

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю.ШМИДТА
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

ПИЛИПЕНКО Вячеслав Анатольевич

**Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых
полей в околоземном пространстве**

01.03.03 – физика Солнца и солнечно-земные связи

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2006 г.

Работа выполнена в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и
Институт космических исследований РАН

Официальные оппоненты:

Ерохин Н.С. - доктор физ.-мат. наук (ИКИ РАН)

Кингсеп А.А. - доктор физ.-мат. наук (РНЦ «Курчатовский Институт»)

Копытенко Ю.А. - доктор физ.-мат. наук (СпБФ ИЗМИРАН)

Ведущая организация: Институт Прикладной Физики РАН (Н. Новгород)

Защита состоится 06 апреля 2007 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета
Д 002.113.03 ИКИ РАН по адресу: Профсоюзная ул. 84/32, Москва 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИФЗ и ИКИ.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Канд. физ.-мат. наук

Буринская Т.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для исследований плазменных процессов в ближнем космосе электромагнитные волны ультра-низкочастотного (УНЧ) диапазона (покрывающим три порядка по частоте, от долей мГц до первых Гц) имеют такое же значение, как сейсмические волны для изучения строения Земли – они позволяют проводить дистанционное зондирование и мониторинг областей, недоступных in-situ измерениям. По сравнению с волновыми процессами в других областях физики, волны в плазме обладают рядом специфических особенностей. Из этих особенностей принципиальное значение имеют резонансные эффекты: взаимодействие волн и частиц, трансформация волн, формирование резонаторов и волноводов. Благодаря резонансным эффектам, УНЧ волны переносят информацию о динамических явлениях в околоземном пространстве и верхней атмосфере, и достигают амплитуд, достаточных для того, чтобы оказывать активное влияние на протекание плазменных процессов и эффективно ускорять магнитосферные электроны. Тем не менее, существует принципиальная возможность использования регистрируемых на Земле УНЧ волн для гидромагнитной диагностики – определения параметров магнитосферной и ионосферной плазмы. УНЧ возмущения сопровождают все геофизические явления, связанные с большим выделением энергии – магнитные бури, взрывы, ураганы и грозы, землетрясения, и являются одним из основных агентов, связывающих в эти периоды разные геофизические оболочки. Однако в отличие от сейсмологии, для большинства геомагнитных пульсаций весьма ориентировочно известны свойства источников волн и каналы их распространения к земной поверхности. Лишь для небольшого числа из необычайного разнообразия периодических возмущений в околоземной плазме можно с уверенностью сказать, что их физическая природа выяснена. Регистрируемые спутниковыми и наземными магнитометрами УНЧ пульсации геомагнитного поля являются отражением магнитогидродинамических (МГД) волн в околоземной среде. МГД волновые явления повсеместно встречаются не только в околоземной среде, но и в солнечной короне и плазме лабораторных установок. Поэтому исследования УНЧ колебаний взаимно обогащают и дополняют физику МГД волн в солнечной, лабораторной и околоземной плазмах.

Цель работы состояла в детальном исследовании влияния резонансных эффектов в околоземной среде на возбуждение, распространение и диссипацию УНЧ волн, в частности:

- разработка адекватных физических и численных моделей, позволяющих детально описать пространственно-частотную структуру УНЧ волн в разных средах: магнитосфере, ионосфере, и у земной поверхности;
- разработка и апробация различных методов определения параметров магнитосферного резонатора по данным наземной регистрации УНЧ волн;
- выяснение возможности распространения УНЧ сигналов вдоль ионосферы и в волноводе Земля-ионосфера;
- выявление особенностей формирования волновых явлений в пограничных областях магнитосферы;
- определение механизмов возбуждения УНЧ колебаний при резонансном взаимодействии волн и частиц;
- выяснение влияния области ускорения авроральных электронов на формирование на этих широтах специфических волновых явлений и на распространение магнитосферных альвеновских волн;
- возможность выделения из всего многообразия природной магнитосферной активности аномальных возмущений антропогенной и сейсмической природы.

Основные защищаемые положения

- Комплекс методов «магнито-сейсмологии» для наземного мониторинга распределения околоземной плазмы, основанный на физическом эффекте резонансной трансформации магнитосферной волновой энергии в локальные альвеновские колебания магнитных оболочек.
- Существование специфического класса поверхностных МГД волн, распространяющихся вдоль проводящего слоя ионосферы.

- Наличие волновых УНЧ явлений во внешней магнитосфере ($>10 R_E$), которые благодаря механизмам конверсии волновой энергии в направляемые альвеновские волны переносят информацию о динамических процессах в этих областях к земной поверхности.
- Наличие волнового механизма модуляции и ускорения электронов в верхней ионосфере на авроральных широтах.
- Механизмы спонтанного возбуждения УНЧ колебаний в результате дрейфовых неустойчивостей неоднородных распределений энергичных частиц в околоземной среде.
- Наличие разнообразных аномальных не-магнитосферных возмущений геомагнитного поля и ионосферной плазмы, вызванных антропогенной, метеорологической и сейсмической активностью.

Научная новизна работы состоит в том, что

- построена теоретически обоснованная численная модель магнитосферно-ионосферного альвеновского резонатора;
- построена численно-аналитическая модель искажения резонансной волновой структуры при прохождении через ионосферу к земной поверхности;
- разработаны и апробированы новые методы наземного мониторинга плотности магнитосферной плазмы, что позволяет говорить о создании “гидромагнитной сейсмологии” околоземного космического пространства;
- экспериментально обнаружены и теоретически смоделированы ранее неизвестные особенности УНЧ волн Pc3 диапазона на низких широтах - аномальная зависимость периода от широты и резкое усиление диссипативных свойств;
- предсказано существование открытых МГД волноводов в области высокоширотного каспа и плазменного слоя со специфическими каналами утечки волновой энергии;
- обнаружено явление периодической модуляции высокоширотной ионосферы долгопериодными альвеновскими волнами солнечного ветра и построена численная модель их наземного отклика;
- предсказано существование новой волновой структуры - альвеновского резонатора в верхней авроральной ионосфере;
- количественно обоснован механизм активизации авроральных дуг альвеновскими волнами;
- построена исчерпывающая линейная теория возбуждения низкочастотных колебаний протонами кольцевого тока в результате кинетических дрейфовых неустойчивостей;
- обнаружены и проинтерпретированы новые эффекты возмущения геомагнитного поля и ионосферы антропогенными, метеорологическими и сейсмическими источниками.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

Особенностью диссертационной работы является попытка синергетически объединить разработку адекватных теоретических моделей с их апробацией с помощью специализированного анализа данных наземных и спутниковых наблюдений, и далее – с постановкой новых нерешенных проблем. Поэтому все теоретические представления, развиваемые автором, получили непосредственное экспериментальное подтверждение, а обнаруженным новым природным явлениям была дана непротиворечивая интерпретация. Многие из результатов работы были опубликованы достаточно давно, некоторые – более 20 лет назад, и «прошли проверку временем»: несмотря на большое число новых исследований, значительно расширивших прежние представления, основные результаты автора не были опровергнуты. Об этом, в частности, свидетельствует большое число ссылок на работы автора (более 300 по данным International Citation Index на май 2006 г.). Все результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах.

Практическая ценность работы.

Полученные в диссертации результаты закладывают практические основы для наземных методов гидромагнитной диагностики магнитосферы, и позволяют говорить о создании «магнито-сейсмологии» околоземного пространства. Показано, что надежный мониторинг резонансных частот локальных силовых линий существен не только для гидромагнитной диагностики, но и для корректной интерпретации данных магнитотеллурического зондирования. Разработанные теоретические модели

резонансной трансформации МГД колебаний и кинетических дрейфовых неустойчивостей являются новыми не только для космической геофизики, но и физики плазмы в целом. Разработанные представления о резонансном взаимодействии УНЧ волн с релятивистскими электронами, представляющими угрозу для надежного функционирования технологических систем в космосе, позволили ввести в космическую геофизику новый геомагнитный индекс – волновой УНЧ индекс, характеризующий уровень УНЧ турбулентности в околоземной среде и используемый для прогноза радиационной опасности для геостационарных спутников. Кроме того, УНЧ диапазон оказался наиболее перспективным для поиска электромагнитных шумов литосферного происхождения, связанных с процессами подготовки землетрясений.

Личный вклад. Характерной особенностью исследований, проводимых автором, является сочетание разработки новых теоретических представлений с их апробацией при обработке и анализе спутниковых и наземных данных. Для наземных исследований пульсаций при непосредственном участии автора был осуществлен ряд международных проектов, материалы которых использованы в работе. Автор участвовал в постановке работ, компьютерной обработке данных и их теоретической интерпретации. Все статьи, на которых основана диссертационная работа, были написаны лично автором, даже если он и не являлся первым соавтором.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, 2 приложений, списка литературы (290 наименований) и списка публикаций автора по теме диссертации (110 наименований). Работа содержит 140 страниц текста и 55 рисунков.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались в более 30 докладах, сделанных автором на отечественных и международных конференциях:

- генеральные ассамблеи Международного Геофизического и Геодезического Союза IUGG (Ванкувер 1991, Бермингем 1999, Саппоро 2003)
- ассамблеях Международной Ассоциации по Геомагнетизму и Аэрономии IAGA (Прага, 1985; Упсала 1997, Тулуза, 2005);
- конференциях Американского Геофизического Союза AGU (Сан-Франциско 1991, 1992);
- международных конференциях по плазменной астрофизике, солнечно-земной физике и геокосмосу (Иркутск 1976, С-Петербург, 2004; 2006; Апатиты, 1998, 2002);
- на научных семинарах ИФЗ, НИИЯФ, ИКИ, ИСЗФ.

Публикации. Из 130 работ, опубликованных автором в рецензируемых отечественных и зарубежных изданиях, непосредственно теме диссертации соответствует 69 работ.

Благодарности. Автору посчастливилось сотрудничать с блестящими физиками – Похотеловым О.А. и Федоровым Е.Н., от которых он многому научился и благодаря которым ему удалось что-то сделать в науке. Автор также признателен другим талантливым коллегам и прекрасным людям за годы совместной работы: Мазур Н.Г., Гохберг М.Б., Курчашов Ю.П., Шалимов С.Л., Козырева О.В., Чугунова О.М., Ягова Н.В., В.В. Сурков.

Введение: РОЛЬ РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПРОЦЕССАХ ГЕНЕРАЦИИ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ДИССИПАЦИИ УНЧ ВОЛН В ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ

Во введении обоснована постановка решаемых автором задач, сформулирована цель работы, дан краткий обзор современного состояния исследований вариаций геомагнитного поля в УНЧ диапазоне, и изложено место работ, составляющих содержание диссертации. Детальные ссылки на работы автора даны в соответствующих разделах диссертации.

МГД волны, пронизывающие все околоземное космическое пространство, доносят до земной поверхности информацию о свойствах окружающей Землю плазмы и динамических процессах в ней. Эти волны регистрируются спутниковыми и наземными магнитометрами в виде УНЧ (Ultra-Low-Frequency по зарубежной терминологии) пульсаций геомагнитного поля диапазона 1мГц–1Гц. Геомагнитные пульсации были, по существу, первыми электромагнитными волнами, зарегистрированными при помощи примитивного магнитометра человеком. Энергетически УНЧ

волны являются самым мощным волновым электромагнитным процессом в околоземном пространстве.

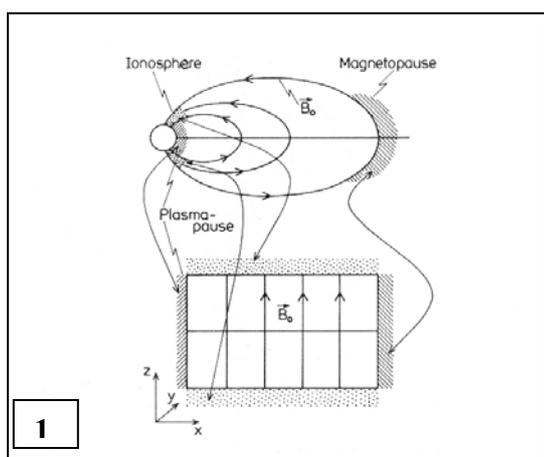
Исследование волновых явлений в околоземной плазме опирается на математический аппарат и теоретические подходы, разработанные в физике плазмы и магнитной гидродинамике. Однако нельзя сказать, что космическая геофизика занимается только приложением физических представлений, выработанных в общей физике плазмы. Ряд принципиально новых физических идей, получивших затем широкое развитие, пришел в физику плазмы из космической геофизики: пересоединение силовых линий и аннигиляция магнитных полей (*Dungey*), бесстолкновительные ударные волны (*Gold*). Сюда же следует добавить и особый класс МГД волн - волны Альвена, отмеченного за их предсказание Нобелевской премией в 1942 г. Конверсия МГД волн в области альвеновского резонанса, впервые предложенная *Chen & Hasegawa* для интерпретации структуры УНЧ волн в магнитосфере Земли, ныне широко используется в работах по управляемому термоядерному синтезу для радиочастотного нагрева плазмы и для объяснения нагрева солнечной короны.

В целом магнитосфера подобна гигантскому природному мазеру для МГД волн, в который накачиваются шумы солнечного ветра, которые затем усиливаются и фильтруются в магнитосферном резонаторе, и высвечиваются через полупрозрачные торцы (ионосферы). Наличие МГД мазера приводит к появлению в околоземном пространстве разнообразных узкополосных сигналов, что было бы трудно ожидать от турбулентного процесса взаимодействия солнечной плазмы с геомагнитным полем. Как будет показано в Гл.5, неравновесные распределения энергичных частиц в магнитосфере, подобно инверсной заселенности в мазере, также могут генерировать узкополосные колебания.

Глава I. РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ в ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЕ ПОЛЯ УНЧ ВОЛН и ГИДРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ

Резонансная трансформация МГД волн и модели MAP

Альвеновские волны принципиально отличаются от обычных волновых процессов в оптике, акустике или сейсмологии. Их спектр даже в пространственно ограниченной системе непрерывен, а собственные функции сингулярны, что приводит к интересным особенностям этих волн: одномерному характеру распространения вдоль магнитного поля и отсутствию геометрического затухания, возможности переноса нестационарного продольного тока вдоль силовых линий, отсутствию незатухающих решений даже в бездиссипативной системе, необратимой конверсии магнитозвуковых возмущений в альвеновские волны. Стоячие альвеновские колебания силовых линий геомагнитного поля, ограниченные сопряженными ионосферами, образуют магнитосферный альвеновский резонатор (MAP). Схематически MAP и его модель с прямыми силовыми линиями показан на рис.1.



Согласно представлениям резонансной теории MAP, МГД возмущения из внешних областей в процессе распространения в глубь магнитосферы трансформируются в альвеновские колебания. Наиболее эффективен процесс трансформации колебаний на геомагнитной широте Φ , где частота внешнего источника f совпадает с локальной частотой f_A собственных колебаний геомагнитной силовой линии, т.е. $f \rightarrow f_A(\Phi)$.

Основные представления о возбуждении MAP внешним источником были первоначально сформулированы в рамках упрощенной одномерной модели (*Southwood, Chen & Hasegawa*), в связи с чем до

сих пор продолжают дискуссии о сохранении качественного характера трансформации МГД волны в области резонанса в более реалистичных ситуациях (например, *Hansen & Goertz*). Строгое обоснование основных принципов теории альвеновского резонанса для двумерно-неоднородных плазменных конфигураций дано в 1.1, где с использованием метода Фробениуса показано, что сингулярный характер поля волны в окрестности резонансной оболочки сохраняется и в 2D

плазменных системах. В этой модели неоднородность альвеновской скорости $V_A(x, z) = B_0 / \sqrt{4\pi\rho_0}$ как поперек, так и вдоль \mathbf{B}_0 создается неоднородным распределением фоновой плазмы с плотностью $\rho_0(x, z)$. Такая модель с прямым \mathbf{B}_0 сохраняет все принципиальные особенности 2D-неоднородной системы, но позволяет избежать формальных усложнений связанных с необходимостью введения метрических коэффициентов в криволинейном \mathbf{B}_0 . Математическое описание волнового поля в окрестности резонансной оболочки получено с помощью качественной теории дифференциальных уравнений в виде асимптотического разложения:

$$\begin{aligned}\xi_y(x, z) &= ik_y^{-1} N Q_S(x_A, z)(x - x_A)^{-1} + O(1) \\ \xi_x(x, z) &= N Q_S(x_A, z) \ln(x - x_A) + O(x - x_A) \\ B_z(x, z) &= N^{-1} \sum_n q_n Q_n(x_A, z) + o(x - x_A)\end{aligned}\quad (1)$$

где x – радиальная координата, $x_A(f)$ – координата резонансной силовой линии, ξ – смещение плазмы, B_z – магнитная компонента вдоль \mathbf{B}_0 (сжатия), Q_n – собственные функции альвеновских колебаний силовых линий.

Главный сингулярный член асимптотического разложения (1), описывающий амплитудные и фазовые характеристики $B_y = B_0 \partial_z \xi_y$ азимутальной составляющей поля колебаний в окрестности резонансной оболочки имеет вид

$$B_y(x, f) = b_0(f) \frac{i\delta_m}{x - x_A(f) + i\delta_m} \quad (2)$$

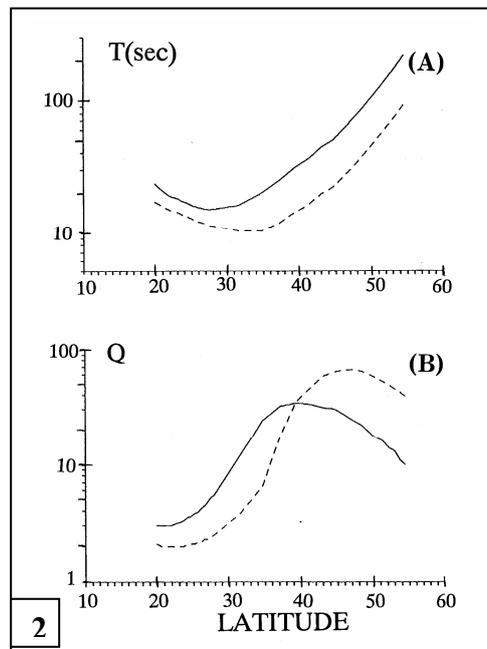
где δ_m – полуширина резонансной области в магнитосфере. Исходя из представления (2), пространственную структуру поля пульсаций можно качественно представить в виде суперпозиции сигнала "источника" $b_0(f)$ и резонансного отклика МАР. Сигнал источника обусловлен возмущением, переносимым крупномасштабной БМЗ волной, и слабо зависит от координаты. Резонансный же отклик МАР, связанный с возбуждением альвеновских колебаний, сильно локализован и вызывает резкое изменение хода амплитуды и фазы пульсаций при переходе через резонансную оболочку. Радиальная компонента $B_x = B_0 \partial_z \xi_x$ поля пульсаций имеет более слабую (логарифмическую) особенность в окрестности резонансной оболочки, и резонансные эффекты в ее структуре проявляются слабо. Компонента сжатия (compressional) магнитного поля B_z регулярна в точке $x=x_A$ и имеет в ее окрестности малую, но конечную величину.

Согласно спектральной теории МГД резонаторов в криволинейном магнитном поле (Крылов, Федоров, Леонович, Мазур), полный спектр колебаний определяются двумя наборами нелокальных дисперсионных уравнений. Эти дисперсионные уравнения совпадают с хорошо известными обыкновенными дифференциальными уравнениями *Dungey*, соответствующими либо малым значениям азимутального волнового числа $m \sim 1$ (тороидальная мода), либо большим $m \gg 1$ (полоидальная мода). Альвеновские колебания тороидального типа преимущественно возбуждаются крупномасштабными вне-магнитосферными источниками и хорошо проходят к земной поверхности. Колебания полоидального типа в основном возбуждаются более локальными внутри-магнитосферными источниками и практически полностью экранируются ионосферой от земной поверхности.

Для описания качественных особенностей МГД волновых процессов в магнитосфере достаточно рассмотрения сравнительно простых моделей с прямым магнитным полем. Однако для целей гидромагнитной диагностики требуется разработка численных моделей, учитывающих реальную геометрию геомагнитного поля и особенности распределения плазмы вдоль силовых линий. Для количественной интерпретации спектральных особенностей УНЧ волн в 1.2 разработана новая численная модель МАР. В этой модели МАР параметры резонатора на данной широте определяются путем численного интегрирования волновых уравнений по ионосфере и магнитосфере с граничными условиями непротекания тока $j_n = 0$ на нижней кромке ионосферы. Пространственное распределение альвеновской скорости и педерсеновской проводимости, определяющих коэффициенты этих уравнений, рассчитываются по параметрам многокомпонентной ионосферной плазмы из эмпирической модели стандартной ионосферы IRI-90.

Для средних и высоких широт ионосфера может быть аппроксимирована для МГД волн тонкой анизотропно проводящей пленкой, когда толщина Δh педерсеновского слоя много меньше эффективной толщины скин-слоя δ_p , т.е. $\Delta h \ll \delta_p = c / (2\pi\sigma_p\omega)^{1/2}$. В приближении тонкого слоя, горизонтальные компоненты электрического и магнитного полей альвеновской волны на уровне ионосферы связаны граничным импедансным условием $E_v = B_\phi / X_p$ через безразмерный адмиттанс ионосферы $X_p = 4\pi\Sigma_p / c \sin I$. Расчеты спектральных характеристик MAP для средних широт хорошо согласуются с результатами экспериментов по определению пространственно-частотной структуры поля Pc3-5 колебаний, описываемых в 1.5.

По мере приближения к приэкваториальным широтам возможность использования приближения "тонкой" ионосферы представляется проблематичной, т.к. на низких широтах значительная часть силовой линии оказывается "погруженной" в ионосферные слои. Как показывают расчеты по разработанной модели MAP на средних широтах ($L > 2$) периоды основных гармоник и добротностей колебаний для реальной ионосферы и в приближении "тонкой" ионосферы практически совпадают. Но по мере приближения к экватору ($L < 2$) расчетные кривые начинают расходиться. При этом период альвеновских колебаний T_A первой (сплошная) и второй (пунктир) гармоник увеличивается и меридиональный градиент альвеновской частоты меняет знак на $L \sim 1.3$ (рис.2А). Изменение хода кривой $T_A(L)$ на низких широтах связано с "нагрузением" силовых линий тяжелыми ионосферными ионами (O^+ , NO^+ , O_2^+). Кроме того, на низких широтах резко усиливается джоулева диссипация колебаний, т.к. на этих широтах значительная часть силовых линий находится в ионосферных слоях с высокой проводимостью: на $\Phi < 40^\circ$ добротность MAP резко падает (рис.2В), в то время как теория "тонкой" ионосферы предсказывает нереально высокое возрастание Q_d на низких широтах.



Для методов наземной диагностики околоземного пространства с использованием УНЧ волн принципиальное значение имеет вопрос о возможных искажениях их структуры при прохождении через ионосферу. Для оценки возможности просачивания магнитосферных возмущений к земной поверхности достаточно воспользоваться простыми соотношениями теории тонкой ионосферы [Альперович & Федоров, Hughes & Southwood], согласно которым при прохождении через однородную ионосферу поперечная пространственная структура волны сохраняется с учетом поворота эллипса поляризации на $\pi/2$: $B_x \rightarrow D$; $B_y \rightarrow H$; и уширения резонансного пика: $\delta \rightarrow \delta_m + h$ (h - высота токнесущего слоя ионосферы).

Применение же методов наземной гидромагнитной диагностики требует более строгого рассмотрения возможных искажений амплитудно-фазовой структуры поля пульсаций при ионосферном прохождении. Такая численная модель, основанная на полных аналитических соотношениях теории прохождения гармоники плоской неоднородной МГД волны через тонкую ионосферу, изложена в 1.3. На первом этапе расчетов, пространственная структура падающей на ионосферу волны в резонансной области разлагается на спектральные гармоники, а на следующем этапе полное поле рассчитывается путем численного интегрирования по всем составляющим гармоникам с их коэффициентами прохождения. Влияние геоэлектрических свойств подстилающей земной коры учитывается рекуррентными импедансными соотношениями для многослойной среды.

Расчеты пространственной меридиональной структуры поля УНЧ волны показывают, что амплитуды горизонтальных магнитных и электрических компонент у земной поверхности имеют симметричный максимум с центром под резонансной силовой линией. Вертикальная компонента B_z меньше по амплитуде, но имеет более резкий максимум. Фаза горизонтальных компонент B_x и E_y при переходе через резонансную область испытывает скачок $\leq \pi$ с наиболее резким градиентом в резонансной

точке. Фаза компоненты B_z в окрестности резонанса имеет в 2 раза более резкий градиент, чем B_x . Соответственно, фазовый сдвиг между B_z и E_y компонентами меняется от $\pi/2$ до $-\pi/2$ по разные стороны от резонансного пика, а в точке резонанса эти компоненты синфазны. Результаты расчетов отношения между амплитудами B_z и E_y компонент и разности фаз между ними на различных расстояниях от резонансной силовой линии подтверждают аналитические соотношения, полученными в 1.4 при условии сильного скин-эффекта.

Одно из практических применений УНЧ волн связано с магнито-теллурическим зондированием (МТЗ) земной коры. Для методов МТЗ адекватный выбор структуры первичного поля имеет принципиальное значение. Предсказываемая резонансной теорией специфическая амплитудно-фазовая структура поля УНЧ волн, не учитывается современными моделями МТЗ. Пренебрежение спецификой структуры поля УНЧ волн на резонансных частотах при интерпретации данных МТЗ над высокоомными разрезами может привести к ложным выводам о наличии локальных геоэлектрических структур в земной коре. В 1.3 представлены результаты исследования резонансной структуры поля УНЧ волн при различных геоэлектрических условиях. Над высокоомной подстилающей поверхностью, когда условие сильного скин-эффекта нарушается, модельные расчеты показывают, что вертикальная магнитная компонента становится сравнимой по величине с горизонтальной. По сравнению со случаем хорошо-проводящей земной коры, широтное распределение амплитуды и фазы искажается, причем в разной степени для электрической и магнитной компонент, что приводит к искажению кажущегося импеданса $Z = \mu_0 E_y / B_x$. Эти искажения амплитудной и фазовой частей Z достигают ~50% от импеданса Тихонова-Каньяра, основанного на модели вертикально падающей плоской волны. Таким образом, определение локальных резонансных частот существенно не только для гидромагнитной диагностики, но и для более корректной интерпретации данных МТЗ.

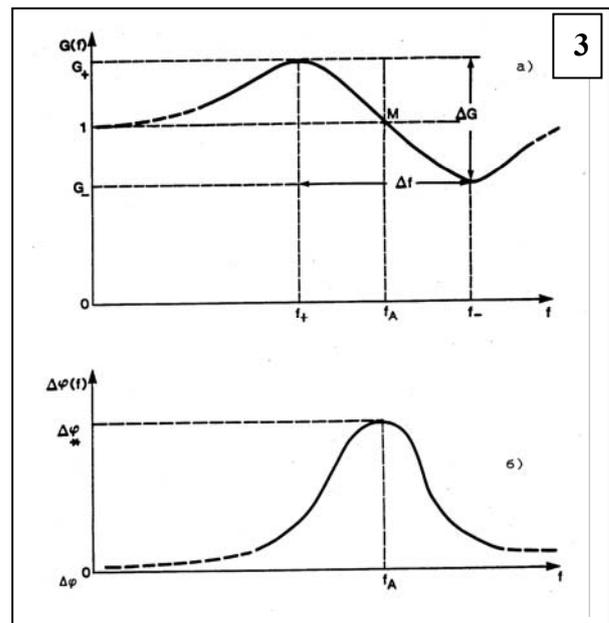
Методы наземного мониторинга околоземной плазмы с использованием УНЧ волн

В отличие от сейсмологии, для геомагнитных пульсаций весьма ориентировочно известны свойства их источников (местонахождение, спектральный состав и т.п.). Тем не менее, как показано в 1.4, существует принципиальная возможность использования регистрируемых на земной поверхности УНЧ волн для гидромагнитной диагностики – определения плотности магнитосферной плазмы. Физической основой гидромагнитной диагностики является рассмотренный в 1.1 нетривиальный эффект резонансной трансформации МГД волн в магнитосфере. Резонансная частота $f_R(B, N)$ определяется для данной геомагнитной широты локальным распределением плазмы вдоль силовой линии, а добротность – диссипативными свойствами ионосферы и магнитосферы [Троицкая, Гульельми]. Таким образом, уверенное выделение резонансных эффектов и наличие надежных методов расчета спектральных параметров MAP открывает возможность мониторинга плотности околоземной плазмы и проводимости ионосферы по наземным данным.

Теоретическое обоснование методов наземного мониторинга магнитосферной плазмы с помощью УНЧ волн дано в 1.4, а в 1.5 описаны результаты специализированных экспериментов по апробации этих методов. Наиболее эффективным образом отстроиться от влияния спектра источника и выделить локальные резонансные особенности удастся с помощью либо градиентных методов [Баранский], основанных на прецизионных измерениях поля пульсаций на малой базе, либо поляризационных методов [Гульельми], опирающихся на соотношения между различными магнитными и электрическими компонентами поля волны в данной точке. Для практического мониторинга резонансной частоты требовалось разработать несколько взаимоконтролирующих методов ее определения.

Градиентный метод. Основная трудность в экспериментальном определении f_R заключается в том, что зачастую вклад в наблюдаемый спектр пульсаций резонансного отклика MAP оказывается сопоставимым с особенностями спектра источника колебаний. В результате, спектральный пик регистрируемого сигнала может не совпадать с локальной резонансной частотой, а ширина спектрального пика - не характеризовать добротность MAP. Неопределенность с разделением спектров резонансного отклика и источника удастся разрешить с помощью градиентного метода [Баранский] - прецизионных измерениях поля пульсаций на малой базе (~50-300 км). Этот метод, и его дальнейшее развитие в 1.4, дает возможность отстроиться от влияния спектра источника и выделить даже сравнительно слабые резонансные эффекты.

Наличие данных регистрации сигналов на двух станциях, разнесенных по меридиану на расстояние $\Delta x = x_2 - x_1$ дает возможность экспериментально рассчитать отношение амплитудных спектров H компонент $G(f) = H(f, x_2) / H(f, x_1)$ и разность фаз $\Delta\varphi(f)$. Из теоретических выражений для $G(f)$ и $\Delta\varphi(f)$ следует, что на резонансной частоте f_c силовой линии, секущей меридиан посередине между двумя близкими станциями, $G(f)$ проходит через 1, а $\Delta\varphi(f)$ достигает экстремальной величины (рис.3). При обычном для магнитосферы уменьшении f_R с ростом широты, знак разности $\Delta\varphi$ должен указывать на кажущееся распространение фазового фронта волны с юга на север, т.е. по направлению к источнику пульсаций. Приведенный в 1.4 набор свойств спектральных функций $G(f)$ и $\Delta\varphi(f)$ позволяет оценить резонансную частоту силовой линии между двумя станциями, ширину резонансной области δ , и градиент альвеновской частоты в магнитосфере.



Модифицированный градиентный метод для горизонтально-неоднородной земной коры.

Наличие горизонтальных геоэлектрических неоднородностей может существенно исказить структуру падающего поля пульсаций. Влияние геоэлектрической неоднородности выражается в изменении амплитудного отношения $G(f)$ на некоторый коэффициент M и появлении дополнительного фазового сдвига $\Delta\varphi_0$. Эти искажения удается рассчитать при предположении, что эти неизвестные коэффициенты слабо зависят от f в ограниченном частотном диапазоне вблизи резонансной частоты. В результате, модифицированный градиентный метод дает возможность рассчитать параметры резонансной структуры даже для данных, искаженных влиянием геоэлектрических неоднородностей.

Амплитудно-фазовый градиентный метод. Согласно резонансной теории спектр резонансной компоненты сигнала может быть представлен в виде аналитического соотношения (2) с особенностью в комплексной плоскости. Исходя из теоретических соотношений для $G(f)$ и $\Delta\varphi(f)$, можно получить соотношение для расчета расстояния $x_R(f)$ до резонансной оболочки на каждой частоте по наблюдательным данным [Гульельми], а затем обращая зависимость $x_R(f) \rightarrow f_R(x)$ - непрерывное широтное распределение резонансной частоты $f_R(x)$. В рамках этого же подхода можно восстановить вид спектра пульсаций $b_0(f)$, неискаженного влиянием резонансных эффектов.

Поляризационные методы изучения резонансной структуры поля пульсаций используют амплитудные и фазовые соотношения между различными компонентами в одной точке. Различная «чувствительность» разных компонент УНЧ волн к резонансной особенности (1) указывает, что информация о резонансной частоте может быть извлечена не только из пространственной структуры волн, но также и из их поляризационных свойств.

Если диссипация в системе очень мала, то из выражения для отношения комплексных спектров $H(f)/D(f)$ следует, что при пересечении резонансной оболочки направление вращения горизонтального вектора должно измениться. Когда добротность МАР невелика, то эффект смены поляризации может проявиться только на оболочках, смещенных относительно резонансной. В этом случае поляризационные особенности горизонтальных магнитных компонент сложно использовать для практического определения резонансных частот, так как смещение точки обращения поляризации от резонансной зависит от трудно определяемых параметров. Поэтому в отличие от предсказаний первых работ по теории МАР [Chen & Hasegawa, Southwood] изменение знака поляризации оказывается ненадежным методом для определения f_R в реальной магнитосфере.

Поскольку резонансный отклик магнитосферы (1) характеризуется резко выраженной асимметрией между H и D компонентами, а спектр источника влияет на обе компоненты одинаковым образом, то

даже тогда, когда резонансный отклик замаскирован спектром источника, отношение $H(f)/D(f)$ выявит максимум на резонансной частоте силовой линии, проходящей через точку наблюдения [Баранский].

Поляризационный метод, основанный на резонансных свойствах вертикальной магнитной компоненты. Появление вертикальной компоненты B_z геомагнитных пульсаций у земной поверхности отражает наличие горизонтальных неоднородностей либо геоэлектрической структуры земной коры, либо самого поля пульсаций. Таким образом, использование B_z компоненты поля пульсаций может оказаться перспективным для выделения резонансных особенностей пространственной структуры поля пульсаций. В случае сильного скин-эффекта (это условие хорошо выполняется для типичных Pc3-5 пульсаций над низкоомными разрезами), если пренебречь вкладом компоненты D и неоднородностью импеданса земной поверхности, B_z компонента в резонансной точке имеет более сильную особенность $\propto (x - x_R)^{-2}$, чем H компонента $\propto (x - x_R)^{-1}$. Появление максимума B_z составляющей в пространственном распределении амплитуды вдоль земной поверхности под резонансным пиком в ионосфере представляет собой специфическую особенность резонансной пространственной структуры, так как синфазные локализованные ионосферные токи создали бы на земле минимум B_z . Следовательно, для определения резонансной частоты с использованием многокомпонентных магнитных данных, в дополнение к $H(f)/D(f)$ отношению можно использовать отношение $B_z(f)/D(f)$, которое должно иметь резкий пик на локальной резонансной частоте. Приведенные в 1.4 аналитические оценки хорошо согласуются с результатами численного расчета в 1.3 приземной структуры УНЧ волн в резонансной области.

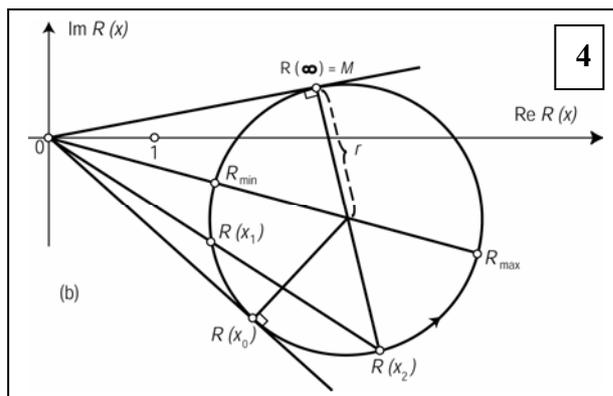
Гидромагнитная диагностика с использованием магнитных и электрических компонент. Резонансные особенности B_z компоненты лежат в основе другого поляризационного метода наземной гидромагнитной диагностики. Из граничного условия для компонент поля УНЧ волн над хорошо проводящей земной корой можно получить соотношение между спектрами компонент $B_z(f)$ и $E_y(f)$.

Численные расчеты и теоретические оценки показывают, что на частоте альвеновского резонанса отношение спектральных плотностей $|B_z(f)/E_y(f)|$ имеет локальный максимум, а компоненты B_z и E_y должны быть синфазны. Более того, удастся получить соотношения, которые позволяют по данным МТЗ наблюдений, включающих не только магнитные, но и электрические компоненты, определить расстояние до резонансной силовой линии с заданной частотой. Обращая зависимость $x_R(f) \rightarrow f_R(x)$, можно восстановить широтный профиль резонансной частоты в окрестности точки наблюдения по данным только одной обсерватории [Гульельми]. Таким образом, данные МТЗ наблюдений могут обогатить набор методов гидромагнитной диагностики. Однако, этот метод можно применить только для условий низкоомных подстилающих пород, когда справедливо условие сильного скин-эффекта. Возможные искажения, вносимые в результаты этого метода конечным сопротивлением земной коры, рассматриваются с помощью численной модели в 2.1.

Метод годографа. В 1.4 предложен новый метод определения частоты МАР, основанный на расчете годографа отношения комплексных спектров сигнала на двух станциях. Идея данного метода опирается на геометрические свойства преобразования, описываемого аналитическими соотношениями (2) резонансной теории. Регистрируя H компоненту УНЧ сигнала на двух станциях меридионального профиля, можно найти отношение их комплексных спектров

$$R(f) = G(f)e^{i\Delta\varphi(f)} = \frac{X + 1 + i\tilde{\delta}}{X - 1 + i\tilde{\delta}} \quad (3)$$

Здесь введена безразмерная координата $X = (x - x_C)/(\Delta x/2)$ и нормированная ширина резонанса $\tilde{\delta} = \delta/(\Delta x/2)$. При изменении частоты f точка $x = x_R(f)$ пробегает всю действительную ось, при этом ее образ $R\{x(f)\}$ пробегает на комплексной плоскости некоторую кривую – годограф (рис.4). Этот годограф обладает рядом замечательных свойств, которые делают его



весьма удобным и информативным средством представления данных. Правая часть формулы (3) для $R(f)$, по существу, задает дробно-линейное преобразование комплексной плоскости X в комплексную плоскость R , которое переводит совокупность прямых в окружности.

В 1.4 получен ряд соотношений для преобразования годографа, опираясь на которые можно по данным градиентных измерений определить характерные резонансные частоты, ширину резонанса и добротность MAP, и искажения за счет неоднородностей геоэлектрики. Применение годографа имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартным градиентным методом: он позволяет контролировать степень соответствия экспериментальных данных теоретической модели во всем частотном интервале и дает более устойчивые оценки. Кроме того, этот метод дополнительно позволяет по данным измерений в двух точках получить непрерывное распределение резонансных частот в интервале широт, выходящем за широту точек наблюдения. Для применения этого метода была разработана специальная интерактивная программа, в настоящее время распространенная среди специалистов по гидромагнитной диагностике.

Эксперименты по выделению резонансных эффектов

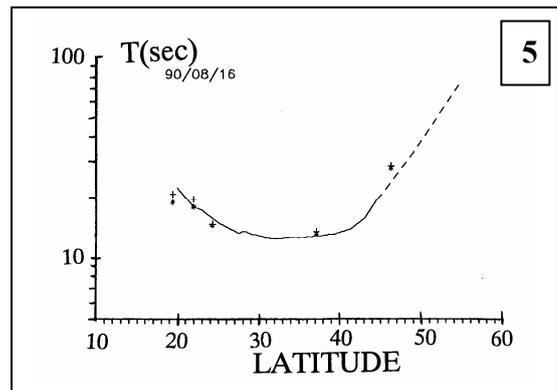
Для изучения локальной структуры поля Pc3-4 и Pi2 пульсаций проводилась серия специализированных экспериментов на разных широтах, описываемых в 1.5. Впервые цифровые методы кросс-спектрального анализа были применены нами к обработке данных советско-германского эксперимента на градиентных парах вблизи станций Согра ($L=3.6$) и Niemegek ($L=2.7$). Градиентный метод показал, что неэквидистантный спектр Pc3 пульсаций во внутренней магнитосфере образуется нечетными гармониками альвеновских колебаний (имеющими в экваториальной плоскости пучность смещения плазмы), что качественно согласуется с гипотезой о внемагнитосферном источнике этих пульсаций. Также градиентный метод подтвердил предположение об альвеновском резонансе для Pi2 сигналов внутри плазмосферы. В целом резонансная теория качественно описывает основные характерные особенности градиентов поля дневных и ночных пульсаций, но при количественных оценках для высоких гармоник возникало противоречие с теорией тонкой ионосферы. Для слежения за временной динамикой MAP нами была разработана процедура градиентно-временного анализа, основанная на сравнении цифровых динамических спектров сигналов на разных станциях. Дифференциальная амплитудная сонограмма Pc3-4 пульсаций отчетливо показывает наличие линии обращения градиента $H^{(N)}(f)-H^{(S)}(f)$, обусловленной теоретически предсказываемым селективным усилением высокочастотной части сигнала на южной станции по сравнению с северной. Дифференциальная фазовая сонограмма показывает, что для всех волновых пакетов хорошо выделяется частота экстремального значения фазовой разности, отвечающая резонансной частоте. Градиентно-временной метод в дальнейшем получил широкое распространение [Waters, Kawano].

В экспериментах в Колорадо и Киргизии синхронная регистрация пульсаций электромагнитного поля Земли велась на сети станций с разносом $\sim 100-200$ км, расположенных вдоль геомагнитного меридиана. Станции находились в резко неоднородных геоэлектрических условиях, и было не ясно, насколько существенно скажутся геоэлектрические неоднородности на результатах градиентного метода. Результаты эксперимента показали, что модифицированный градиентный метод позволяет определить резонансные эффекты Pc3-4 пульсаций даже для данных, искаженных влиянием геоэлектрической неоднородности подстилающих пород. Сравнение градиентных и поляризационных методов для определения собственной частоты силовых линий, ее радиального градиента и ширины резонансной области продемонстрировало применимость этих методов в качестве инструмента гидромагнитной диагностики магнитосферы.

При анализе данных наблюдений на сети среднеширотных станций 210 MM идентифицировать резонансные частоты Pc3-4 колебаний удалось однозначным образом провести с помощью квази-градиентного метода, использующего данные почти сопряженных станций. Используя экспериментально определенный набор резонансных частот, был восстановлен характер распределения магнитосферной плазмы, как в радиальном направлении, так и вдоль силовой линии, хорошо согласующийся со спутниковыми результатами.

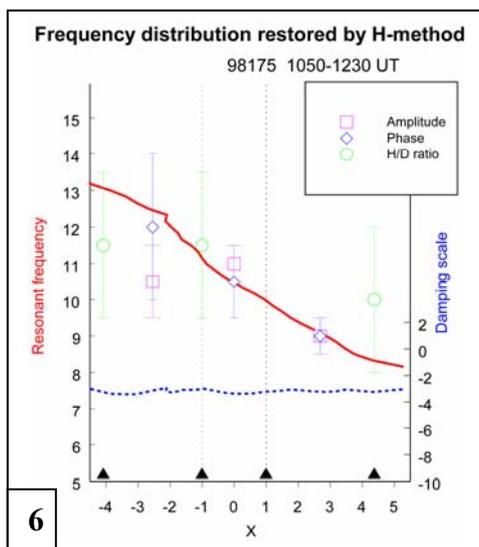
Поляризационный метод диагностики, использующий отношение спектральных плотностей горизонтальных магнитных компонент, был успешно апробирован по данным эксперимента по синхронной регистрации Pc3-4 пульсаций на среднеширотных станциях Niemegek и Laquila.

Как предсказывает теоретическая модель в 1.2, качественно новые особенности MAP могут проявиться на низких геомагнитных широтах (ниже 30°), где значительная часть силовой линии оказывается погруженной в ионосферную плазму. Данные цепочки станций 210 MM действительно выявили резкое ухудшение добротности $Pc3$ колебаний по мере приближения к экваториальным широтам. Кроме того, поляризационным H/D методом на низких широтах обнаружен аномальный ход резонансного периода – рост $T_R(\Phi)$ с уменьшением широты (рис.5), предсказываемый



разработанной численной моделью ионосферно-магнитосферного резонатора. Совместный анализ ионосферных и магнитосферных данных показывает, что наземные наблюдения УНЧ пульсаций могут использоваться не только на средних, но и на низких широтах для мониторинга плотности плазмы в плазмосфере, где спутниковые наблюдения оказываются неэффективными.

Амплитудно-фазовый градиентный метод был успешно апробирован при анализе данных наблюдений на сети низкоширотных станций в Японии. Этот метод также подтвердил наличие аномальной зависимости $T_R(\Phi)$ на низких широтах.



Метод годографа был применен нами для определения широтной зависимости резонансной частоты MAP по данным меридиональной сети станций в Скандинавии. Пример широтного распределений $f_R(X)$ и $\tilde{\delta}(X)$, восстановленных методом годографа по данным эксперимента BEAR, показан на рис.6.

Проведенные эксперименты позволили сформулировать основные подходы к задаче гидромагнитной спектроскопии, т.е. идентификации спектральных пиков УНЧ излучений. Оптимальным образом для гидромагнитной спектроскопии необходимо сочетание станций с малыми (~ 100 км) базами, позволяющими выделить локальные резонансные частоты, и большими (~ 1000 км) базами, необходимыми для определения глобальной структуры волн. Потенциальные возможности апробированных методов наземного УНЧ мониторинга распределения плазмы в магнитосфере

позволяют говорить о создании “гидромагнитной сейсмологии” околоземного пространства.

Глава II. Ионосферное распространение УНЧ волн

В Гл.2 рассмотрена возможность существования специфических низкочастотных МГД мод, которые могут распространяться вдоль ионосферы. В таком случае, ионосфера уже не являлась бы просто пассивным экраном, отражающим волновые процессы в магнитосфере достаточно больших масштабов, а могла бы приводить к более сложной картине интерферирующих сигналов.

В геофизической литературе в целом не было четкой картины распространения низкочастотных МГД возмущений вдоль ионосферы. С одной стороны, ряд авторов [Rostoker] полагали, что распространение УНЧ возмущений вдоль ионосферы аналогично распространению электромагнитной волны в проводящей пластине, и тем самым ограничено скин-длиной δ_p . С другой стороны, Сорокин, Федорович развивали представления о возможности дальнего ионосферного распространения на средних и высоких широтах специфических МГД мод, названных гиротропными волнами, вдоль E-слоя, где преобладает холловская проводимость $\sigma_H \gg \sigma_p$. Вопрос о возможности распространения гиротропной моды в приэкваториальной ионосфере оставался открытым. Обычно полагается, что все особенности поля УНЧ волн на при-экваториальных широтах связаны с существованием узкой полосы в экваториальной ионосфере с высокой каулинговской проводимостью σ_C . Однако, анализ поля $Pc3$

пульсаций на приэкваториальных широтах показал, что экваториальная ионосфера не только пассивно усиливает токи растекания от более высокоширотных источников, но и активно генерирует УНЧ возмущения. Эти экспериментальные наблюдения подводят к гипотезе о том, что флуктуации экваториального электроджета могут возбуждать геомагнитные возмущения, которые затем разбегаются вдоль ионосферы. В 2.2 дан строгий анализ задачи о распространении МГД возмущений вдоль ионосферного слоя с малым наклоном I геомагнитного поля. Эта задача завершает построение полной картины возможного ионосферного распространения МГД волн, развиваемой *Сорокиным, Борисовым, Мазуром*.

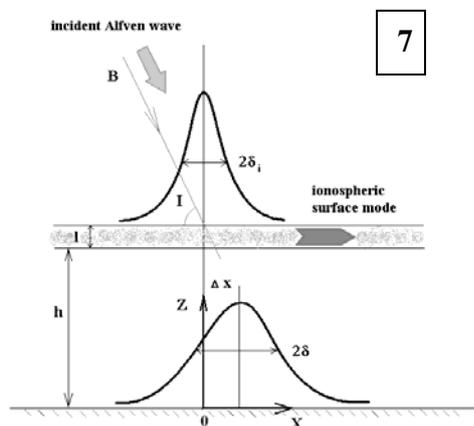
Суммируя результаты 2.3 и предшествующих работ, общие свойства поверхностной гиротропной моды можно описать следующим образом. Для наглядности, рассматриваем ситуацию, когда влиянием Земли на возмущения в ионосфере можно пренебречь, т.е. $kh \gg 1$. Введем характерные скорости ионосферы, определяемые интегральными ионосферными проводимостями: $V_{P,H} = 1/\mu_0 \Sigma_{P,H}$. В ионосферном слое с малой педерсеновской проводимостью ($\Sigma_P \ll \Sigma_H$) возможно дальнейшее распространение гиротропной моды, при этом скорость распространения определяется Σ_H : $\omega/k = \sqrt{2k}V_H \cos I$.

В типичной ионосфере, где $\Sigma_P \approx \Sigma_H$, свойства гиротропной моды меняются принципиальным образом - волновой режим распространения сменяется на диффузионный. В приближении тонкой ионосферы из бесконечного дискретного спектра горизонтальных волновых чисел k_n остается только мода с

$$k = i\omega/2V_C \quad \text{или} \quad \omega = -2iV_C |k| \quad (4)$$

где $V_C = 1/\mu_0 \Sigma_C$ - ионосферная "каулинговская" скорость, которая определяется комбинацией интегральных ионосферных проводимостей $\Sigma_C = \Sigma_P + \Sigma_H^2/\Sigma_P$. Дисперсионное соотношение (4) для поверхностной гиротропной волны в среде с анизотропной проводимостью показывает, что ее распространение вдоль ионосферной пленки имеет диффузионный характер. В дневной ионосфере кажущаяся скорость распространения $\omega/k = -i2V_C$, а длина затухания $\delta_S = 2V_C/\omega$. По сравнению со скин-эффектом, гиротропная мода, возбуждаемая экваториальным электроджетом, способна переносить УНЧ возмущения на значительно большие расстояния $\sim \delta_S \sim 10^3$ км и с большей скоростью $V_C \sim 30$ км/с.

В 2.1 рассмотрена задача о возбуждении магнитной моды в атмосфере падающей альвеновской волны с учетом индукционных эффектов в ионосфере и конечной проводимости земной коры. Аналитические оценки и численные расчеты с помощью аналитико-численной модели прохождения альвеновской волны в резонансной области через тонкую ионосферу, описанной в 1.3, показывают, что при прохождении через ионосферу пространственный резонансный пик смещается вдоль меридиана к полюсу и амплитудно-фазовая структура поля искажается за счет возбуждения ионосферной моды падающей альвеновской волной (рис.7).



Там же рассмотрено влияние этого эффекта на различные наземные методы определения резонансных магнитосферных частот. Численные расчеты проведены для условий, характерных для средних и низких широт. Наиболее заметным образом эффекты искажения пространственной структуры поля проявляются для высоких резонансных частот и при высокой проводимости ионосферы. С физической точки зрения, эти искажения вызваны двумя причинами: (а) возбуждением поверхностной моды, диффузионно распространяющейся вдоль ионосферы, (б) конечной проводимостью Земли. Относительная роль возбуждения поверхностной ионосферной волны растет с увеличением ионосферной

проводимости и частоты падающей альвеновской волны. Конверсия части энергии падающей волны в ионосферную моду приводит к асимметрии амплитуд наземных сигналов в южном и северном

полушариях под несимметричными сопряженными ионосферами, и может быть представлен как экранирование (shielding) УНЧ волн высокопроводящей ионосферой (не путать с широко известным геометрическим эффектом ослабления (screening) мелкомасштабных пространственных гармоник).

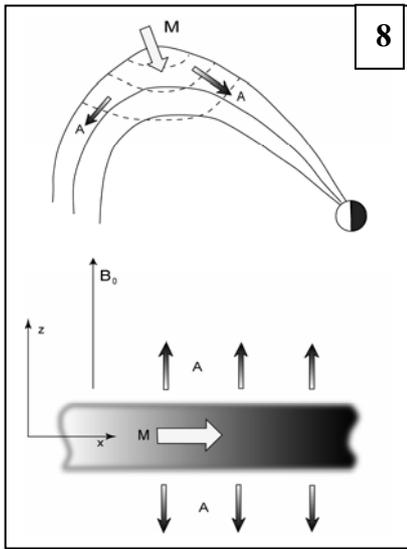
Среди обширного числа УНЧ явлений особое внимание уделяется изучению явлений, связанных с приходом межпланетной ударной волны перед началом магнитной бури – SC (storm commencement). Импульсное воздействие, каким является SC, служит удобным зондирующим сигналом для изучения отклика магнитосферы. Несмотря на кажущуюся простоту такого воздействия, комплекс УНЧ волновых явлений, стимулированных SC, оказывается удивительно многообразным. Несмотря на длительную историю исследования SC, далеко не все аспекты сопутствующих волновых явлений окончательно установлены. Согласно феноменологической модели SC, наблюдаемое магнитное возмущение представляет собой суперпозицию ступенчатого увеличения геомагнитного поля, вызванного поджатием магнитосферы, предварительного обратного импульса PI и последующего основного импульса MI. Природа MI к настоящему времени надежно идентифицирована как результат распространения БМЗ импульса вглубь магнитосферы. В то же время, механизм PI остается невыясненным: в 3.3 показано, что ни одна из существующих моделей PI не описывает адекватно это явление. Резкое возмущение магнитопаузы при SC вызывает возбуждение не только БМЗ, но и альвеновской волны, поэтому естественно предположить, что альвеновский импульс и является причиной PI на высоких широтах. Однако вопрос о распространении PI на средние и низкие широты остался открытым. *Kikuchi and Araki* предположили, что PI импульс распространяется в волноводе Земля-ионосфера в виде электрической TH_0 моды, которая не имеет частоты отсечки, распространяется со скоростью близкой к скорости света, и слабо затухает. Эта модель применялась для интерпретации кажущегося мгновенного распространения PI и получила широкую популярность. В 2.3, исходя из теории электромагнитных мод волновода Земля-ионосфера, получено соотношение для возмущения вертикальной компоненты атмосферного электрического поля ΔE_z , которое показывает, что для типичных PI сопутствующее ΔE_z должно быть не менее градиента атмосферного потенциала ($\sim 10^2-10^3$ В/м). Специализированный эксперимент по синхронной регистрации вариаций геомагнитного поля и атмосферного электричества с хорошим временным разрешением не обнаружил возмущений E_z с величиной более первых В/м в момент PI, что опровергает теорию PI как TH_0 моды. Кажущаяся сверх-альвеновская скорость распространения сигнала между магнитными станциями может быть связана с рефракцией фронта МГД возмущения в неоднородной магнитосфере.

Глава 3. УНЧ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ МАГНИТОСФЕРЫ

Высокие геомагнитные широты имеют особое значение для космической геофизики, т.к. в силу особенностей топологии околоземного магнитного поля они геомагнитно сопряжены с пограничными областями магнитосферы, где происходят основные процессы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Это взаимодействие имеет нестационарный и турбулентный характер. Существование естественных МГД резонаторов и волноводов в околоземной плазме приводит к квазипериодическому отклику на внешнее воздействие, поэтому УНЧ волны на высоких широтах оказываются индикатором такого взаимодействия.

Пульсации частотного диапазона Pc3 - наиболее распространенный тип УНЧ волн в околоземном пространстве. Их первичным источником является турбулентная область перед квазипараллельным участком магнитосферной отошедшей ударной волны, которая образуется благодаря кинетической ионно-циклотронной неустойчивости протонов, отражающихся от фронта ударной волны. Условия возникновения и частота возбуждаемых волн определяются величиной и ориентацией ММП. Широкополосные возмущения, проникающие в магнитосферу из переходной области (magnetosheath) в районе магнитосферного экватора, могут возбуждать альвеновские колебания силовых линий. Эта резонансная трансформация, как показано в 1.1, действует как природный полосовой фильтр, который и дает на выходе узкополосные сигналы, регистрируемые на Земле.

Интенсивная УНЧ волновая активность существует также на высоких широтах в околополуденные часы. Эта волновая активность приурочена к ионосферной проекции дневных пограничных слоев магнитосферы, хотя более точно идентифицировать положение источника еще не удалось. В дальнейшем для краткости эту область мы будем понимать как касп в обобщенном смысле. В области каспа происходит значительное увеличение интенсивности волновой активности в широком диапазоне частот, но наиболее значительное усиление по сравнению с фоновым уровнем происходит в номинальном диапазоне 20-100 мГц. Волновая активность в этом диапазоне включает в себя длительные широкополосные пульсации типа P1 и узкополосные волновые пакеты Pc3, обусловленные, по-видимому, разными механизмами генерации. Широкополосные P1 излучения тесно связаны с высыпающимися электронами в области каспа, и по-видимому вызваны флуктуациями их потоков, хотя природа взаимосвязей между УНЧ активностью и осциллирующими потоками частиц окончательно не выяснена. Наличие узкополосных Pc3 сигналов на широтах каспа подразумевает наличие некоего естественного механизма частотной фильтрации и усиления шумов переходной области в этой области. Однако, на широтах каспа MAP вряд ли может оказаться столь же



8

эффективным для формирования узкополосной спектральной структуры Pc3 пульсаций как на средних широтах. Замкнутые силовые линии вблизи экваториальной границы каспа имеют фундаментальный период $T_A \sim 5-10$ мин, т.о. Pc3 пульсации должны были быть гармониками стоячих альвеновских колебаний с номерами $n \sim 10-20$. Возбуждение таких гармоник в реальной диссипативной магнитосфере представляется маловероятным. Кроме того, моделирование траекторий БМЗ волн в реалистичной модели магнитосферы показало, что магнитозвуковые возмущения Pc3 диапазона, проникающие из переходной области, должны быть заперты в районе высокоширотного каспа.

В 3.1 предложена альтернативная гипотеза о механизме естественной узкополосной фильтрации в области высокоширотного каспа. Предполагается, что в этой области широкополосные БМЗ флуктуации могут трансформироваться в альвеновские волны, убегающие вдоль силовых линий к ионосфере. Теоретическая

модель описывает генерацию альвеновских волн БМЗ возмущением, распространяющимся в двумерно-неоднородной плазме с минимумом в распределении альвеновской скорости $V_A(z)$, и основывается на системе зацепленных уравнений для потенциалов БМЗ ψ и альвеновской φ мод в двумерно-неоднородной системе

$$\partial_x L_A \partial_x \varphi - k_y^2 L_A \varphi = -ik_y g \psi \quad (5)$$

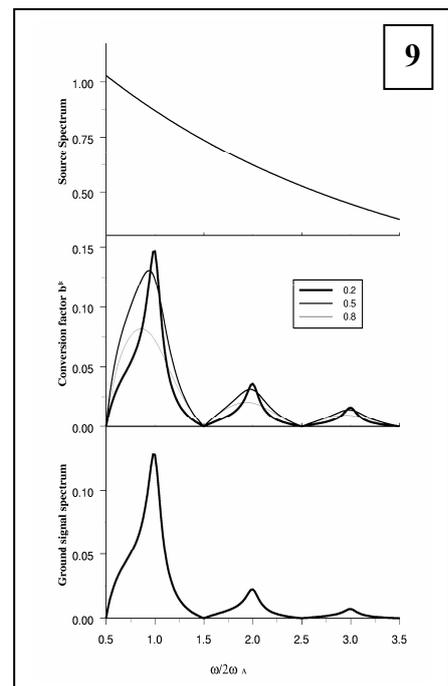
$$\partial_x L_M \partial_x \psi - k_y^2 L_M \psi = ik_y g \varphi$$

Здесь $L_A = \partial_{zz}^2 + k_A^2$ - альвеновский оператор,

$L_M = \nabla_{\perp}^2 + \partial_{zz}^2 + k_A^2$ - магнитозвуковой оператор, коэффициент

$g = \partial_x k_A^2(x, z)$ описывает зацепление между модами из-за

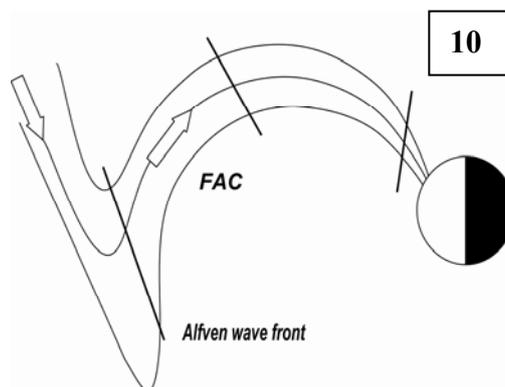
поперечной неоднородности альвеновской скорости. В отличие от локальной теории MAP в 1.1, которая описывает структуру поля только в окрестности резонансной оболочки, в 3.1 рассмотрен случай плавного профиля $V_A(x)$ вдоль оси волновода, для которого удалось построить асимптотическую ВКБ теорию, в которой трансформация БМЗ моды в альвеновские колебания аналитически описана для всей системы. Область плазмы с пониженной $V_A(z)$ представляет собой, с одной стороны - волновод для БМЗ возмущений, а с другой - резонатор с полупрозрачными зеркалами для альвеновских волн (рис.8). Точное аналитическое решение для коэффициента трансформации удалось найти для упрощенной модели, в



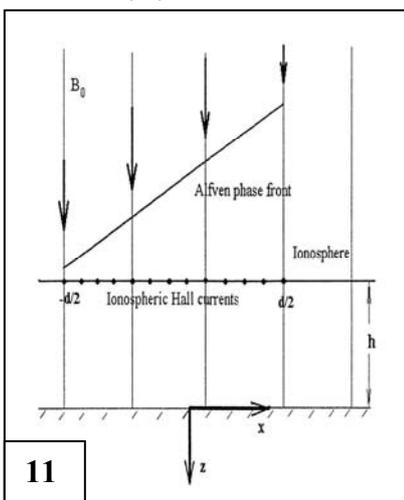
9

которой профиль $V_A(z)$ вдоль B_0 является ступенчатой функцией, а вариации параметров плазмы вдоль волновода плавные, но произвольные. Трансформация наиболее эффективна в резонансном случае, когда частота БМЗ моды близка к локальной частоте альвеновского квази-резонатора в каспе (рис.9). Таким образом, гидромагнитные турбулентные шумы из переходного слоя имеют возможность проникать через магнитопаузу и накапливаться в области геомагнитной воронки (внешний касп), где магнитное поле резко ослаблено. Резонансная конверсия захваченных шумов в убегающие альвеновские волны приводит к появлению узкополосных Pc3 сигналов на широтах каспа. Наблюдения показали, что разработанная модель наилучшим образом из всех предложенных механизмов интерпретирует селективное усиление турбулентности из переходной области в Pc3 диапазоне в области каспа.

Вариации геомагнитного поля с характерными периодами порядка нескольких десятков мин лежат на границе между УНЧ колебаниями и конвективными возмущениями. Распространяющиеся к полюсу квази-периодические возмущения, регистрируемые наземными магнитометрами преимущественно в Н и Z компонентах, и сопровождающиеся авроральными активизациями и усилением риометрического поглощения, называют "poleward progressing ionospheric convection disturbances" [Clauer, Stauning]. Эти явления тесно связаны с вариациями B_y компоненты ММП, и интерпретировались как проявления



распространяющейся к полюсу DРУ токовой системы, которая усиливается благодаря процессам пересоединения на дневной магнитопаузе. С другой стороны, *Большаковой, Клейменовой, Куражковской* квази-периодические возмущения в дневные часы при $B_z < 0$ на широтах $75.0^{\circ}-77.5^{\circ}$ рассматриваются как очень длиннопериодные пульсации (Very Long Period) - наиболее низкочастотная часть спектра колебаний магнитосферных силовых линий. Сопоставление свойств VLP и "poleward progressing ionospheric disturbances" показывает, что обе группы исследователей фактически независимо исследовали одно и то же явление. Чтобы классифицировать это явление в рамках существующей номенклатуры УНЧ колебаний, в 3.2 предложено именовать эти возмущения как $P_{DРУ6}$ пульсации. В 3.2 детально проанализировано типичное событие типа $P_{DРУ6}$, и показано, что его интерпретация как движущегося к полюсу осциллирующего ионосферного тока или собственных магнитосферных колебаний не дает адекватного объяснения свойств наземных вариаций.

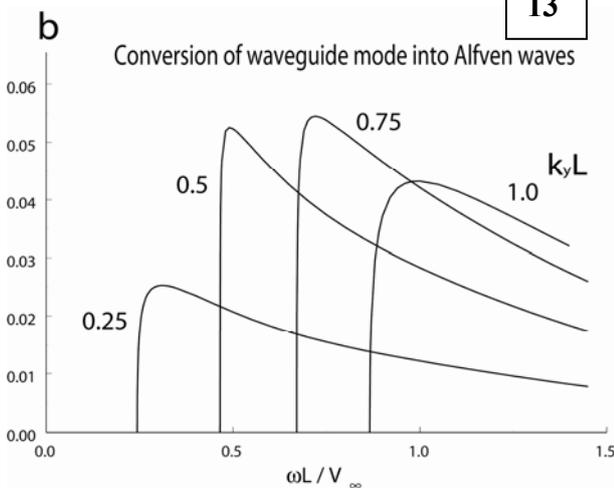
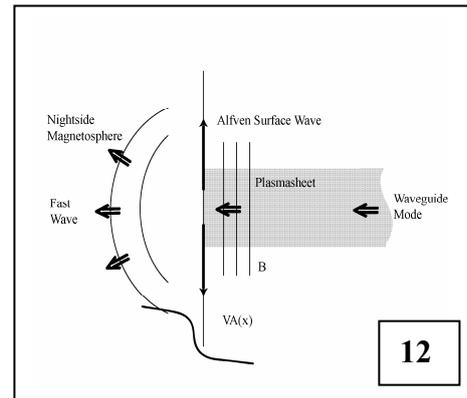


Построена новая модель $P_{DРУ6}$ пульсаций, учитывающая волновой перенос возмущений из приэкваториальной магнитосферы в ионосферу. Связь между вариациями ММП и полярными геомагнитными вариациями поддерживается, по-видимому, продольными токами, текущими вдоль пересоединившихся силовых линий межпланетного и геомагнитного полей в открытой магнитосфере. Качественно искажение фронта нестационарного возмущения продольного тока по мере распространения от вершины силовой линии до ионосферы показано на рис.10. Сопоставление с данными межпланетного спутника Wind показало, что $P_{DРУ6}$ пульсации представляют собой наземный отклик в области ионосферной проекции дневных пограничных слоев на крупномасштабные альвеновские волны в солнечном ветре. При благоприятной ориентации ММП, когда происходит частичное

пересоединение геомагнитного и межпланетного полей, малые квази-периодические вариации ММП ($B_y \sim 10$ нТ) стимулируют наземные возмущения на полтора порядка большей амплитуды ($H \sim 400$ нТ). Пространственно-временная структура наземного возмущения рассчитана с помощью численной модели "волны включения" ионосферных токов (рис.11). В основе модели лежит предположение, что наблюдаемые временные задержки связаны не с фактическим движением тока вдоль ионосферы, а с пространственной зависимостью альвеновского пролетного времени от экваториальной плоскости до ионосферы. Расчеты показали хорошее согласие модельных сигналов с наблюдаемыми $P_{DРУ6}$

пульсациями, в частности хорошо видны: отличие кажущейся фазовой скорости вдоль земной поверхности от скорости распространения возмущения вдоль ионосферы, различные положение максимумов, темпы спада амплитуды и фазовые задержки для H и Z компонент.

В космической плазме повсеместно встречаются МГД волноводы, образуемые областями с повышенной плотностью плазмы, способные накапливать и удерживать гидромагнитные возмущения. Одним из таких образований является плазменный слой хвоста магнитосферы Земли, который служит волноводом для магнитозвуковых мод, обеспечивая их распространение к Земле с незначительным затуханием вдоль слоя. Наличие резкой неоднородности $V_A(x)$ вдоль оси волновода на внутренней границе плазменного слоя может привести к излучению локализованных альвеновских волн вдоль магнитных силовых линий (рис.12). Для оценки эффективности конверсионного механизма уже нельзя воспользоваться одномерной моделью (типа [Southwood]), значительно упрощающей теоретическое рассмотрение. В 3.3 в двумерно-неоднородной модели рассмотрена трансформация волноводных БМЗ мод в альвеновские волны поверхностного типа при резком изменении параметров волновода в направлении его оси. Эффективность трансформации растет с увеличением параметра $k_y L$ (L – толщина слоя, k_y – волновое число в направлении утро-вечер) и достигает максимума при значениях, соответствующих приближению к частоте отсечки волноводной моды. Коэффициент трансформации имеет резкую частотную зависимость (рис.13), что обеспечивает фильтрацию вытекающих альвеновских возмущений по частоте. Величина коэффициента трансформации для слабого скачка достигает ~5%, и должна быть значительно выше для реального сильного скачка $V_A(x)$.



13

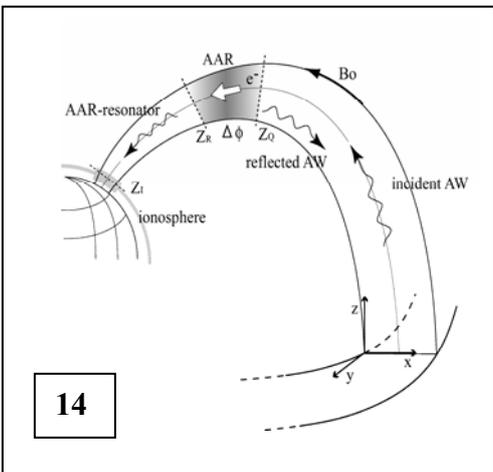
Исходя из рассмотренной модели предложен сценарий, по которому возмущения из дальнего хвоста сначала распространяются к Земле в плазменном слое, а затем частично трансформируются на внутренней кромке плазменного слоя в альвеновские волны, уносящие энергию возмущений к ионосфере. Сигналы этого типа должны наблюдаться преимущественно на экваториальной границе аврорального овала. Проведенное рассмотрение позволило построить исчерпывающую картину возможных волновых связей между импульсными и волновыми процессами в хвосте магнитосферы и откликом высокоширотной ионосферы.

Глава 4. ВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ В ОБЛАСТИ АВРОРАЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ

Суббура представляет собой глобальную неустойчивость магнитосферы, приводящую к замыканию части магнитосферных продольных токов $j_{||}$ через ионосферу. Непременной частью взрывной фазы суббури является всплеск широкополосных Pi1B пульсаций. С другой стороны, в дневной высокоширотной магнитосфере интенсивные $j_{||}$ характерны для локализованных возмущений - конвективных холловских вихрей (Travelling Convection Vortices), проявляющихся на магнитных записях как импульсные магнитные события (Magnetic Impulsive Events). MIE/TCV являются реакцией магнитосферы на резкие неоднородности и скачки давления в солнечном ветре или импульсное пересоединение на магнитопаузе. В большинстве случаев TCV/MIE сопровождаются высокочастотными всплесками в диапазоне периодов 3-20 сек, которые были идентифицированы как Pc1-2 или Pi1. Несмотря на внешнее различие наблюдавшихся пульсаций в дневном каспе и в ночной авроральной области, наблюдения показывают наличие общего физического эффекта:

локализованные магнитные возмущения обладают тонкой волновой структурой - всплеском высокочастотных колебаний. В 4.1 предложен возможный сценарий формирования магнитных флуктуаций в частотной полосе Pi1 в период усиления продольных токов в магнитосфере.

Модельные оценки показывают, что j_{\parallel} при этих явлениях достигают величин, достаточных для возбуждения высокочастотных плазменных неустойчивостей, что, в свою очередь, приводит к появлению аномальной проводимости σ_{\parallel}^* и продольного электрического поля E_{\parallel}^* . В 4.1 критически проанализированы существующие представления и предложен новый механизм, согласно которому флуктуации вызываются спонтанной генерацией квази-периодических вариаций ускоренных частиц в результате перехода режима с аномальным сопротивлением в осцилляторную фазу. Анализ систем уравнений слабой турбулентности показал, что эволюция ионно-звуковой неустойчивости приводит не к квазистационарному состоянию, а к периодическим осцилляциям вблизи уровня насыщения – росту и срыву неустойчивости из-за быстрого нагрева электронов. Соответствующие вариации σ_{\parallel}^* и E_{\parallel}^* создают пульсирующее высыпание электронов и приводят к генерации магнитных шумов в Pi1 диапазоне. Предложенный механизм дает естественное объяснение наблюдаемой взаимосвязи между локализованными магнитными возмущениями (например, при суббурях или TCV/MIE), электронными высыпаниями и всплесками высокочастотных УНЧ шумов.



Важной особенностью системы магнитосфера-ионосфера на авроральных широтах является наличие области ускорения авроральных частиц (Auroral Acceleration Region) – области со значительным падением электрического потенциала вдоль силовых линий. AAR ответственна за ускорение электронов, приводящее к возбуждению аврорального свечения. В тепловой плазме в магнитной ловушке широко распространенное представление об эквипотенциальности геомагнитных силовых линий может нарушаться. Значительное нерезистивное падение потенциала вдоль силовых линий может создаваться пробочным (mirror) механизмом. В кинетической теории удастся рассчитать самосогласованную стационарную функцию распределения частиц вдоль силовой трубки с распределением потенциала

$\Phi(s)$ и продольного тока j_{\parallel} [Knight]. В общем случае, j_{\parallel} является функционалом от $\Phi(s)$, однако в широком диапазоне значений потенциала оказывается справедливым линейное нелокальное соотношение между вытекающим из ионосферы током и падением потенциала $\Delta\Phi$

$$\Delta\Phi = Q j_{\parallel} \quad \text{или} \quad j_{\parallel} = K \Delta\Phi \quad (6)$$

где $K = Q^{-1}$ - продольная "проводимость" силовой трубки ($K \sim Ne^2 / mu_e$). Расчеты и спутниковые измерения показали, что AAR сконцентрировано в узком, по сравнению с длиной альвеновской волны, по высоте слое. Возникновение продольной разности потенциала является кинетическим эффектом и его корректное описание в рамках МГД приближения, строго говоря, невозможно. В 4.2-4.4 использован гибридный подход, при котором полагается, что в рамках МГД приближения внутри AAR на альвеновских временах существует нелокальная вольт-амперная характеристика (6) между j_{\parallel} и $\Delta\Phi$, вытекающая из кинетического рассмотрения.

В 4.2 рассмотрены свойства альвеновских колебаний, возбуждаемых при постоянной внешней накачке в MAP со слоем с падением потенциала (AAR). Использована многослойная электродинамическая модель авроральной верхней ионосферы, включающая E-слой ионосферы, AAR, полость между AAR и нижней ионосферой, и магнитосферу над AAR. Ключевым параметром, характеризующим взаимодействие магнитосферной альвеновской волны с областью с пробочным (mirror) сопротивлением, оказалась введенная нами альвеновская резистивная длина $\lambda_A = \sqrt{Q \Sigma_A}$, определяемая величиной падения потенциала и альвеновской скоростью над слоем.

Накачка волновой энергии в MAP вызывает рост амплитуды альвеновских колебаний и уменьшение пространственной ширины резонансного пика. В стационарном состоянии этот рост ограничивается на

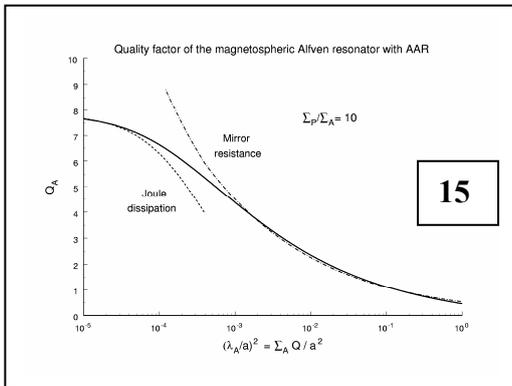
некотором уровне, определяемом доминирующим механизмом диссипации. Если диссипативная альвеновская длина λ_A относительно мала, так что $\lambda_A \ll l_A$ (где масштаб $l_A = (2a\lambda_A^2 / \pi n)^{1/3}$), то ширина n -ой гармоники резонанса δ_n и ее добротность Q_{An} определяются преимущественно ионосферной проводимостью и слабо зависят от величины пробочного сопротивления

$$\delta_n \approx \frac{2a}{\pi n} \left(\frac{\Sigma_A}{\Sigma_P} \right) \quad Q_{An}^{(0)} = \frac{\pi n}{4} \left(\frac{\Sigma_P}{\Sigma_A} \right)$$

В обратном случае больших λ_A , когда $\lambda_A \gg l_A$, доминирующим механизмом диссипации являются потери в AAR, при этом

$$\delta_n \approx l_A \quad Q_{An} \approx \frac{\pi n}{8} \left(\frac{a}{\lambda_A} \right)^{2/3}$$

Результаты численных расчетов добротности Q_A (рис.15) показывают, что эти приближенные соотношения (пунктир) хорошо согласуются с точным решением (сплошная линия) исходных уравнений в рамках соответствующих аппроксимаций. Малые значения продольного сопротивления Q соответствуют преобладающей ионосферной диссипации, а большие Q - затуханию в AAR. Граница между этими двумя режимами $(\lambda_A / a)^2 = 10^{-3}$ соответствует значениям $Q \sim 1.6 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.



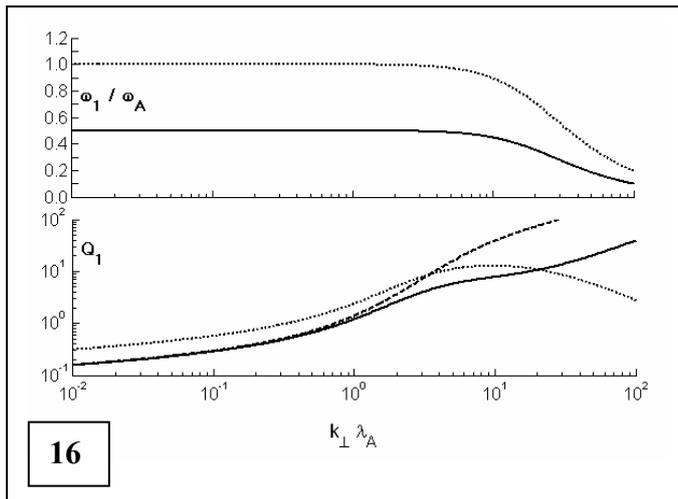
Обычно в качестве доминирующего механизма диссипации, ограничивающего рост и сужение резонансного пика, рассматривают джоулеву диссипацию в ионосфере, дисперсионный вынос колебаний и нелинейные эффекты. Оценки показывают, что при наличии AAR с продольным сопротивлением уже сравнительно небольшой величины $\sim 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, пробочное затухание может преобладать над остальными эффектами. Обнаружение декрементов затухания импульсных Pi2 пульсаций, превышающих значения, даваемые ионосферной диссипацией, свидетельствовало бы о наличии дополнительных

источников диссипации в авроральной области, в частности - связанного с AAR. Ранние работы по изучению Pi2 пульсаций во время суббурь действительно выявили, что декремент их затухания увеличивается при амплитудах сопутствующей магнитной бухты более 100 нТ.

В 4.3 показано, что AAR может эффективно отражать и поглощать мелкомасштабные альвеновские волны. В результате, в полости между нижней кромкой AAR и E-слоем ионосферы может образоваться резонатор для альвеновских волн. Этот резонатор может удерживать и накапливать мелкомасштабные альвеновские структуры в верхней ионосфере, и приводить к формированию тонкой структуры спектра УНЧ излучений в частотной области около 0.1 Гц. Спектральные свойства резонатора определяются отражением альвеновских волн от AAR и ионосферы. В случае «оптически тонкого» AAR входной импеданс системы AAR + магнитосфера Z_{RQ} удастся свести к простому виду $Z_{RQ} \approx \Sigma_Q^{-1} + Z_M$, где $\Sigma_Q^{-1} = Z_{AM} (k_{\perp} \lambda_A)^2$ может быть названа интегральным сопротивлением тонкого AAR. В этом случае выражение для коэффициента отражения альвеновских волн от верхней кромки резонансной полости упрощается, что позволяет аналитически рассчитать собственные частоты ω_n , декремент затухания γ_n и добротность n -ой гармоники резонатора

$$\frac{\omega_n}{\omega_A} = n - \alpha / 2\pi; \quad \frac{\gamma_n}{\omega_A} = \frac{1}{2\pi} \ln |R_I R_{RQ}|; \quad Q_n = \frac{n\pi - \alpha / 2}{\ln |R_I R_{RQ}|}$$

Здесь $\omega_A = \pi V_{AR} / d_R$ - характерная частота резонатора, d_R - расстояние между E-слоем и нижней кромкой AAR, $\alpha = \arg (R_I R_{RQ})$ - набег фазы при отражении.



Рассчитанные по соотношениям тонкого AAR значения параметров резонатора (рис.16) в зависимости от нормированного поперечного волнового числа $\bar{k} = k_{\perp} \lambda_A$ для случаев низкой ($\Sigma_p / \Sigma_A = 0.1$, пунктир), высокой (10, штрих), и "бесконечной" (100, сплошная линия) проводимостей показывают, что собственная частота резонатора над авроральной ионосферой $\omega_1 \approx \omega_A / 2$ на всех масштабах волны вплоть до $k_{\perp} \lambda_A \sim 10$. Это значение соответствует четверть-волновой моде ($n=1, \alpha=\pi$) с пучностью магнитного поля в E-слое и узлом на нижней границе AAR.

Добротность резонатора, определяемая в основном отражением от AAR, а не затуханием в ионосфере, монотонно растет с уменьшением поперечного масштаба волны, достигая при $k_{\perp} \lambda_A = 10$ значений ~ 8 для $\Sigma_p / \Sigma_A = 10$. Для AAR конечной толщины спектральные свойства резонатора могут быть рассчитаны только численно из дисперсионного уравнения с точными соотношениями для коэффициентов отражения R_i и R_{RQ} . Для резонатора под AAR конечной толщины собственные частоты несколько изменяются по сравнению с тонким AAR, но для мелко-масштабных возмущений $k_{\perp} \lambda_A > 2$ ширина AAR не оказывает сильного влияния на спектральные характеристики резонатора. В реальной ионосфере размытость границ AAR приведет к некоторому уменьшению отражения альвеновских волн и ухудшению резонансных свойств. Тем не менее, теоретически оцененное значение добротности $Q_A \sim 8-12$ имеет достаточно большой запас, чтобы можно было ожидать проявления резонансных свойств ионосферной полости под AAR.

Неотъемлемым элементом суббури и авроральной активности являются излучения типа Pi1. Тесная связь между Pi1 пульсациями, уярчением полярных сияний, и усилением ионосферных токов указывает, что механизм генерации этих излучений должен быть связан с областью высыпания авроральных электронов. Pi1 излучения, хотя и иррегулярны, преимущественно имеют ограниченный по частоте спектр вблизи 0.1 Гц, что указывает на то, что эти излучения вызваны не просто стохастическими вариациями потоков высыпающихся электронов, а возникают в результате некоего естественного процесса полосовой фильтрации. В этом частотном диапазоне процесс фильтрации не может быть вызван ни наличием MAP, характерные периоды которого на авроральных широтах порядка нескольких минут, ни IAP, основная частота которого ~ 1 Гц, а естественно объясняется с помощью представлений об авроральном резонаторе. Динамический спектральный анализ данных наземных магнитометров выявил наличие тонкой спектральной структуры Pi1 излучений в предсказываемом частотном диапазоне. Модель AAR-резонатора позволяет также понять, почему наблюдаемые на спутниках мелкомасштабные альвеновские структуры в верхней ионосфере не убегают вдоль геомагнитных силовых линий в магнитосферу.

Динамика УНЧ волн в земной магнитосфере тесно связана с динамикой частиц. Магнитосферные УНЧ волны могут эффективно модулировать распределение частиц вблизи магнитосферного экватора, что может приводить к модулированному высыпанию в ионосферу и проявляться в квазипериодических вариациях риометрического поглощения и авроральной светимости. большей частью современные представления о модуляции электронного высыпания УНЧ волнами основываются на механизме *Coroniti and Kennel*, согласно которому компонента сжатия магнитного поля b_{\parallel} волны модулирует величину инкремента электронно-циклотронной неустойчивости, которая вызывает питч-угловую диффузию электронов в конус потерь. При этом из-за различия характерных скоростей волн и электронов должен возникать временной сдвиг (до нескольких минут) между магнитными и риометрическими вариациями. Однако, зачастую электронные высыпания, модулированные УНЧ волнами, не сопровождаются компонентой b_{\parallel} или фоновыми электронно-циклотронными шумами. Анализ синхронных риометрических и магнитных данных показывает, что не

более 1/3 из Pc4-5 событий согласуются с предсказаниями модели *Coroniti and Kennel*, а в остальных магнитные и риометрические возмущения практически одновременны. Мелкомасштабные дисперсионные альвеновские структуры, обладающие собственным продольным электрическим полем E_{\parallel} , также могут эффективно ускорять авроральные электроны и приводить к их высыпанию. Однако E_{\parallel} достигают заметной величины только в дисперсионных альвеновских волнах с очень малыми поперечными масштабами, сравнимыми с дисперсионным радиусом ρ_d . Таким образом, необходимо исследование других возможных механизмов модуляции.

Таким механизмом, описанным в 4.4, может быть модуляция продольного падения потенциала альвеновскими волнами, падающими из магнитосферы на AAR. Оценка эффективности этого механизма потребовала расчета взаимодействия альвеновской волны с многослойной системой ионосфера - магнитосфера, включающей AAR и авроральный резонатор. Детальные аналитические расчеты удастся провести в приближении тонкого AAR слоя. Предложенный новый механизм модуляции аврорального ускорения позволяет объяснить появление тонких спектральных особенностей магнитных и риометрических возмущений во время авроральных активизаций.

Нестационарные магнитосферные процессы, такие как суббури, связаны с большими потоками энергии из плазменного слоя и хвоста магнитосферы. В последние годы были получены первые свидетельства в пользу существенной роли волнового механизма переноса электромагнитной энергии в авроральную ионосферу, основанные на данных наблюдений спутника Polar. Таким образом, дополнительная энергия для интенсификации авроральных дуг может поступать через волновой канал. Однако, чтобы иметь физическое обоснование этой гипотезы необходимо количественно оценить степень возможной передачи энергии волны ускоряемым электронам. Эта проблема решена в 4.5, где оценены мощности, диссипируемые в ионосфере и идущие на ускорение электронов при взаимодействии альвеновской волны с AAR.

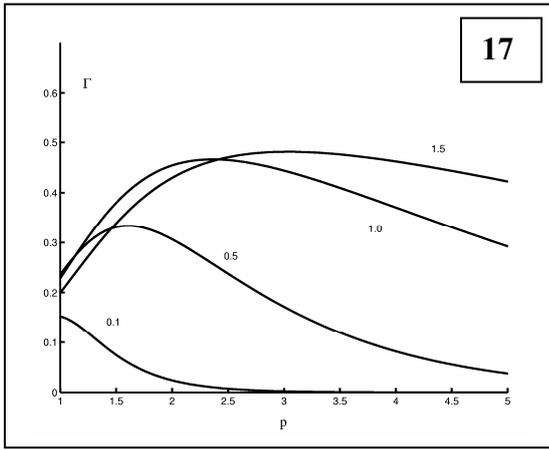
Энергия альвеновской волны S_Q , поглощаемая в AAR и идущая на дополнительное ускорение авроральных электронов

$$S_Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (j_{\parallel} \Delta \Phi^*) = k_{\perp}^2 |1 + R_{MQ}(k_{\perp})|^2 S_M^{(i)}$$

весьма чувствительна к поперечному размеру возмущений. Крупномасштабные альвеновские волны ($\bar{k}_{\perp} \rightarrow 0$) практически не взаимодействуют с AAR, и следовательно не передают энергии на ускорение электронов ($S_Q \rightarrow 0$). В свою очередь мелкомасштабные волны ($\bar{k}_{\perp} \gg 1$) отражаются и не проникают в AAR. Только волны с промежуточными поперечными масштабами эффективно передают энергию авроральным электронам. Потери альвеновской энергии внутри AAR максимальны при $k_{\perp}^* \lambda_A = (1 + \Sigma_A / \Sigma_P)^{-1/2}$. Относительная доля волновых потерь Γ в AAR определяется отношением между энергией J_Q , теряемой альвеновскими волнами на ускорение электронов в AAR, и полным потоком энергии J_0 , переносимым волнами

$$\Gamma = \frac{J_Q}{J_0} = \frac{\int S_Q^{(i)}(x) dx}{\int S_M^{(i)}(x) dx} = \frac{\int \bar{k}_{\perp}^2 |1 + R(\bar{k}_{\perp}^2)|^2 |B_M^{(i)}(\bar{k}_{\perp})|^2 d \bar{k}_{\perp}}{\int |B_M^{(i)}(\bar{k}_{\perp})|^2 d \bar{k}_{\perp}}$$

Пространственный спектр волнового всплеска с хорошей точностью может быть смоделирован степенной зависимостью в интервале от характерного волнового числа k_0 до высокочастотного числа отсечки k_H : $|B_M^{(i)}(k_{\perp})|^2 \propto [1 + (k_{\perp} / k_0)^2]^{-p/2}$. Волновому числу отсечки $k_0 = 1/a$ соответствует пространственный масштаб альвеновского волнового всплеска a . Результаты численных расчетов зависимости Γ от крутизны спектра p для различных значений безразмерного числа отсечки $k_0 \lambda_A$ (указаны рядом с кривыми на рис.17) показывают, что при $k_0 \lambda_A \ll 1$ степень поглощения Γ мала, не более ~10%. Когда же $k_0 \lambda_A \sim 1$, Γ становится много выше, до ~50% для оптимальных $p \sim 2-3$.



Проведенное рассмотрение показывает, что вклад альвеновских волн в энергетический баланс ААР критически зависит от поперечного масштаба волн. Наиболее эффективная трансформация альвеновской волновой энергии в энергию авроральных электронов происходит, когда наибольший поперечный масштаб волнового всплеска a порядка диссипативной альвеновской длины λ_A . Построенная модель взаимодействия альвеновских волн с авроральной ионосферой закладывает физическую основу под гипотезу о волновой активизации авроральных дуг, и хорошо согласуется со спутниковыми наблюдениями.

Глава V. РЕЗОНАНСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ УНЧ ВОЛН ЧАСТИЦАМИ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Волновые возмущения в околоземном пространстве могут возбуждаться не только при воздействии потока солнечного ветра на магнитосферу Земли, но и в результате спонтанной генерации в неравновесной плазме. Основные источники свободной энергии для роста плазменных неустойчивостей – резкие неоднородности плотности энергичных протонов кольцевого тока и их немонотонное распределение по скоростям (bump-on-tail). Неоднородность плазмы может приводить к росту дрейфовых неустойчивостей при условии, что ларморовская дрейфовая частота плазмы превышает собственную частоту колебаний плазмы $\omega < \omega^*$.

Хотя теория дрейфовых неустойчивостей, вызываемых неоднородностями горячей плазмы, активно развивается в физике плазмы, интерпретация наблюдений волн в магнитосферной плазме потребовала разработки новых теоретических моделей, описываемых в Гл.5, учитывающих характерные особенности магнитосферной плазмы: конечное давление плазмы, сопоставимое с давлением магнитного поля ($\beta_{\perp} \sim 1$); многокомпонентность плазмы – наличие холодных и горячих частиц; анизотропия $A = T_{\perp} / T_{\parallel} - 1$ продольной и поперечной температур. Обнаруженные неустойчивости оказались новыми не только для космической геофизики, но и для физики плазмы в целом.

В 5.1 используя общий теоретический подход (Михайловский, Похотелов), исследована устойчивость неоднородной анизотропной плазмы конечного давления относительно раскочки низкочастотных колебаний при резонансном взаимодействии волн с энергичными частицами. Компоненты тензора диэлектрической проницаемости плазмы ϵ_{ij} рассчитаны интегрированием по траекториям частиц возмущенной функции распределения. Содержащиеся в ϵ_{ij} “резонансные” знаменатели вида $(\omega - k_{\parallel} V_{\parallel} - k_{\perp} V_D)^{-1}$ обусловлены резонансом между волной и частицами, осциллирующими вдоль \mathbf{B}_0 и дрейфующих поперек силовых линий со скоростью магнитного дрейфа V_D . Это резонансное взаимодействие волна-частица и является механизмом возбуждения рассматриваемых кинетических неустойчивостей. Даже небольшая добавка фоновых холодных электронов “закорачивает” продольную компоненту электрического поля возмущений E_{\parallel} . Исследование устойчивости низкочастотных ($\omega \ll \Omega_i$) колебаний сводится к исследованию комплексных собственных значений системы уравнений

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} - N_{\parallel}^2 & \epsilon_{12} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} - N^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_A \\ \psi_M \end{pmatrix} = 0$$

Зацепление различных мод поперечно-мелкомасштабных колебаний определяется эффектами конечного ларморовского радиуса ρ . Возмущения с поперечными длинами волн, большими ларморовского радиуса, т.е. $(k_{\perp} \rho)^2 \ll 1$, в плазме конечного давления распадаются на независимые колебания – альвеновскую волну и моду магнитозвукового типа

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{11} - N_{\parallel}^2) \psi_A &= 0, & \psi_M &= 0 \\ (\varepsilon_{22} - N^2) \psi_M &= 0, & \psi_A &= 0 \end{aligned}$$

Потенциал ψ_A ($\propto j_{\parallel}$) характеризует сжимаемую альвеновскую волну (compressional Alfvén wave), являющуюся обобщением представления об альвеновских волнах для плазмы конечного давления. Сжимаемые альвеновские волны канализируются вдоль внешнего магнитного поля, но при этом обладают конечной продольной магнитной компонентой B_{\parallel} . Альвеновская мода с частотой $\omega \approx k_{\parallel} V_A + O(\omega^*)$ может раскачиваться при дрейфовой неустойчивости, но с малым инкрементом.

Потенциал ψ_M ($\propto p + B_{\parallel} B_0 / 4\pi$) характеризует моду магнитозвукового типа. Эта мода возбуждается при дрейфово-зеркальной (ДЗ) неустойчивости, когда порог $\Delta = A - \beta_{\perp}^{-1} > 0$ (Hasegawa). Частота колебаний определяется не размерами МАР, а локальными свойствами плазмы $\omega \approx \omega^*$.

Низкочастотные колебания Pc5 диапазона являются неотъемлемым элементом магнитной бури и тесно связаны с инъекцией энергичных протонов кольцевого тока во внутреннюю магнитосферу. Анализ свойств буревых Pc5 волн в 5.2-5.3 по данным синхронных измерений электрических и магнитных полей вблизи вершины силовой линии на геостационарном спутнике GEOS-2 и их ионосферной проекции по наблюдениям на наземной радарной установке STARE. По данным STARE буревые Pc5 колебания распространяются в азимутальном направлении с поперечной длиной волны, соответствующей азимутальным волновым числам $m = k_y (LR_E) \sim 40-60$. Поляризация колебаний и конечные значения параметра $(k_{\perp} \rho)^2 \sim 0.1$ указывают на то, что наблюдаемые колебания нельзя интерпретировать как расцепленную альвеновскую или ДЗ моду.

Исследование устойчивости магнитосферной плазмы относительно возбуждения длинноволновых возмущений дало следующую картину. В 5.2 показано, что на резкой внутренней кромке кольцевого тока, когда радиус кривизны геомагнитного поля R велик по сравнению с размером неоднородности a горячей компоненты плазмы, так что $\beta_{\perp} (k_{\perp} \rho)^2 > a/R$, возможно возбуждение дрейфово-анизотропной (ДА) неустойчивости. Специфической особенностью неустойчивости является зацепление сжимаемых альвеновских волн и ДЗ моды в области синхронизации, возникающее при значениях параметра $\Delta \ll 1$.

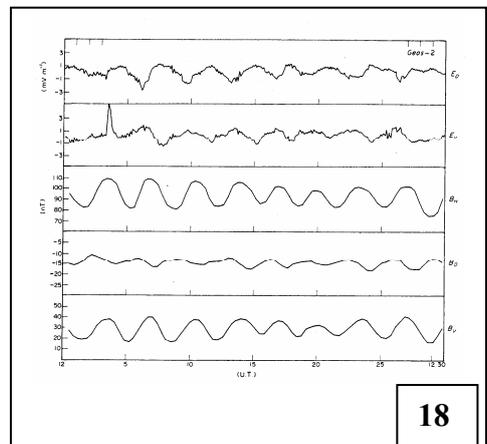
$$\omega \approx -\omega_A \approx \omega_* \Big|_{\Delta \rightarrow 0}$$

Теоретически предсказанная неустойчивость имеет значительно больший инкремент нарастания по сравнению с ранее известными дрейфовыми неустойчивостями альвеновских волн

$$\frac{\gamma}{\omega} \approx \sqrt{\frac{n}{N}} k_{\perp} \rho \left(\frac{u_{\parallel}}{V_A} \right)^{1/2}$$

Анализ Pc5 пульсаций, зарегистрированных на GEOS-2 и STARE, показал хорошее согласие наблюдаемых свойств колебаний с выводами теории. Колебания данного типа представляют собой фундаментальную моду стоячей сжимаемой альвеновской волны (рис.18), раскачиваемой ДА неустойчивостью внутренней кромки кольцевого тока. Возбуждаемые колебания распространяются в долготном направлении с востока на запад со скоростью ларморовского дрейфа плазмы, \sim первых км/с. Для теоретической интерпретации механизма возбуждения данных колебаний неоднократно делались попытки применить теорию дрейфовых неустойчивостей энергичных протонов кольцевого тока. Однако предшествующие теории не могли объяснить направление распространения волны, ее поляризацию, и поперечный масштаб колебаний.

Отмеченные трудности находят разрешение в рамках предложенной теории ДА неустойчивости.



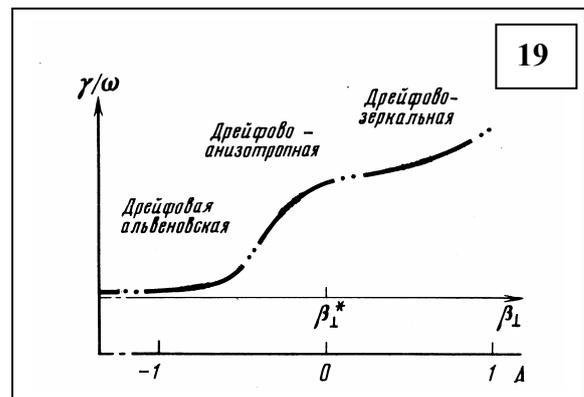
Вблизи максимума в радиальном распределении частиц кольцевого тока, когда справедливо обратное соотношение $\beta_{\perp}(k_{\perp}\rho)^2 < a/R$, возбуждается модифицированная кривизной дрейфовая альвеновская неустойчивость (раздел 5.3). В этом случае зацепление между модами обеспечивается кривизной геомагнитного поля и анизотропией плазмы. Модифицированная альвеновская неустойчивость имеет более низкий порог возбуждения по анизотропии энергичной компоненты по сравнению с ДА неустойчивостью. Детальный анализ данных магнитометра и спектрометра частиц геостационарного спутника GEOS-2 показал, что свойства УНЧ колебаний магнитного поля и потоков протонов кольцевого тока в восстановительную фазу магнитных бурь хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями.

В том случае, когда инжекция горячей плазмы происходит настолько быстро, что ДА неустойчивости не успевают развиваться, возникает условие для возбуждения волн магнитозвукового типа (раздел 5.4). Характерные особенности плазмы кольцевого тока – конечное давление $\beta \sim 1$, анизотропия температур $T_{\perp} > T_{\parallel}$, и резкие радиальные градиенты, создают благоприятные условия для развития ДЗ неустойчивости. Прямые спутниковые измерения "глобальных Pc5", названных так из-за своей стабильности и длительности, достигающей до десятков часов, указывают на их малый продольный масштаб локализации в приэкваториальной плоскости магнитосферы таким образом, что $k_z \gg \omega/V_A$. Этот факт заведомо исключает из рассмотрения альвеновские волны, и детально исследованная ранее физика неустойчивостей альвеновских волн, которая получила убедительное экспериментальное подтверждение при наблюдениях других УНЧ колебаний, оказывается неприменимой к интерпретации глобальных Pc5. Выход из создавшейся ситуации найден в 5.4 теории модифицированной ДЗ неустойчивости, развивающейся при увеличенной кривизне геомагнитного поля и высоких анизотропных плотностях потоков энергичных частиц. Порог возбуждения этой неустойчивости оказался ниже, чем у традиционной ДЗ неустойчивости

$$\Delta_{eff} = \Delta + O \left\{ \frac{n}{N} \left(\frac{Au_i}{R\omega_A} \right)^2 \right\}$$

Прямые спутниковые измерения показывают, что общая геофизическая ситуация в моменты возбуждения глобальных Pc5 волн благоприятствует развитию модифицированной ДЗ неустойчивости.

Возбуждение частицами квазимонохроматических Pc5 колебаний имеет место в фазу восстановления магнитной бури, когда неравновесные распределения горячих протонов медленно релаксируют к термодинамически устойчивому состоянию под действием кинетических дрейфовых неустойчивостей. В начальную фазу бури интенсивная инжекция энергичных протонов и электронов может сопровождаться нерезонансной генерацией интенсивных иррегулярных возмущений типа (раздел 5.5). Эта генерация создает надтепловой уровень флуктуаций, из которого затем могут развиваться интенсивные гармонические колебания при кинетических неустойчивостях. Проведенный в главе 5 цикл исследований привел к построению полной картины возможных механизмов возбуждения УНЧ колебаний в периоды магнитных бурь, когда резко усиливается интенсивность потоков частиц радиационных поясов Земли. Схематично возможная картина развития дрейфовых неустойчивостей в неоднородной анизотропной плазме показана на рис.19.



Одна из наиболее актуальных идей современной космической геофизики – возможность ускорения энергичных магнитосферных электронов до релятивистских энергий во время магнитных бурь УНЧ волнами. Эти волны, предположительно, играют в бесстолкновительной плазме роль промежуточного агента, передающего энергию от солнечного ветра группе магнитосферных электронов. Поэтому основные параметры УНЧ волн, возбуждаемых при магнитных бурях, представляют исключительную важность для моделирования механизмов ускорения и диффузии электронов в магнитосфере. Источником крупномасштабных ($m \sim 1$) Pc5 волн является поток солнечной плазмы, обтекающий фланги

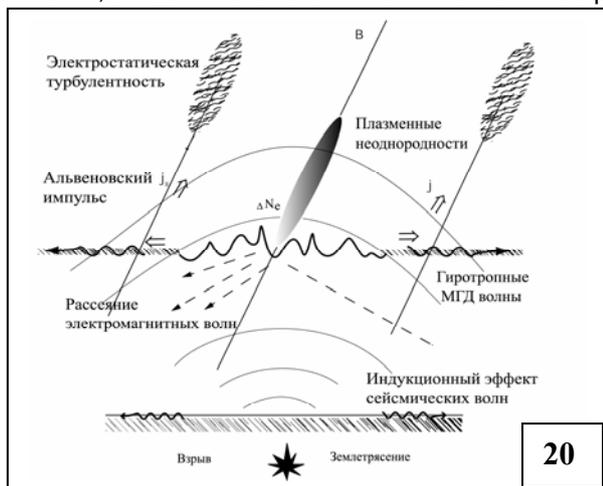
магнитосферы. Механизмы же возбуждения и свойства колебаний в номинальном Pc5 диапазоне во время магнитных бурь, вообще говоря, могут быть отличны от Pc5 в магнитоспокойное время.

В 5.5 исследуется общепланетарная структура магнитной активности, высыпаний энергичных частиц и колебаний диапазона Pc5-6/Pi3 (1.7-10 МГц) во время главной фазы бури 15.05.1997 с использованием глобальной сети магнитных и риометрических станций. Для визуализации азимутального распространения возмущений на суб-авроральных широтах разработана техника MLT-UT диаграмм. Эти диаграммы показали, что ионосферный западный электроджет во время бури резко усиливается в утреннем секторе, а восточный – в вечернем секторе. Интенсивная УНЧ активность во время бури наблюдается в двух областях: в ранние утренние часы и в вечернем секторе. В утреннем секторе усиление западной электроструи и УНЧ колебаний сопровождается усилением электронных высыпаний. Первая область возбуждения колебаний связана с инжекцией энергичных электронов, а вторая – с инжекцией протонов кольцевого тока. В 5.5 показано, что низкочастотные колебания во время главной фазы магнитной бури отличаются по своим физическим свойствам от обычных Pc5 волн. Предложен новый механизм возбуждения иррегулярных низкочастотных колебаний, обусловленный нерезонансным возбуждением дрейфующими энергичными частицами, а не потоком солнечного ветра. По результатам кросс-спектрального анализа поперечной структуры интенсивных широкополосных УНЧ волн по данным сети IMAGE, их азимутальный масштаб в вечернем секторе магнитосферы ~500 км, что примерно на порядок меньше, чем требуется для выполнения условия резонанса с дрейфующими высокоэнергичными электронами. Обнаруженные особенности Pc5 колебаний во время фазы роста бурь накладывают ограничения на возможность использования моделей дрейфового резонанса и ускорения электронов этими колебаниями.

В 5.6 выдвинуто предположение о возможности нового эффекта взаимодействия между геофизическими средами - радиальная диффузия и ускорение частиц внутреннего радиационного пояса, стимулированные интенсивными акустическими движениями в верхней атмосфере. Теоретическая модель показывает, что осцилляции магнитосферно-ионосферной токовой системы, вызванными периодическими акустическими движениями, в результате резонансного периодического воздействия на захваченную радиацию на малых высотах приводят к образованию моноэнергетической группы ускоренных электронов. В целом, рассмотренный физический сценарий представляет собой по сути своеобразный "геосинхротрон". Этот теоретический сценарий подтвердился обнаружением воздействия тайфунов на высыпания электронов. В последнее время "геосинхротронный" механизм широко используют для интерпретации ускорения Pc5 пульсациями релятивистских электронов – "убийц" спутников во время магнитных бурь. В отличие от возмущений в номинальном Pc5 диапазоне во время главной фазы бури, Pc5 волны на фазе восстановления могут эффективно ускорять энергичные электроны до релятивистских энергий. Этот физический механизм лежит в основе ULF индекса, предложенного в качестве нового параметра космической погоды.

Глава VI. ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИОНОСФЕРЫ АНТРОПОГЕННЫМИ, АТМОСФЕРНЫМИ И ЛИТОСФЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Детальное знание морфологии и механизмов естественных вариаций геомагнитного поля, описанные в предыдущих главах, позволяют среди кажущегося хаоса возмущений выделить слабые аномальные сигналы, связанные с источниками не-магнитосферной природы, такими как:



- наземные химические и подземные ядерные взрывы, старты ракет;
- метеоявления (ураганы, тайфуны, грозы);
- деформации и трещинообразование земной коры при подготовке землетрясений.

Эти процессы связаны с выделением большого количества энергии и затрагивают все геофизические оболочки (литосферу, атмосферу, ионосферу и магнитосферу) и физические поля Земли. Экспериментальные факты, свидетельствующие о взаимном влиянии между процессами, протекающими в различных геофизических средах, требуют рассмотрения

геофизических оболочек как единой системы. В гл.6 дан краткий обзор работ автора по поиску эффектов в геомагнитном поле и ионосферной плазме от источников техногенной, метеорологической и сейсмической природы. Многие из этих работ оказались пионерскими, и в дальнейшем получили широкое развитие.

Многочисленные эксперименты по изучению динамического взаимодействия между атмосферой и ионосферой показали, что ионосфера может служить чувствительным индикатором естественных и антропогенных источников возмущений. При доплеровском радиозондировании ионосферы выявлены импульсные и волновые возмущения, возбуждаемые такими мощными источниками инфразвука, как землетрясения, цунами, ядерные и промышленные взрывы, грозы и ураганы, работа ракетных двигателей. Данные наблюдений хорошо укладываются в простую физическую картину: акустическая волна, распространяющаяся вверх в атмосфере с экспоненциально спадающей плотностью, увеличивает свою относительную амплитуду, и на ионосферных высотах модулирует ионосферную плазму. Поэтому ионосферное зондирование позволяет обнаруживать следы инфразвуковых возмущений, которые в приземном слое практически неразличимы на фоне атмосферных шумов. Например, взрыв, как когерентный источник акустического возмущения, должен вызвать больший эффект в ионосфере, чем некогерентный источник – землетрясение.

В этих экспериментах ионосферная плазма по существу играла роль пассивного экрана. В 6.1 приводятся свидетельства существенной роли активного взаимодействия нейтральной и ионизированной компонент в динамике системы атмосфера-ионосфера.

6.1. Взрывы, метеоявления и запуски ракет

В этом разделе кратко описаны новые механизмы возможного воздействия взрывов на ионосферу и геомагнитное поле и результаты поиска предполагаемых эффектов.

Акустическая волна взрыва, достигающая ионосферных высот, индуцирует горизонтальные токи в проводящем *E*-слое ионосферы. Система ионосферных токов оказывается незамкнутой и порождает продольные токи вдоль силовых линий геомагнитного поля на фронте акустического импульса. Теоретические оценки указывают на возможность высокой эффективности трансформации акустической волны в альвеновские возмущения, уходящие в магнитосферу вдоль геомагнитных силовых линий. На качественном уровне, можно представлять себе, что достигающие *E*-слоя акустические возмущения приводят к генерации струй продольного тока на фронте ударной волны. Магнитный эффект такой локальной токовой системы, индуцированной акустическим воздействием, может быть значительным в магнитосфере, и с трудом различим на поверхности Земли. Предложенная модель позволяет объяснить появление магнитных импульсов на низкоорбитальном спутнике после наземных взрывов.

Акустическая волна взрыва, порождающая интенсивный импульс продольного тока, стимулирует генерацию в результате плазменной неустойчивости высокочастотной турбулентности в верхней ионосфере. Наиболее низким порогом обладает электростатическая ионно-циклотронная неустойчивость, приводящая к возбуждению колебаний с поперечными масштабами $\sim \rho$. На ионосферном спутнике эти мелкомасштабные колебания будут зарегистрированы в виде всплеска электростатических шумов на частотах ~ 200 Гц. Хотя пятно электростатических шумов будет медленно расплываться и ослабевать из-за амбиполярной диффузии, его время жизни оказывается больше, чем у альвеновского импульса. Рассмотренный сценарий подтвердился при наблюдениях ионосферных эффектов от подземных ядерных взрывов на спутнике DE-2.

Возмущение верхней стенки волновода Земля–нижняя ионосфера акустической волной взрыва приводит к утечке вверх в магнитосферу электромагнитных шумов волновода. Утечка наиболее интенсивных из них – на частоте шумановского резонанса ~ 8 Гц – может привести к усилению электромагнитных излучений этого диапазона на спутниковых высотах. Такие эффекты действительно зарегистрированы на спутнике OGO-6 над местами взрывов.

Продукты сгорания от факела ракетного двигателя в нижних слоях ионосферы подобно снежному плугу сгребает плазму и генерируют интенсивные токи, а следовательно - и широкополосные гидромагнитные шумы. Часть этих шумов, с частотами более 1 Гц, захватывается в ионосферный магнитозвуковой волновод и распространяется на значительные расстояния от места старта. Такие

возмущения наблюдались на сети индукционных магнитометров в Финляндии после запусков стратегических ракет на полигоне Плесецк.

6.2. Землетрясения

Сейсмoeлектромагнитные явления служат чувствительным индикатором процессов разрушения в литосфере и могут эффективно использоваться для разработки дополнительных несейсмических методов прогноза землетрясений [Гохберг, Гуфельд, Соболев, Молчанов, Сурков]. Частотно-зависимое ослабление электромагнитных возмущений в проводящей земной коре обуславливает два возможных диапазона наблюдений:

- ОНЧ излучения с частотами от сотен Гц до первых МГц, источники которого могут находиться в поверхностных слоях коры и, по-видимому, связаны с микрорастрескиванием породы;

- УНЧ возмущения с характерными частотами от мГц до Гц, источники которых возможно находятся в области очага готовящегося землетрясения

В обоих частотных диапазонах были получены обнадеживающие результаты, указывающие на появление аномальных шумов и импульсов за часы–дни до отдельных сейсмических событий. Хотя эти излучения представляется весьма перспективными для разработки систем оперативного электромагнитного прогноза землетрясений, они еще недостаточно изучены и не имеют надежного физического обоснования. Предполагалось, что аномальные УНЧ шумы могут быть вызваны э/м излучением раскрывающихся трещин на заключительной стадии разрушения земной коры, индукционным эффектом акустического излучения трещин, или образованием крупномасштабной системы механо-электрических преобразователей вдоль будущего разлома. Нами предложена модель “эллипсоидального включения”, которая позволяет корректно обосновать гипотезу о том, что аномальные УНЧ шумы обусловлены нестационарным флуктуирующим течением поровой жидкости сквозь растрескивающуюся породу.

Зона подготовки сильного землетрясения может иметь характерные размеры порядка сотен и тысяч километров. Крупномасштабный характер возможных аномалий может помочь их обнаружению дистанционными наблюдениями за состоянием ионосферы Земли. По существу, ионосферу можно представлять как пленку легко-подвижной плазмы на удалении ~100 км от земной поверхности, чутко реагирующую на крупномасштабные приземные возмущения даже небольшой амплитуды. При этом мелкомасштабные и нескоррелированные флуктуации быстро ослабевают с высотой. Непосредственным агентом переноса возмущений на ионосферные высоты могут быть квазистационарные электрические поля и акусто-гравитационные волны (АГВ). Характерная особенность АГВ – нарастание их амплитуды по мере распространения вверх в атмосферу с экспоненциально падающей плотностью. Кроме того, ионосферная плазма обладает собственной свободной энергией, поэтому даже сравнительно слабое внешнее воздействие может стимулировать каскад плазменных и электромагнитных процессов. Образующиеся при этом плазменные неоднородности и электромагнитные шумы могут быть зафиксированы низколетящими спутниками и наземными установками зондирования ионосферы.

В ходе работ по поиску сейсмо-ионосферных связей по данным индукционного магнитометра ионосферного спутника OGO-6, из пролетов в магнитоспокойное время в ночные часы над эпицентрами поверхностных землетрясений с $M > 5.5$, в половине случаев за несколько часов до толчка наблюдался всплеск электромагнитных шумов с частотами ~0.2-1 кГц.

Анализ данных наблюдений свечения ночного неба на обс. Абастумани привел к обнаружению ранее неизвестного природного явления – усиление свечения (до 30%) нижней ионосферы (зеленая кислородная эмиссия 5577 А°) за несколько часов перед близким землетрясением. Статистический анализ данных непрерывных наблюдений в периоды 180 местных слабых землетрясений подтвердил эффект усиления 5577А° эмиссии - в среднем на $(6 \pm 1)\%$ за несколько часов до сейсмического толчка. Для интерпретации этого явления был предложен новый механизм литосферно-ионосферных связей: «сейсмический Тримпи-эффект» - резонансное рассеяние по питч-углам и высыпание в ионосферу энергичных электронов из магнитосферы под действием сравнительно слабого сейсмического ОНЧ излучения.

Последующие исследования неоднократно подтверждали существование сейсмо-ионосферных связей, обнаруженных в наших ранних работах. Сейсмо-ионосферные эффекты представляют собой

один из примеров геофизических явлений, названных нами «террогенные эффекты в ионосфере», под которыми понимаются такие физические ситуации, когда ионосфера оказывается безразличной к процессам вблизи земной поверхности и к свойствам земной коры.

Основные результаты работы

1. Дано обоснование основных принципов теории альвеновского резонанса для двумерно-неоднородных плазменных конфигураций. Построены численные модели магнитосферно-ионосферного альвеновского резонатора, прохождения резонансной волновой структуры через ионосферу к земной поверхности, и пространственной многокомпонентной структуры поля УНЧ колебаний над многослойной земной корой. Моделирование выявило искажение наземной пространственной структуры УНЧ волн, связанное с конверсией части энергии падающих альвеновских колебаний в ионосферную поверхностную волну.
2. Разработаны и апробированы новые методы наземного мониторинга плотности магнитосферной плазмы (модификация градиентного метода, поляризационные методы метод годографа), основанные на теории резонансной трансформации МГД колебаний. Разработанные методы “гидромагнитной спектроскопии” позволяют восстановить характер распределения магнитосферной плазмы как в радиальном направлении, так и вдоль силовой линии.
3. Выявлены специфические особенности низкоширотных пульсаций Pс3: аномальная зависимость резонансного периода от широты и резкое усиление диссипации по мере приближения к экваториальным широтам. Разработанная численная модель ионосферно-магнитосферного резонатора показывает, что обнаруженные эффекты вызваны “нагрузением” силовых линий ионосферными ионами на низких широтах.
4. Теоретически рассчитано распространение вдоль E-слоя ионосферы с малым наклоном геомагнитного поля гиротропной поверхностной волны, возбуждаемой вариациями экваториального электроджета. Характерный масштаб затухания гиротропной волны намного превышает ионосферную скин-длину, а кажущаяся скорость распространения определяется интегральной каулинговской проводимостью приэкваториальной ионосферы.
5. Предсказано существование нового волнового явления в магнитосфере Земли: МГД волновода и резонатора в области высокоширотного каспа. Построена аналитическая модель, описывающая трансформацию волновой энергии волновода в убегающие альвеновские волны в 2-мерно неоднородной системе без отражающих торцов. Трансформация имеет резонансный по частоте характер, что может обеспечить формирование узкополосного спектра Pс3 пульсаций в области каспа из широкополосных шумов переходной области.
6. Обнаружены и детально исследованы долгопериодные геомагнитные возмущения P_{DRY6} в дневной высокоширотной ионосфере. Показано, что P_{DRY6} пульсации являются ионосферным откликом в области каспа на квазипериодические альвеновские структуры солнечного ветра при южной ориентации ММП. Построена численная модель расширяющегося к полюсу азимутального ионосферного холловского тока, возбуждаемого нестационарными продольными токами с запаздыванием. Построенная модель хорошо объясняет наблюдаемую амплитудно-фазовую структуру наземного поля P_{DRY6} колебаний.
7. Теоретически оценена эффективность утечки волновой энергии из неоднородного МГД волновода за счет трансформации захваченных магнитозвуковых волноводных мод в убегающие альвеновские волны поверхностного типа на резком скачке параметров волновода. Коэффициент трансформации имеет резкую частотную зависимость, что обеспечивает фильтрацию вытекающих возмущений по частоте. Согласно разработанному сценарию ранее неизвестного волнового канала связи между хвостом магнитосферы и высокоширотной ионосферой, возмущения из дальнего хвоста сначала распространяются к Земле в плазменном слое, а затем частично трансформируются на внутренней кромке плазменного слоя в альвеновские волны, уносящие энергию возмущений к ионосфере.
8. Предложен механизм генерации излучений герцового диапазона, сопровождающих интенсивные локализованные геомагнитные возмущения. Показано, что плотности продольных токов, создающих эти возмущения, достаточны для возникновения аномального сопротивления в верхней ионосфере. Протекание тока через плазму с ионно-звуковой турбулентностью оказывается нестационарным и происходит в режиме включения/выключения аномального сопротивления. Предложенный

механизм объясняет связь между такими различными геофизическими явлениями, как магнитные импульсы, всплески высыпания электронов и авроральной светимости, и усиление интенсивности геомагнитных шумов.

9. Построена модель взаимодействия альвеновских волн с областью ускорения авроральных частиц. Расчеты показали, что отражение и прохождение магнитосферных волн критически зависит от их поперечного масштаба. Характерным параметром модели является диссипативная альвеновская длина λ_A . Теоретически предсказан новый механизм затухания Pc5 волн в авроральной области, обусловленный наличием продольного падения потенциала вдоль силовых линий, который может доминировать над ионосферным затуханием и дисперсионными эффектами. Показано, что магнитосферные альвеновские волны, проникающие вглубь области аврорального ускорения, могут вызывать осцилляторные вариации продольного падения потенциала, что служит новым механизмом модуляции авроральных электронов. Предсказано существование нового резонатора в верхней ионосфере в области аврорального ускорения частиц, способного удерживать мелкомасштабные альвеновские волны и структуры в частотном диапазоне порядка 0.2 Гц. С помощью построенной теоретической модели, описывающей взаимодействие альвеновских волн с комбинированной системой магнитосфера - авроральная ионосфера в криволинейном магнитном поле, показано, что альвеновские волны с поперечным масштабом $\sim \lambda_A$ могут вносить существенный вклад в энергетический баланс авроральной области, и тем самым приводить к уярчению полярных сияний.
10. Теоретически предсказаны новые кинетические неустойчивости УНЧ колебаний в неоднородной анизотропной плазме конечного давления: дрейфово-анизотропная; модифицированная дрейфово-анизотропная, и модифицированная дрейфово-зеркальная, развивающиеся в разных областях кольцевого тока. Детальный анализ данных магнитометра и спектрометра частиц геостационарного спутника GEOS-2 и наземной радарной установки STARE показал, что свойства регистрируемых во время магнитных бурь Pc5 колебаний хорошо согласуются с развитыми теоретическими представлениями.
11. С помощью новой техники MLT-UT диаграмм показано наличие двух областей интенсификации длиннопериодных геомагнитных Pi3 пульсаций во время основной фазы магнитной бури: в ранние утренние часы и в вечернем секторе, связанных с инжекцией энергичных частиц. В утреннем секторе буревые Pi3 пульсации сопровождаются квазипериодической модуляцией инжектированных электронов. Предположено, что геомагнитные возмущения в обеих областях генерируются нерезонансным образом интенсивными нестационарными поперечными токами энергичных частиц. Измерения локальной пространственной структуры Pi3 колебаний в главную фазу бури показали, что эти колебания мелкомасштабны в азимутальном направлении и не могут ускорять электроны до релятивистских энергий за счет магнито-дрейфового резонанса.
12. Выделены специфические возмущения геомагнитного поля и ионосферы, вызванные подземными ядерными и поверхностными химическими взрывами, запусками ракет, атмосферной и сейсмической активностью, и предложены их физические механизмы.

Основные публикации по теме диссертации

- Амата Э., Пилипенко В.А., Похотелов О.А., Троицкая В.А., Щепетнов Р.В., Psc-5 пульсации на геостационарной орбите – Геомагн. аэрономия, 1986, 26, N2, 283-287.
- Анисимов С.В., Курнева Н.А., Пилипенко В.А. Вклад электрической моды в поле геомагнитных Pc3-4 пульсаций, Геомагн. аэрономия, 1993, 33, N3, 35-41.
- Бест А., Крылов С.М., Курчашов Ю.П., Пилипенко В.А., Градиентно-временной анализ Pc3 пульсаций, Геомагн. аэрономия, 26, N6, 980-984, 1986.
- Голиков Ю.В., Д'Коста А., Пилипенко В.А., Геомагнитные пульсации, возбуждаемые при сильных землетрясениях, Геомагн. аэрономия, 1985, 25, N5, 824-828.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А., Возбуждение низкочастотных МГД волн в магнитосферной плазме, в сб.: "Структура электромагнитного поля геомагнитных пульсаций", М., Наука, 48-61, 1980.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А., Наблюдение со спутника электромагнитного излучения над эпицентральной областью готовящегося землетрясения, ДАН СССР, 268, N1, 1982.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А., О сейсмических предвестниках в ионосфере, Изв. АН СССР (Физика Земли), N10, 17-21, 1983.

- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А., Эффекты электромагнитной природы при разрушении земной коры, Изв. АН СССР (Физика Земли), N1, 72-87, 1985.
- Гохберг, М.Б., В.А. Пилипенко, О.А. Похотелов, Е.Н. Федоров, Всплески электромагнитных КНЧ шумов в верхней ионосфере, стимулированные наземными взрывами, Геомагн. аэрономия, 36, N4, 61-67, 1996.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А., и др., Акустическое возмущение от подземного ядерного взрыва как источник электростатической турбулентности в магнитосфере, ДАН СССР, 313, N3, 568-574, 1990.
- Грин А.У., Вортингтон Е.У., Пилипенко В.А., и др., Влияние магнитосферного альвеновского резонанса на спектр пакетов пульсаций Pc3-4 на средних широтах, Геомагн. аэрономия, 31, N4, 619-624, 1991.
- Гошджанов М.Б., Муханов М.Б., Пилипенко В.А. Импульсные возмущения ионосферы, вызванные грозовой и сейсмической активностью, Геомагн. и аэрономия, 31, N6, 1064-1069, 1991.
- Курчашов Ю.П., Пилипенко В.А. Геометрический метод анализа градиентных наблюдений геомагнитных пульсаций, Геомагн. аэрономия, 36, N4, 53-60, 1996.
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Излучение альвеновских волн из неоднородного МГД волновода, Физика плазмы, 27, N9, 773-784, 2003.
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., О возможности отражения альвеновских волн в криволинейном магнитном поле, Физика плазмы, 30, N5, 450-458, 2004.
- Пилипенко В.А., Похотелов О.А., Фейгин Ф.З. Влияние баунс-резонансов на возбуждение альвеновских волн вне плазмосферы, Геомагн. аэрономия, 17, N5, 894-899, 1977.
- Пилипенко В.А., Похотелов О.А., Гидромагнитные колебания магнитозвукового типа в околоземной космической плазме, в сб.: "Естественное электромагнитное поле Земли", М., Наука, 30-37, 1977.
- Пилипенко В.А., Похотелов О.А., Дрейфово-зеркальная неустойчивость в кривом магнитном поле, Геомагн. аэрономия, 17, N1, 161-163, 1977.
- Пилипенко В.А., Повзнер Т.А., Савин И.В., Никомаров Я.С. Локальная пространственная структура поля геомагнитных пульсаций на средних широтах, Изв. АН СССР (Физика Земли), N10, 54-61, 1988.
- Пилипенко В.А., Федоров Е.Н. Модуляция полного электронного содержания ионосферы геомагнитными пульсациями, Геомагн. аэрономия, 34, N4, 103-109, 1994.
- Пилипенко В.А., Н.Г. Клейменова, О.В. Козырева, К. Юмото, Ж. Биттерли, Является ли касп источником среднеширотных Pc3 пульсаций? Геомагн. аэрономия, 36, N2, 39-48, 1996.
- Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Ягова Н.В., Соловьев С.И., Вершинин Е.В. Юмото К., Вариации спектрального состава Pc3-4 пульсаций вдоль геомагнитного меридиана 210, Геомагн. аэрономия, 37, N1, 80-88, 1997.
- Пилипенко В.А., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Юмото, К. Биттерли Ж. Долготные особенности геомагнитных пульсаций диапазона Pc5 в утреннем и вечернем секторах, Геомагн. аэрономия, 37, N3, 64-, 1997.
- Пилипенко В.А., Диффузия частиц внутреннего радиационного пояса, вызванная атмосферными возмущениями, в сб.: «Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера», т.2., М., 205-215, 1999.
- Пилипенко В.А., Романова Н.В., Чижиков В.А., Влияние космической погоды на спутниковые системы, Вестник РАЕН, вып.14, 93-104, 2006.
- Похотелов О.А., Пилипенко В.А., К теории дрейфово-зеркальной неустойчивости магнитосферной плазмы, Геомагн. аэрономия, 16, N3, 504-510, 1976.
- Похотелов О.А., Незлина Ю.М., Пилипенко В.А. Дрейфово-анизотропная неустойчивость кольцевого тока, ДАН СССР, 289, N2, 332-335, 1986.
- Сурков В.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Рао Д.Р.К., Ионосферное распространение геомагнитных возмущений от экваториального электроджета, Геомагн. аэрономия, 37, N2, 61-70, 1997.
- Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Курнева Н.А., Баранский Л.Н., МТЗ и гидромагнитная диагностика магнитосферы, Исслед. по геомагн., аэрономии и физике Солнца, 98, 49-79, 1992.
- Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А., К теории альвеновского резонанса в двумерно-неоднородной плазме, Физика плазмы, 21, N4, 333-338, 1995.
- Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А., Лепиди С., О механизме формирования Pc3 пульсаций на широтах дневного каспа, Геомагн. аэрономия, 38, N2, 60-66, 1998.
- Чугунова О.М., Пилипенко В.А., Энгбретсон М., Появление квазимонохроматических Pc3-4 пульсаций в полярной шапке, Геомагн. аэрономия, 44, N2, 1-8, 2004.
- Чугунова О.М., Пилипенко В.А., Энгбретсон М., Статистические характеристики пространственных распределений Pc3-4 пульсаций на высоких широтах в Антарктике, Геомагн. аэрономия, 46, N1, 68-77, 2006.
- Шалимов С.Л., Пилипенко В.А., Тонкая волновая структура магнитных импульсов в дневном секторе аврорального овала, Геомагн. аэрономия, 39, 422-427, 1999.
- Юмото К., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Курнева Н.А., Хабазин Ю.Г. Механизмы затухания геомагнитных пульсаций на низких широтах, Геомагн. аэрономия, 33, N5, 34-42, 1993.
- Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Влияние ионосферной проводимости на параметры среднеширотных Pc3-4 пульсаций, Геомагн. аэрономия, 38, N2, 67-73, 1998.

- Alperovich L.S., Fedorov E.N., Volgin A.V., Pilipenko V.A., Pokhil'ko S.N. Doppler sounding as tool for the study of MHD wave structure in the ionosphere, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 53, N6/7, 581-586, 1991.
- Baransky L.N., Green A.W., Fedorov E.N., Kurneva N.A., Pilipenko V.A., Worthington W., Gradient and polarization methods of ground-based monitoring of magnetospheric plasma, *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, 1293-1309, 1995.
- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A., Yumoto K., On the theory of field line resonances in plasma configurations, *Physics of Plasmas*, 2(2), 527-532, 1995.
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Yumoto K., MHD wave conversion in plasma waveguides, *J. Geophys. Res.*, 103, NoA11, 26595-26605, 1998.
- Fedorov E., Pilipenko V., Surkov V., Rao D.R.K., Yumoto K., Ionospheric propagation of magnetohydrodynamic disturbances from the equatorial electrojet, *J. Geophys. Res.*, 104, NA3, 4329-4336, 1999.
- Fedorov E., Pilipenko V., Engebretson M.J., ULF wave damping in the auroral acceleration region, *J. Geophys. Res.*, 106, 6203-6212, 2001.
- Fedorov E., Pilipenko V., Uyeda S., Electric and magnetic fields generated by electrokinetic processes in a conductive crust, *Physics and Chemistry of the Earth*, (C) 26, N10-12, 793-799, 2001.
- Fedorov E., Pilipenko V., Engebretson M.J., Rosenberg T.J., Alfvén wave modulation of the auroral acceleration region, *Earth, Planets, and Space*, 56, N7, 649-661, 2004.
- Feygin F.Z., Kalisher A.L., Pilipenko V.A., O.A. Pokhotelov, Dobes K., On the theory of the generation of auroral radiation, *Planet. Space Sci.*, 27, N11, 913-923, 1979.
- Fishkova L.M., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A., Relationship between night airglow and seismic activity, *Annales Geophysicae*, 1985, 3, N6, 689-694.
- Gokhberg, M.B., V.A. Troitskaya, V.A. Pilipenko, O.A. Pokhotelov, On the problems of the interaction between Pc1/Pi1 and Pc4-5 hydromagnetic waves, *J. Geophys. Res.*, 86, N2A, 833-836, 1981.
- Green A.W., Worthington E.W., Baransky L.N., Fedorov E.N., Kurneva N.A., Pilipenko V.A., et al., Alfvén field line resonances at low latitudes ($L=1.5$), *J. Geophys. Res.*, 98, N9, 15693-15699, 1993.
- Kawano H., Yumoto K., Pilipenko V.A., et al., Restoration of continuous field line eigenfrequency distribution from ground-based ULF observations, *J. Geophys. Res.*, 107, N8, SMP25, 2002.
- Kurchashov, Yu.P., Nikomarov Ya.S., Pilipenko V.A., Best A. Field-line resonance effects in a local meridional structure of mid-latitude geomagnetic pulsations, *Annales Geophysicae*, 5A, N3, 147-154, 1987.
- Martines-Bedenko V.A., V.A. Pilipenko, et al., Correspondence between ULF activity, field-aligned currents, and DMSP-based dayside magnetospheric domains, *Geomagn. Aeronomy International*, 4, N2, 141-151, 2003.
- Pilipenko V.A., Buchner J., Kirchner T. About MHD heating of plasmaspheric and ionospheric plasmas, *Gerlands Beitr. Geophysik*, Bd.95, Hf.2, 167-176, 1986.
- Pilipenko V.A., ULF waves on the ground and in space, *J. Atmospheric Terrestrial Physics*, 52, N12, 1193-1209, 1990.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N. Magnetotelluric sounding of the crust and hydromagnetic monitoring of the magnetosphere with the use of ULF waves, *Annali di Geofisica*, 36, N5-6, 19-33, 1993.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Magnetotelluric sounding of the crust and hydromagnetic monitoring of the magnetosphere with the use of ULF waves, in: "Solar wind sources of magnetospheric ULF waves", *Geophysical Monograph*, v.81, 436 p., AGU, 283-292, 1994.
- Pilipenko V., Vellante M., Anisimov S., De Lauretis M., Fedorov E., Villante U., Multi-component ground-based observation of ULF waves: goals and methods, *Annali di Geofisica*, 41, N1, 63-77, 1998.
- Pilipenko V., O. Kozyreva, M. Engebretson, et al., Coupling between substorms and ULF disturbances in the dayside cusp, in: "Substorms-4", Terra Scientific Publishing Company/Kluwer Academic Publishers, 573-576, 1998.
- Pilipenko V.A., K. Yumoto, E. Fedorov, N. Kurneva, F. Menk, Field line Alfvén oscillations at low latitudes, *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ.*, ser. D, Earth Planet. Sci., XXX, N1, 23-43, 1998.
- Pilipenko V., Shalimov S., Fedorov E., Engebretson M., Hughes W., Coupling between field-aligned current impulses and Pi1 noise bursts, *J. Geophys. Res.*, 104, NA8, 17419-17430, 1999.
- Pilipenko V., Fedorov E., Mazur N., Engebretson M., Hughes W., MHD waveguide/resonator for Pc3 ULF pulsations at cusp latitudes, *Earth, Planets and Space Science*, 51, 441-448, 1999.
- Pilipenko V., Yumoto K., Fedorov E., Yagova N., Hydromagnetic spectroscopy of the magnetosphere with Pc3 geomagnetic pulsations at 210 meridian, *Annales Geophysicae*, 17, 53-65, 1999.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Yagova N.V., Yumoto K., Attempt to detect ULF activity preceding earthquakes, in: "Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes", 203-214, TERRAPUB, Tokyo, 1999.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Engebretson M.J., Papitashvili V.O., Watermann J., Poleward progressing quasi-periodic disturbances at cusp latitudes: The role of wave processes, *J. Geophys. Res.*, 105, N12, 27569-27588, 2000.
- Pilipenko V., Vellante M., Fedorov E., Distortion of the ULF wave spatial structure upon transmission through the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 105, NA9, 21225-21236, 2000.

- Pilipenko V.A., Kurchashov Yu.P., A hodograph method of analysis for geomagnetic pulsation observations, *International J. Geomagn. Aeronomy*, 2, N2, 87-92, 2000.
- Pilipenko V., Shalimov S., Uyeda S., H. Tanaka, Possible mechanism to clarify the Kushida method of the ionospheric earthquake prediction, *Proceedings of the Japan Academy*, 77, ser.B, N7, 125-130, 2001.
- Pilipenko V., J. Watermann, V. Popov, V. Papitashvili, Relationship between auroral electrojet and Pc5 ULF waves, *J. Atmosph. Solar–Terrestrial Physics*, 63, 1545-1557, 2001.
- Pilipenko V., Kleimenova N., Kozyreva O., Engebretson M., Rasmussen O., Global ULF wave activity during the May 15, 1997 magnetic storm, *J. Atmosph. Solar–Terrestrial Physics*, 63, N5, 489-501, 2001.
- Pilipenko V., Engebretson M., Ground images at high latitudes of ULF wave processes in the outer magnetosphere, *J. Atmosph. Solar–Terrestrial Physics*, 64, 183-201, 2002.
- Pilipenko V.A., Martines-Bedenko V.A., Engebretson M.J., et al., High-latitude mapping of ULF activity, field-aligned currents, and DMSP-based dayside magnetospheric domains at high latitudes, *AGU Monograph 133 "The LLBL and its dynamic interaction with the solar wind and magnetosphere"*, 231-240, 2002.
- Pilipenko V.A., Yagova N.V., Chugunova O.M., et al., ULF waves at very high latitudes, *Proc. of the Conf. in memory Yu. Galperin 3-7 Feb., 2003 "Auroral phenomena and solar-terrestrial relations"*, Moscow, SCOSTEP, 169-176, 2004.
- Pilipenko V., Mazur N., Fedorov E., Uozumi T., Yumoto K., Excitation of Alfvén impulse by the anomalous resistance onset on the auroral field lines, *Annales Geophysicae*, 23, N4, 1455-1465, 2005.
- Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Engebretson M.J., et al., Dynamics of long-period magnetic activity and energetic particle precipitation during May 15, 1997 storm, *J. Atmosph. Solar–Terr. Phys.*, 64, 831-843, 2002.
- Pilipenko V., Fedorov E., Engebretson M.J., Yumoto K., Energy budget of Alfvén wave interactions with the auroral acceleration region, *J. Geophys. Res.*, 109, A10204, doi:10.1029/2004JA010440, 2004.
- Pilipenko V., Mazur N., Fedorov E., Engebretson M.J., Murr D.L., Alfvén wave reflection in a curvilinear magnetic field and formation of Alfvénic resonators on open field lines, *J. Geophys. Res.*, 110, A10S05, 2005.
- Pilipenko V., Fedorov E., Mursula K., Pikkarainen T., Generation of magnetic noise bursts during distant rocket launches, *Geophysica*, 41(1-2), 57-72, 2005.
- Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Amata E. Drift-anisotropy instability of a finite-beta magnetospheric plasma, *Planetary Space Sci.*, 33, N11, 1229-1241, 1985.
- Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Nezlina Yu.M., Woch J., Kremser G., Korth A., Amata E., Excitation of high-beta plasma instabilities at the geostationary orbit: Theory and observations, *Planetary Space Sci.*, 34, N8, 695-712, 1986.
- Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Stenflo L., Shukla P.K., Induced electromagnetic turbulence in the ionosphere and the magnetosphere, *Physica Scripta*, 50, 600-605, 1994.
- Pokhotelov O.A., Parrot M., Pilipenko V.A., et al., Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources, *Annales Geophysicae*, 13, 10197-10210, 1995.
- Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Parrot M., Strong atmospheric disturbances as a possible origin of inner zone particle diffusion, *Annales Geophysicae*, 17, 526-532, 1999.
- Popov L.N., Krakovezkiy Yu.K., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A., Terrogenic effects in the ionosphere: a review, *Physics of the Earth and Planet. Inter.*, 1989, 57, 115-128.
- Surkov V., Pilipenko V., The physics of pre-seismic electromagnetic ULF signals, in "Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes", ed. M. Hayakawa, 357-370, TERRAPUB, Tokyo, 1999.
- Surkov V.V., Pilipenko V.A., Magnetic effects due to earthquakes and underground explosions: a review, *Annali di Geofisica*, XL, N2, 1-13, 1997.
- Vellante M., De Lauretis M., Förster M., Lepidi S., Zieger B., Villante U., Pilipenko V.A., Zolesi B., Geomagnetic field line resonances at low latitudes: Pulsation event study of 16 August 1993, *J. Geophys. Res.*, 107, N5, SMP 6 1-18, 2002.
- Woch J., Kremser G., Korth A., Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Nezlina Yu.M., and Amata E. Curvature-driven drift mirror instability in the magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 36, N4, 383-393, 1988.
- Yagova N., V. Pilipenko, A. Rodger, V. Papitashvili, J. Watermann, Long period ULF activity at the polar cap preceding substorm, in: *Proc. 5th International Conference on Substorms*, St. Peterburg, Russia (ESA SP-443), 603-606, 2000.
- Yagova N., V. Pilipenko, E. Fedorov, M. Vellante, K. Yumoto, Influence of ionospheric conductivity on mid-latitude Pc3-4 pulsations, *Earth, Planets and Space*, 51, N2, 129-138, 1999.
- Yagova N., Lanzerotti L., Villante U., Pilipenko V., et al., Magnetic activity in the ULF Pc5-6 band at very high latitudes in Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 107, N8, 1195, doi:10.1029/2001JA900143, 2002.
- Yagova N.V., Pilipenko V.A., Lanzerotti L.J., et al., Two-dimensional structure of long-period pulsations at polar latitudes in Antarctica, *J. Geophys. Res.*, 109, A03222, doi:10.1029/2003JA010166, 2004.
- Yumoto K., Pilipenko V., Fedorov E., Kurneva N., De Lauretis M., Magnetospheric ULF wave phenomena stimulated by SSC, *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 1179-1195, 1997.
- Yumoto K., V. Pilipenko, E. Fedorov, N. Kurneva, K. Shiokawa, The mechanisms of damping of geomagnetic pulsations, *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, N2, 163-176, 1995.