

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (г. Иркутск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Федоров Евгений Николаевич
(ОИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта, г. Москва);
доктор физико-математических наук, профессор,
Власов Валерий Георгиевич
(Ир.ГТУ, г. Иркутск);
доктор физико-математических наук,
Уралов Аркадий Михайлович
(ИСЗФ РАН, г. Иркутск).

Ведущая организация – Институт космической физики РАН, г. Москва

Защита состоится в середине мая 2000 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д.003.24.01 Института солнечно-земной физики СО РАН: Россия, 664033, Иркутск, п/я 4026, ИСЗФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан "21" марта 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



А.И. Галкин

Д 214.36,0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предметом данной диссертационной работы является теоретическое исследование гидромагнитных колебаний магнитосферы Земли.

Актуальность темы

Разнообразные физические явления, происходящие в околоземном космическом пространстве, находят свое отражение в электромагнитных колебаниях, распространяющихся в магнитосфере и ионосфере. Значительную часть этих колебаний составляют магнитогиродинамические (МГД) волны. Во многих процессах МГД волны принимают непосредственное участие, являясь их важным составным элементом. Например, они играют существенную роль в процессах, связанных с высыпанием магнитосферных частиц в полярную ионосферу, участвуют в диссипации энергии кольцевого тока после магнитной бури, возможно, являются важным элементом квазивязкого взаимодействия солнечного ветра с магнитосферной плазмой и т.д. Однако, даже если удельный энергетический вклад МГД колебаний в рассматриваемых процессах мал, они несут детальную информацию о характерных параметрах этих процессов и структуре областей, где они протекают. Часть МГД волн может проникать внутрь магнитосферы из солнечного ветра, другая часть имеет внутримангитосферные источники. Некоторые из этих колебаний достигают поверхности Земли, где проявляются в виде геомагнитных пульсаций. Часто геомагнитными пульсациями сопровождаются различные типы полярных сияний. Таким образом, данные колебания можно использовать для оперативной наземной диагностики состояния плазмы магнитосферы и солнечного ветра.

Однако эффективность такой диагностики определяется тем, насколько хорошо мы себе представляем условия распространения МГД волн в неоднородной околоземной среде. В однородной плазме существуют три независимых ветви МГД колебаний: альфвеновские, быстрые магнитозвуковые и медленные магнитозвуковые волны. В неоднородной плазме все эти колебания взаимодействуют между собой на определенных резонансных магнитных оболочках (Татао, 1964). Таким образом, рассматривать их как независимые можно с определенной натяжкой и только вдали от области резонанса. В связи с этим принципиально важно исследовать взаимодействие МГД колебаний в такой существенно неоднородной системе, какой является магнитосфера Земли. Задача еще более усложняется, если

учесть, что внутри магнитосферы за счет неоднородности магнитосферной плазмы создаются условия для "запирания" различных типов МГД волн в некоторых ограниченных областях.

Достаточно давно сложилось представление о магнитосфере в целом, как о резонаторе для магнитозвуковых волн (Ваньян и Зыбин, 1966). Сравнительно резкая граница, разделяющая плазму магнитосферы и солнечный ветер, магнитопауза, способна частично отражать эти волны, удерживая их внутри магнитосферной полости. Другой тип резонатора для магнитозвуковых волн существует во внутренней части магнитосферы (Гульельми, 1970). "Стенками" такого резонатора служат магнитные оболочки, на которых выполняется условие полного отражения волн, связанное с обращением в нуль их групповой скорости в направлении поперек магнитных оболочек. Для наиболее высокочастотных магнитозвуковых колебаний (в частотном диапазоне $Pc1$) в F2-слое ионосферы существует волновод, внутри которого они могут распространяться вдоль ионосферы (Tepley and Landsdorf, 1966).

Представления об альфвеновских волнах, как о колебаниях "привязанных" к силовым линиям геомагнитного поля, формировались долгое время на основании теоретических исследований в рамках идеальной МГД в среде с однородным магнитным полем. Однако в неоднородной плазме такое представление можно использовать только как приближенное. Рассмотрение альфвеновских волн в рамках двухжидкостной МГД показывает, что у них имеется небольшая составляющая групповой скорости, приводящая к их перемещению поперек магнитных оболочек. Кроме того, в неоднородной плазме происходит измельчение пространственной структуры волн и связанное с этим их затухание (Тимофеев, 1979). Остановить этот процесс может наличие волновода, способного запереть альфвеновские волны поперек магнитных оболочек и предотвратить их измельчение. Для альфвеновских колебаний в частотном диапазоне $Pc1$ в верхней ионосфере существует резонатор, способный частично запирать их вдоль направления геомагнитного поля вблизи ионосферы (Поляков и Рапопорт, 1981). Наличие такого резонатора существенно влияет на процессы взаимодействия альфвеновских волн с ионосферой.

Еще один фактор, который влияет на эффективность наземной диагностики магнитосферных процессов по наблюдениям МГД волн, - это наличие вблизи Земли резко различающихся по своим физическим харак-

теристикам слоев: атмосферы и ионосферы. Поле магнитосферных МГД колебаний, проникая сквозь эти слои на поверхность Земли, существенно искажается (Hughes, 1974; Maltsev et al., 1974). Таким образом, для того, чтобы восстановить это поле по наблюдениям на Земле следует определить связь между электромагнитными колебаниями на земной поверхности и полем МГД колебаний в магнитосфере. При теоретическом исследовании МГД колебаний магнитосферы большое значение имеют также граничные условия на ионосфере, которые существенно зависят от структуры околоземной среды.

Таким образом, актуальной является проблема комплексного теоретического исследования МГД колебаний магнитосферы.

При этом важно использовать такие модели среды, которые наилучшим образом описывают реальную магнитосферу. Однако из-за математических трудностей зачастую приходится ограничиваться моделями, которые позволяют проводить доступные на современном этапе теоретические расчеты. Реальная магнитосфера представляет собой трехмерно неоднородную среду. Сейчас, к сожалению, нет достаточно эффективных методов теоретического исследования МГД колебаний в такой системе. Поэтому, наилучшим приближением, которое достигнуто в настоящее время - это использование двухмерно неоднородной аксиально симметричной модели магнитосферы.

Целью работы является проведение теоретического исследования МГД колебаний в аксиально симметричной модели магнитосферы. При этом используется приближение "холодной" плазмы, исключающее из рассмотрения медленные магнитозвуковые волны. Диапазон параметров этих волн, при которых они могут свободно распространяться в магнитосфере достаточно узок. Поэтому при рассмотрении многих магнитосферных процессов медленным магнитным звуком можно пренебречь. Конкретно были поставлены **следующие задачи**:

1. Исследовать пространственную структуру и частотный спектр собственных магнитозвуковых колебаний аксиально-симметричной магнитосферы.

2. Провести полное исследование пространственно-временных характеристик поля квазиальфвеновских колебаний, возбуждаемых в магнитосфере как распределенными, так и локализованными монохроматическими и широкополосными источниками.

3. Показать, что малая поперечная дисперсия альфвеновских волн приводит к запырению их в направлении поперек силовых линий геомагнитного поля вблизи экстремумов в поперечном профиле альфвеновской скорости: в окрестности плазмопаузы и в волокнах плотной плазмы, расположенных в утреннем секторе магнитосферы.

4. Определить поле колебаний, которые индуцируются на поверхности Земли локализованными монохроматическими альфвеновскими и квазиальфвеновскими колебаниями магнитосферы.

Научная новизна

В каждой части представленного в настоящей работе исследования имеется ряд новых результатов.

Для анализа структуры собственных магнитозвуковых колебаний аксиально симметричной магнитосферы разработан метод решения МГД-уравнений, основанный на совместном использовании аналитического и численного исследования. Радиальная (поперек магнитных оболочек) структура поля магнитозвуковых колебаний описывается в ВКБ приближении. Получающаяся при этом математическая задача, которая определяет продольную (вдоль силовых линий геомагнитного поля) структуру колебаний, решается численно. Это позволило исследовать конфигурацию поля отдельных гармоник собственных магнитозвуковых колебаний и спектр их собственных частот. Используемая модель среды включает в себя дипольное геомагнитное поле и модельную функцию, описывающую двумерное распределение величины скорости Альфвена в меридиональной плоскости, с учетом резкого ее изменения на плазмопаузе и магнитопаузе. Такое исследование невозможно провести исключительно методами численного моделирования.

Впервые определена полная пространственная структура поля квазиальфвеновских волн. Если структура отдельных гармоник таких колебаний вдоль геомагнитного поля известна из предшествующих работ достаточно хорошо, то в направлении поперек магнитных оболочек она получена впервые. Это позволило перейти от описания колебаний отдельной гармоники с фиксированным значением азимутального волнового числа m и частотой ω к исследованию колебаний, которые могут возбуждаться в магнитосфере реальными широкополосными, произвольно распределенными в пространстве источниками. Во всех предшествующих работах рассматривались отдельные гармоники колебаний с определенным m . В

настоящей работе построен полный пакет МГД колебаний, возбуждаемых в магнитосфере широкополосным, локализованным в ионосфере источником. Это позволило применить полученные результаты для интерпретации реально наблюдаемых МГД возмущений, зарегистрированных в ходе активных экспериментов МАССА.

Показано, что в волокнах плотной плазмы, вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля (магнитосферных дактах) альфвеновские волны могут распространяться в волноводном режиме. "Запирание" альфвеновских волн внутри плазменного волокна обусловлено их малой поперечной дисперсией, связанной с эффектами конечного ларморовского радиуса и инерции ионов плазмы. Исследована пространственная структура собственных альфвеновских колебаний такого волновода. Аналогичное исследование проведено и для альфвеновских колебаний, запертых внутри резонатора, существование которого обусловлено поперечной дисперсией волн, связанной с кривизной силовых линий геомагнитного поля.

В части, касающейся проникновения поля альфвеновских колебаний из магнитосферы на поверхность Земли, основным достижением является аналитическое описание этого процесса в реалистичной модели околоземной среды. Учтен произвольный наклон силовых линий геомагнитного поля к поверхности Земли, произвольное распределение по высоте компонент тензора проводимости и наличие в проводящем слое ионосферы сторонних токов. При этом удалось избежать чрезмерных упрощений, связанных с ограничениями, накладываемыми обычно в задачах с такими моделями среды, на поперечную структуру рассматриваемой альфвеновской волны. Единственное ограничение касается длины волны вдоль направления геомагнитного поля. Она должна быть много больше характерной толщины ионосферы, т.е. рассматриваемые волны достаточно низкочастотны (диапазон геомагнитных пульсаций Pc3-Pc5). Структура волны поперек силовых линий геомагнитного поля может быть произвольной. Это позволило получить граничные условия на ионосфере для низкочастотных квазиальфвеновских колебаний магнитосферы и рассчитать поле электромагнитных колебаний, индуцируемых ими на поверхности Земли. Аналогичная задача была решена и для альфвеновских волн, локализованных в магнитосферных дактах. Отметим, что рассматриваемое волновое поле включает в себя все возможные пространственные гармоники колебаний.

Научная и практическая ценность

Научная ценность диссертации определяется тем, что в ней построена теория МГД-колебаний в достаточно реалистичной аксиально симметричной модели магнитосферы. В рамках этой модели исследованы основные виды МГД колебаний: альфвеновские волны и быстрый магнитный звук. Таким образом, данная работа может стать основой для развития теоретических исследований в более сложных трехмерно неоднородных моделях магнитосферы. Практическое значение работы заключается в том, что полученные в ней результаты могут быть использованы для разработки методов гидромагнитной диагностики магнитосферы. В ней изучены МГД-колебания практически во всем диапазоне характерных азимутальных волновых чисел m и частот ω . Это позволяет проводить исследования волновых полей, возбуждаемых в магнитосфере реальными источниками, произвольно распределенными в пространстве и с произвольным поведением во времени.

Аппробация работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах ИСЗФ СО РАН, ИКИ РАН, ИФЗ РАН, на семинаре КАПГ по геомагнитным пульсациям (Москва 1984) и представлялись на симпозиумах КАПГ по солнечно-земной физике (Сочи, 1984; Самарканд 1989), Всесоюзной конференции по физике горячей плазмы (Звенигород, 1984), симпозиуме по математическим моделям ближнего космоса (Москва, 1996), симпозиумах EGS (Grenoble, 1994; Nice 1998), IAGA (Uppsala, 1997), IUGG (Birmingham, 1999).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 213 страниц текста, 41 рисунок. Список литературы включает 168 наименований. Общий объем диссертации - 232 страницы.

Содержание работы

Во **введении** дан краткий исторический обзор состояния проблемы, обосновывается актуальность темы диссертации, очерчен круг решаемых задач.

В **главе 1** (раздел 1.1.1) получена система двух связанных уравнений, которые в приближении идеальной МГД описывают альфвеновские и быстрые магнитозвуковые колебания трехмерно неоднородной магнитосферы. Взаимодействие этих колебаний осуществляется на резонансных магнитных оболочках. Найдены решения уравнений, описывающие соб-

ственные магнитозвуковые колебания аксиально симметричной магнитосферы. Разработан комбинированный метод исследования, заключающийся в следующем. Структура колебаний в направлении поперек магнитных оболочек описывается в ВКБ приближении (разделы 1.1.2, 1.1.3). Уравнение, определяющее их структуру вдоль силовых линий геомагнитного поля, решается численно (раздел 1.1.4). При этом используется модель среды с дипольным геомагнитным полем, а функция распределения альфвеновской скорости учитывает немонотонность изменения ее величины на плазмопаузе и резкий скачок на магнитопаузе.

В результате такого расчета получается не только структура волнового поля отдельных собственных гармоник колебаний, но также форма областей прозрачности этих колебаний. Эта форма определяется расположением точек поворота магнитозвуковых волн в меридиональной плоскости. Исследована зависимость формы области прозрачности от частоты рассматриваемых колебаний ω и двух волновых чисел - азимутального m и продольного n , определяющего число узлов поля колебаний на силовой линии. Показано, что для основных мод ($m, n \sim 1$) области прозрачности локализованы вблизи экваториальной плоскости, а моды с большими волновыми числами в магнитосферу практически не проникают. Это полностью объясняет результаты предшествующих исследований, полученных другими авторами с помощью методов численного моделирования, и подтвержденных спутниковыми наблюдениями. В этих работах исследовалось полное поле МГД колебаний, возбуждаемых в аксиально симметричной магнитосфере источниками различных типов, расположенными на магнитопаузе. Оказалось, что энергия колебаний сосредоточена вблизи экваториальной плоскости, а при увеличении азимутального волнового числа m область локализации колебаний прижимается к магнитопаузе.

Решение поперечной задачи (раздел 1.2.1), включающей граничные условия для магнитозвуковых волн в направлении поперек магнитных оболочек, позволило рассчитать спектр частот собственных колебаний в рассматриваемой модели магнитосферы. Рассмотрены два типа таких собственных колебаний: а) собственные моды резонатора под плазмопаузой, область прозрачности которых ограничена поперек магнитных оболочек с двух сторон точками поворота (раздел 1.2.2) и б) global modes, область прозрачности которых ограничена внутри магнитосферы точками поворота, а извне - магнитопаузой (раздел 1.2.3). Частота каждой

собственной моды определяется тремя квантовыми числами: азимутальным m , продольным n и поперечным j (равным числу узлов собственной моды в направлении поперек магнитных оболочек).

Результаты разделов 1.1.2 и 1.2.2 получены совместно с В.А. Мазуром.

Во 2 главе исследована пространственная структура монохроматических квазиальфвеновских колебаний с определенным значением азимутального волнового числа $m \gg 1$. В первой части главы получено уравнение, описывающее поле колебаний в меридиональной плоскости (разделы 2.1.1, 2.1.2). Оказалось, что такие колебания существуют только в виде вынужденных колебаний, генерируемых внешним источником. При этом источник должен располагаться на тех же магнитных оболочках, где эти колебания возбуждаются. В предельном случае $m \gg a/\Delta_N \gg 1$ (где a - характерный масштаб неоднородности магнитосферной плазмы, а Δ_N - масштаб локализации N -ой гармоники стоячих волн поперек магнитных оболочек) структура квазиальфвеновских колебаний достаточно строго исследована аналитически (разделы 2.1.3, 2.1.5 - 2.1.9) и численно (2.1.4). В направлении вдоль силовых линий она представляет собой стоячую между магнитосопряженными ионосферами волну. Поперек магнитных оболочек она имеет вид бегущей волны. Эта волна генерируется в окрестности полюсальной резонансной поверхности каким-либо источником (в данной работе в качестве такого источника рассматриваются сторонние токи в ионосфере). Затем колебания бегут к тороидальной резонансной поверхности (оставаясь при этом стоячей волной вдоль силовых линий геомагнитного поля), где полностью поглощаются из-за диссипации в ионосфере.

Во второй части главы 2 предложено модельное уравнение, которое позволяет исследовать структуру поля квазиальфвеновских колебаний в более широком диапазоне значений $m \gg 1$, включая гармоники с $m < a/\Delta_N$ (разделы 2.2.1, 2.2.2). Получено аналитическое решение этого уравнения в виде контурного интеграла (раздел 2.2.3), исследование которого выполнено численно (раздел 2.2.4). Показано, что при увеличении m структура квазиальфвеновской волны поперек магнитных оболочек меняется от резонансной, характерной для тороидальных альфвеновских волн в field line resonance, до описанной выше структуры бегущей волны.

Результаты разделов 2.1.1, 2.2.1 и 2.2.2 получены совместно с В.А. Мазуром

В главе 3 исследуются МГД колебания, генерируемые в магнитосфере локализованными и широкополосными источниками. В первой части главы с помощью обратного фурье-преобразования решения модельного уравнения по спектру азимутальных волновых чисел получено выражение, описывающее структуру поля монохроматических квазиальфвеновских колебаний магнитосферы (раздел 3.1.1). Использование решения модельного уравнения позволяет рассчитывать полное поле МГД колебаний, возбуждаемых в магнитосфере реальными, локализованными в пространстве источниками (разделы 3.1.2, 3.1.3). В качестве источника может быть использован ВЧ радар, который периодически нагревает ионосферу с частотой, близкой к частоте собственных альфвеновских колебаний магнитосферы на данной магнитной оболочке. Поле колебаний включает в себя все пространственные гармоники, которые возбуждаются в магнитосфере.

Предложена методика для экспериментального определения поляризационных характеристик рассматриваемых квазиальфвеновских колебаний (раздел 3.1.4). Показано что в распределении амплитуды этих колебаний поперек силовых линий геомагнитного поля, имеются три локальных максимума, один из которых расположен в области локализации источника, а два других - на тороидальной резонансной поверхности. Показано, как по измеренным между этими максимумами расстояниям можно определить интервал между полюидальной и тороидальной резонансными оболочками. Зная этот интервал можно найти величину поляризационного расщепления спектра собственных альфвеновских колебаний магнитосферы.

Во второй части 3-ей главы аналогичным образом решается задача о генерации в магнитосфере квазиальфвеновских колебаний, возбуждаемых широкополосным источником, локализованным в ионосфере. Здесь, кроме фурье-преобразования по азимутальным гармоникам, проведено такое же преобразование по спектру частот источника (раздел 3.2.1). Наиболее подробно исследован случай импульсного источника. Показано, что каждая стоячая квазиальфвеновская волна после импульсного возбуждения может колебаться в двух различных режимах. Какой из этих режимов реализуется зависит от характерного дисперсионного времени $\tau_N = \Delta\Omega_N^{-1}$ где $\Delta\Omega_N = \Omega_{TN} - \Omega_{PN}$ - величина поляризационного расщепления спектра (Ω_{TN}, Ω_{PN} - частоты собственных тороидальных и полюидальных альфве-

новских колебаний магнитосферы). В начальном режиме ($t \ll \tau_N$), который устанавливается сразу вслед за импульсным возбуждением, во всем пространстве доминируют колебания с частотой, равной частоте собственных тороидальных альфвеновских колебаний на той магнитной оболочке, где локализован источник (раздел 3.2.2). Максимум в распределении амплитуды таких колебаний поперек силовых линий находится в области локализации источника.

В асимптотическом режиме ($t \gg \tau_N$) колебания осуществляются внутри области, имеющей в плоскости поперечной к силовым линиям вид "крыльев бабочки" с центром в области локализации источника. В каждой точке внутри этой области колебания происходят со своей собственной частотой, начальной фазой и амплитудой (раздел 3.2.3). Максимум амплитуды таких колебаний расположен в части "крыльев бабочки" ближней к экватору. Специальный расчет полного поля колебаний (разделы 3.2.4-3.2.6), которые могут быть зарегистрированы на борту спутника, пересекающего область одного из "крыльев бабочки" показал, что при пересечении границы этой области должен регистрироваться импульс с характеристиками, свойственными тороидальным альфвеновским волнам. Форма, поляризация и длительность такого импульса совпадают с "альфвеновским броском", зарегистрированным в эксперименте МАССА1 на борту спутника OPEOL-3.

Результаты раздела 3.1.2 получены совместно с В.А. Мазуром

В главе 4 рассмотрены альфвеновские колебания, локализованные в областях с немонотонным профилем альфвеновской скорости. В магнитосфере такие области имеются в окрестности плазмопаузы, на приэкваториальных магнитных оболочках и в магнитосферных дактах - волокнах плотной плазмы, вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля. Небольшая поперечная дисперсия альфвеновских волн приводит к наличию у них некоторой составляющей групповой скорости поперек силовых линий геомагнитного поля. При этом в неоднородной плазме происходит измельчение поперечной пространственной структуры альфвеновских волн, что ведет к их затуханию. Однако в областях с немонотонным профилем альфвеновской скорости эти волны могут распространяться в волноводном режиме без существенного изменения своей пространственной структуры и без затухания.

Рассчитано поле волноводных мод, распространяющихся в магнито-

сферных дактах. Рассмотрены два типа таких колебаний, локализация которых обусловлена малой поперечной дисперсией альфвеновских волн, связанной с: а) инерцией ионов плазмы (раздел 4.1), и б) конечностью ларморовского радиуса ионов (раздел 4.2). Для мод первого типа волновод в магнитосферных дактах существует только вблизи экватора. В этой же области происходит резонансное усиление альфвеновских волн, связанное с циклотронной неустойчивостью горячих протонов. Размер этой области достаточен для того, чтобы распространяющиеся в волноводе альфвеновские волны могли пробегать область неустойчивости в режиме, максимально благоприятном для их усиления. Моды второго типа могут распространяться в волноводном режиме вдоль всего плазменного волокна, вплоть до ионосферы. Это дает возможность наблюдать структуру волноводных мод на поверхности Земли. В разделе 4.3 рассчитано поле собственных мод альфвеновского резонатора, локализация которых обусловлена специфической поперечной дисперсией, связанной с кривизной силовых линий геомагнитного поля.

Результаты раздела 4.3 получены совместно с В.А. Мазуром

В главе 5 решена задача о проникновении поля альфвеновских колебаний магнитосферы на поверхность Земли. При этом использована достаточно реалистичная модель околоземной среды с произвольным распределением по высоте компонент тензора проводимости ионосферы и альфвеновской скорости и произвольным углом наклона силовых линий геомагнитного поля к поверхности Земли. Учтена также возможность наличия в проводящем слое ионосферы сторонних токов, не связанных непосредственно с волной. Эти токи могут играть роль источника квазиальфвеновских волн в магнитосфере.

Получено аналитическое выражение граничного условия для квазиальфвеновских волн на верхней границе ионосферы, необходимое для решения задачи о структуре этих волн в магнитосфере (разделы 5.2.1-5.2.4). Единственным упрощением в аналитических расчетах являлось предположение о малости толщины ионосферы по сравнению с продольной длиной волны рассматриваемых магнитосферных колебаний. Установлена связь амплитуд отдельных фурье-гармоник альфвеновских колебаний в магнитосфере и электромагнитных колебаний на поверхности Земли. С помощью обратного фурье-преобразования по всем пространственным гармоникам, построено полное поле колебаний, индуцируемых на поверхности

Земли монохроматическими квазиальфеновскими колебаниями магнитосферы (раздел 5.2.5). Аналогичная задача, с использованием более простой модели среды, с нормальным к поверхности Земли геомагнитным полем, решена и для волноводных мод, распространяющихся в магнитосферных дактах (раздел 5.1).

Результаты разделов 5.2.2 и 5.2.3 получены совместно с В.А. Мазуром

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем.

1. Проведено комплексное теоретическое исследование собственных магнитозвуковых колебаний аксиально-симметричной магнитосферы. Определены конфигурация областей локализации колебаний, их пространственная структура и спектр собственных частот.

2. Аналитически исследовано волновое поле МГД-колебаний магнитосферы с $m \gg 1$. Эти колебания, названные квазиальфеновскими, похожи по структуре на альфеновские волны, но, в отличие от них, имеют продольную компоненту магнитного поля. Определены форма и расположение резонансных поверхностей, на которых происходит генерация и поглощение монохроматических квазиальфеновских колебаний магнитосферы.

3. Выведены уравнения, которые описывают поле квазиальфеновских колебаний, возбуждаемых в магнитосфере локализованным монохроматическим источником. Получено распределение амплитуды таких колебаний поперек силовых линий геомагнитного поля. Предложена методика для экспериментального определения величины поляризационного расщепления спектра собственных альфеновских колебаний магнитосферы.

4. Рассчитано полное поле квазиальфеновских колебаний, генерируемых в магнитосфере локализованным импульсным источником. Проведен специальный расчет магнитного поля колебаний вдоль траектории спутника, пересекающего область их локализации. Предложена интерпретация МГД-возмущений, зарегистрированных в ходе активных экспериментов МАССА на борту спутника ОРЕОЛ-3.

5. Доказана возможность локализации поля альфеновских волн вблизи экстремумов в поперечном профиле альфеновской скорости. Рассчитана

структура поля и спектр собственных частот локализованных альфвеновских колебаний.

6. Проведен аналитический расчет электромагнитного поля, индуцируемого в приземных слоях монохроматическими альфвеновскими колебаниями магнитосферы. Получены граничные условия для магнитосферных альфвеновских колебаний на верхней границе ионосферы. Рассчитано волновое поле, которое генерируется на поверхности Земли локализованными альфвеновскими и квазиальфвеновскими колебаниями магнитосферы.

Публикации по теме диссертации

1. Леонович, А.С., О распространении геомагнитных пульсаций в магнитосферных дактах, *Геомагнетизм и астрономия*, 24, 94-100, 1984.
2. Buzevich, A.V., A.S. Leonovich and V.A. Parkhomov, Geomagnetic pulsations associated with MHD-waveguide in magnetospheric ducts, *Planet. Space Sci.*, 35, 109-116, 1987.
3. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, A theory of transverse small-scale standing Alfvén waves in an axially symmetric magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 41, 697-717, 1993.
4. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, Magnetospheric resonator for transverse small scale standing Alfvén waves, *Planet. Space Sci.*, 43, 881-883, 1995.
5. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, Linear transformation of the standing Alfvén waves in an axisymmetric magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 43, 885-893, 1995.
6. Леонович, А.С., и В.А. Мазур, Магнитосферные стоячие альфвеновские волны, возбуждаемые сторонними токами в ионосфере: структура поля монохроматических колебаний с $m \gg 1$ на поверхности Земли, *Исследования по геомагнетизму, астрономии и физике Солнца*, вып. 104, 126-134, 1995.
7. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, Penetration to the Earth's surface of standing Alfvén waves excited by external currents in the ionosphere, *Annales Geophysicae*, 14, 545-556, 1996.

8. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, A model equation for monochromatic standing Alfvén waves in the axially-symmetric magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, 11,443-11,456, 1997.
9. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, Standing Alfvén waves with $m \gg 1$ in an axisymmetric magnetosphere excited by a stochastic source, *Annales Geophysicae*, 16, 900-913, 1998.
10. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, Standing Alfvén waves with $m \gg 1$ in an axisymmetric magnetosphere excited by a nonstationary source, *Annales Geophysicae*, 16, 914-920, 1998.
11. Leonovich, A.S., and V.A. Mazur, Standing Alfvén waves in the magnetosphere from a localized monochromatic source, *J. Geophys. Res.*, 104, 2411-2420, 1999.
12. Leonovich, A.S., A magnetospheric MHD disturbance, triggered by an impulsive source in the ionosphere, *IUGG99 Birmingham abstracts, week B, 26th-30th July, Univ. Birmingham*, B.351, 1999.
13. Leonovich, A.S., Magnetospheric MHD response to a localized disturbance in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 105, 2507-2520, 2000.
14. Леонович, А.С., и В.А. Мазур, Магнитозвуковые колебания аксиально-симметричной магнитосферы, *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*, вып. 110, 255-262, 2000.
15. Леонович, А.С., и В.А. Мазур, Пространственная структура поля МГД-колебаний, возбуждаемых в магнитосфере локализованным монохроматическим источником в ионосфере, *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*, вып. 111, 42-54, 2000.