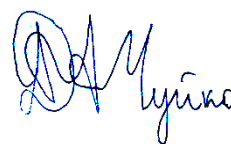


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 533.951



Чуйко Даниил Александрович

**МГД-ВОЛНОВОД ВО ВНЕШНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ
И МЕХАНИЗМЫ ЕГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Иркутск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Мазур Виталий Айзикович доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Научный консультант:

Леонович Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Сажин Виктор Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет», профессор.

Пилипенко Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, научный руководитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, заведующий лабораторией физики околоземного пространства.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Защита состоится 2015 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук: <http://iszf.irk.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Поляков В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магнитосфера Земли является крупномасштабной плазменной структурой, динамика которой определяется изменением параметров потока солнечного ветра и ориентацией межпланетного магнитного поля [Borovsky et al., 1998; Watanabe, Sato, 1990]. Поступление энергии в магнитосферу происходит при ее взаимодействии с солнечным ветром. Часть этой энергии расходуется на генерацию магнитосферных токовых систем, высыпание частиц в ионосферу и конвекцию магнитосферной плазмы. Другая часть этой энергии запасается в хвосте магнитосферы, с последующим ее высвобождением во время суббури [Зеленый, 1986; Carovillano, Siscoe, 1973; Dessler, Parker, 1959; Coroniti, Kennell, 1972].

Отметим, что магнитосфера Земли – наиболее изученная из планетных магнитосфер солнечной системы. Поэтому исследование различных физических процессов в магнитосфере Земли позволяет понять закономерности крупномасштабных плазменных процессов, протекающих в магнитосферах других планет солнечной системы [Беленькая, 2009; Russel, 1993].

В настоящее время в магнитосфере Земли функционируют многочисленные искусственные спутники, работа которых зависит от состояния окружающей их околоземной плазмы. В периоды магнитосферных возмущений в работе их аппаратуры могут происходить сбои, а отдельные приборы могут даже полностью выходить из строя [Erinmez et al., 2002; Gaunt, Coetzee, 2007; Katz et al., 2000, Kawasaki et al., 2006, Koons et al., 1999; Koons, Fennell, 2006; Weaver et al., 2004]. На поверхности Земли всплески напряжения, наводимые во время геомагнитных возмущений на протяженные линии электропередач, не раз вызывали сбои в энергоснабжении густонаселенных областей [Paul Cannon et al., 2013]. Магнитосферные электромагнитные поля могут достигать земной поверхности и оказывать прямое влияние на биологические системы: жизнедеятельность человека, ориентацию в пространстве мигрирующих животных и птиц и другие биологические процессы [Boyle et al., 2010; Burch et al., 2008; Kleimenova et al., 2006; Baker et al., 1983; Stoilova, Dimitrova, 2008].

Магнитосферные возмущения, как правило, сопровождаются генерацией и распространением крупномасштабных магнитогидродинамических (МГД) волн. Такие волны называются геомагнитными пульсациями, которые принято классифицировать по их спектральному составу и поведению. Выделяют устойчивые пульсации Pc (pulsations continuous), которые условно разбиты на диапазоны с периодами 0.2–5 с (Pc1), 5–10 с (Pc2), 10–45 с (Pc3), 45–150 с (Pc4), 150–600 с (Pc5) и иррегулярные пульсации Pi (pulsations irregular) с периодами 1–40 с (Pi1), 40–150 с (Pi2). Поскольку геомагнитные пульсации используются для диа-

гностики состояния магнитосферной плазмы, их свойства интенсивно изучаются уже на протяжении более полувека [Guglielmi, 1989; Singh et al., 2013].

В однородной плазме существуют три ветки МГД-колебаний: быстрый магнитный звук (БМЗ), медленный магнитный звук (ММЗ) и альфвеновские волны. В неоднородной плазме все эти ветки колебаний связаны между собой и представляют единое поле МГД-колебаний. В разных областях пространства это волновое поле имеет свойства, близкие свойствам тех или иных ветвей МГД-колебаний однородной плазмы. Как альфвеновские, так и ММЗ-волны, распространяются вдоль силовых линий геомагнитного поля и могут возбуждаться в магнитосфере при их взаимодействии с БМЗ-волнами на резонансных поверхностях. БМЗ-волны могут проникать в магнитосферу из солнечного ветра или генерироваться сдвиговым течением на магнитопаузе при обтекании магнитосферы потоком солнечного ветра. При определенных условиях БМЗ-волны могут запираются между магнитопаузой и поверхностями отражения внутри магнитосферы, связанными с градиентом скорости Альфвена.

Как показано в настоящей диссертации, БМЗ-волновод во внешней магнитосфере определяет основные свойства низкочастотных геомагнитных пульсаций в частотных диапазонах $Pc3$ – $Pc5$. Область локализации собственных колебаний волновода в частотном диапазоне $Pc3$ расположена в лобовой части магнитосферы. Эти колебания могут возбуждаться неустойчивостью потока протонов, отраженных от фронта головной ударной волны [Гульельми и др., 1976; Потапов, 1974]. Затем эти колебания проникают в магнитосферу через магнитопаузу. Пульсации $Pc5$, в которых заключена подавляющая доля энергии всех геомагнитных пульсаций, могут генерироваться неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе при взаимодействии магнитосферы Земли с потоком солнечного ветра.

В настоящее время нет всеобъемлющей теории, описывающей глобальное распределение и свойства этих колебаний в магнитосфере и включающей механизмы их генерации, распространения, усиления и диссипации. Представленная диссертационная работа является попыткой провести такое комплексное исследование для двух типов геомагнитных пульсаций в частотных диапазонах $Pc3$ и $Pc5$, для которых важную роль играет БМЗ-волновод во внешней магнитосфере.

Цели и задачи диссертационной работы

Представленная диссертационная работа посвящена решению следующих задач.

1. Разработка модели БМЗ-волновода во внешней магнитосфере, адекватно отражающей основные свойства плазмы в лобовой и фланговых областях магнитосферы и позволяющей провести аналитическое исследование поля волноводных МГД-колебаний с учетом их поглощения в области альфвеновского резонанса.

2. Рассмотрение структуры собственных мод БМЗ-волновода во внешней магнитосфере, возбуждаемых неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе.

3. Исследование процесса проникновения БМЗ-волн из солнечного ветра в магнитосферу в модели, учитывающей наличие БМЗ-волновода и поглощение волн в области альфвеновского резонанса.

4. Определение пространственного распределения линейной плотности энергии собственных мод БМЗ-волновода во внешней магнитосфере, а также ее спектральной плотности в различных областях внешней магнитосферы.

Научная новизна

1. Впервые аналитически исследованы пространственная структура и спектр собственных колебаний МГД-волновода во внешней магнитосфере, их усиление неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе и затухание в области альфвеновского резонанса.

2. Впервые проведено аналитическое исследование процесса проникновения МГД-волн из солнечного ветра в магнитосферу с учетом БМЗ-волновода во внешней магнитосфере.

3. Впервые изучена структура собственных мод МГД-волновода в двумерно-неоднородной модели магнитосферы и линейное распределение энергии основных гармоник этих мод вдоль волновода при их возбуждении широкополосным источником.

Научная и практическая значимость работы

Проведено аналитическое исследование особенностей волноводного распространения МГД-колебаний во внешней магнитосфере с учетом пространственной неоднородности как самого волновода, так и прилегающей к магнитопаузе области солнечного ветра. Аналитический подход позволяет описать особенности распространяющихся там МГД-волн и определить один из двух возможных механизмов возбуждения собственных мод, приводящих к появлению максимумов в распределении плотности волновой энергии вдоль волновода. Речь идет о колебаниях, возбуждаемых неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе или проникающих в магнитосферу из солнечного ветра при наличии их сверхотражения.

Проведенные исследования позволили оценить частоты собственных мод, возбуждаемых в МГД-волноводе в результате проникновения БМЗ-волн из солнечного ветра и действия неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе, определить их пространственную структуру и распределение плотности их энергии в волноводе.

Полученные результаты дают новое представление о механизмах взаимодействия магнитосферы Земли с потоком солнечного ветра. Представленная в диссертации теория волноводного распространения МГД-колебаний является

обобщением результатов предшествующих работ, посвященных аналогичным исследованиям, и дает новое понимание процессов генерации и распространения геомагнитных пульсаций во внешней магнитосфере. Теория эволюции собственных мод, распространяющихся в МГД-волноводе во внешней магнитосфере, вносит существенный вклад в общее понимание процессов, протекающих в околоземном космическом пространстве. Полученные результаты могут быть использованы для расширения возможностей волновой диагностики состояния околоземной плазмы.

Достоверность результатов, представленных в работе, обеспечивается строгим использованием методов математического анализа, согласием полученных результатов в их предельных случаях с результатами предшествующих работ, а также хорошим совпадением наблюдаемых распределений интенсивности геомагнитных пульсаций диапазонов Pc3 и Pc5 с предсказанными теоретическими распределениями.

Личный вклад автора. Результаты работы в равной мере принадлежат руководителю и диссертанту. Аналитические выкладки выполнены диссертантом и проверены руководителем. Все численные расчеты и графические представления результатов выполнены диссертантом.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: международная конференция COSPAR, Москва, 2014 доклад: “Evolution of eigenmodes of the MHD-waveguide in the outer magnetosphere”; 8-я конф. «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2013 г. доклад: «Отражение гидромагнитных волн от магнитосферы: влияние сдвигового течения на магнитопаузе, волновода во внешней магнитосфере и альфвеновского резонанса в ее глубине»; 7-я конф. «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2012 г. доклад: «МГД-волновод в лобовой и фланговых областях магнитосферы и механизмы его возбуждения»; международная конференция Problems of Geocosmos, Санкт-Петербург, 2012 доклад: “Nose and flanks magnetospheric MHD waveguide and its excitation mechanisms”; конференция молодых учёных БШФФ-2011. доклад: «Возбуждение магнитосферного резонатора неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе»; 5-я конф. «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 2010 г. доклад: «Возбуждение собственных мод магнитосферного резонатора сдвиговым течением на магнитопаузе.»

Публикации

Материалы, представленные в диссертации, опубликованы в 6 печатных работах:

1. Мазур В.А., Чуйко Д.А. Возбуждение магнитосферного МГД-резонатора неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 11. С. 979.

2. Мазур В.А., Чуйко Д.А. // Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе, МГД-волновод во внешней магнитосфере и альфвеновский резонанс в глубине магнитосферы // Физика плазмы. 2013а. Т. 39. С. 556.

3. Мазур В.А., Чуйко Д.А. Влияние МГД-волновода во внешней магнитосфере на отражение гидромагнитных волн от сдвигового течения на магнитопаузе // Физика плазмы. 2013б. Т. 39, № 12. С. 1071.

4. Mazur V.A., Chuiko D.A. Azimuthal inhomogeneity in the MHD waveguide in the outer magnetosphere // J. Geophys. Res. 2015 (in print).

5. Чуйко Д.А. Исследование влияния альфвеновского резонанса на основную моду, генерируемую неустойчивостью на магнитопаузе // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 22. С 16–20.

6. Мазур В.А., Чуйко Д.А. МГД-волновод во внешней магнитосфере и механизмы его возбуждения // Солнечно-земная физика. 2015. М.: ИНФРА-М. Т. 1, № 1. С. 36–55.

Из них 4 работы – в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана двумерно-неоднородная модель БМЗ-волновода во внешней магнитосфере, позволяющая проводить аналитические исследования процессов волноводного распространения его собственных мод с учетом их усиления неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе и затухания в области альфвеновского резонанса.

2. Получено аналитическое выражение, описывающее зависимость коэффициента прохождения МГД-волн из солнечного ветра в магнитосферу от скорости солнечного ветра, учитывающее наличие БМЗ-волновода во внешней магнитосфере. Показано, что волновод играет роль своеобразного фильтра, который выделяет дискретный набор скоростей солнечного ветра, при которых коэффициент прохождения монохроматических волн имеет локальные максимумы, определяемые набором собственных частот волновода.

3. В результате проведенных расчетов показано, что в подсолнечной области магнитосферы максимум спектрального распределения плотности энергии БМЗ-волн, проникающих в магнитосферу, находится в частотном диапазоне геомагнитных пульсаций Pc3, а на флангах магнитосферы – пульсаций Pc5. Это полностью соответствует наблюдаемым пространственным распределениям энергии УНЧ-колебаний в магнитосфере.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Список цитируемой литературы включает 95 наименований. Работа содержит 133 страницы основного текста, включая 36 рисунков.

Основное содержание работы

Во **введении** отмечены актуальность и научная новизна решаемой в диссертации проблемы волноводного распространения МГД-колебаний во внешней магнитосфере. Сформулированы основные цели и задачи, решаемые в диссертационной работе. Представлен обзор литературы, в которой исследованы процессы проникновения БМЗ-волн из солнечного ветра в магнитосферу, их распространения во внешней магнитосфере, а также наблюдения этих колебаний в спутниковых экспериментах [Sung et al., 2006].

В **первой главе** проанализирована структура геомагнитного поля и распределение плазмы во внешней магнитосфере (см. [Мазур, Чуйко, 2015]). Показано, что при типичных распределениях плазмы и магнитного поля в этой области магнитосферы образуется волновод для БМЗ-волн [Dmitrienko, 2013; Mann et al., 1999; Walker, 1998; Wright, Mann, 2006; Wright, 1994]. БМЗ-волны запираются между поверхностями отражения, расположенными в глубине магнитосферы и магнитопаузой, которая служит внешней стенкой рассматриваемого БМЗ-волновода (рис. 1).

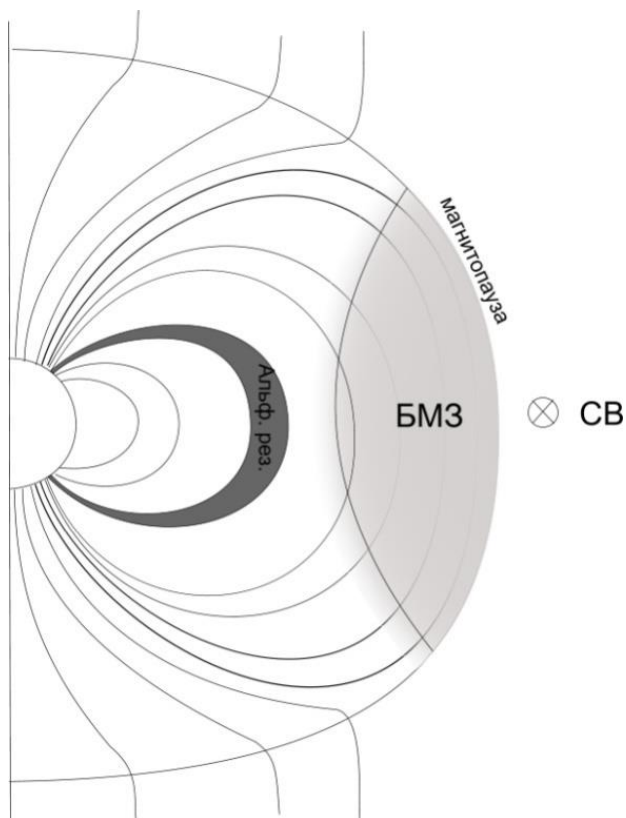


Рис. 1. Расположение БМЗ-волновода и области альфвеновского резонанса в реалистичной модели магнитосферы. Показано сечение дневной части магнитосферы в меридиональной плоскости полдень–полночь.

Для исследования БМЗ-волновода в диссертационной работе использована U-образная двумерно-неоднородная модель магнитосферы (рис. 2). Такая модель корректно отражает следующие свойства среды: 1) скачок параметров плазмы на магнитопаузе; 2) неоднородность магнитного поля поперек магнитных оболочек (по оси X); 3) неоднородность волноводного канала вдоль оси Y. В плазме солнечного ветра $\beta \gg 1$, где β – отношение газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля. В большей части магнитосферы $\beta \leq 1$, а часто и $\beta \ll 1$. Поскольку учет конечной температуры плазмы в магнитосфере слабо влияет на свойства рассматриваемых в работе БМЗ-волн, для упрощения теоретического анализа считается, что плазма магнитосферы является холодной и для нее можно пренебречь скоростью Альфвена по сравнению со скоростью звука. В солнечном ветре, наоборот, именно скорость звука определяет свойства БМЗ-волн, поэтому мы пренебрегаем наличием магнитного поля. Таким образом, колебания в БМЗ-волноводе во внешней магнитосфере рассматриваются как быстрый магнитный звук в холодной плазме, а в прилегающей к нему области солнечного ветра – как обычный звук. Такая модель среды позволяет провести аналитическое исследование собственных колебаний БМЗ-волновода во внешней магнитосфере.

Задача решена методом разных масштабов. Сначала с использованием метода ВКБ решается задача о распространении собственных мод в волноводе, неоднородном только по поперечной координате x . Из решения уравнений идеальной МГД с соответствующими граничными условиями получено дисперсионное соотношение для собственных БМЗ-мод такого волновода, определены их пространственная структура и спектр собственных частот.

После этого аналогичная задача решается в модели БМЗ-волновода со слабой продольной неоднородностью. Для решения этой задачи используются результаты решения в одномерно-неоднородном волноводе. Мы считаем, что свойства собственных мод волновода, слабо неоднородного по координате u , полностью соответствуют свойствам колебаний в продольно-однородном волноводе с такими же поперечными распределениями параметров (скорости звука и альфвеновской скорости), как и в локальном сечении рассматриваемого волновода. Локальное применение одномерно-неоднородной модели возможно только тогда, когда колебание в каждом сечении волновода успевает подстраиваться под его локальные свойства, за исключением резонансных областей, где следует проводить сглаживание потока поступающей в волновод энергии.

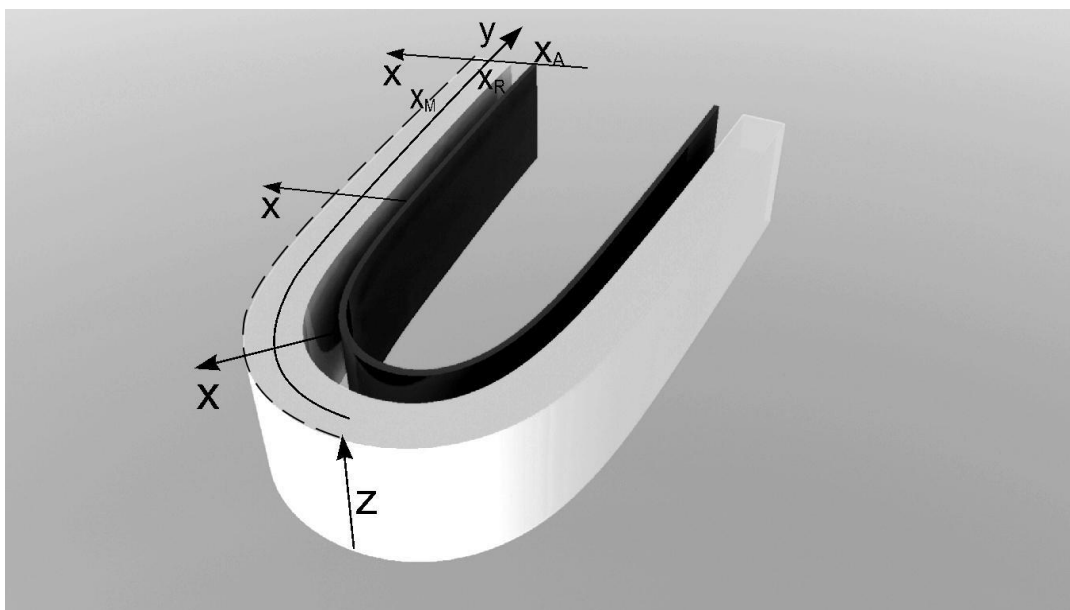


Рис. 2. Двумерно-неоднородная модель среды. Выделены область прозрачности для БМЗ-волн и область альфвеновского резонанса, x_M – координата магнитопаузы, x_R – внутренняя точка отражения БМЗ, x_A – точка альфвеновского резонанса. Геомагнитное поле направлено вдоль оси Z .

Во **второй главе** подробно изучены свойства собственных мод МГД-волновода во внешней магнитосфере [Мазур, Чуйко, 2011, 2013а]. Эти моды усиливаются неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе [Foullon et al., 2008; Pu, Kivelson, 1983]. Оказывается, что рассматриваемые колебания становятся неустойчивыми при превышении скоростью солнечного ветра некоторого порогового значения, своего для каждой из гармоник волновода. Показано, что каждая из собственных мод имеет некоторый нижний порог по скачку скорости солнечного ветра на магнитопаузе, моделируемой тангенциальным разрывом параметров плазмы и магнитного поля, выше которого частота моды становится комплексной. Положительная мнимая добавка к частоте колебаний представляет собой инкремент неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (рис. 3). С помощью проведенного в диссертации аналитического исследования определена поперечная структура собственных мод БМЗ-волновода во внешней магнитосфере и инкременты их неустойчивости как функции скачка скорости солнечного ветра на магнитопаузе v . Прослежена также эволюция пространственной структуры волноводных собственных мод по координате y , по которой имеется слабая неоднородность среды. Построено поперечное распределение плотности энергии собственных мод такого волновода в области солнечного ветра, в магнитосферном БМЗ-волноводе и в области альфвеновского резонанса. На рис. 4 эти распределения представлены для различных значений скачка скорости солнечного ветра на магнитопаузе. Получены аналитические выражения, опреде-

ляющие зависимость инкремента от скачка скорости солнечного ветра и величины альфвеновской скорости на магнитопаузе, а также от частоты и номера собственной волноводной моды.

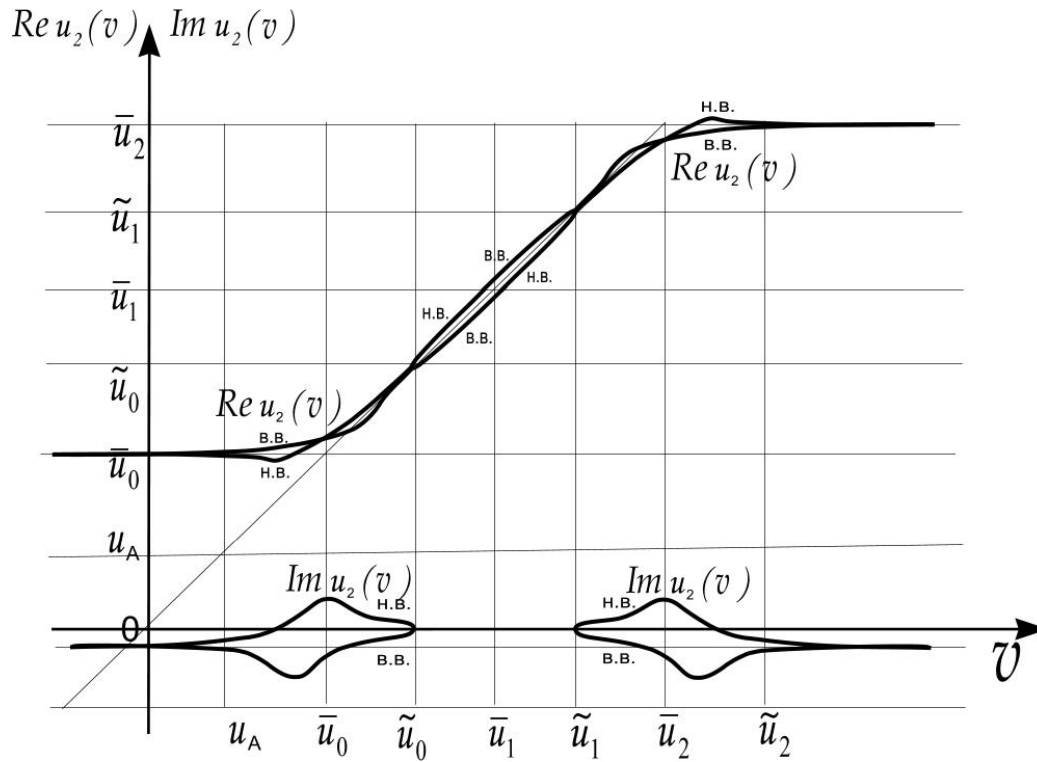


Рис. 3. Схематические графики безразмерных действительных и мнимых частей комплексной частоты второй моды волноводных колебаний как функций безразмерной скорости солнечного ветра. Здесь в.в. и н.в. означают верхнюю (затухающую) и нижнюю (неустойчивую) ветви колебаний соответственно, \bar{u}_n – безразмерные собственные частоты волновода.

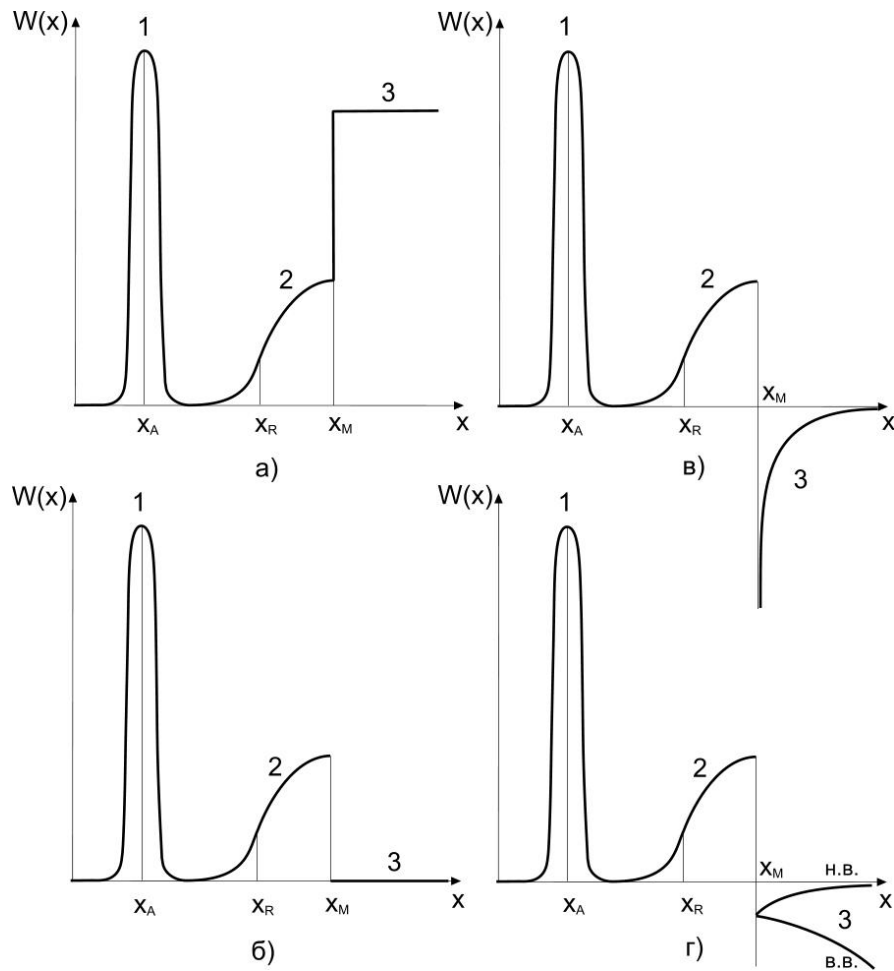


Рис. 4. Распределение энергии колебаний по координате x для различных значений v : $v = \bar{u}_{n-1} - \alpha$ (для затухающих колебаний, верхняя ветвь на рис. 3), их энергия в солнечном ветре положительна (а); при $v = \tilde{u}_{n-1}$ колебания обеих ветвей (см. рис. 3) отсутствуют (б); $v = \bar{u}_n$ – энергия колебаний в солнечном ветре отрицательна, а ее распределения для нижней и верхней ветвей (см. рис. 3) совпадают (в); $v \rightarrow \infty$ – энергия колебаний в солнечном ветре отрицательна, а ее распределения для нижней и верхней ветвей различны (г). Здесь 1 – область альфвеновского резонанса, 2 – область магнитосферного БМЗ-волновода, 3 – солнечный ветер.

В третьей главе решена задача о падении БМЗ-волны из солнечного ветра на магнитопаузу с учетом поглощения части ее энергии в области альфвеновского резонанса внутри магнитосферы (рис. 5 и [Мазур, и Чуйко, 2013б]). Аналогичные задачи о проникновении МГД-волн из солнечного ветра в магнитосферу решались в работах [Ghosch, 2009; Thomson et al., 2001, 2002; Stephenson, Walker, 2010]. В этих работах исследования ограничивались рассмотрением некоторых частных случаев с заданными значениями скорости солнечного ветра. В данной диссертационной работе аналитически решена задача, для которой результаты решения применимы для всего диапазона значений скорости солнечного ветра на орбите Земли.

Получено аналитическое выражение для коэффициента отражения падающих на магнитопаузу БМЗ-волн. Оно имеет достаточно сложный вид, поэтому проведено его исследование как аналитическими, так и численными методами, для всех возможных значений скорости солнечного ветра и частот падающих на магнитосферу волн (рис. 6). Обнаружено, что при достаточно малых значениях скорости солнечного ветра БМЗ-волны, падающие на магнитосферу из солнечного ветра, имеют коэффициент отражения меньше единицы, т. е. часть их энергии поглощается в области альфвеновского резонанса внутри магнитосферы. При увеличении скорости солнечного ветра выше некоторого порогового значения у части этих волн коэффициент отражения оказывается больше единицы, что соответствует явлению сверхотражения. Максимумы коэффициентов отражения как тех, так и других волн, локализованы вблизи собственных частот БМЗ-волновода в магнитосфере. Коэффициент отражения волн с частотами, достаточно далекими от собственных частот БМЗ-волновода, близок единице. Волны с такими частотами не могут эффективно проникать внутрь магнитосферы. Волны, для которых имеет место сверхотражение, называют волнами с отрицательной энергией [Kozlov, 2010; Leonovich et al. 2003; Mann, Wright, 1999; Walker, 2005]. При этом в магнитосферный волновод проникает волна с положительной энергией, которая частично поглощается в области альфвеновского резонанса.

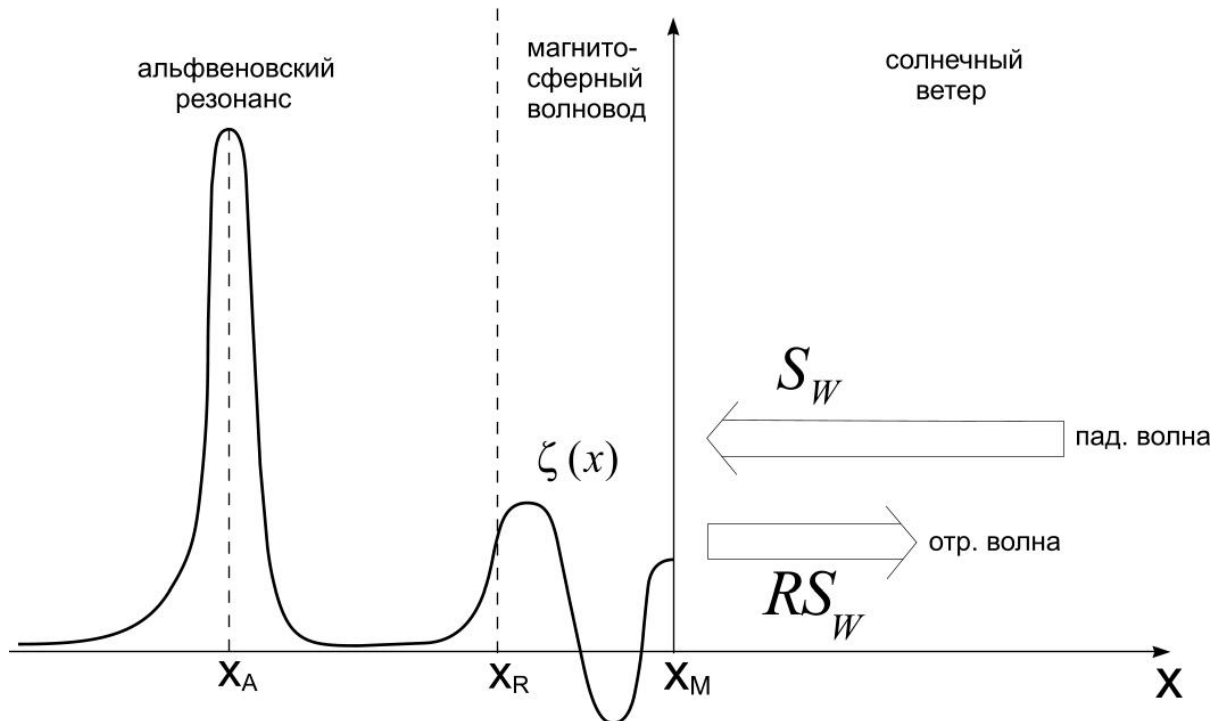


Рис. 5. Поперечная структура колебаний в магнитосферном МГД-волновое в задаче о падении БМЗ-волны из солнечного ветра на магнитопаузу.

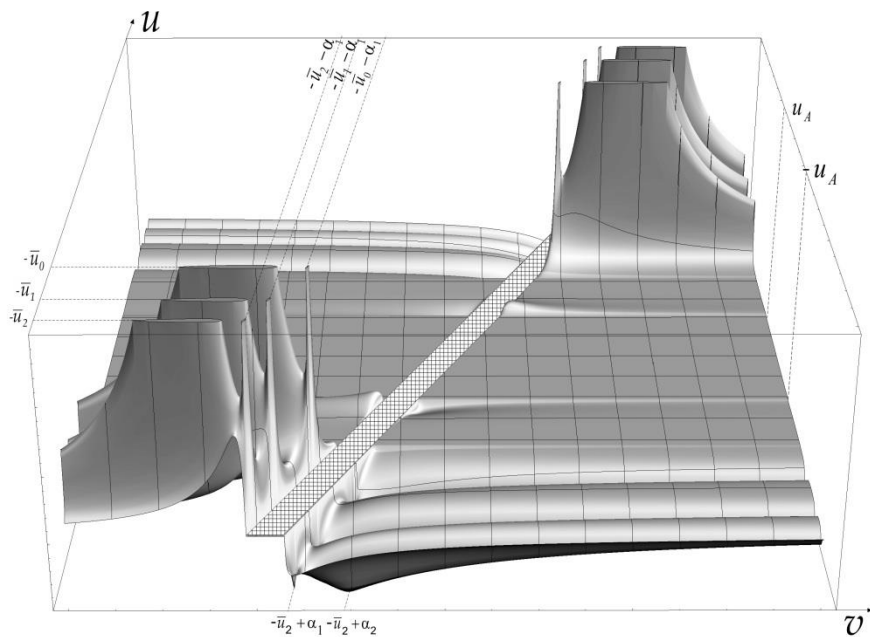


Рис 6. Коэффициент отражения $R(u, v)$ как функция частоты падающей волны и скорости солнечного ветра.

В **четвертой** главе решена задача распределения энергии собственных мод волновода вдоль волноводного канала [Мазур, Чуйко, 2015]. Моды возбуждаются волнами, падающими на магнитопаузу из солнечного ветра, и усиливаются неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. Получены приближенные аналитические решения уравнения переноса энергии волноводных мод, а также построены распределения плотности их энергии для двух типов накачки БМЗ-волновода немагнитосферными волнами. Накачка волновода в высокочастотном диапазоне приводит к возбуждению геомагнитных пульсаций Pc3, а в низкочастотном – пульсаций Pc5. Области локализации этих колебаний в магнитосфере, предсказанные теоретически, совпадают с наблюдаемыми. Из теоретических расчетов следует, что в высокочастотном диапазоне БМЗ-волновод наиболее эффективно накачивается в лобовой части магнитосферы, что полностью соответствует области локализации наблюдаемых в магнитосфере геомагнитных пульсаций Pc3. В низкочастотном диапазоне наиболее эффективна накачка БМЗ-волновода на флангах магнитосферы, где наиболее часто наблюдаются геомагнитные пульсации Pc5. Показано, что в каждом из этих двух частотных диапазонов геомагнитных пульсаций имеется свой набор собственных мод БМЗ-волновода с эффективной накачкой. Для нулевой и первой моды БМЗ-волновода в высокочастотном диапазоне Pc3 эффективная накачка волнами, проникающими в магнитосферу из солнечного ветра, близка нулю. Поэтому реальное возбуждение собственных колебаний волновода для пульсаций частотного диапазона Pc3 начинается только со второй гармоники. В низкочастотном диапазоне (Pc5) эффективное возбуждение колебаний начинается с основной моды. Набор частот собственных мод, а также их пространственная структура описывается аналитиче-

скими соотношениями, которые зависят как от распределения плазмы в волноводе, так и от номера собственной гармоник. Для основных мод волновода построены распределения плотности энергии колебаний вдоль волноводного канала, а также проведен их спектральный анализ (рис. 7–10).

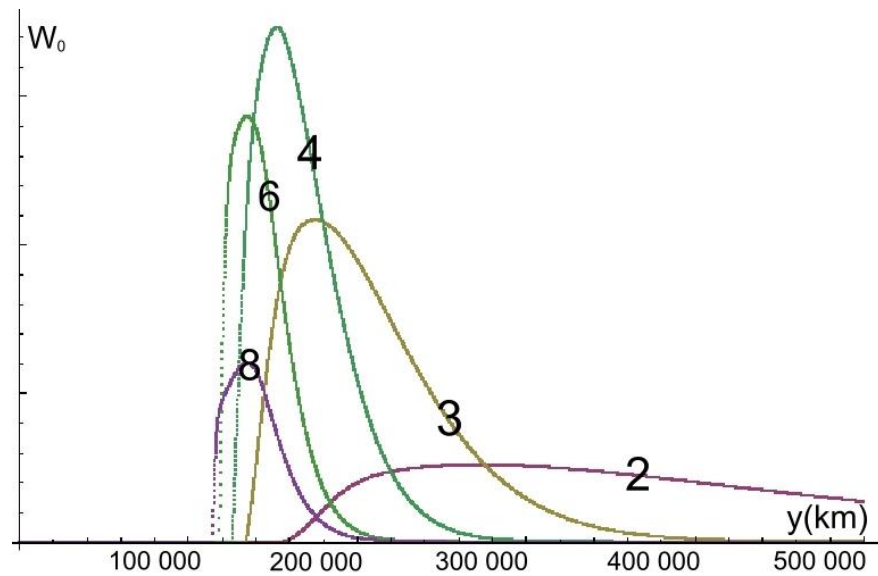


Рис. 7. Профили линейной плотности энергии нулевой моды волновода в диапазоне Рс5 для значений частоты: 2–2 мГц, 3–3 мГц, 4–5 мГц, 6–8 мГц, 8–12 мГц.

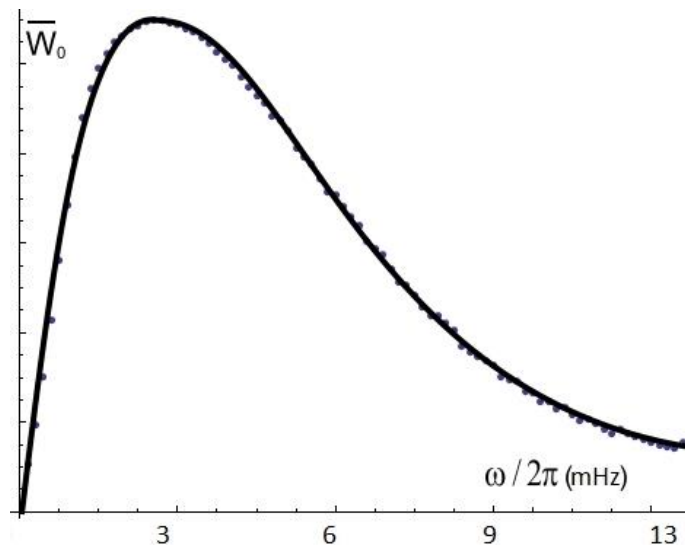


Рис. 8. График интегральной спектральной плотности энергии колебаний основной моды в диапазоне Рс5.

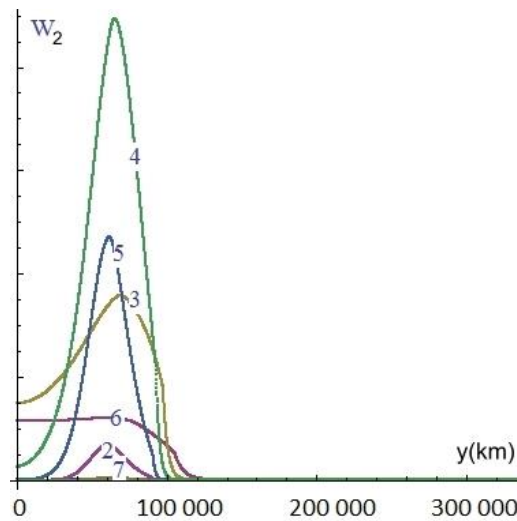


Рис. 9. Профили линейной плотности энергии нулевой моды волновода в диапазоне Pc3 для значений частоты: 2–10 мГц, 3–20 мГц, 4–40 мГц, 5–60 мГц, 6–80 мГц, 7–90 мГц.

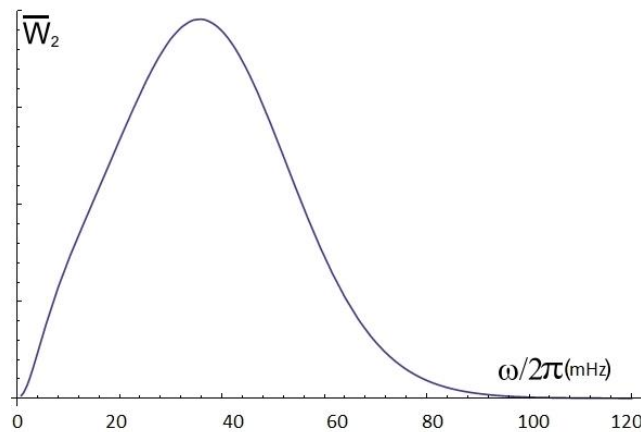


Рис. 10. График интегральной спектральной плотности энергии колебаний второй моды в диапазоне Pc3.

В **заклучении** представлены основные результаты, полученные в диссертационной работе, которые можно сформулировать следующим образом.

1. С помощью аналитического исследования распределения параметров плазмы и геомагнитного поля во внешней магнитосфере доказано, что в ней существует БМЗ-волновод, собственные моды которого затухают при их взаимодействии с альфвеновскими волнами на резонансных поверхностях.

2. Показано, что неустойчивость Кельвина–Гельмгольца для МГД-колебаний на магнитопаузе можно рассматривать как механизм возбуждения собственных мод БМЗ-волновода во внешней магнитосфере. Наличие такого волновода определяющим образом влияет на свойства БМЗ-волн, проникающих в магнитосферу из солнечного ветра и усиливающих неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. В магнитосферу могут проникать только волны, частоты которых близки собственным частотам этого волновода. Процесс падения и отраже-

ния таких волн от магнитопаузы может происходить в одном из двух режимов. Волны, фазовая скорость которых вдоль волновода меньше скорости солнечного ветра, отражаются от магнитопаузы с коэффициентом отражения, меньшим единицы. Волны, проекция фазовой скорости которых на направление скорости солнечного ветра больше скорости солнечного ветра, отражаются от магнитопаузы с коэффициентом отражения, большим единицы (явление сверхотражения).

3. Решена задача распределения энергии собственных мод БМЗ-волновода вдоль волноводного канала. Подробно исследован механизм возбуждения собственных мод БМЗ-волнами, падающими на магнитопаузу из солнечного ветра, которые затем усиливаются неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца на магнитопаузе и диссипируют в области альфвеновского резонанса.

Список цитируемой литературы

Беленькая Е.С. Магнитосферы планет, обладающих собственным магнитным полем // УФН. 2009. Т. 179, № 8. С. 809–835.

Гульельми А.В., Потапов А.С., Д'Коста А. К теории возбуждения геомагнитных пульсаций типа Pc3 // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1976. Вып. 39. С. 27–32.

Потапов А.С. Возбуждение геомагнитных пульсаций типа Pc3 перед фронтом околоземной ударной волны пучком отраженных протонов // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1974. Вып. 34. С. 3–12.

Зеленый Л.М. Динамика плазмы и магнитных полей в хвосте магнитосферы Земли // Итоги науки и техники / под ред. Р.З. Сагдеева. М.: ВИНТИ, 1986. Вып. 24. С. 58–186.

Baker R., Mather J.G., Kennaugh J.H. Magnetic bones in human sinuses // Nature. 1983. Vol. 301. P. 78–80.

Borovsky J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C. The driving of the plasma sheet by the solar wind // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103(A8), P. 17617–17639.

Boyle W.A., Norris D.R., Guglielmo C.G. Storms drive altitudinal migration in a tropical bird // Proc. Biol. Sci. 2010. Vol. 277. P. 1693.

Burch J. B., Reif J. S., Yost M. G. Geomagnetic activity and human melatonin metabolite excretion // Neurosci. Lett. 2008. Vol. 438. P. 76–79.

Carovillano R.L., Siscoe G.L., Energy and momentum theorem in magnetospheric processes // Rev. Geophys. Space Phys. 1973. Vol. 11(2). P. 289–353.

Coroniti F.V., Kennel C.F. Changes of magnetospheric configuration during the substorm growth phase // J. Geophys. Res. 1972. Vol. 77. P. 3361–3370.

Dmitrienko I. S. Evolution of FMS and Alfvén waves produced by the initial disturbance in the FMS waveguide // J. Plasma Phys. 2013. Vol. 79, N 01. P. 7–17.

Dessler A.J., Parker E.N. Hydromagnetic theory of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1959. Vol. 64(12). P. 2239–1152.

Erinmez I.A., Kappenman J.G., Radasky W.A. Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. 2002. Vol. 64. P. 743–756.

Foullon C. et al. Evolution of Kelvin–Helmholtz activity on the dusk flank magnetopause // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. P. A11203.

Gaunt C. T., Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk // Power Tech., 2007, IEEE, Lausanne. P. 807 - 812

Ghosch S., Thomson D.J., Matthaeus W.H., Lanzerotti L.J. Coexistence of turbulence and discrete modes in the solar wind // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. P. A08106.

Guglielmi A.V. Hydromagnetic diagnostic and geoelectric sounding // Sov. Phys. Usp. 1989. Vol. 32. P. 628.

Katz J., Davis V.A., Snyder D.B., Robertson E.A. ESD triggered solar array failure mechanism // The 6th Spacecraft Technology Conf. AFRL-VS-TR-20001578, 1 Sept. 2000. P. 39.

Kawasaki T., Hosoda S., Kim J., Toyoda K, Cho M. Charge neutralization via arcing on a large solar array in the GEO plasma environment // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. Vol. 34, N 5. P. 1979–1985.

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Breus T.K., Rapoport S.I. Pc1 geomagnetic pulsations as a potential hazard of the myocardial infarction // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2007. Vol. 69. P. 1759–1764.

Koons H.C., Fennell J.F. Space weather effects on communications satellites // The Radio Sci. Bull. Int. Union of Radio Sci. 2006. Vol. 16. P. 27–41.

Koons H.C., Mazur J.E., Selesnick R.S., Fennell J.F., Roeder J.L., Anderson P.C. The Impact of the Space Environment on Space Systems // Aerospace Report. #TR99-(1670)-1, 1999. p. 13.

Kozlov D.A. Transformation and absorption of magnetosonic waves generated by solar wind in the magnetosphere // JASTP. 2010. Vol. 72, N 18. P. 1348–1353.

Leonovich A.S., Mishin V.V., Cao J.B. Penetration of magnetosonic waves into the magnetosphere: Influence of a transition layer // Annales Geophysicae. 2003. Vol. 21, N 5. P. 1083–1093.

Mann I.R., Wright A.N. Diagnosing the excitation mechanisms of pc5 magnetospheric flank waveguide modes and FLRs // Geophys. Res. Lett. 1999. Vol. 26, N 16. P. 2609–2612.

Mann I.R. et al. Excitation of magnetospheric waveguide modes by magnetosheath flows // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104, N A1. P. 333–353.

Cannon P., et al. Extreme space weather: Impacts on engineered systems and infrastructure // Royal Academy of Engineering, 2013. p. 69.

Pu Zu-yin, Kivelson M.G. The Kelvin–Helmholtz instability at the magnetopause // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88. P. 853–861.

Russel C.T. Planetary magnetospheres // Reports on Progress in Physics. 1993. Vol. 56, N 6. P. 687-732.

Stephenson J.A.E., Walker A.D.M. Coherence between radar observation of magnetospheric field line resonances and discrete oscillations in the solar wind // *Ann. Geophys.* 2010. Vol. 28. P. 47–59.

Sanny J., Judnick D., Moldwin M.B., Berube D., Sibeck D.G. Global profiles of compressional ultralow frequency wave power at geosynchronous orbit and their response to the solar wind // *J. Geophys. Res.* 2007. P. A05224.

Singh A.K., Mishra S., Singh R. ULF wave index as magnetospheric and space-weather parameters // *Adv. Space. Res.* Vol. 52(8). P. 1427–1436.

Stoilova I., Dimitrova S. Geophysical variables and human health and behavior // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70. P. 428–435.

Sung S.K. et al. Simultaneous ground-based and satellite observations of Pc5 geomagnetic pulsations: A case study using multipoint measurements // *Earth Planets Space*. 2006. V. 58. P. 873–883.

Thomson D.J., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G. Interplanetary magnetic field: Statistical properties and discrete modes // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 15941–15962.

Thomson D.J., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G. Study of some statistics of the interplanetary magnetic field and implications for discrete modes // *Adv. Space Res.* 2002. Vol. 29(12). P. 1911–1916.

Walker A.D.M. et al. Excitation of field line resonances by sources outside the magnetosphere // *Annales Geophysicae*. 2005. Vol. 23. P. 3375–3388.

Walker A. D. M. Excitation of magnetohydrodynamic cavities in the magnetosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1998. Vol. 60. P. 1279–1293.

Weaver M., Murtagh W., Balch C., Biesecker D., Combs L., Crown M., Doggett K., Kunches J., Singer H., Zezula D. Halloween Space Weather Storms of 2003 // *Rep. NOAA Technical Memorandum*. 2004, OAR SEC-88, NOAA.

Wright A.N., Mann I.R. Global MHD eigenmodes of the outer magnetosphere. “Magnetospheric ULF waves: Synthesis and new directions” / Eds. Kazue Takahashi et al. *Geophys. Monograph*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2006.

Wright A.N. Dispersion and wave coupling in inhomogeneous MHD waveguides // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 159–167.

Watanabe K., Sato T. Global simulation of the solar wind – magnetosphere interactions. The importance of its numerical validity // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95(A1). P. 75–88.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН
Заказ № от 2015 г.
Объем 21 с. Тираж 150 экз.