исследовано влияние суббурь на вариации атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах. Обнаружено, что развитие суббури в ночном секторе приводит к отрицательным вариациям E_z в дневном секторе полярных широт и положительным отклонениям E_z в предполуночное время на низких широтах. По нашему мнению, вариации E_z на низких широтах в значительной мере контролируются экваториальным электроджетом,

максимальным в дневные часы, а на высоких широтах – авроральным электроджетом.

Проведено исследование влияния магнитосферных суббурь на вариации E_z по данным наблюдений в полярной области (арх. Шпицберген). Развитие суббури в утреннем секторе сопровождается положительными отклонениями в E_z (Рис. 7), независимо от положения точки наблюдения - в полярной шапке или



на её границе. Во всех рассмотренных событиях обс. Хорзунд находилась вблизи центра утреннего вихря конвекции. В вечернем секторе, когда обсерватория попадала в область ионосферного отрицательного конвективного вихря, развитие полярной суббури сопровождалось отрицательными отклонениями в E_z .

Ключевыми параметрами электродинамики высокоширотной системы ионосфера - магнитосфера являются размер полярной шапки и разность потенциалов поперек нее. Проведено исследование влияния разности потенциалов поперек полярной шапки во время суббурь на E_z в полярных широтах. Вне зависимости от положения проекции обсерватории (в полярной

шапке, на её границе или в области аврорального овала), как правило, временные вариации E_z , особенно в утреннем секторе, значительно отличались от временных вариаций потенциала полярной шапки.

Исследованы особенности вариаций E_z при северном направлении ММП, когда в авроральной зоне не наблюдается суббурь. В вечерние и предполуночные часы в магнитоспокойных условиях наблюдались положительные отклонения в E_z независимо от знака B_y . Одна из возможных причин положительных отклонений E_z - резкое уменьшение размеров полярной шапки в магнитоспокойных условиях.

Проанализировано возможное влияние наиболее мощных длиннопериодных высокоширотных пульсаций (0.5-5 мГц) магнитного поля на флуктуации E_z во время суббурь. В ранние утренние часы на арх. Шпицберген, хотя и отмечается подобие спектров $Pi3$ вариаций в геомагнитном и электрическом поле, появление отдельных волновых пакетов не совпадает во времени. Однако для геомагнитных пульсаций типа $Ps6$ обнаружена четкая противофазность периодических вариаций E_z и D компоненты магнитного поля.

Обнаружено, что вблизи каспа типичные для этой области магнитосферы полярные геомагнитные пульсации pr ($T \sim 5-10$ мин, амплитуда $\sim 10-20$ нТл) не сопровождаются синхронными колебаниями электрического поля E_z . Однако более длиннопериодные пульсации νlp с периодами $\sim 20-40$ мин и амплитудой $\sim 100-200$ нТл могут приводить к синхронным E_z колебаниям в противофазе с H компонентой (Рис. 8).

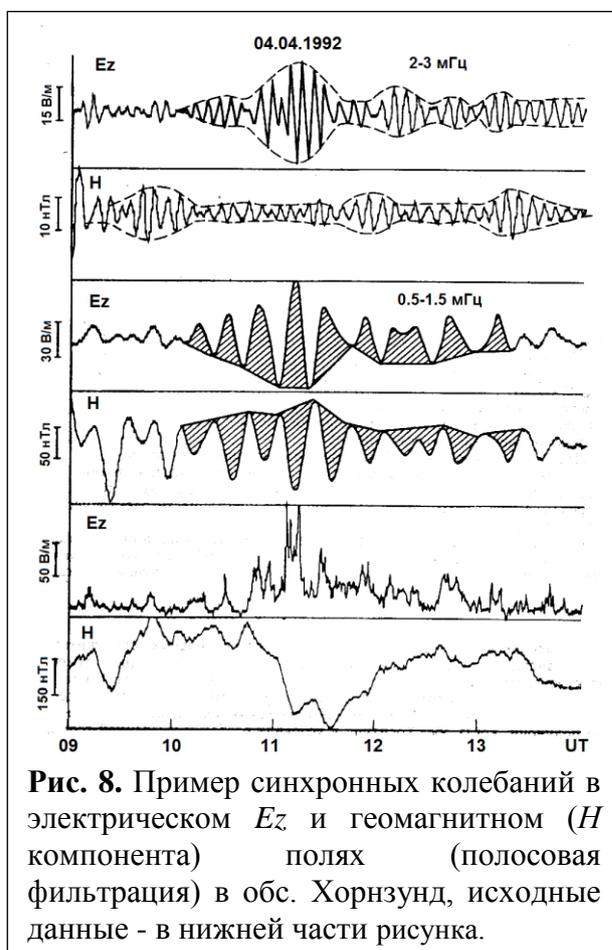
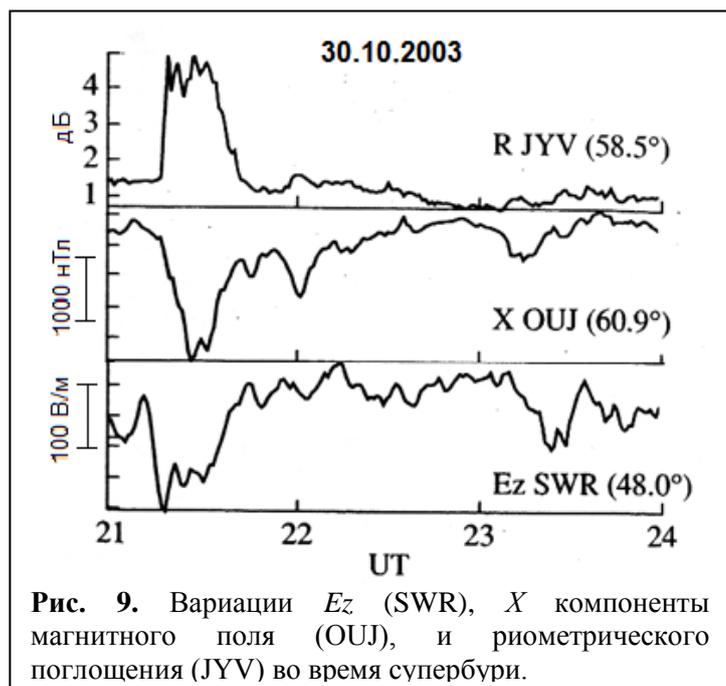


Рис. 8. Пример синхронных колебаний в электрическом E_z и геомагнитном (H компонента) полях (полосовая фильтрация) в обс. Хорнзунд, исходные данные - в нижней части рисунка.

Исследовано влияние авроральных высыпаний энергичных электронов (по данным риометрического поглощения) на вариации атмосферного электрического поля и тока в полярных широтах во время магнитосферных суббурь. Отрицательные возмущения E_z наблюдаются синхронно с появлением бухты риометрического поглощения в авроральной зоне. Причиной уменьшения значений E_z может быть возрастание проводимости верхней атмосферы, вызванное вторжением энергичных электронов. Подобие вейвлет структуры вариаций (1-10 мин) вертикального тока атмосферы J_z , геомагнитного поля и риометрического поглощения свидетельствует об их общем источнике, вероятно, связанном с квази-периодическими вариациями высыпания энергичных электронов.

5.2. Эффекты магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля на средних широтах

Проведено исследование вариаций поля E_z с целью выяснения вопроса о том, могут ли магнитные бури вызывать возмущения атмосферного электричества на средних широтах. Обнаружен эффект главной фазы магнитной бури в дневных среднеширотных вариациях вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (E_z). Одновременно с началом развития авроральной суббури в ночном секторе в дневном секторе в средних широтах могут появляться отрицательные возмущения в E_z . Положительные возмущения в E_z часто наблюдаются без суббурь при северном ММП и повышенном динамическом давлении СВ. Во время главной фазы супербури 30.10.2003 отрицательное возмущение E_z на



средних широтах происходило синхронно с появлением бухты риометрического поглощения в субавроральных широтах (Рис. 9).

Обнаружено уменьшение атмосферного поля E_z на средних широтах по сравнению с магнитоспокойным уровнем во время кратковременного резкого понижения интенсивности космических лучей, вызванное экранированием околоземного пространства потоком высокоскоростной плазмы СВ (форбуш-понижения). Этот эффект указывает на возможность еще одного канала воздействия космической погоды на атмосферное электричество.

Таким образом, проведенный цикл исследований показал, что магнитосферная активность (магнитные бури, суббури, vlp пульсации, форбуш-эффект) может приводить к заметным возмущениям атмосферной электрической цепи как на высоких, так и на средних широтах. Механизм такого воздействия связан с вариациями проводимости ионосферы и верхней атмосферы нестационарными или квазипериодическими потоками высыпавшихся энергичных магнитосферных электронов, однако количественная теория взаимосвязи возмущений геомагнитного и атмосферного электрического полей не разработана.

Глава 6. Разработка и применение волнового УНЧ-индекса

Процессы переноса энергии в системе СВ – магнитосфера Земли носят нестационарный и турбулентный характер. Однако, ни один из геомагнитных индексов, используемых в геофизике (Kp , Ap , AE , AL , Dst , $SYM-H$, PC), не отражает уровень турбулентности и волновой активности. Для ее оценки был разработан новый индекс, названный УНЧ (ULF) индексом. Предложенный нами набор УНЧ индексов характеризует среднечасовую мощность вариаций магнитосферного и межпланетного магнитных полей в диапазоне $Pc5$ пульсаций ($f \sim 2-6$ мГц) и рассчитывается по данным мировой сети магнитных обсерваторий, геостационарных и межпланетных спутников. Именно эти, наиболее мощные, пульсации могут резонансно взаимодействовать с дрейфующими вокруг Земли релятивистскими электронами.

6.1. Статистические свойства УНЧ волновой активности во время магнитных бурь разной интенсивности

Применение нового индекса планетарной волновой активности позволило провести статистический анализ уровня интенсивности дневных пульсаций в разные фазы как сильных, так и умеренных магнитных бурь. Обнаружено, что наибольшая интенсивность пульсаций в авроральных широтах отмечается в главную фазу бури, а не в восстановительную, как это считалось ранее. Основной вклад в дневную волновую активность во время главной фазы магнитной бури вносят пульсации, возбуждающиеся во время и после утренних суббурь.

На базе нового УНЧ индекса проведены статистические исследования уровня волновой активности в утреннем, послеполуденном и ночном секторах во время сильных магнитных бурь с Dst от -100 до -150 нТл. Обнаружено, что наибольшая интенсивность пульсаций в начальную фазу магнитной бури отмечается в полярных широтах в утреннем секторе, а в авроральных широтах - в ночном и утреннем. Во время главной фазы суббуревая активность перемещается в послеполуночный сектор, и основной вклад в УНЧ активность вносят пульсации восстановительной фазы суббурь в утреннем секторе авроральной зоны. В восстановительную фазу бури волновая активность наибольшая в авроральной зоне в утреннем и ночном секторах. Общие статистические закономерности вариаций пульсаций во время сильных и умеренных бурь подобны и отличаются только уровнем амплитуд (Рис.10), и подтверждают закономерности УНЧ волновой активности, описанные в Гл.2.

6.2. УНЧ волновой отклик магнитосферы на разные типы бурь

Анализ дневной УНЧ активности во время рекуррентных (CIR) бурь в минимуме 23-го цикла солнечной активности (2006 г.) показал, что высокая скорость СВ (>600 км/с) способствует усилению генерации УНЧ волн в магнитосфере Земли, по-видимому, за счет развития неустойчивости К-Г на магнитопаузе. На земной поверхности наиболее интенсивные дневные Pc5

пульсации во всех фазах рекуррентных бурь наблюдались преимущественно в дополуночном секторе на широтах выше 70° . Статистическое сопоставление УНЧ индекса во время разных типов бурь показало, что в главную фазу для CIR-бурь интенсивность магнитных вариаций в $Pc5$ диапазоне в несколько раз ниже, и они наблюдаются на более высоких широтах, чем при CME-бурях. На восстановительной фазе повышенный уровень волновой $Pc5$ активности наиболее характерен для CIR-бурь.

Статистическое сопоставление УНЧ индекса с данными о потоках магнитосферных электронов на спутниках *LANL*, *GOES* показало, что УНЧ индекс лучше, чем любой из существующих индексов, коррелирует с возрастаниями релятивистских электронов на геостационарной орбите. Этот факт свидетельствует в пользу

механизма радиальной диффузии и ускорения магнитосферных электронов УНЧ волнами. В настоящее время УНЧ индекс активно используется мировым геофизическим сообществом для статистических исследований роли УНЧ волн и турбулентности в возмущениях космической погоды (~10 публикаций в ведущих журналах).

В **Приложении 1** дано описание скомпилированной в ходе работы базы данных магнитных вариаций со всех мировых станций, а также геостационарных и межпланетных спутников.

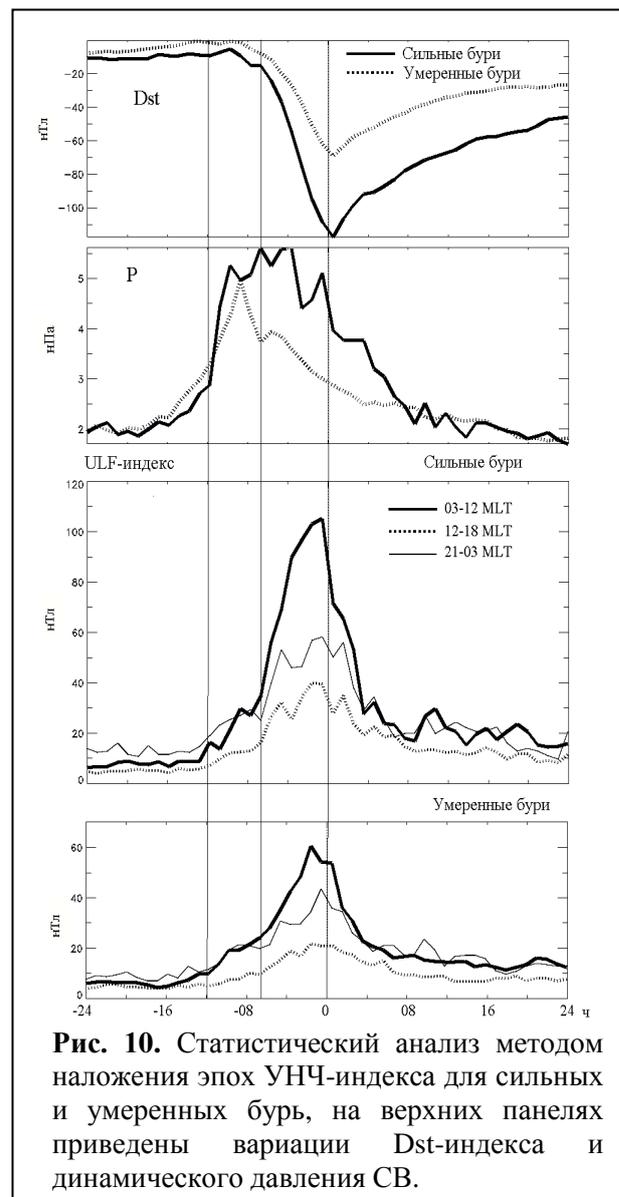


Рис. 10. Статистический анализ методом наложения эпох УНЧ-индекса для сильных и умеренных бурь, на верхних панелях приведены вариации Dst-индекса и динамического давления СВ.

В **Приложении 2** представлен разработанный автором пакет оригинальных программ в среде IDL для визуализации и анализа многомерных геофизических временных рядов, включающий различные методы спектрального оценивания, расчета планетарного 1D и 2D распределения спектральной мощности УНЧ волн, динамических широтных диаграмм мощности.

В **Приложении 3** приводится методика вычисления УНЧ индекса

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

- Начальная фаза магнитной бури, вызванная подходом к орбите Земли межпланетного магнитного облака, характеризуется возбуждением $Pc5-6$ пульсаций с периодом $T \sim 5-20$ мин с наибольшей амплитудой в утреннем секторе полярной шапки. Предположительно, основным агентом, вызывающим возбуждение этих полярных пульсаций, является проникновение флуктуаций плазмы СВ на переднем фронте магнитного облака. При большом динамическом давлении СВ от полярных до экваториальных широт синхронно возбуждаются крупномасштабные $Pc5$ пульсации с дискретным спектром с малыми волновыми числами $m \sim 1$ и наибольшей амплитудой в послеполуденные часы. Одновременно в области утренней авроральной электроструи возбуждаются широкополосные колебания с $f \sim 2.5-3.5$ МГц и $m \sim 3-5$, являющиеся отражением вариаций интенсивности продольных токов.
- В главную фазу магнитной бури волновая активность при подходе ведущего края магнитного облака резко перемещается из полярных широт в замкнутую магнитосферу. Пространственно-временная картина развития суббурь полностью отражается в динамике ночных иррегулярных пульсаций $Pi3$.
- В восстановительную фазу супербурь происходит возбуждение качественно нового типа пульсаций $Pc5$ с аномально большой амплитудой и глубоким проникновением до низких широт с двумя областями усиления $Pc5$ пульсаций, разделенных областью переворота фазы волны на плазмопаузе. Эти глобальные $Pc5$ волны предположительно являются колебаниями магнитосферного МГД волновода. Триггером глобальных $Pc5$ волн при высокой скорости СВ являются

всплески флуктуаций плотности СВ. Выявлена асимметрия меридиональной структуры $Pc5$ пульсаций: в утреннем секторе максимум мощности находится на авроральных широтах, а в послеполуденном – на субавроральных и средних широтах.

- Специфические высокоширотные колебания $ipcl$ и nr , наблюдаемые в околополуденные часы вблизи ионосферной проекции входных слоев магнитосферы, обусловлены пульсирующим высыпанием частиц. Триггером пульсаций $ipcl$, nr , и $Pc4$ на широтах каспа может быть внезапное начало магнитной бури. В интенсивности $ipcl$ и nr пульсаций на широтах каспа проявляется сезонная северо-южная асимметрия, обусловленная как контролем ионосферной проводимостью, так и несимметричным распределением продольных токов между полушариями.
- Обнаружен эффект резкого подавления дневных $ipcl$ колебаний в каспе во время начала суббури (с интенсивностью не менее 250 нТл) на ночной стороне, контролируемый знаком B_y компоненты ММП.
- $Pc3-4$ пульсации в области каспа и на средних широтах имеют общий источник - форшок, однако каналы проникновения волновой энергии из области перед магнитосферной ударной волной на средние и высокие широты различны.
- Во время суббури в утренние часы в авроральных широтах пульсирующие высыпания электронов синхронны с геомагнитными $Pc5$ пульсациями только на частотах $f > 2$ мГц. Морфологические свойства всплесков $Pi3$ пульсаций геомагнитного поля и риометрического поглощения свидетельствуют в пользу механизма их генерации периодической модуляцией проводимости ионосферы.
- Спорадические высыпания энергичных электронов ($E > 300$ кэВ), обнаруженные по данным спутника *КОРОНАС-Ф*, бухтообразные магнитные возмущения, всплески риометрического поглощения, геомагнитные $Pi3$ пульсации, и уярчения полярных сияний постоянно присущи полярной границе ночного аврорального овала, даже в магнитоспокойное время.

- Развитие суббури сопровождается положительными/отрицательными отклонениями в атмосферном электрическом поле E_z , когда пункт наблюдения находится вблизи центра утреннего/вечернего вихря ионосферной конвекции. В средних широтах отрицательные возмущения E_z появляются одновременно с началом суббури, вторжением энергичных электронов и форбуш-понижением интенсивности космических лучей. Высокоширотные νlp (20-30 мин) и $Ps6$ (10-15 мин) геомагнитные пульсации также проявляются в вариациях E_z .
- Разработан новый УНЧ индекс, характеризующий уровень волновой активности на земной поверхности, магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве, оказавшийся важным параметром космической погоды. Применение УНЧ индекса позволило статистически показать различие в отклике волновой активности и геостационарных релятивистских электронов на разные типы магнитных бурь.

Список основных работ по теме диссертации, опубликованных в реферируемых журналах

1. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Унгstrup И. О пространственном распределении полярных хоров в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т.23. N4. С.697.
2. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Хольтет Я. КНЧ излучения и экваториальная граница дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т.24. N6. С.983.
3. Распопов О.М., Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Афанасьева Л.Т., Федоренко Ю.П. Модуляция всплесков КНЧ-излучений геомагнитными пульсациями диапазона Pc3-4 на широтах дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия, 1987. Т.27. N 2. С.341.
4. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Кайзер Т., Буллоф К. Северо-южная асимметрия интенсивности КНЧ-шумов в области дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т.27. N3. С.457.
5. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Геомагнитные пульсации как результат солнечной вспышки 23.03.76 // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т.29. N1. С.133.
6. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Спектр длиннопериодных геомагнитных пульсаций пр в области дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т.29. N 5. С.846.
7. Клейменова Н.Г., Афанасьева Л.Т., **Козырева О.В.**, и др., Гигантские геомагнитные пульсации P_g на широтном профиле обсерваторий // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т.30. N 4. С.579.
8. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.** КНЧ-ОНЧ шумовые излучения на широтах дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т.31. N 1. С.60.
9. Michnowsky S., Szymanski A., Nikiforova N., **Kozyreva O.**, et al., On simultaneous observation of geomagnetic and atmospheric electric field changes at Arctic Station Horsund, Spitsbergen // Pubs. Inst. Geophys. Poland Acad. 1991. С.83.
10. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Высокоширотные длиннопериодные пульсации в геомагнитном поле и атмосферном электричестве по наблюдениям на арх. Шпицберген // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т.32. N2. С.41.
11. Клейменова Н.Г., Михновски С., Никифорова Н.Н, **Козырева О.В.** Длиннопериодные геомагнитные пульсации и флуктуации напряженности элетрического поля атмосферы на широтах каспа // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. N 4. С.38.
12. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Биттерли Ж. Длиннопериодные геомагнитные пульсации в области тета-авроры 11 мая 1983 // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т.35. С.44.

13. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Зайцев А.Н., Одинцов В.И. Геомагнитные пульсации РС5 на глобальной сети обсерваторий в магнитную бурю 24 марта 1991 г. // Геомагнетизм и аэрномия. 1996. Т.36. N 1. С.52.
14. Пилипенко В.А., Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др. Является ли касп источником среднеширотных РС3-пульсаций? // Геомагнетизм и аэрномия. 1996. Т.36. N2. С.39.
15. Пилипенко В.А., Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Долготные особенности геомагнитных пульсаций диапазона РС5 в утреннем и вечернем секторах // Геомагнетизм и аэрномия. 1997. Т.37. N 3. С.64-74.
16. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Ранга Х., РС5 пульсации в геомагнитном поле и риометрическом поглощении в утреннем секторе авроральных широт // Геомагнетизм и аэрномия. 1997. Т.37. N 5. С.51.
17. Schott J., Kleimenova N.G., Bitterly J., **Kozyreva O.V.** The strong Pc5 geomagnetic pulsations in the great magnetic storm of March 24, 1991 // Earth Planets Space. 1998. 50. 3.101-106.
18. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Два типа дневных длиннопериодных геомагнитных пульсаций диапазона РС5 на средних широтах в сильную бурю // Геомагнетизм и аэрномия. 1998. Т.38. N1. С.61.
19. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Биттерли Ж., Биттерли М. Длиннопериодные (T=8-10 мин) геомагнитные пульсации в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. 1998. Т.38. N 4. С.38.
20. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Связь внезапных прекращений геомагнитных пульсаций $ipcl$ в каспе с началом суббури на ночной стороне // Геомагнетизм и аэрномия. 1998. Т.38. N 6. С.58.
21. Pilipenko V., Kleimenova N., **Kozyreva O.**, Yumoto K., Bitterly J. Is the cusp a source of the mid-latitude Pc3 pulsations? // Geomagnetism and Aeronomy International. 1998. V.1. N1. P.43.
22. Клейменова Н.Г., Михновски С., Никифорова Н.Н, **Козырева О.В.** Вариации вертикальной составляющей атмосферного электрического поля в вечернем секторе полярных широт (обс.Хорзунд) // Геомагнетизм и аэрномия. 1998. Т.38. N6. С.123.
23. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Биттерли Ж., Шотт Ж.-Ж. Северо-южная асимметрия геомагнитных пульсаций $ipcl$ // Геомагнетизм и аэрномия. 1999. Т.39. N 3. С.115.
24. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Биттерли Ж., Шотт Ж.-Ж. Геомагнитные пульсации РС3-5 на широтах полярного каспа во время SC и их глобальный отклик // Геомагнетизм и аэрномия. 1999. Т.39. N 4. С.29.

25. Pathan B.M., Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, Rao D.R.K., Asinkai R.L. Equatorial enhancement of Pc5-6 magnetic storm time geomagnetic pulsations // *Earth, Planets Space*. 1999. V.51. P.959-964.
26. Kleimenova N.G., Francia P., Villante U., **Kozyreva O.V.**, Bitterly J., Schott J.-J. The temporal and spatial variations of ipcl geomagnetic pulsations at dayside polar cusp/cleft and cap latitudes // *Annali di Geofisika*. 1999. V. 42. P.675-681.
27. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Длиннопериодные (1-6 мГц) геомагнитные пульсации в начальную фазу большой магнитной бури 21 февраля 1994 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2000. Т.40. N 4. С. 16-25.
28. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Геомагнитные пульсации диапазона Pc4 в высоких широтах, вызванные подходом к Земле межпланетного магнитного облака 10 января 1997 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2001. Т.41. N4. С.482-489.
29. Pilipenko V.A., Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, et al., Global ULF wave activity during the May 15, 1997 magnetic storm // *J. Atmosph. Solar-Terr. Physics*. 2001. V.63. P. 489-501.
30. Manninen J., Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, Ranta A. Long period geomagnetic and riometer pulsations response to the front edge of the magnetic cloud on January 10, 1997 // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys*. 2002. 64. P.23-32.
31. Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, et al. Case studies on the dynamic of Pi3 geomagnetic and riometer pulsations during auroral activations // *Ann. Geophysicae*. 2002. V.20. P.151-159.
32. Pilipenko V.A., **Kozyreva O.V.**, et al. Dynamics of long-period magnetic activity and energetic particle precipitation during the May 15, 1997 storm // *J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys*. 2002. V.64. P.831-843.
33. Клейменова Н. Г., **Козырева О.В.**, и др., Геомагнитные пульсации диапазона Pc5-6 на экваториальных и низких широтах // *Геомагнетизм и аэрномия* 2002. Т.42. №4. С.469.
34. Клейменова Н. Г., **Козырева О.В.**, Шотт Ж.Ж. Геомагнитные пульсации Pc5-6, вызванные подходом к Земле ведущего края межпланетного магнитного облака (19 октября 1998 г.) // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2002. Т.43. №1. С.50-62.
35. Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, et al., Dayside geomagnetic Pc5 pulsations in the conditions of a strongly disturbed solar wind during the magnetic storm on Feb. 21, 1994 // *Int. J. Geomagnetism and Aeronomy*. 2003. V.3. N4. P.229-244.
36. **Kozyreva O.V.**, Kleimenova N.G., Ivanova P., Schott J.-J. Low-latitude Pc5-6 geomagnetic pulsations as an indicator of compressional waves in the solar wind // *C.R. Acad. Bulgar. de Sci*. 2003. T.56. N12. P.41-46.

37. Никифорова Н.Н., Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Влияние авроральных высыпаний энергичных электронов на вариации атмосферного электрического поля в полярных широтах // Геомагнетизм и аэрономия Т.43. №1. С.32-39. 2003
38. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, Шотт Ж.Ж. Волновой геомагнитный отклик магнитосферы на подход к Земле межпланетного магнитного облака (14-15 июля 2000 г., “Bastille day event”) // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т.43. №3. С. 321-331.
39. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г., Шотт Ж.Ж. Геомагнитные пульсации начальной фазы магнитной бури // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 44. №1. Р.37-46. 2004.
40. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.** Пространственно-временная динамика геомагнитных пульсаций P_{i3} и P_{c5} во время экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 года // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45. № 1. С.75-83.
41. Никифорова Н.Н, Н.Г. Клейменова, **О.В. Козырева**, и др. Необычные вариации атмосферного электрического поля во время главной фазы магнитной бури 30.10.2003 г. на среднеширотной обсерватории Свидер // Геомагн. и аэрономия. 2005. Т.45. №1. С.148.
42. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.** Интенсивные геомагнитные пульсации P_{c5} в восстановительную фазу супербури 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45. № 5 С. 597-612.
43. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г., Ватерманн Ю. Геомагнитные пульсации диапазона P_{c5} при большом динамическом давлении солнечного ветра в начальную фазу магнитной бури (16 апреля 1999 г.) // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45. № 5 С. 613.
44. Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, et al. Unusual strong quasi-monochromatic ground P_{c5} geomagnetic pulsations in the recovery phase of November 2003 superstorm // Ann. Geophysicae, 2005. 23. 2621–2634.
45. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г., и др. Необычная пространственно-временная динамика геомагнитных возмущений в главную фазу сверхсильной магнитной бури 7-8 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и Аэрономия. 2006. Т. 46. №5. С.614-626.
46. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г., Левитин А.Е., Ватерман Ю. Длиннопериодные геомагнитные пульсации в квази-сопряженных областях Арктики и Антарктики в магнитную бурю 16-17 апреля 1999 г. // Геомагнетизм и Аэрономия. 2006. Т. 46. №5. С.657-670.
47. **Kozyreva O.**, V. Pilipenko, M.J. Engebretson, K. Yumoto, et al., In search of a new ULF wave index: Comparison of P_{c5} power with dynamics of geostationary relativistic electrons // Planet. Space Science. 2007. V.55. P.755–769.

48. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.** КНЧ полярные хоры и магнитные бури // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2007. Т. 47. №3. С. 357-363.
49. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации и магнитные возмущения в начальную фазу сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм. 2007. Т. 47. №4. С. 501-511.
50. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.** Дневные квазипериодические геомагнитные колебания в восстановительную фазу сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2007. Т.47. №5. С. 616-623.
51. Kleimenova N., **Kozyreva O.** Non-typical Pc5 pulsations in the October 2003 superstorm recovery phase // Advances in Geosciences. 2007. Vol. 14: Solar Terrestrial. P. 213-223
52. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г. Оценка уровня дневной волновой геомагнитной активности во время магнитных бурь с помощью нового ULF индекса // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2008. Т. 48. №4. С. 511-519.
53. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г. Новый индекс активности дневных геомагнитных пульсаций и его применение к анализу магнитных бурь // Геофизические исследования. 2008. Т. 9. № 1. С. 3-13.
54. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Эффект магнитной бури в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах, Геомагнетизм и Аэрoномия. 2008. Т. 48. №5. С. 650-659.
55. Manninen J., Kleimenova N.G., **Kozyreva O.V.**, et al. Ground-based observations between two strong November 2004 storms attributed to steady magnetospheric convection // J. Geophys. Res. 2008. V.113. A9. Doi: 10.1029/2007JA012984.
56. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.** Восстановительная фаза сверхсильной магнитной бури 15–17 июля 2000 г.: суббури и ULF пульсации // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2009.Т. 49. №3. С. 321-334.
57. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г. Вариации ULF-индекса геомагнитных пульсаций во время сильных магнитных бурь // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2009.Т. 49. №4. С. 446.
58. **Козырева О.В.**, и др. Высыпания энергичных электронов и геомагнитных пульсаций Pi3 в полярных широтах // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2009. Т. 49. №6. С.777-785.
59. Kleimenova N., **O. Kozyreva**, et al., Variations of the mid-latitude atmospheric electric field (Ez) associated with geomagnetic disturbances and Forbush decreases of cosmic rays // Pubs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2009. D-73. 412.
60. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2010. Т.50. № 1. С. 51

61. Клейменова Н.Г., **Козырева О.В.**, и др., Послеполуденные геомагнитные пульсации Pc5 на земной поверхности и в ионосфере (радары STARE) // Геомагнетизм и Аэрномия. 2010. Т.50. № 3. С. 344–353.
62. **Козырева О.В.**, Клейменова Н.Г. Вариации ULF-индекса дневных геомагнитных пульсаций во время рекуррентных магнитных бурь // Геомагнетизм и Аэрномия. 2010. Т.50. №6. С. 799-809.
63. Manninen J., N.G. Kleimenova, **O.V. Kozyreva**, T. Turunen, Pc5 geomagnetic pulsations, pulsating particle precipitation, and VLF chorus: Case study on 24 November 2006 // J. Geophys. Res. 2010. V.115. A00F14.
64. Pilipenko V., **O. Kozyreva**, et al., Generation of magnetic and particle Pc5 pulsations during the recovery phase of strong magnetic storms // Proc. R. Soc. A. 2010. doi: 10.1098/rspa.2010.0079
65. Клейменова Н.Г., **О.В. Козырева**, М. Кубицки, С. Михновски, Вариации приземного электрического поля в высоких широтах и разности потенциалов поперек полярной шапки во время утренних полярных суббурь // Геомагнетизм и Аэрномия. 2011. Т.51. № 3. 397–404.
66. Клейменова Н.Г., **О.В. Козырева**, и др. Высокоширотные геомагнитные возмущения в начальную фазу рекуррентной магнитной бури // Геомагнетизм и Аэрномия. 2011. Т.51. № 6. 746-756.
67. Маннинен Ю., Н.Г. Клейменова, **О. В. Козырева**, П.А. Беспалов, Т. Раита, Квазипериодические ОНЧ излучения, ОНЧ хоры и геомагнитные пульсации Pc4 (событие 3 апреля 2011 г.) // Геомагнетизм и Аэрномия. 2012. Т.52. № 1. С. 82–92
68. Клейменова Н.Г., **О.В. Козырева**, и др., Влияние суббурь в ночном секторе Земли на вариации приземного атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах // Геомагнетизм и Аэрномия. 2012. Т.52. № 4. С. 494–500
69. Франк-Каменецкий А.В., А.Л. Котиков, А.А. Круглов, Г. Барнс, Н.Г. Клейменова, **О.В. Козырева**, и др., Вариации приземного электрического поля в высоких широтах и потенциал ионосферы во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и Аэрномия, 2012. Т.52. № 5. С. 666-675.
70. Клейменова Н.Г., Е.Е. Антонова, **О.В. Козырева**, и др., Волновая структура магнитных суббурь в полярных широтах // Геомагнетизм и Аэрномия. 2012. Т.52. № 6. С. 785-793.
71. Manninen J., Kleimenova N., **Kozyreva O.**, et al. Experimental evidence of the simultaneous occurrence of VLF chorus on the ground in the global azimuthal scale – from pre-midnight to the late morning // Ann. Geophys. 2012. V.30. P. 725-732.

72. Manninen J., N. G. Kleimenova, **O.V. Kozyreva**, New type of ensemble of quasi-periodic, long-lasting VLF emissions at the auroral zone // *Ann. Geophys.* 2012. V.30. P.1655–1660.
73. Kleimenova N., **O. Kozyreva**, S. Michnowski, M. Kubicki, Influence of geomagnetic disturbances on atmospheric electric field (Ez) variations at high and middle latitudes // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2013. V.99. P.117-122.
74. Manninen J., N.G. Kleimenova, **O.V. Kozyreva**, P.A. Bespalov, A.E. Kozlovsky, Non-typical ground-based quasi-periodic VLF emissions observed at L~5.3 under quiet geomagnetic conditions at night // *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics.* 2013. V.99, P. 123-128.
75. **Козырева О.В.**, Глобальная динамика геомагнитных возмущений в начальную фазу магнитной бури 05.04.2010 г. // *Геофизические исследования.* 2013. Т.14. № 2. С.59-70.