

УДК 533.951+550.385+551.510+551.590.21

О. К. Черемных¹, Ю. М. Ямпольский², А. В. Агапитов³, А. В. Зализовский², В. Н. Ивченко³, Л. В. Козак³,
А. С. Парновский¹, Ю. Г. Рапопорт³, Ю. А. Селиванов¹, А. В. Колосков², С. О. Черемных¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

² Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ИССЛЕДОВАНИЯ МГД-КОЛЕБАНИЙ ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ РЕЗОНАНС

Активную фазу международного орбитального космического проекта РЕЗОНАНС, в котором участвуют 12 стран, запланировано начать в 2014–2016 гг. Украинские ученые принимают участие в проекте уже с подготовительной фазы: определяются теоретические модели явлений в магнитосферной плазме, в радиационных поясах, модели взаимодействия магнитосферы и ионосферы, генерации магнитогидродинамических волн, уточняются методики интерпретации космических и наземных измерений, их комплексирования, в ЛЦ ИКИ созданы бортовые магнитометры для спутников проекта. В статье рассмотрены детали указанных вопросов и определены задачи для реализации украинскими учеными в проекте.

ВВЕДЕНИЕ

Международный космический проект РЕЗОНАНС [39, 40] планируется с участием научных коллективов из России, Украины, Австрии, Болгарии, Германии, Греции, Польши, Словакии, США, Чехии, Финляндии и Франции и имеет целью исследование резонансного взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли. Одной из наиболее актуальных проблем космических исследований есть характер взаимосвязи микро-, мезо- и макромасштабных процессов, особенно в активных слоях верхней атмосферы. При этом наиболее мелкомасштабные явления труднее всего поддаются экспериментальному изучению, поскольку требуют тщательной координации положения космических аппаратов (КА) с измерительными приборами в пространстве и во времени. Данный проект впервые в практике космических исследований предусматривает выведение двух пар исследова-

тельских КА на околоземные магнитосинхронные орбиты. В результате выполненного российскими учеными большого объема исследований были найдены орбиты, на которых каждая пара КА будет достаточно долго (несколько часов) находится в одной и той же силовой трубке геомагнитного поля [42, 65].

Другой уникальной частью проекта будет совместный с наземным стендом радиочастотного нагрева ионосферы эксперимент, который позволит проверить возможность управления некоторыми мощными процессами в околоземной плазме [42, 47, 65].

Главными задачами проекта определены:

1. Долговременные наблюдения таких природных явлений, как динамика магнитосферного циклотронного мазера [89–91], образование кольцевого тока, заполнение плазмосферы после магнитных бурь, роль мелкомасштабных феноменов в глобальной плазменной динамике для понимания закономерностей взаимодействия волн и частиц в магнитосферной плазме [42, 84].

2. Искусственные воздействия на процессы в магнитосферном мазере, такие как искусственное возбуждение и (или) стимуляция волновых

© О. К. ЧЕРЕМНЫХ, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ, А. В. АГАПИТОВ,
А. В. ЗАЛИЗОВСКИЙ, В. Н. ИВЧЕНКО, Л. В. КОЗАК,
А. С. ПАРНОВСКИЙ, Ю. Г. РАПОПОРТ, Ю. А. СЕЛИВАНОВ,
А. В. КОЛОСКОВ, С. О. ЧЕРЕМНЫХ, 2013

мод, модификация высыпаний частиц, модификация коэффициента отражения в ионосферной части выбранной магнитосферной магнитной трубки при направленных изменениях фактора добротности Q магнитосферного мазера [89—91].

3. Долговременные наблюдения магнитосферных резонаторов (МР). Образованные пространственной структурой магнитного поля Земли и высотным распределением электронной концентрации верхней ионосферы, МР играют важную роль в диагностике состояния геокосмоса. Возбуждение МР, как правило, является следствием взаимодействия магнитосферы с корпускулярными потоками от Солнца. Возможно также возбуждение МР процессами энерговыделения на поверхности Земли и в нижней атмосфере естественного (циклоны, землетрясения) и искусственного происхождения (нагрев ионосферы мощным высокочастотным излучением) [84, 90].

Исследования динамики поведения резонансных МГД-волн в таких резонаторах позволяет получить важную информацию о текущем состоянии магнитосферы и степени ее возмущенности. Важно отметить, что искусственный нагрев ионосферы позволяет целенаправленно возбуждать МР за счет периодической модификации характеристик верхней ионосферы.

Выполнение проекта позволит, в частности, получить новую информацию о природе геомагнитных пульсаций — вариаций приземного геомагнитного поля, обусловленных длинноволновыми и долгопериодными колебаниями магнитногидродинамического типа, проникающими к поверхности Земли от магнитосферы через ионосферу. Вопросы транспорта энергии солнечного ветра от магнитосферы к нижней атмосфере, обуславливающего наземные проявления «космической погоды», до сих пор не имеют ответа, в первую очередь вследствие ввиду сложности и недостаточности описания процессов взаимодействия ионосферы и магнитосферы. В этих процессах важнейшую роль играют МГД-колебания, их взаимодействия между собой и с пучками заряженных частиц.

Для осуществления целей проекта РЕЗОНАНС спутники будут снабжены научной измерительной аппаратурой следующих категорий:

- 1) магнитометры для измерения квазипостоянного магнитного поля,
- 2) приемники в диапазонах УНЧ-, ОНЧ- и ВЧ-колебаний,
- 3) датчики параметров холодной плазмы,
- 4) приборы для определения функции распределения сверхтепловых электронов,
- 5) приборы для определения функции распределения и массового анализа сверхтепловых ионов,
- 6) быстрые анализаторы электронов,
- 7) спектрометр энергичных электронов и ионов,
- 8) спектрометр релятивистских электронов,
- 9) радиоинтерферометр.

Из наземных устройств будут задействованы нагревательный стенд НААРР (Аляска, США) [67], позволяющий осуществлять генерацию низкочастотных колебаний в ионосфере за счет модулированного ВЧ-излучения [45, 47, 68], с расположенными в его окрестности наземными цепочками магнитометров [58] и аналогичная установка MURMANSK (Кольский полуостров, РФ).

Украинская сторона в этом проекте ответственна за изготовление и сопровождение бортовых магнитометров (индукционные магнитометры LEMI-606 Львовского центра ИКИ НАНУ-ДКАУ [18]) и осуществление эксперимента «Наземно-космический МГД-интерферометр» (см. разд. 2). При этом состав научной аппаратуры и данные, которые будут получены в активной фазе проекта, дадут возможность существенно продвинуться в целом ряде направлений исследований, в настоящее время осуществляемых в учреждениях НАН Украины. В ходе интенсивных обсуждений на семинарах и многосторонних международных совещаниях были определены задачи, для которых будут существенно полезны или даже критичны научные данные экспериментов проекта РЕЗОНАНС. Поэтому в разделах 1—5 рассмотрен ряд уже развиваемых в НАНУ направлений исследований динамики ионосферной и магнитосферной плазмы.

В разд. 1 рассмотрены результаты теоретических исследований механизмов генерации резонансных геомагнитных пульсаций, преимущест-

венно УНЧ-диапазона, и наблюдаемые особенности их поляризационных состояний.

В разд. 2 приведены методики и экспериментальные результаты по одно- и многопозиционной поляризационной диагностике естественных МГД-волн в ионосфере-магнитосфере, а также экспериментальные исследования магнитосферных МГД-колебаний, возбуждаемых приземными и ионосферными источниками. Важная для реализации проекта РЕЗОНАНС часть результатов получена из анализа экспериментов на установках ВЧ-нагрева ионосферы СУРА [27] и HAARP по генерации МГД-волн в ионосфере и воздействия последних на состояние ионосферных и магнитосферных резонансных структур.

Воздействие неоднородностей солнечного ветра, как и мощное воздействие нагретых стенов, приводят к развитию турбулентности в магнитосферной плазме, составляющей не только фон, но и источник энергии для ускорения частиц и раскачки колебаний в магнитосферных резонаторах. Учет характеристик турбулентности необходим в проекте, поэтому важно развить и довести до практического использования соответствующие сложности ситуации методы анализа турбулентных и диффузионных процессов. Этой теме посвящен разд. 3 данной работы.

Исторически сложилось, что многие важнейшие представления современной физики магнитосферы пришли из радиоэлектроники. Принципы генерации мощного излучения на основе взаимодействия электромагнитных волн и пучков заряженных частиц, изобретенные для лампы обратной волны, разработанные для мазеров и их модификаций на свободных электронах, будучи примененными к процессам в ионосфере и магнитосфере, привели, например, к теории магнитосферного мазера, с помощью которой были успешно объяснены особенности пульсаций диапазона Pc1, так называемые «жемчужины».

В разд. 4 приведены результаты исследований по развитию новых методов моделирования волновых процессов в нелинейной среде с дисперсией и диссипацией с использованием подходов, сложившихся в последнее время в смежных областях физики.

Наконец, в разд. 5, на основании изложенных результатов формулируются постановки исследовательских задач, предложенных исследовательскими коллективами НАН Украины, в решении которых эксперименты проекта РЕЗОНАНС будут иметь решающее значение. Эта совокупность задач носит предварительное название проект РЕЗОНАНС-У.

1. ГЕНЕРАЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Описание МГД-возмущений в магнитосфере. Скорость распространения магнитогидродинамических возмущений в магнитосфере изменяется в широких пределах от сотен до тысяч км/с. Это приводит к запираанию магнитогидродинамических волн в системе, реализации собственных или резонансных мод и возможности резонансной накачки энергии в эти моды. Именно с такими собственными магнитогидродинамическими колебаниями связывают геомагнитные пульсации — ультранизкочастотные (УНЧ) периодические возмущения магнитного поля в магнитосфере (частотный диапазон от 1 мГц до 5 Гц). Геомагнитные пульсации являются гидромагнитными колебаниями магнитосферной плазмы. Эти волны имеют пространственный масштаб, сравнимый с размерами магнитосферы, и их параметры зависят от топологии магнитного поля системы. В магнитосфере Земли квазидипольное магнитное поле внутриземных источников теряет аксиальную симметрию из-за воздействия внешних токовых систем. Генерация геомагнитных пульсаций происходит в результате транспорта энергии в системе солнечный ветер — магнитопауза — магнитосфера в результате изменения параметров солнечного ветра и генерации собственных колебаний дневной магнитосферы в виде стоячей быстрой магнитозвуковой волны [2], внезапными импульсами солнечного ветра [2, 24], в результате развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца на магнитопаузе и последующей резонансной генерации собственных колебаний поверхностной волной [36], быстрыми магнитозвуковыми волнами, которые распространяются в магнитосферном волноводе. Поляризация резонанс-

ных УНЧ-волн определяется механизмом генерации [3].

Генерация МГД-волн в космическом пространстве во многом обусловлена неоднородностью структуры магнитосферы, на границах которой обычно наблюдается возмущение геомагнитного поля. В начале 1970-х годов в рамках простейшей модели неоднородной магнитосферы с прямыми силовыми линиями магнитного поля, ограниченными двумя идеально проводящими ионосферами [82], было проанализировано распространение быстрой магнитозвуковой (БМЗ) волны поперек магнитного поля. При совпадении периода БМЗ-волны с периодом собственной альвеновской моды, система содержит сингулярность, которая отвечает за резонансную генерацию альвеновской волны на силовой линии. Этот эффект получил название резонанса на силовых линиях магнитного поля. Магнитосферные альвеновские резонансы на силовых линиях магнитного поля с кратными частотами достоверно наблюдались на космическом аппарате AMPTE/CSE [83] на расстояниях от двух до девяти радиусов Земли. Установлено, что они генерируются в диапазоне частот от 0.001 до 0.1 Гц (диапазон пульсаций Pc3—Pc5) на дневной стороне магнитосферы от плазмопаузы до магнитопаузы [44, 56]. Для резонансных альвеновских частот было получено соотношение масштабирования [24]. В зависимости от поляризации возмущения УНЧ-диапазона можно разделить на два типа: тороидальные и полоидальные. Убедительное подтверждение резонансной природы тороидальных периодических возмущений УНЧ-диапазона приведено в работе [44], в которой была получена зависимость частот периодических возмущений от параметра Мак-Илвайна, полученная в рамках модели резонанса на силовых линиях магнитного поля. В качестве механизма генерации собственных резонансных мод в ряде работ также рассматриваются неустойчивость Кельвина — Гельмгольца на магнитопаузе [20, 64, 66], которая реализуется при совпадении частоты поверхностной волны с собственной частотой, внезапные импульсы в динамическом давлении солнечного ветра [2, 24, 26, 64, 65, 82], квазипериодические возмущения параметров

солнечного ветра [46], волноводные моды между магнитопаузой и поверхностью отражения волн в окрестности плазмопаузы [57, 61—63, 71]. В частности, в работе [25] на основе экспериментальных наблюдений показана возможность генерации как полоидальных, так и тороидальных резонансных возмущений на разных частотах в зависимости от магнитной оболочки после широкополосного возмущения магнитного поля, вызванного внезапным импульсом давления солнечного ветра. Теория локальных магнитосферных резонансов на магнитных силовых линиях со стоячими альвеновскими волнами, появляющимися в виде отклика на распространение внешних возмущений на границе магнитосферы, способна объяснить основные особенности наблюдаемых геомагнитных возмущений диапазона Pc3—Pc5. Эффект резонанса на силовых линиях магнитного поля далеко выходит за рамки геофизики. Теории, использующие этот эффект разрабатываются в физике Солнца [40], комет [35] и в разработке методов ВЧ-нагрева плазмы [36].

В данном разделе рассмотрены особенности параметров геомагнитных пульсаций УНЧ-диапазона в зависимости от механизма генерации, теоретические основы связывания собственных колебательных мод магнитосферы и особенности поляризации геомагнитных пульсаций по данным наблюдений в околоземном космическом пространстве. Раздел завершается обзором наблюдаемых в магнитосфере проявлений различных механизмов генерации геомагнитных пульсаций.

Поляризация резонансных возмущений геомагнитного поля УНЧ-диапазона [1]. Для объяснения общих свойств МГД-пульсаций в магнитосфере Земли обычно используются упрощенные модели магнитного поля (например МР). Тонкая структура магнитосферных резонансов может быть получена в геометрии магнитного поля (а также в распределении плотности плазмы и профилей токов) близкой к реальной. В достаточно реалистичном приближении магнитосферные резонансы были рассмотрены в работах [20, 21, 54, 55]. Для того чтобы проиллюстрировать результаты этих работ, ограничимся простейшей трехмер-

ной моделью магнитного поля Земли (МПЗ) — осесимметричным магнитным диполем с вложенными магнитными поверхностями. Эта модель достаточно хорошо аппроксимирует МПЗ до расстояний около $6R_E$. В такой модели структура геомагнитного поля \mathbf{B} в сферической системе координат r, θ, φ (r — радиальное расстояние, θ — геомагнитная широта, φ — восточная геомагнитная долгота, которая задается полоидальным магнитным потоком ψ) имеет вид

$$\mathbf{B} = [\nabla\psi \times \nabla\varphi], \quad (1)$$

а вектор смещения ξ элементарного объема плазмы можно представить в виде [39]

$$\xi = \xi \frac{\nabla\psi}{|\nabla\psi|^2} + \eta \frac{[\mathbf{B} \times \nabla\psi]}{|\mathbf{B}|^2} + \tau \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2}. \quad (2)$$

В работе [35] было показано, что в указанной геометрии имеют место два типа резонансных возмущений: тороидальные альвеновские моды (ТАМ), которые описываются уравнением

$$\rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \frac{|\mathbf{B}|^2}{|\nabla\psi|^2} \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{|\nabla\psi|^2}{|\mathbf{B}|^2} \mathbf{B} \cdot \nabla \eta \right), \quad (3)$$

и не связанные с ними медленные магнитозвуковые (ММЗ) моды, которые описываются уравнением

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\gamma p}{\rho \omega^2 |\mathbf{B}|^2} \mathbf{B} \cdot \nabla \text{div} \xi \right) + (1 + \beta) \text{div} \xi = 0, \quad (4)$$

где γ — показатель адиабаты, β — плазменный параметр (отношение динамического давления плазмы к давлению магнитного поля $B^2/(8\pi)$), ρ — плотность плазмы. Уравнения (3) и (4) с соответствующими граничными условиями описывают свободные (собственные) колебания [1, 18, 25, 38, 40, 69]. Магнитосферная плазменная система, выведенная из положения равновесия внешним возмущением, будет совершать собственные колебания на частотах, являющихся собственными значениями уравнений (3) и (4). В качестве внешнего возмущения могут выступать, например, возмущения в солнечном ветре, распространяющиеся от магнитопаузы в виде БМЗ-волны. В работах [1, 40] для дипольной геометрии магнитного поля применимость уравнений (3) и (4) была уточнена для собствен-

ных поперечно-мелкомасштабных возмущений. Было показано, что ТАМ и ММЗ реализуются в случае $\xi = 0$, т. е. когда вектор смещения (2) лежит на магнитной поверхности $\psi = \text{const}$, поскольку, как следует из (2), в этом случае справедливо равенство $\xi \cdot \nabla\psi = 0$.

В работах [1, 18, 21] для произвольной геометрии магнитного поля с магнитными поверхностями было показано, что помимо резонансной раскачки собственных волн, описываемых уравнениями (3) и (4), раскачиваются также магнитосферные волны другого типа. Эти резонансные возмущения даже в дипольной геометрии магнитного поля «зацеплены» друг с другом через радиальную кривизну силовых линий магнитного поля и описываются уравнениями

$$\frac{\rho}{|\nabla\psi|^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla\psi|^2} \mathbf{B} \cdot \nabla \xi \right) + \frac{2\chi \cdot \nabla\psi}{|\nabla\psi|^2} (p' \xi + \text{div} \xi), \quad (5)$$

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\gamma p}{\rho \omega^2 |\mathbf{B}|^2} \mathbf{B} \cdot \nabla \text{div} \xi \right) + (1 + \beta) \text{div} \xi + \frac{2\chi \cdot \nabla\psi}{|\nabla\psi|^2} \xi = 0, \quad (6)$$

где $\chi = \left(\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \cdot \nabla \right) \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}$ — вектор кривизны силовой линии магнитного поля, ρ — плотность плазмы, p — динамическое давление плазмы, γ — показатель адиабаты. Уравнение (5) описывает резонансные полоидальные альвеновские моды, а уравнение (6) — ММЗ-моды. В дипольной геометрии полоидальные и тороидальные моды генерируются независимо друг от друга.

Уравнения (5) и (6) для поперечно-мелкомасштабных возмущений в дипольной геометрии магнитного поля реализуются при малом смещении вдоль магнитной поверхности $\eta \approx 0$ [1, 18, 21]. Это означает, что вектор смещения единичного объема плазмы ξ лежит в плоскости, перпендикулярной к магнитной поверхности, поскольку вектор смещения удовлетворяет равенству $[\mathbf{B} \times \nabla\psi] \cdot \xi = 0$. Указанные возмущения генерируются при условии, что вектор возмущающей силы (или смещения) направлен определенным образом по отношению к магнитным поверхностям. Если возмущающая сила действует на элементарный плазменный объем вдоль магнитной поверхности, то в этом случае генерируются тороидальные альвеновские и ионнозвуч-

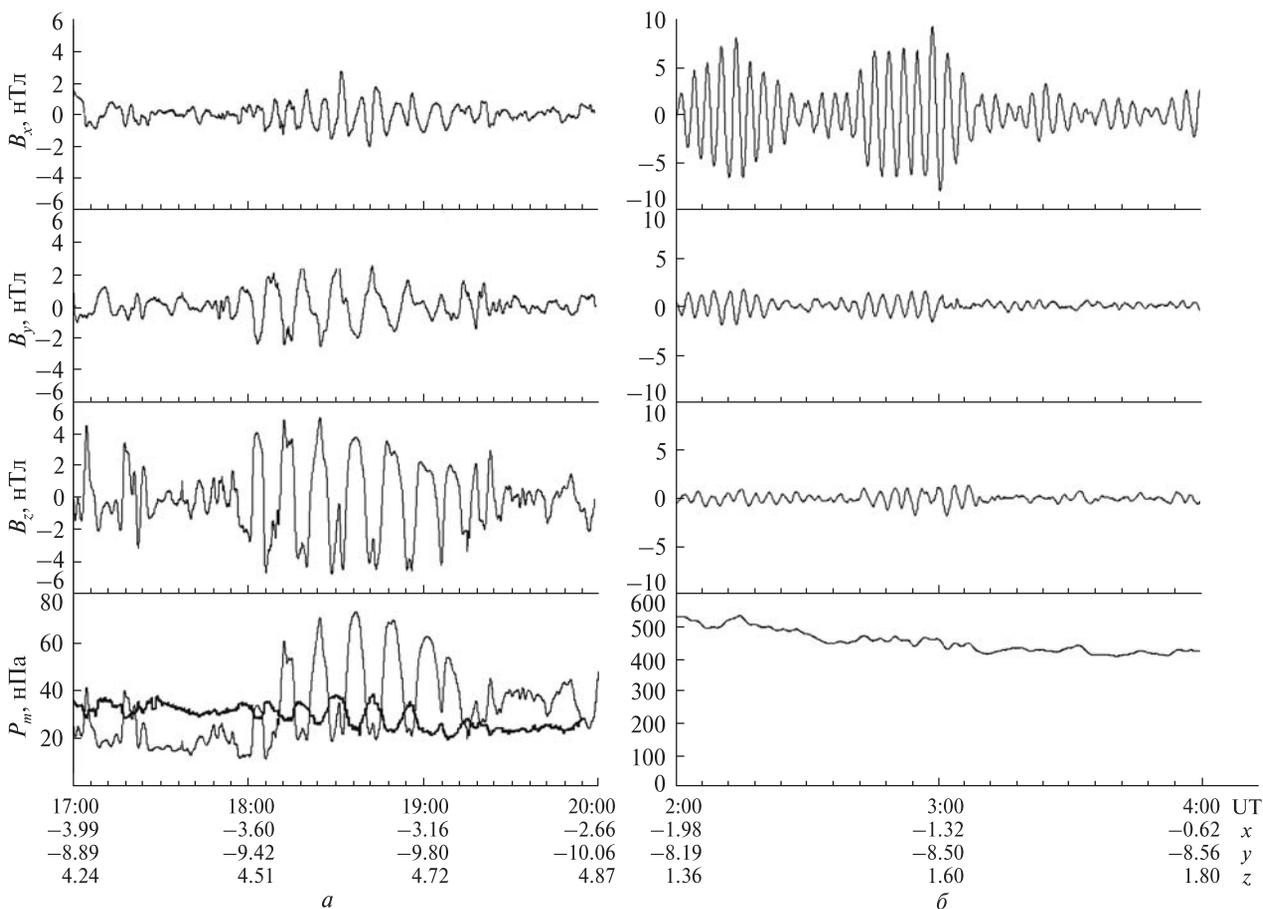


Рис. 1. Компоненты магнитного поля в системе координат локального магнитного поля 18.03.1998 г., давление магнитного поля для 17:00 — 20:00 UT (а) и 02:00 — 04:00 UT (б). Внизу приведены координаты космического аппарата «Экватор-S» в системе координат GSE

ковые моды. Такая ситуация реализуется в магнитосфере в утреннем и вечернем секторах. Если же возмущающая сила лежит в плоскости, перпендикулярной к магнитной поверхности, то силовые линии магнитного поля находятся в резонансе с полоидальными альвеновскими и ионнозвуковыми модами. Из геометрии взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой следует, что последние должны генерироваться в дневном секторе магнитосферы под действием возмущений в солнечном ветре. В областях между дневной частью магнитосферы и «утренним» и «вечерним» секторами могут генерироваться собственные тороидальные, полоидальные альвеновские моды и медленные магнитозвуковые волны.

В работах [3, 21, 40] было показано, что при $\delta P = 0$ в плазменной системе генерируются собственные поперечно-мелкомасштабные МГД-моды. Таким образом, БМЗ-волна, генерируемая в магнитосфере внешними источниками, является естественным источником раскачки собственных поперечно-мелкомасштабных мод (см. рис. 1). В магнитосфере Земли обычно наблюдается частичная компенсация давления магнитного поля кинетическим давлением плазмы. Причиной этого эффекта является то, что волновой процесс в магнитосфере контролируется изменениями магнитного поля, а не возмущенным давлением плазмы.

Распределение наблюдаемых УНЧ-событий в зависимости от магнитного локального времени

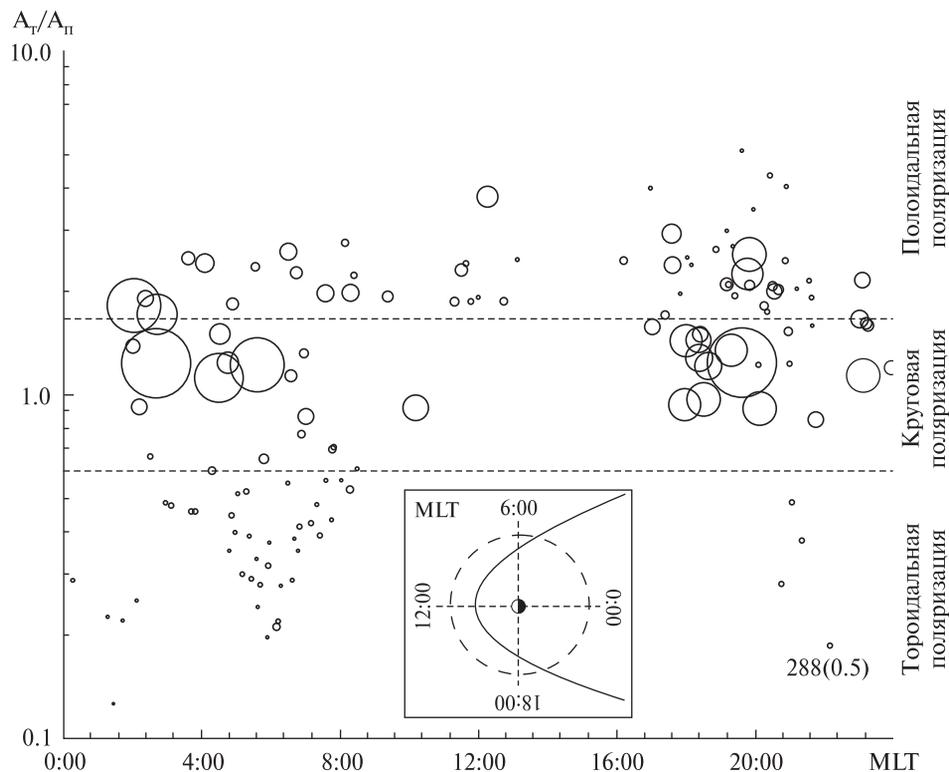


Рис. 2. Распределение УНЧ-событий, зарегистрированных на борту АМРЕ/ССЕ в 1986 г., в зависимости от магнитного локального времени наблюдения и поляризации магнитного поля в волне

наблюдения (MLT) и поляризации магнитного поля в волне показано на рис. 2. Диаметр кружка на диаграмме пропорционален отношению продольной составляющей возмущения магнитного поля (относительно локального магнитного поля) к поперечной. Чем больше диаметр кружка, тем больше возмущение магнитного давления в волне. В качестве параметра, характеризующего поляризацию волны, выбрано отношение амплитуды полоидальной составляющей к амплитуде тороидальной. С таким параметром поляризации тороидальные волны группируются в нижней части диаграммы, а полоидальные — в верхней. Как видно из диаграммы, тороидальные волны в основном наблюдаются без возмущения давления магнитного поля и, соответственно, без возмущения давления плазмы. Наиболее часто они регистрируются на флангах магнитосферы Земли. При этом отношение амплитуды продольной составляющей

возмущения магнитного поля к поперечной не превышает 0.5. Для большинства событий с тороидальными возмущениями магнитного поля это отношение составляет менее 0.1. Наблюдаемая на рис. 2 асимметрия утреннего и вечернего секторов магнитосферы может быть объяснена в рамках механизма генерации неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца на флангах магнитосферы или волноводной модой. Для полоидальных волн характерно наличие существенной составляющей давления магнитного поля и динамического давления плазмы. Отношение амплитуд продольного и поперечного возмущения магнитного поля в волне могут достигать 4. В среднем это отношение в полоидальных волнах составляет 1.5—2.5.

Максимальные амплитуды продольной составляющей возмущения магнитного поля в волне наблюдаются в волновых событиях с поляризацией, близкой к круговой. Отношение

продольной и поперечной амплитуд возмущения может достигать 5–7. На флангах магнитосферы этими волнами являются волноводные БМЗ-волны, которые могут эффективно связываться с резонансными модами на силовых линиях. Полоидальные волны наблюдаются в дневном секторе, где они могут генерироваться при изменении параметров солнечного ветра. Волновые события с линейной поляризацией и с близкими по амплитуде тороидальной и полоидальной составляющими проходят с меньшим возмущением давления магнитного поля.

Механизмы генерации резонансных геомагнитных пульсаций. Генерация поверхностными волнами Кельвина — Гельмгольца. Механизм генерации собственных колебаний с тороидальной поляризацией рассмотрен в ряде работ [54]. Достоверное экспериментальное подтверждение резонансной накачки стало возможным благодаря многоточечным наблюдениям проектов «Кластер» [71] и THEMIS [26]. Характерными особенностями резонансного взаимодействия будут локализация возмущения на L-оболочке, изменение при переходе через максимум амплитуды, синфазность колебаний и поверхностных волн на магнитопаузе (рис. 3). По наблюдениям параметров магнитослоя, условия развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца реализуются менее чем в 10 % случаев пересечений (наблюдения THEMIS), поэтому обсуждаются другие способы генерации резонансных мод на силовых линиях, связанные с изменениями динамического давления плазмы на магнитопаузе (cavity modes) и системами запертых магнитозвуковых колебаний (waveguide modes), которые могут раскачиваться при произвольных изменениях параметров солнечного ветра.

Динамическое давление солнечного ветра определяет активность магнитосферы и ее размеры. Увеличение давления солнечного ветра вызывает увеличение токов на магнитопаузе, что, в свою очередь, приводит к увеличению магнитного поля в магнитосфере при общем уменьшении ее размеров и приближению подсолнечной точки к Земле. После изменения размеров магнитосфера находится в новом динамическом равновесном состоянии, которое описывает-

ся полуэмпирическим выражением, где расстояние от подсолнечной точки магнитопаузы до центра Земли равно $R_{MP} = 107.4 (n_s u_s)^{(-1/6)}$ [24, 26] (n_s — концентрация, u_s — скорость потока плазмы в солнечном ветре). При этом магнитопауза выступает источником генерации нескольких типов УНЧ-волн [24, 36, 55]. Если время изменения параметров солнечного ветра меньше характерного времени распространения МГД-волны через магнитосферу (порядка 10 мин), то магнитопауза выступает как источник МГД-волны сжатия, которая распространяется внутрь системы. Когда происходит сжатие или расширение магнитосферы, и магнитопауза перемещается со скоростью u_b , баланс давлений в подсолнечной точке описывается соотношением $B^2/\mu_0 = Kn_s m_s (u_s - u_b)^2$, где B — мгновенное значение напряженности магнитного поля в магнитосфере непосредственно у магнитопаузы, m_s — средняя масса пары ион-электрон в солнечном ветре, K — геометрический фактор для подсолнечной точки, близкий к единице, μ_0 — магнитная постоянная. Движение магнитопаузы продолжается до тех пор, пока B не достигнет конечного равновесного значения $B_M : B_M^2/\mu_0 = Kn_s m_s u_s^2$. Отсюда скорость u_b может быть выражена как $u_b = (B_M - B)/\sqrt{2\mu_0 Kn_s m_s}$, где положительным значениям u_b соответствует движение в сторону Земли. Сжатие или расширение плазмы, начавшееся на магнитопаузе, распространяется через магнитосферу со скоростью V_F быстрой магнитозвуковой волны. Обычно движение магнитопаузы дозвуковое ($u_b/V_F < 1$), если $n_m \ll n_s$ и $m_m \approx m_s$. На дневной стороне магнитосферы давление плазмы мало ($\beta \ll 1$). Поэтому значение V_F практически равно альвеновской скорости $V_A = B_m/\sqrt{\mu_0 n_m m_m}$ (в магнитосфере — от 400 до 10000 км/с). Следовательно, магнитозвуковой импульс в магнитосфере будет опережать ударную волну в солнечном ветре. Передача сигнала от магнитопаузы до земной поверхности при средней альвеновской скорости, равной 600–1000 км/с, происходит примерно за 1–3 мин. Примерно такое запаздывание наблюдается при регистрации наземными станциями импульсных возмущений [2, 24].

Наблюдаются два различных типа смещения поверхности экваториальной магнитопаузы: одномерное движение как целого (flapping), пример реконструкции возмущения магнитопаузы показан на рис. 4, и движение по поверхности магнитопаузы двухмерных волновых структур. Квазипериодические смещения поверхности магнитопаузы являются проявлениями одного события в различных регионах магнитосферы. Периодические смещения поверхности МП в подсолнечном регионе связаны с собственными колебаниями дневной магнитосферы (cavity modes), рассчитанные периоды которых близки к периоду наблюдаемых колебаний положения МП. Эти колебания приводят к возникновению возмущений на поверхности магнитопаузы, которые сносятся в хвост магнитосферы.

Поверхностные волны наблюдаются на флангах магнитосферы. Для одномерных колебаний положения поверхности МП характерна меньшая скорость смещения магнитопаузы. Одномерные периодические смещения положения магнитопаузы характерны для подсолнечного региона МП. Генерация волновых структур на флангах магнитосферы связана с собственными колебаниями дневной магнитосферы и вызванными ими неоднородностями поверхности МП. Таким образом, осцилляции подсолнечной магнитопаузы и волновые структуры на флангах магнитосферы, распространяющиеся в хвост, являются проявлениями единого процесса в разных регионах экваториальной МП. Неоднородности поверхности магнитопаузы, возникающие при колебаниях подсолнечной МП, сносятся в хвост со скоростью потока плазмы в магнитослое. Поскольку осцилляции имеют квазипериодический характер, на флангах магнитосферы наблюдаются волноподобные возмущения, амплитуда которых может существенно увеличиваться при развитии неустойчивости Кельвина — Гельмгольца [54]. Экспериментальное подтверждение этой концепции генерации собственных мод было получено в работе [36]. На магнитопаузе наблюдались поверхностные волны при выполнении условий развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца, а периодические возмущения, зафиксированные на борту

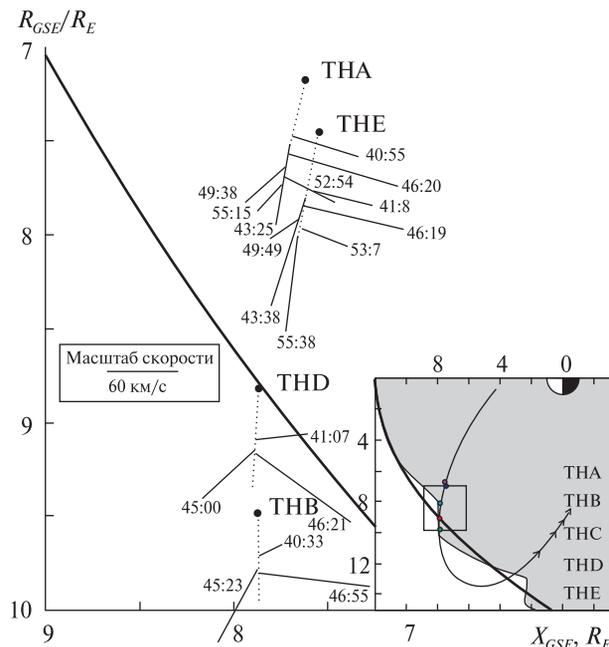


Рис. 3. Нормали к поверхности, определенные при пересечениях системой THEMIS, и реконструкция динамики смещения поверхности магнитопаузы в интервале времени 3:00—6:00 UT 15 мая 2007 г. Приняты обозначения: $R_{GSE} \equiv (Y_{GSE}^2 + Z_{GSE}^2)^{1/2}$, A — амплитуда волны, Φ — фаза волны

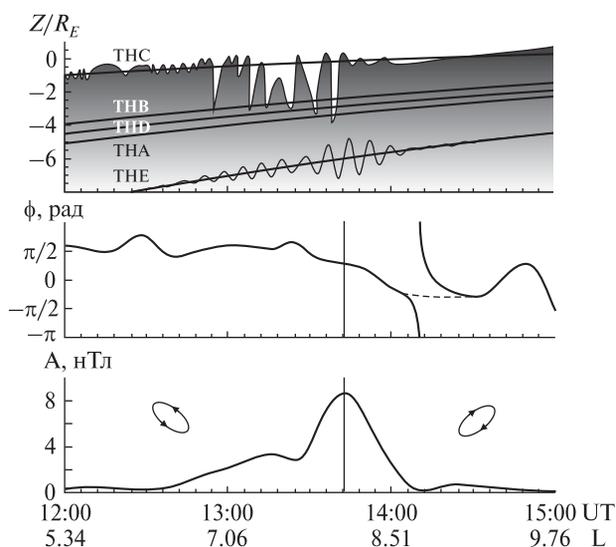


Рис. 4. Схематическая реконструкция возмущения поверхности магнитопаузы, построенная по измерениям четырех космических аппаратов системы THEMIS; приведены траектории движения космических аппаратов, на траектории космического аппарата THEMIS показано возмущение магнитного поля

THEMIS, представляли собой собственные резонансные тороидальные альвеновские моды. Между поверхностными волнами и собственными волнами на силовых линиях внутри магнитосферы наблюдалось полное частотное и фазовое соответствие. Поляризационные свойства волн соответствовали их теоретическим свойствам при расположении источника на магнитопаузе.

Глобальные магнитосферные колебания реализуются в виде стоячей волны, когда быстрые магнитозвуковые волны оказываются запертыми в дневном секторе магнитосферы между магнитопаузой и поверхностью отражения поблизости от плазмопаузы (где наблюдается скачок альвеновской скорости) [66]. Амплитуда возмущения спадает при удалении от магнитопаузы. При этом наблюдается квазипериодическое смещение поверхности магнитопаузы от ее равновесного значения. Спектр таких собственных возмущений дискретный. Возможно, именно эти возмущения связаны с дискретным набором частот, выделяемым на статистическом материале наблюдений динамики магнитного поля на поверхности Земли — так называемые CMS-частоты: 1.3, 1.9, 2.3, 2.6, ... мГц [25], которые соответствуют гармоникам запертой магнитозвуковой волны. Изменения параметров солнечного ветра служат постоянным источником таких возмущений. Резонатор в дневной магнитосфере является полуоткрытым, поэтому колебания быстро затухают за счет ухода части энергии в виде волноводных мод во фланги магнитосферы, связывания и раскачивания резонансных (в основном полоидальных) колебаний на силовых линиях магнитного поля (field line resonance) [36, 82] и за счет ухода части энергии через поверхность магнитопаузы в магнитослой.

Волноводные моды на флангах магнитосферы наблюдаются в виде перезамедленных быстрых магнитозвуковых волн (фазовая скорость может быть меньше альвеновской в несколько раз), которые распространяются поперек магнитного поля. Поскольку наибольшая амплитуда обычно отвечает первой гармонике запертых БМЗ-волн в дневной магнитосфере, обычно волноводные моды наблюдаются в частотном диапазоне 1—1.5 мГц и могут эффективно раскачивать резо-

нансные тороидальные и полоидальные моды на силовых линиях магнитного поля.

Генерация внезапными импульсами солнечного ветра [2]. Дисперсионное уравнение в модели, представляющей собой неоднородную плазменную среду, помещенную в магнитное поле с прямыми силовыми линиями и двумя идеально проводящими ионосферами, в случае распространении быстрой магнитозвуковой волны поперек магнитного поля содержит логарифмическую сингулярность при совпадении периода волны с периодом собственной альвеновской моды, распространяющейся вдоль локальной силовой линии. Эта сингулярность интерпретируется как генерация стоячей альвеновской волны на резонансной силовой линии. Воздействие структурных неоднородностей солнечного ветра на магнитопаузу приводит к генерации импульсных быстрых магнитозвуковых возмущений, распространяющихся внутрь магнитосферы. Для того чтобы на магнитопаузе формировался магнитозвуковой импульс (широкополосный), характерный временной масштаб изменений параметров солнечного ветра должен быть меньше времени распространения сигнала в границах магнитосферы (порядка 10 мин). Такой временной масштаб характерен для быстрых ударных волн в солнечном ветре, при наблюдении которых динамическое давление солнечного ветра может измениться на порядок и более за десятки секунд [35]. Скорость распространения импульса в магнитосфере примерно равна альвеновской скорости. Поэтому волна внутри магнитосферы опережает ударную волну в солнечном ветре, в отличие от переходного слоя, где возмущение отстает от ударной волны. Направление распространения в магнитосфере зависит от угла падения ударной волны на магнитопаузу. В плоскости геомагнитного экватора нормали к поверхности фронта возмущения в магнитосфере и в солнечном ветре при небольших углах падения ударной волны совпадают. Фронт распространения возмущения в магнитосфере в меридиональном сечении представляет собой сложную трехмерную поверхность, поскольку альвеновская скорость зависит от геомагнитной широты и расстояния от Земли.

Быстрые магнитозвуковые возмущения при распространении генерируют собственные колебательные моды магнитосферы. Генерация собственных колебаний импульсным магнитозвуковым возмущением подтверждает то, что волны УНЧ-диапазона в магнитосфере являются собственными колебаниями. После прохождения фронта возмущения в магнитосфере одновременно наблюдаются колебания с различными частотами в зависимости от локального периода собственных колебаний. Пространственный масштаб «силовой трубки» — области, в которой колебания проходят с одинаковой частотой, для внутренней магнитосферы в экваториальной области составляет 5000—7000 км. Отметим, что переход между периодами колебаний осуществляется дискретно. Внутри магнитосферы направление распространения фронта магнитозвуковой волны в экваториальной плоскости примерно совпадает с направлением скорости фронта ударной волны в солнечном ветре. Неоднородность магнитного поля и концентрации плазмы приводит к концентрации энергии БМЗ-волн в окрестности экватора.

Поляризация генерируемых волн зависит от направления распространения фронта быстрого магнитозвукового возмущения и от направления возмущения магнитного поля в нем. В зависимости от угла падения на силовую линию возбуждаются либо альвеновские тороидальные колебания, либо колебания, представляющие собой гибрид альвеновской волны с медленной магнитозвуковой составляющей — полоидальные моды с частотами ниже 10 мГц. Волновые возмущения магнитного поля регистрируются также и в магнитосопряженных точках на поверхности Земли. Также следует отметить, что после прохождения быстрого магнитозвукового импульса на борту космического аппарата и на поверхности Земли регистрируются периодические возмущения магнитного поля с одинаковыми частотными характеристиками.

Пульсации типа Ps₆ в хвосте магнитосферы. Кроме пульсаций Ps в магнитосфере наблюдается широкий спектр нерегулярных пульсаций P_i — всплесков колебаний с локализованной по времени огибающей. К последним относятся и

пульсации Ps₆, которые наблюдаются на поверхности Земли как положительные всплески D- или Y-составляющих геомагнитного поля. Некоторые из пульсаций непосредственно связаны с бурями и суббурями.

При анализе магнитометрических данных КА «Интербол-1» (хвостовой) за период 1995—2000 гг. были получены основные спектральные и физические особенности низкочастотной волновой активности в хвосте магнитосферы. Возмущение регистрируется в магнитных измерениях, измерениях плазменного давления и в потоках заряженных частиц. Амплитуда возмущения изменяется, модуль возмущенного магнитного поля достигает 15—40 % от невозмущенного уровня. Волновой пакет регистрируется в течение 30—90 мин. Ведущая частота колебаний 0.8—2.5 МГц. Колебания динамического давления плазмы и давления магнитного поля проходят в противофазе. Как показала статистика наблюдений в плазменном слое магнитосферы Земли, именно возмущения такого типа являются характерными возмущениями УНЧ-диапазона. Характерные частоты волновых процессов в далеком магнитосферном хвосте меньше, чем во внутренней магнитосфере. Волна заполнения имеет альвеновский тип с магнитозвуковой составляющей. С помощью координированных наблюдений магнитного поля в плазменном слое на борту КА и в магнитосопряженных точках на поверхности Земли с помощью системы магнитометрических станций были сделаны оценки размеров и скорости движения этих структур. Поперечные относительно магнитного поля размеры составляют (3...6) R_E . Активная область вытянута вдоль геомагнитной широты. Скорость движения поперек магнитного поля на расстоянии (15...20) R_E в хвосте магнитосферы составляет 6—12 км/с. Скорость, судя по наземным наблюдениям, не является постоянной, а уменьшается при приближении к Земле до 2—4 км/с.

Наблюдения Ps₆-возмущений в фазе восстановления геомагнитной суббури, через несколько часов после минимума D_{st} -индекса, возможно, связано только с тем, что наземными магнитометрами регистрируются волновые возмущения,

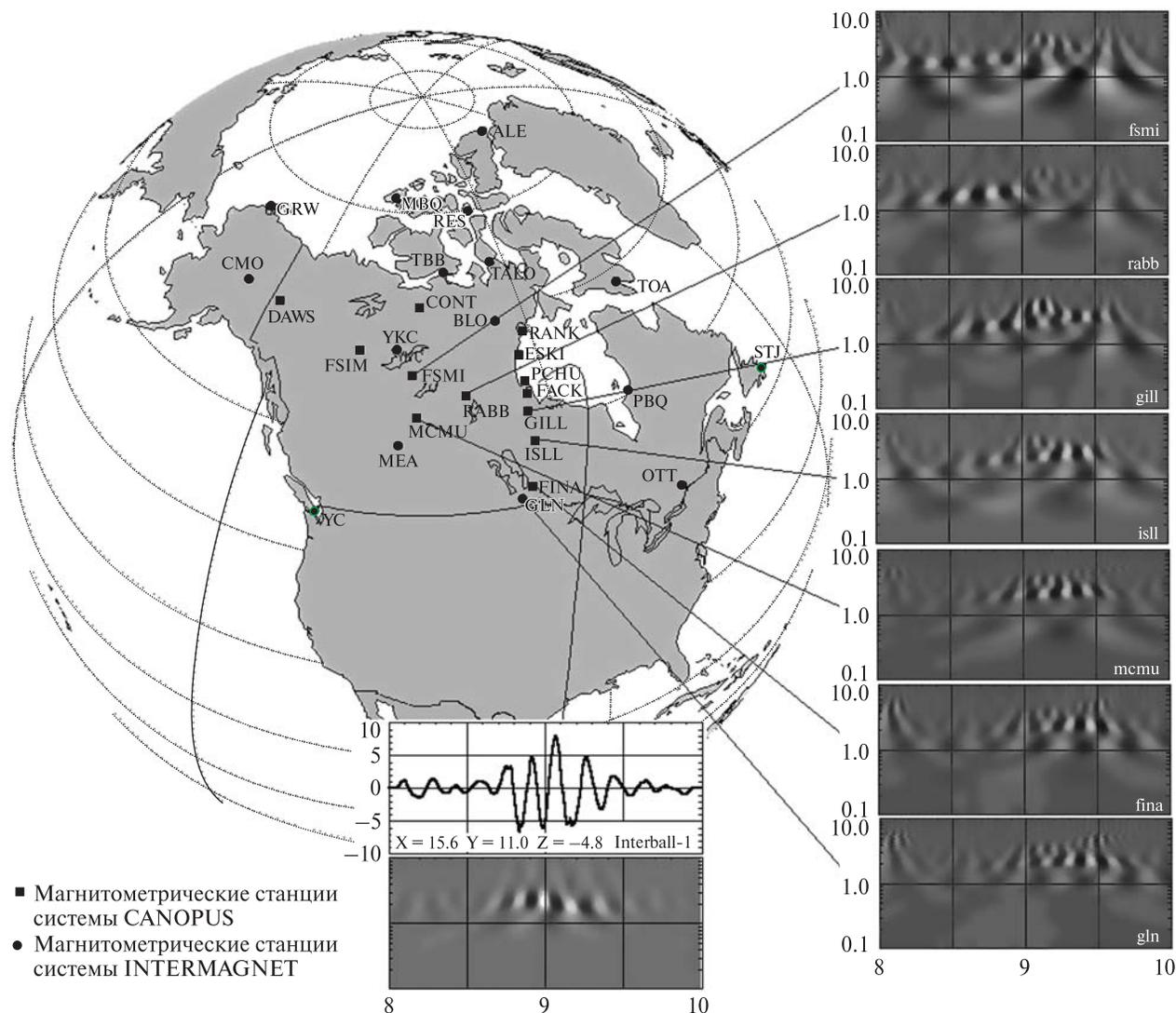


Рис. 5. Распространение волнового пакета Ps6 по наблюдениям наземных магнитометрических станций «Канопус» и на борту КА «Интербол-1». Показаны вейвлет-спектры модуля магнитного поля

переместившиеся из хвоста магнитосферы [24]. Об этом косвенно свидетельствует время и пространственные координаты точки наблюдения волнового пакета (рис. 5). Время регистрации пропорционально удалению сектора регистрации от точки максимального возмущения геомагнитного поля во время суббури. Возможно, при протекании взрывной фазы суббури часть энергии сбрасывается в виде волнового пакета типа Ps6, который перемещается к Земле, сохраняя свои характеристики. Параметры частотно-

временных характеристик волновой структуры отвечают параметрам для магнитозвуковых солитонов огибающей в плазменном слое.

2. МНОГОПОЗИЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА МГД-ВОЛН В РАМКАХ СПУТНИКОВОГО ПРОЕКТА РЕЗОНАНС

Наземно-космический МГД-интерферометр. В рамках проекта РЕЗОНАНС открываются новые возможности исследования механизмов возбуждения и распространения МГД-волн в геокос-

мосе. Для диагностики состояния МР и идентификации источников их возбуждения могут продуктивно применяться поляриметрические и интерферометрические подходы, успешно развиваемые в Радиоастрономическом институте НАН Украины. С их помощью исследовались геомагнитные пульсации у поверхности Земли, а также в верхней ионосфере. Параметры МГД-волн использовались также для диагностики состояния околоземного космического пространства.

Одновременные спутниковые и наземные измерения позволят также провести оригинальные исследования в магнитосфере УНЧ-СНЧ-полей, прошедших через ионосферные резонансные системы — шумановский (ШР) и ионосферный альвовенский (ИАР) резонаторы.

Однопозиционные измерения параметров МГД-волн. Квазигармонические вариации магнитного поля Земли, характеризующиеся периодами от нескольких секунд до десятков минут (микрорезонансы геомагнитного поля) переносятся в околоземной плазме магнитогидродинамическими (МГД) волнами, частоты которых удовлетворяют условию $\omega < \Omega_i$, где Ω_i — гирочастота ионов. Такие МГД-колебания играют важную роль в энергообмене между солнечным ветром, гелиосферным магнитным полем, магнитосферой и ионосферой. Измерения их характеристик могут быть использованы для диагностики состояния околоземной плазменной оболочки. На поверхности Земли пульсации регистрируются в виде ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний.

Ниже рассмотрим особенности поведения суточного хода параметров поляризации геомагнитных пульсаций классов Pc3 и Pc4 (периоды 10—45 и 45—150 с соответственно). Систематические долговременные наземные наблюдения вариаций геомагнитного поля в диапазоне 1—100 МГц проводились с помощью трехкомпонентного магнитометра, расположенного на магнитной обсерватории АІА Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский» (65°15' S, 64°16' W) [11]. Типичные суточные вариации позиционного угла ϵ эллипса поляризации приведены на рис. 6 (*a* — для летнего времени, *b* — для зимнего). В летнее время суточная

вариация позиционного угла напоминает «арку», в зимнее время эллипс совершает монотонный поворот с востока на запад вслед за движением Солнца по небу (такая суточная вариация была названа авторами «эффектом подсолнуха» [11]).

Физическими причинами суточных вариаций поляризации УНЧ-волн могут быть изменения со временем углового спектра падающих на ионосферу МГД-возмущений и временные вариации проводимостей плазмы в Е-слое (на высотах динамо-области). Как известно, поперечные относительно геомагнитного поля проводимости нижней ионосферы (педерсеновская и холловская) определяют условия отражения МГД-колебаний на границе с нейтральной атмосферой и их трансформации в электромагнитное поле [9, 16, 80]. В рамках теоретической модели, изложенной в работе [9], методом численного моделирования были исследованы «временные» механизмы формирования суточных изменений поляризационных характеристик резонансных УНЧ-полей. Характерные экспериментальные и рассчитанные суточные зависимости позиционных углов эллипса поляризации микропульсий геомагнитного поля приведены на рис. 6.

Проводимости плазмы Е-области, используемые в расчете, рассчитывались по синхронным данным вертикального зондирования ионосферы на УАС. Для каждого часового интервала в дни измерений из ионограмм определялись электронная концентрация N_0 в максимуме Е-области и высота максимума h_m . Форма высотного профиля N_e для удобства расчетов аппроксимировалась «чепменовской» функцией

$$N_e(h) = N_0 \exp \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{h-h_m}{D} - \exp \left(-\frac{h-h_m}{D} \right) \right) \right], \quad (7)$$

где D — высота приведенной атмосферы (в расчетах принималась равной 8 км). Для построения профилей удельных педерсеновской и холловской проводимостей

$$\sigma_p = e^2 N_e(z) \left[\frac{v_e}{m(\Omega_e^2 + v_e^2)} + \frac{v_{in}}{M(\Omega_i^2 + v_i^2)} \right], \quad (8)$$

$$\sigma_H = e^2 N_e(z) \left[\frac{\Omega_e}{m(\Omega_e^2 + v_e^2)} - \frac{\Omega_i}{M(\Omega_i^2 + v_{in}^2)} \right],$$

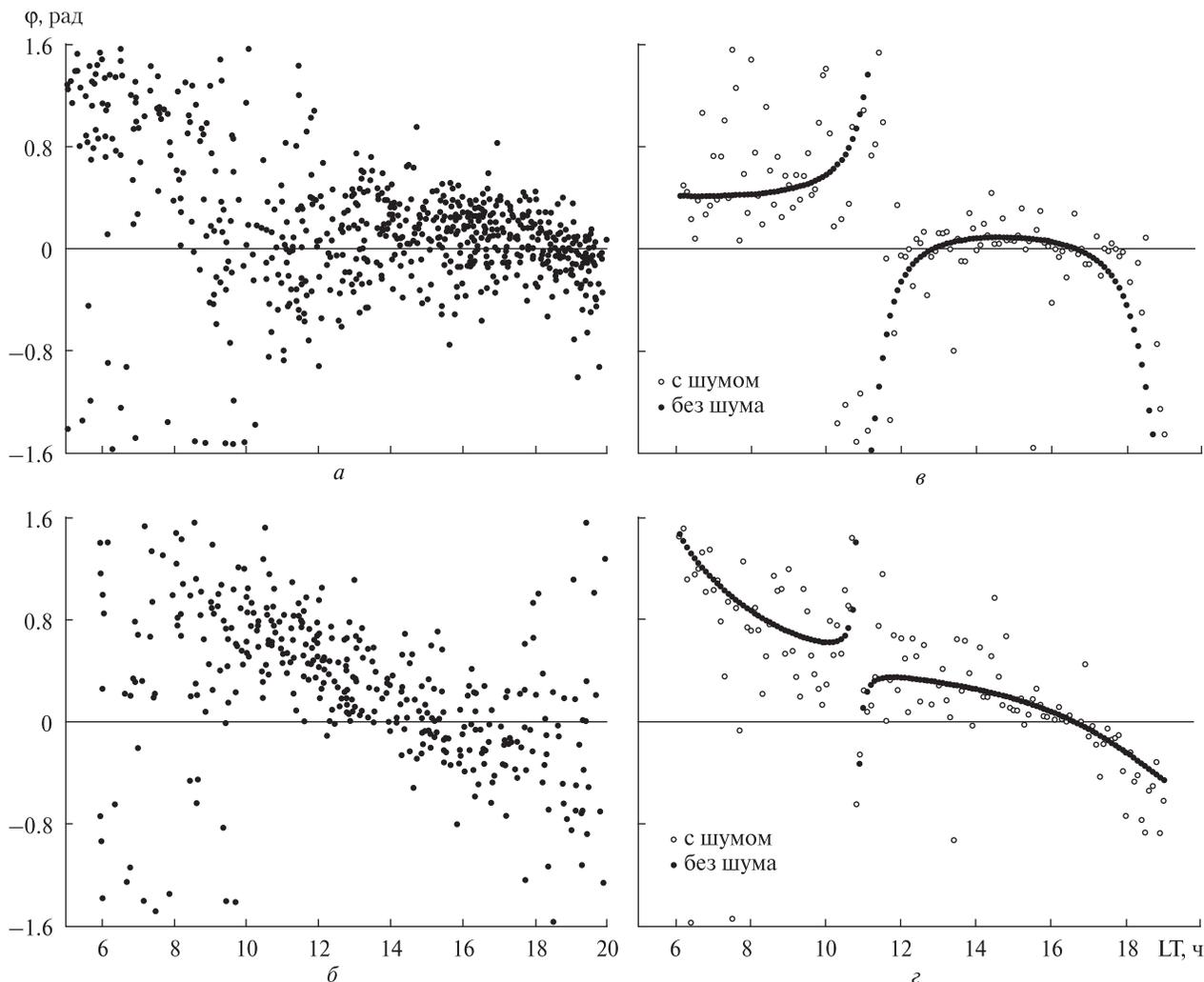


Рис. 6. Вариации позиционного угла φ эллипса поляризации пульсаций Pc4: a, b — наблюдения на станции «Академик Вернадский» в декабре 2002 г. (летом) и в июне 2002 г. (зимой), ϑ — модельные вариации при постоянном пространственном спектре волн в F-области ионосферы без учета суточных вариаций волнового вектора магнитозвуковой моды, z — модельные вариации при постоянном пространственном спектре альвеновской волны и переменных границах азимутального угла магнитозвуковых волн в F-области ионосферы с учетом суточных вариаций волнового вектора магнитозвуковой моды ($A_f/A_a = 1/2$)

кроме $N_e(h)$ использовались справочные данные об ионном составе ионосферной плазмы и частотах соударений [7]. Проинтегрированные по высоте значения проводимостей $\Sigma_{P,H} = \int \sigma_{P,H} dz$ усреднялись в каждом часовом интервале за десятидневный цикл измерений. В полученные кривые методом наименьших квадратов были вписаны параболы, которые использовались для моделирования суточного хода $\Sigma_{P,H}$.

При расчете пространственной структуры УНЧ-поля в точке наблюдения предполагалось, что пучок МГД-волн, падающих на анизотропную поверхность $z = 0$ из магнитосферы, состоит из двух дискретных мод — альвеновской и магнитозвуковой:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_\perp, z = 0) = \mathbf{e}_\xi A_a \exp(ik_A \zeta + iq_1 \xi + ip_1 \eta) + \mathbf{e}_\eta A_f \exp(i\sqrt{k_A^2 - p_2^2 - q_2^2} \zeta + iq_2 \xi + ip_2 \eta). \quad (9)$$

Цель моделирования состояла в нахождении такой комбинации соотношения амплитуд A_a и A_f и поперечных волновых векторов $p_{1,2}$; $q_{1,2}$, при котором качественно воспроизводится наблюдаемый суточный ход поляризационных характеристик поля пульсаций.

Прежде всего было установлено, что для наблюдаемой поляризационной структуры поля существенно наличие в ионосфере обеих МГД-мод: согласование расчета с экспериментом достигается при $A_f / A_a \approx 1$. В отношении направления прихода волн рассматривались две модельные ситуации:

1. поперечные компоненты p , q волновых векторов обеих мод постоянны;
2. направление прихода магнитозвуковой волны изменяется в соответствии с движением подсолнечной точки магнитопаузы, а волновой вектор альвеновской волны постоянен в течение дня.

Результаты расчета представлены на рис. 6, а, б. В первой ситуации суточный ход позиционного угла эллипса поляризации обусловлен только вариациями ионосферных проводимостей. Удовлетворительное согласие с экспериментом (суточный ход типа «арки») получается в том случае, когда альвеновская волна направлена вдоль \mathbf{V}_0 , а угол падения на ионосферу магнитозвуковой волны на $10...20^\circ$ превышает угол наклона геомагнитного поля. Перпендикулярные к плоскости магнитного меридиана («азимутальные») компоненты обоих волновых векторов p близки к нулю. Кроме регулярных параметров модель включала равномерно распределенную случайную «шумовую» добавку к проводимостям $\Sigma_{p,n}$ и нормально распределенную добавку к амплитудам магнитного поля на поверхности Земли.

Эффект «подсолнуха» в суточном ходе позиционного угла удалось объяснить в предположении о том, что поперечные компоненты волнового вектора падающей из магнитосферы магнитозвуковой моды МГД-волны изменяются вслед за изменением положения подсолнечной точки, тогда как волновой вектор альвеновской волны остается неизменным в течение дня. Такое предположение вполне оправданно, поскольку магнитозвуковая волна переносит энергию

в произвольном к внешнему магнитному полю направлении, а групповая скорость альвеновской волны всегда направлена вдоль внешнего поля. Таким образом, вглубь магнитосферы на низкие L-оболочки энергия проникает в основном за счет распространения магнитозвуковой моды. Эффективный источник магнитозвуковой волны для наземного наблюдателя может перемещаться вслед за подсолнечной точкой по магнитопаузе, а источник альвеновской волны должен располагаться недалеко от точки, сопряженной с точкой наблюдения, где возбуждается эта волна при отражении магнитозвуковой моды. Следовательно, положение эффективного источника альвеновской волны в течение суток изменяется незначительно, поперечные компоненты волнового вектора остаются существенно меньше продольной, и в первом приближении их можно считать постоянными.

Удовлетворительный суточный ход параметров поляризации был получен для углов падения магнитозвуковой волны φ_0 на ионосферу, изменяющихся в пределах $\varphi_0 = \pm 25^\circ$. Так же, как и в предыдущем случае, в ионосферные проводимости и амплитуды магнитного поля на Земле были добавлены случайные компоненты. Полученный модельный суточный ход (рис. 6, б) весьма напоминает «эффект подсолнуха», часто наблюдавшийся в эксперименте (рис. 6, а).

Применение описанной методики обработки УНЧ-колебаний к спутниковым измерениям в рамках проекта РЕЗОНАНС позволит оценить пространственный спектр и поляризацию падающих из магнитосферы МГД-волн. Используя эту информацию совместно с данными о поляризации пульсаций на поверхности Земли, в рамках модели, изложенной в работах [9, 80, 81], можно будет восстанавливать ионосферные проводимости и отслеживать источники возбуждения МР.

Ранее подобная задача ставилась в 2005 г., во время специальной кампании с нагревным стендом (НС) «Сура» (Россия). Искусственная ионосферная турбулентность (ИИТ) создаваемая излучением НС в верхней ионосфере играла роль своеобразного «маркера», отслеживающего перемещение плазмы в скрещенных элект-

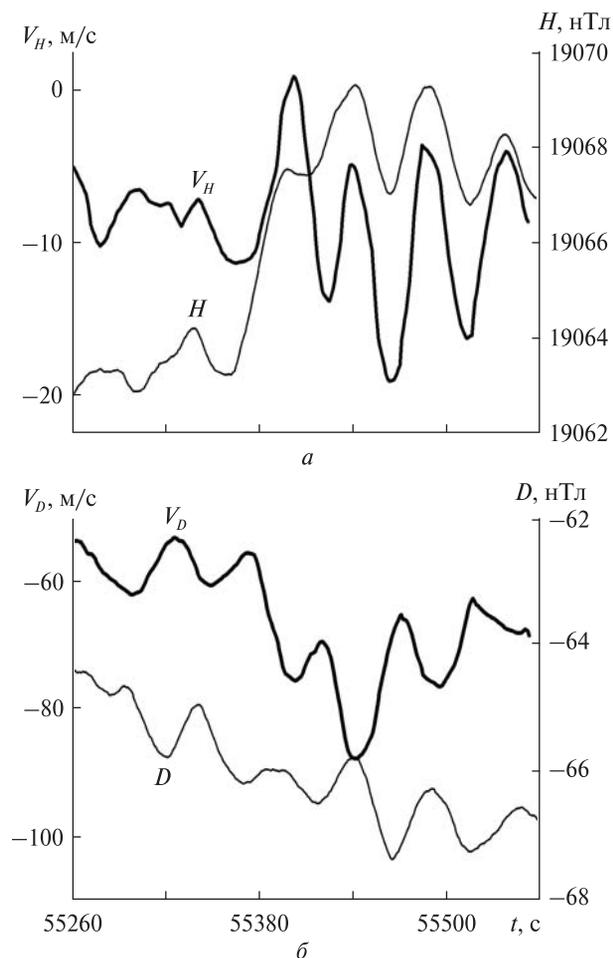


Рис. 7. Вариации H - и D -составляющих магнитного поля на РАО и вариаций скорости дрейфа неоднородностей ИИТ над НС «Сура» 22.08.2010 г. в 15:21 — 15:26 UT

рическом и магнитном полях МГД-природы. На РАО им. Брауде под Харьковом регистрировались ВЧ-сигналы станции РВМ (Москва, Россия) и широкопередаточного передатчика (Самара), ракурсно рассеянные плазменными неоднородностями области ИИТ, созданной мощным излучением нагревного стенда «Сура». Геометрия эксперимента создавала близкий к прямоугольному базис векторов рассеяния сигналов, который позволял измерять поляризацию МГД-волны в верхней ионосфере по квазипериодическим вариациям проекций скоростей дрейфа плазмы. На рис. 7 приведены вариации скоростей дрейфа плазмы и магнитного поля у

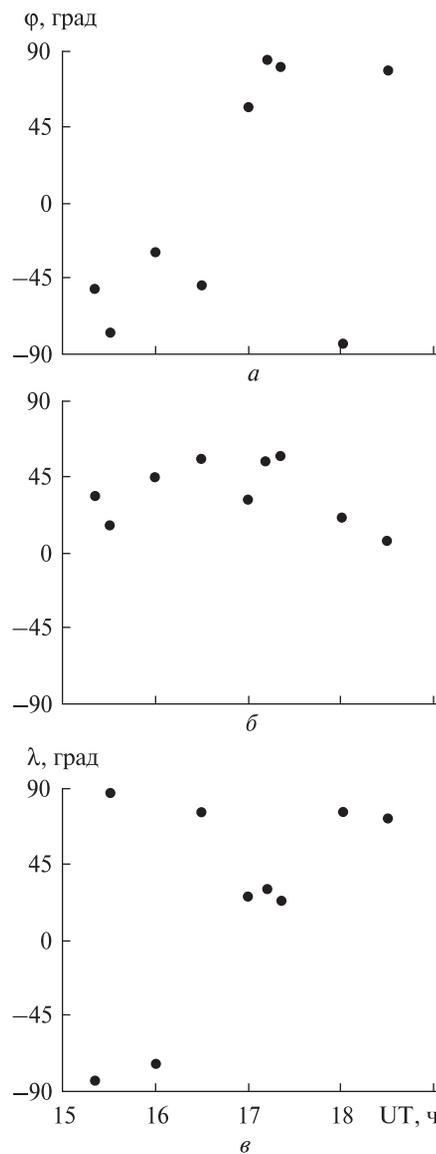


Рис. 8. Значение позиционного угла ϕ пульсаций скорости дрейфа плазмы в F-области ионосферы над НС «Сура» (а), позиционного угла пульсаций магнитного поля на поверхности Земли (б) и поворот плоскости поляризации α при переходе от пульсаций в скоростях дрейфа плазмы к пульсациям в магнитном поле на поверхности Земли (в)

поверхности Земли в H -составляющей, ориентированной на север вдоль магнитного меридиана, и в D -составляющей, ориентированной перпендикулярно к магнитному меридиану на восток. Как видно, вариации хорошо коррели-

лированы, что дает основание предполагать их принадлежность к одному процессу. На рис. 8, *a* приведен угол ε ориентации эллипса поляризации в скоростях дрейфа плазмы над отражающей поверхностью, на рис. 8, *б* — в магнитном поле на поверхности Земли. На рис. 8, *в* показан поворот эллипса поляризации в зависимости от скоростей дрейфа плазмы в F-области ионосферы к вариациям в приземном магнитном поле. На рис. 8 представлены результаты только для тех пульсаций, модуль коэффициента эллиптичности которых, как в скоростях дрейфа, так и в магнитном поле не превышал 0.4.

Отметим, что в верхней ионосфере вектор скорости дрейфа плазмы перпендикулярен к вектору магнитного поля МГД-волны. Поэтому угол поворота на 90° (рис. 8, *б*) означает отсутствие изменения ориентации поляризации в магнитном поле.

На поверхности Земли наблюдаются магнитные поля, вызванные вариациями горизонтальных токов в E-области ионосферы, которые, в свою очередь, стимулированы МГД-колебаниями. При этом возникает поворот плоскости поляризации, определяемый соотношением холловской и педерсеновской интегральных ионосферных проводимостей. В случае малости холловской проводимости поворот поляризации МГД-волны происходить не должен. В соответствии с этим угол поворота плоскости поляризации от вариаций дрейфа плазмы к вариациям магнитного поля на поверхности Земли должен быть равен 90° . В случае, если педерсеновская проводимость много меньше холловской, угол между плоскостями поляризации вариаций скорости дрейфа плазмы и магнитного поля на поверхности Земли должен быть близок к нулю.

В эксперименте, как правило, угол поворота плоскости поляризации магнитного поля на поверхности Земли к ориентации дрейфа в верхней ионосфере близок к 90° , что говорит о несущественном повороте плоскости поляризации вариаций магнитного поля. Это означает, что интегральная холловская проводимость во время измерений была малой по сравнению с интегральной педерсеновской проводимостью.

В рамках проекта РЕЗОНАНС подобные прямые измерения можно реализовывать регулярно, проводя сравнение ориентации плоскостей поляризации МГД-волн в магнитосфере по данным спутниковых измерений с поляризацией пульсаций по данным согласованных магнитометрических наблюдений на поверхности Земли. Таким образом, дополнение наземных поляризационных измерений спутниковыми данными даст возможность восстанавливать значения интегральных проводимостей ионосферы в рамках модели, изложенной в работах [9, 80, 81].

Многопозиционные измерения параметров МГД-волн. Двух- и многопозиционные измерения параметров МГД-волн дают возможность исследовать пространственное распределение полей, в ряде случаев оценить направление распространения волны или ее интерференционную структуру при формировании резонансных условий. Ранее в РИ НАНУ проводились измерения параметров пульсаций у поверхности Земли в магнитосопряженных областях [81]. В этом разделе покажем, что корреляционный анализ пульсаций в несопряженных точках также не лишен смысла и может дать информацию о свойствах компрессионной составляющей МГД-колебаний.

Измерения в сопряженных точках. В 1999 г. на обсерватории Массачусетского технологического института Милстоун Хилл (Новая Англия, США, географические координаты 42.6° N , 71.48° W ; геомагнитные (CGM): 52.92° N , 6.87° E), расположенном вблизи магнитосопряженной к УАС-области, были установлены чувствительные магнитометры, позволившие проводить синхронные измерения параметров пульсаций [81].

Предварительный анализ магнитосопряженных данных показал, что, как правило, уровень корреляции пульсаций в обоих пунктах был чрезвычайно высоким. На рис. 9 представлен типичный пример проявления резонансных пульсаций на фоне регулярного суточного изменения магнитного поля в Антарктиде и Новой Англии.

Принадлежность пульсаций в обоих пунктах к одному процессу определялась следующим образом. Сначала отбирались одновременные

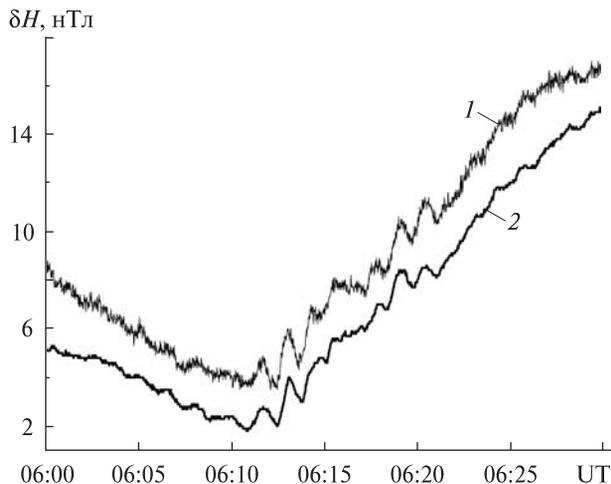


Рис. 9. Синхронные регистрации геомагнитных микропульсаций Pc4, зарегистрированных 6 сентября 1999 г., в сопряженных регионах: 1 — Милстоун Хилл, 2 — «Академик Вернадский»

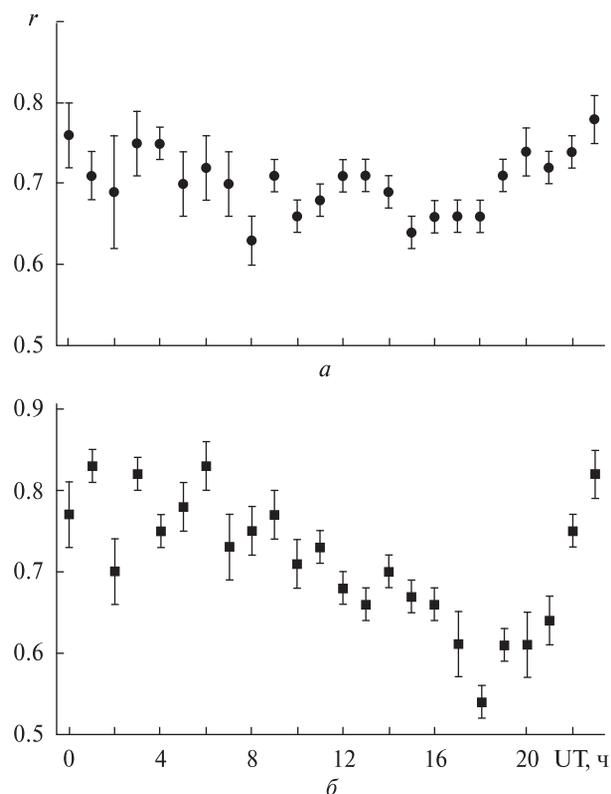


Рис. 10. Суточная вариация экстремума коэффициента корреляции r пульсаций в Милстоун Хилл и на станции «Академик Вернадский» в сентябре 1999 г.: *a* — в *H*-компонентах магнитного поля, *б* — в *D*-компонентах

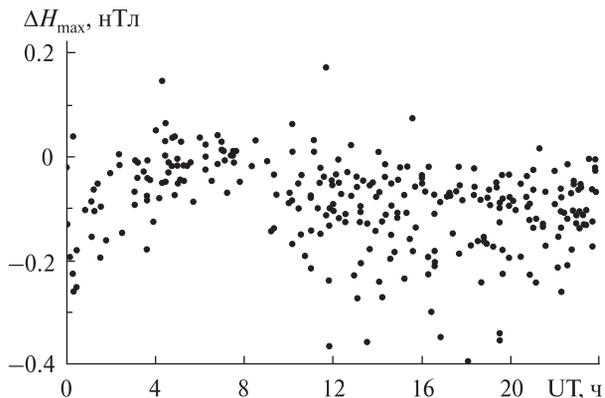


Рис. 11. Разность $\Delta H \equiv H_{\max AIA}$ амплитуд пульсаций *H*-составляющих магнитного поля между станцией УАС и Милстоун Хилл в августе 1999 г.

вариации, частоты которых совпадали в сопряженных регионах. В случае, если максимум взаимной корреляционной функции вариаций по одной из горизонтальных составляющих превышал значение 0.5, считалось, что пульсации связанные. Измерения в сопряженном регионе подтвердили ранее сделанные выводы о поведении поляризации пульсаций в Антарктическом регионе и позволили выявить некоторую асимметрию параметров пульсаций между пунктами.

Максимумы амплитудных спектров пульсаций в сопряженных регионах неодинаковы, и их отличие варьирует в течение суток (рис. 10). Изменяется в течение суток и модуль коэффициента корреляции между пульсациями в *H*- и *D*-компонентах (рис. 11). Остановимся подробнее на сезонных изменениях разности фаз пульсаций в сопряженных регионах. На рис. 12 приведены вариации временного сдвига пульсаций в *H*-компонентах в сентябре и декабре 2000 г. (положительный сдвиг соответствует опережающим вариациям в Антарктике).

В сентябре в предутренние часы наблюдается опережение вариаций в Милстоун Хилл, в остальное время вариации в Антарктике наблюдаются несколько ранее. В декабре лишь в околополуденное время (около 16 UT) лидируют вариации в Антарктике, в остальное время суток «впереди» пульсации в Милстоун Хилл. Заметим, что в июле практически в течение всех

суток пульсации на УАС опережают пульсации в Милстоун Хилл.

Весьма вероятно, все перечисленные эффекты связаны с отличиями коэффициентов отражения МГД-волн в сопряженных ионосферах. Коэффициент отражения МГД-волн определяется отношением поперечных проводимостей ионосферы к волновой проводимости вдоль силовых линий геомагнитного поля $\Sigma_w = c^2 / 4\pi V_A$, равной приблизительно 1 Ом^{-1} . Как правило, в средних широтах ночью поперечные ионосферные проводимости имеют характерную величину порядка 0.1 Ом^{-1} , днем — 10 Ом^{-1} . В июле поперечные проводимости в Милстоун Хилл (лето) всегда выше, чем в Антарктике (зима). В сентябре ситуация похожая, за исключением того, что в утренние часы ионосфера в Антарктике раньше освещается Солнцем, что, вероятно, и приводит к относительно более высоким проводимостям здесь в утренние часы. В декабре же Солнце в ионосфере над станцией «Академик Вернадский» не заходит, что, естественно, приводит к достаточно высоким проводимостям в течение всех суток. И лишь около полудня ($\approx 16 \text{ UT}$) величины проводимостей в Милстоун Хилл существенно возрастают, что приводит почти к синхронным вариациям.

Как правило, в том из магнитосопреженных пунктов, где ионосферные проводимости выше, пульсации несколько запаздывают относительно пункта с меньшими проводимостями. Обусловлена такая задержка, видимо, формой интерференционной картины вблизи отражающей поверхности (Е-слоя ионосферы), где формируется интерференционный минимум в электрических компонентах альвеновской волны, тем более глубокий, чем больше значения ионосферных проводимостей. А чем глубже минимум, тем больше изменяется фаза колебания вблизи ионосферы относительно фазы в магнитосфере.

Многопозиционные синхронные спутниковые измерения дадут информацию о пространственно-временной структуре МГД-полей в магнитосфере, что позволит строго решать задачу относительно добротности резонатора и значений интегральных ионосферных проводимостей.

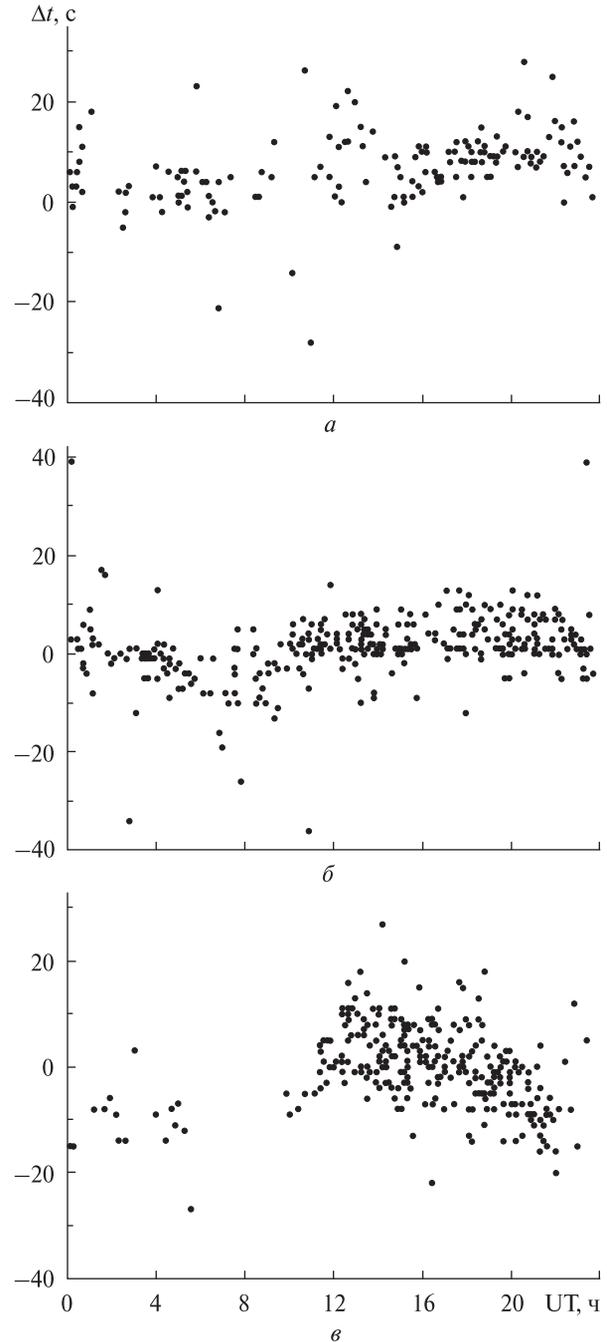


Рис. 12. Временные сдвиги Δt между пульсациями УАС — Милстоун Хилл: а — в июле 1999 г., б, в — в сентябре и декабре 2000 г.

Измерения в несопряженных точках. Наряду с исследованием природы пульсаций в магнитосопреженных регионах, интерес представляет

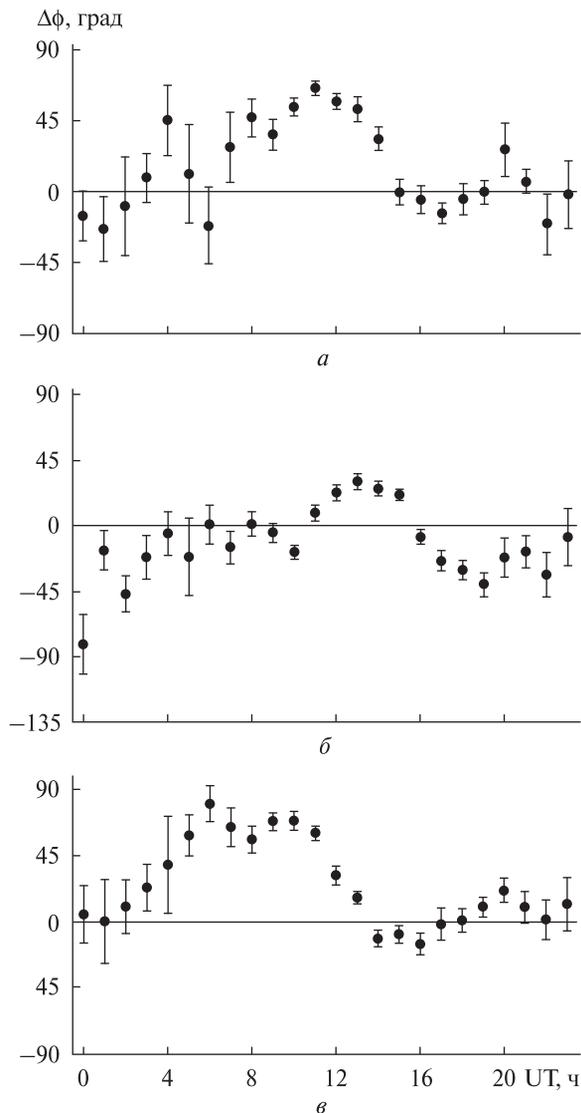


Рис. 13. Суточные вариации разности $\Delta\phi$ позиционных углов эллипсов поляризации пульсаций, измеренных в несопряженных точках на УАС и НЧО в 2010 г.: *a* — март, *б* — июнь, *в* — декабрь

сравнительный анализ параметров пульсаций, одновременно регистрируемых в несопряженных пунктах. В случае сопряженных пульсаций высокая степень их корреляции обусловлена формирующим действием магнитосферного альвеновского резонатора, определяющего общий период колебаний на сопряженных концах магнитной силовой трубки. В случае синхронного наблюдения пульсаций в несопряженных

регионах, корреляции резонансных альвеновских колебаний быть не должно. Весьма вероятно, хорошая корреляция может наблюдаться только у пульсаций, сформированных при участии магнитозвуковой моды, изотропно распространяющейся в космической плазме. Поэтому синхронные наблюдения скоррелированных пульсаций в несопряженных регионах позволяют выявить и провести анализ эффектов, связанных преимущественно с компрессионными модами МГД-волн.

Измерения, о которых пойдет речь, синхронно проводились на обсерватории «Argentine Islands Archipelago» (AIA), расположенной на УАС (параметр Мак-Илвейна равен 2.4), и на низкочастотной обсерватории (НЧО) РИ НАНУ, расположенной в пос. Мартовская (Харьковская область, координаты $49^{\circ}56' N$, $36^{\circ}57' E$, параметр Мак-Илвейна равен 1.9).

На рис. 13 приведены вариации взаимной ориентации эллипсов поляризации пульсаций, одновременно наблюдававшихся на УАС и НЧО в марте, июне и декабре 2010 г. Здесь из значения позиционного угла ϕ эллипса на УАС (измеренного относительно направления на север) вычиталось значение позиционного угла эллипса поляризации пульсации, зарегистрированной на НЧО (измеренного относительно направления на юг). Получено, что в мартовское и сентябрьское равноденствия суточные вариации поляризации несопряженных скоррелированных пульсаций практически повторяются (рис. 13, *a*), тогда как в месяцы солнцестояний они сильно отличаются друг от друга (рис. 13, *б*, *в*). Причина таких существенных отличий, вероятно, кроется в различном положении источника компрессионной моды МГД-волны относительно пунктов измерения в июне и декабре.

В заключение этого раздела отметим, что измерения разностно-фазовых и поляризационных характеристик МГД-волн во время нахождения спутников на сильно разнесенных L-оболочках дадут возможность анализировать преимущественно магнитозвуковую (компрессионную) компоненту МГД-волн.

Измерения интерференционной структуры МГД-поля выше отражающего слоя. С начала

1980-х гг. в РИ НАНУ в течение длительного времени проводились радарные измерения МГД-колебаний в верхней ионосфере с помощью пробных сигналов, ракурсно рассеянных на искусственных ионосферных неоднородностях, стимулированных мощной волной НС «Сура» [5, 94]. Так, на рис. 14 приведена схема измерений вариации доплеровского смещения частоты (ДСЧ) сигналов станции РВМ, принятых ориентированными в направлении возмущенной области пространственно разнесенными антенными лучами радиотелескопа УТР-2 [4, 81].

Корреляционный анализ вариаций ДСЧ в разных каналах показал, что они между собой существенно (порядка 1 с) сдвинуты во времени. Такой временной сдвиг не мог быть объяснен в приближении одной распространяющейся с альвеновской скоростью МГД-волны. Интерпретация фазовой задержке была дана в предположении о наличии в верхней ионосфере интерференции падающей сверху и отраженной снизу МГД-волн. Радарные измерения выше отражающего слоя позволили восстановить форму интерференционной картины, и далее сделать оценки коэффициентов отражения МГД-волны от ионосферы и интегральных проводимостей нижней ионосферы, определяющих эти коэффициенты [4, 81].

В рамках проекта РЕЗОНАНС будут проводиться регулярные измерения амплитуд и фаз МГД-колебаний вдоль одной силовой трубки двумя парами спутников, что даст возможность оценивать параметры интерференционной картины, а значит, добротность резонатора, коэффициенты отражения волн в ионосфере и значения интегральных поперечных магнитному полю проводимостей ионосферной плазмы.

Исследования в магнитосфере МГД-колебаний, возбуждаемых приземными и ионосферными источниками. Весьма интересным выглядит вопрос о возможности запитки магнитосферных резонаторов снизу. Традиционно считается, что для понимания процессов в верхней ионосфере и магнитосфере Земли достаточно рассматривать прямое солнечно-земное взаимодействие. Однако энергия, запасенная в нижних слоях атмосферы, чрезвычайно велика, и даже ничтож-

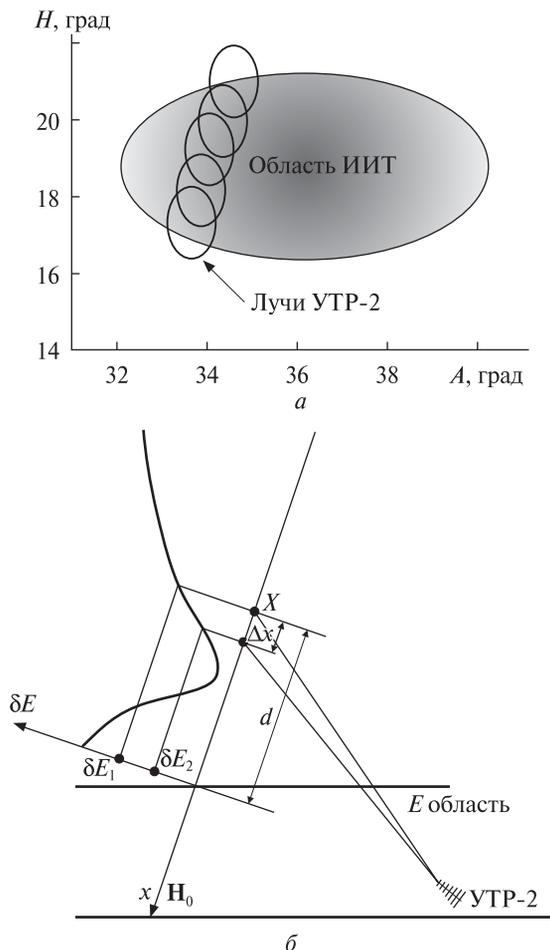


Рис. 14. Схема измерения вариации ДСЧ-сигналов, ракурсно рассеянных искусственными ионосферными неоднородностями, стимулированными НС «Сура»: *а* — взаимное расположение диаграмм направленности лучей радиотелескопа УТР-2 и области искусственной ионосферной турбулентности (*A* — азимут, *H* — угол места), *б* — иллюстрация интерференционной картины в амплитудах электрического поля альвеновской волны в верхней ионосфере при отражении от *E*-области ионосферы

но малая ее часть, переданная в магнитосферу, может существенно изменить картину наблюдаемых в ней явлений. В РИ НАНУ исследование процессов переноса энергии из нижних в верхние слои атмосферы является традиционным направлением. Так впервые было показано, что пространственное распределение плазмы как в нижней, так и верхней ионосфере над Антарктическим полуостровом в большой степени подвержены влиянию со стороны динамики

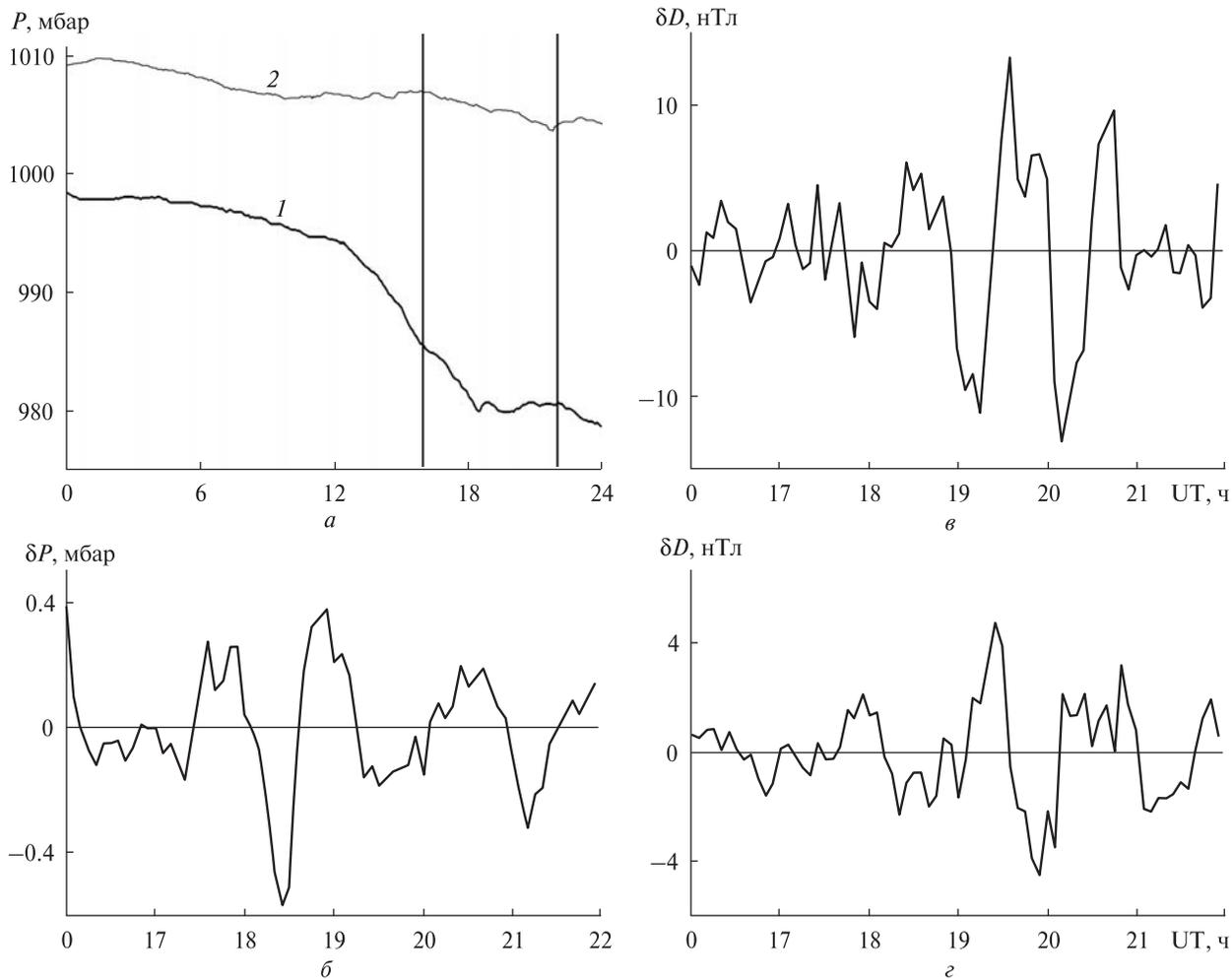


Рис. 15. Вариации приземного давления и составляющих магнитного поля в сопряженных регионах 21 сентября 1999 г.: *a* — давление на УАС и в Милстоун Хилл, *б* — отфильтрованные вариации давления на УАС, *в*, *г* — отфильтрованные вариации *D*-составляющей на УАС и Милстоун Хилл

нейтральной атмосферы [8, 10, 95]. Кроме того, были выявлены эффекты вариаций магнитного поля [23], стимулированных снизу мощными атмосферными фронтами. Также в результате нагревных экспериментов еще в 1980-х гг. были выявлен эффект возбуждения искусственных периодических МГД-импульсов во время изменения режимов работы НС («эхо-рассеяние» [22]), который также планируется детально исследовать в рамках проекта РЕЗОНАНС. Отдельный интерес представляет вопрос о «просачивании» колебаний, сформированных шумановским и ионосферным альвеновским резонатором в магнитосферу.

Циклоническая активность и атмосферные гравитационные волны. В работе [23] была экспериментально показана возможность возбуждения МГД-волн атмосферными гравитационными волнами (АГВ), которые наблюдались как в вариациях магнитного поля в непосредственной близости от крупномасштабной АГВ, так и в магнитосопряженной области. Экспериментальный пример проявления подобного эффекта приведен на рис. 15, 16.

Из анализа 10-летнего массива метеорологических и магнитных данных, полученных на УАС в 1996—2005 гг., видно, что достаточно часто, причем преимущественно зимой, отмечают-

ся квазипериодические вариации приземного давления и горизонтальных составляющих магнитного поля, которые, как правило, несколько отстают во времени (рис. 15). Связано это, вероятнее всего, с распространением внутренних атмосферных гравитационных волн от поверхности Земли на высоты динамо-области ионосферы и возбуждению там квазипериодических электрических токов. Как было показано в работе [23], возможны два механизма трансформации энергии АГВ в вариации электродинамических параметров динамо-области. Первый механизм связан с прямым преобразованием квазипериодических вариаций скорости движения нейтрального компонента, вызванных распространением АГВ, в модуляцию тока за счет разделения зарядов в динамо области. Вторым механизмом может реализоваться через варьирование проводимостей E-области ионосферы при распространении АГВ, что должно привести к модуляции тока, вызванного сторонним электрическим полем. Следует отметить, что последний механизм может эффективно реализовываться в авроральных областях ионосферы, где горизонтальные электрические поля достигают максимальных значений. Поэтому механизмы возбуждения МГД путем трансформации энергии АГВ в динамо области весьма интересно анализировать, используя данные спутниковых измерений.

Генерация МГД-волн мощным ВЧ-излучением нагревных стендов. В 1980-х гг. был обнаружен эффект «эхо-рассеяния», состоящий в периодическом, с периодом резонансных альвеновских пульсаций, усилении интенсивности ионосферной турбулентности после выключения мощного излучения нагревного стенда [22] (см. рис. 17). Эффект вызван генерацией альвеновского импульса в возмущенной области на стадии релаксации ИИТ, его распространением в магнитосопреженную ионосферу, отражением там и возвратом обратно. Возврат МГД-волны в область релаксирующей турбулентности приводит к «подкачке» интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Кроме того, в ряде измерительных сеансов регистрировалось увеличение интенсивности искусственных ио-

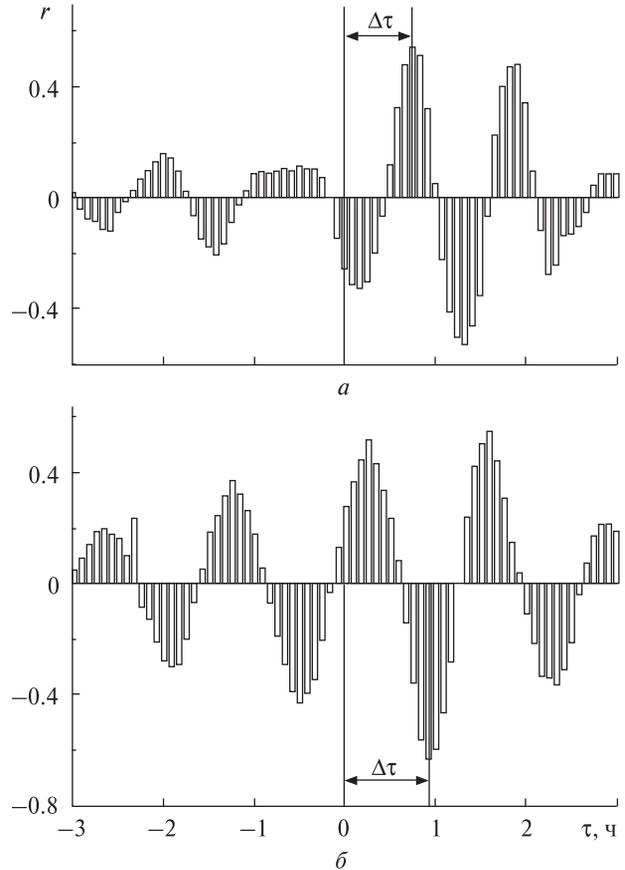


Рис. 16. Взаимные корреляционные функции между вариациями давления и D-составляющей на УАС (а) и Милстоун Хилл (б)

носферных неоднородностей в поле естественной МГД-волны [70], что говорит о нелинейном взаимодействии МГД-полей с мелкомасштабными неоднородностями ионосферной плазмы.

Эффект «эхо-рассеяния» может быть детально исследован в рамках спутникового проекта РЕЗОНАНС. Во время нахождения спутниковой группировки над НС НААРР можно будет исследовать модовый состав искусственно возбуждаемых МГД-волн, измерять скорость и направление их распространения. Кроме того, НС представляет собой детерминированный во времени и пространстве источник возбуждения МГД-волны, что может быть использовано для апробации и калибровки алгоритмов определения параметров МГД-волн по сигналам, измеряемым на спутниках.

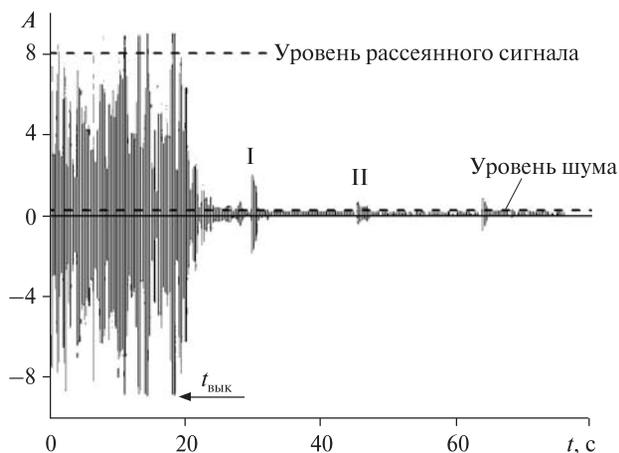


Рис. 17. «Эхо-рассеяние» — периодическое усиление ракурсно-рассеянного сигнала после отключения $t_{\text{вык}}$ излучения нагревного стенда НС «Сура»: I и II — первый и второй эхо-сигналы

Исследование излучения, сформированного шумановским и ионосферным альвеновским резонаторами, в магнитосфере. Сигналы, формируемые шумановским (ШР) и ионосферным альвеновским (ИАР) резонаторами [15] устойчиво регистрируются у поверхности в разных областях земного шара. Как показывают предыдущие спутниковые эксперименты, излучение, сформированное ИАР, регистрируется также в верхней ионосфере на высотах порядка 500 км и более. Открытыми остаются вопросы об источниках возбуждения этого резонатора, а также о том, какие моды МГД-волн дают вклад в резонансные колебания. Ответы на эти вопросы могут быть получены благодаря спутниковым измерениям модового состава, пространственной структуры и направления распространения МГД-волн СНЧ-диапазона в рамках проекта РЕЗОНАНС.

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Некоторые статистические задачи в проекте РЕЗОНАНС. Во внутренней магнитосфере Земли неравновесное состояние плазмы тесно связано с генерацией различных плазменных колебаний, которые активно взаимодействуют с частицами, приводя как к их пространственной диффузии,

так и к диффузии в пространстве скоростей. Таким образом, динамические процессы по сути контролируют время жизни частиц в магнитосфере. При этом динамика частиц в магнитосфере Земли, и радиационных поясах в частности, тесно связана с параметрами солнечного ветра, геомагнитной активностью и включает в себя процессы с различными пространственными и временными масштабами [85, 86, 93].

Исследование динамики энергетических частиц в магнитосфере ведутся с момента открытия радиационных поясов. И несмотря на то, что получено много экспериментальных результатов, уточняющих механизмы появления, транспорта и потерь магнитосферных заряженных высокоэнергетических частиц, ряд вопросов остается открытым.

Статистический анализ измерений параметров плазмы в рамках проекта РЕЗОНАНС позволит ответить на ряд вопросов, которые активно обсуждаются на сегодняшний момент. Среди них можно выделить:

- наличие анизотропии свойств плазмы для описания особенностей генерации хоров. (Поскольку наличие резкого градиента в пространстве скоростей, который необходим для подтверждения модели генерации хоров, предложенной В. Ю. Трахтенгерцем [89], до настоящего времени экспериментально не обнаружено);
- изучение особенностей механизмов нагрева частиц. (Наличие перемежаемости турбулентных процессов [17] на разных временных масштабах может привести к существенному ускорению заряженных частиц. Данный подход особенно важен для анализа процессов в авральной магнитосфере и позволяет рассмотреть мелкомасштабные электродинамические структуры. В ряде работ указывалось, что динамика электростатических структур может определять разогрев и ускорение заряженных частиц, в результате чего образуются области с пониженной концентрацией плазмы [34]);
- радиальная диффузия как из внешней магнитосферы Земли, так и из области ионосферы. (Анализ флуктуаций параметров плазмы на временных масштабах от долей секунд до суток позволит не только определить характерные за-

кономерности турбулентных процессов в исследуемой области, но и определить тип и характер диффузионных процессов [14, 77]).

Для ответа на поставленные вопросы можно использовать измерения нескольких приборов проекта РЕЗОНАНС: ферозондовый магнитометр, который предназначен для измерения трех составляющих квазипостоянного магнитного поля в частотном диапазоне до 16 Гц; прибор РЕПИН, который предназначен для измерения параметров холодной плазмы (одновременное изменение вектора скорости и плотности плазмы существенно упростит интерпретацию полученных результатов); приборы КАМЕРА-Э и КАМЕРА-И, предназначенные для изучения тонкой структуры функции распределения электронов и ионов с высоким временным разрешением вплоть до 0.1 с.

Методы и подходы в анализе турбулентных и диффузионных процессов. Поскольку развитая турбулентность характеризуется большим количеством степеней свободы и нелинейно взаимодействующих мод, многомасштабной структурой и случайными пульсациями скоростей и полей, то для ее описания обычно применяют методы статистической физики и теории вероятности. Для того чтобы описать случайный процесс, необходимо определить функцию распределения вероятности плазменных параметров (PDF-анализ), а также моменты этой функции распределения (ESS-анализ). В рамках первого подхода удается определить наличие или отсутствие перемежаемости (неоднородности) в турбулентных процессах, а в рамках второго — сравнить результаты измерений с известными моделями турбулентных процессов. Кроме того, данные методы позволяют определить тип диффузионных процессов.

PDF-анализ. Для всех типов флуктуаций плазменных параметров во времени зависимость их максимума распределения плотности вероятности P_0 от временного масштаба можно аппроксимировать степенной зависимостью $P_0(\tau) \sim \tau^{-S}$. При этом для классического случайного процесса функция плотности вероятности амплитуд флуктуаций удовлетворяет нормальному (гауссовому) распределению (показатель $S =$

$= 0.5$), а при наличии неоднородности турбулентных процессов $S > 0.5$.

Для турбулентности с перемежаемостью наличие значительных флуктуаций на крыльях распределения возникает благодаря избытку энергии крупномасштабных возмущений, которые генерируются внешним источником или границами течений. Изучение изменения высоты максимума функции плотности вероятности флуктуаций магнитного поля на разных временных масштабах использовалось, например, для определения характера турбулентности в хвосте магнитосферы в период распада поперечного тока и для анализа турбулентных процессов в магнитослое Земли [12, 13].

ESS-анализ. Для конкретизации типа турбулентных процессов проводится анализ особенностей структурных функций (моментов функции плотности вероятности) разных порядков в соответствии с временным интервалом — так называемый поиск расширенного самоподобия (extended self-similarity). При этом структурная функция q -го порядка определяется соотношением

$$S_q(\tau) = \langle |X(t+\tau) - X(t)|^q \rangle \sim \tau^{\zeta(q)},$$

где угловыми скобками обозначено усреднение экспериментальных данных по времени, τ — временной масштаб (сдвиг по времени), $X(t)$ — исследуемый параметр.

Важно, что для разных типов турбулентных процессов имеются разные зависимости показателя $\zeta(q)$ степени структурной функции от порядка q структурной функции. Так, в случае полностью однородной изотропной колмогоровской 3D-турбулентности значения экспоненты задаются соотношением $\zeta(q) = q/3$, а для модели Ирошникова — Крейчнана, описывающей двумерную турбулентность плазмы в сильном магнитном поле, $\zeta(q) = q/4$ [6, 60].

Нелинейная зависимость показателя $\zeta(q)$ степени структурной функции от порядка q структурной функции указывает на наличие перемежаемости. Трехмерная турбулентность с перемежаемостью детально описывается лог-пуассоновской моделью, в которой рассматривается стохастический мультипликативный каскад [78]:

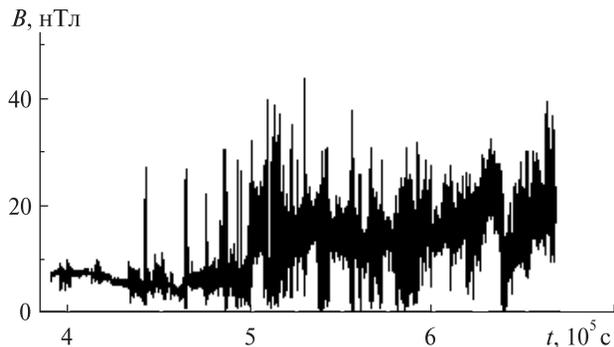


Рис. 18. Пример проанализированных флуктуаций магнитного поля для 15 мая 2010 г.

Таблица 1. Значения показателя степени s максимума функции распределения плотности вероятности флуктуаций магнитного поля для различных событий и областей в диапазоне до 1 с

Дата	SW	FSH	PSH	MSH	MP
04.03.2004 г.	0.52	0.7	0.98	0.95	0.65
02.05.2009 г.	0.67	0.72	0.9	0.8	0.81
01.05.2008 г.	0.56	0.8	1.01	0.9	0.7
20.02.2005 г.	0.6	0.67	0.89	0.82	0.66
10.03.2006 г.	0.48	0.68	0.95	0.94	0.8
08.08.2008 г.	0.55	0.76	0.97	0.91	0.73
15.05.2010 г.	0.52	0.75	0.9	0.87	0.8
04.05.2007 г.	0.45	0.6	0.92	0.87	0.67

$$\zeta(q) = (1 - \Delta) \frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1 - \beta} [1 - \beta^{q/3}].$$

Индекс β характеризует степень перемежаемости ($\beta = 1$ для неперемежаемой однородной развитой турбулентности, например в колмогоровской модели K41), Δ — параметр, связанный с геометрией диссипативных структур и краевыми эффектами.

Для описания двумерной турбулентности при наличии неоднородности турбулентных процессов очень часто используется модель Политано — Пукке [69]:

$$\zeta(q) = q/8 + 1 - (1/2)^{q/4}.$$

ESS-анализ заключается в определении относительного значения показателя экспоненты для разного порядка структурных функций. В общем случае для q -го и p -го порядков предполагается соотношение

$$S_q(\tau) \sim S_p(\tau) \tau^{\zeta(q)/\zeta(p)}.$$

Приложения в анализе спутниковых измерений.

Для апробации описанных выше статистических методов были проанализированы измерения магнитного поля полученные на спутнике «Танго» космической миссии «Кластер-2» за период 2004—2010 г. с частотой опроса 22.5 Гц.

Пример рассмотренных флуктуаций магнитного поля показан на рис. 18. Во время события 15 мая 2010 г. спутник, двигаясь из плазмы солнечного ветра, прошел через форшок, трижды пересек ударную волну, затем прошел через весь магнитослой и вошел в магнитосферу. Несмотря на то, что выделенные для этого события закономерности наблюдаются не при всех пролетах, они являются достаточно типичными.

При переходе из солнечного ветра в магнитослой уровень флуктуаций магнитного поля резко изменился:

- в плазме солнечного ветра уровень флуктуаций $\delta B / B \sim 0.02$,
- в форшоковой области дисперсия вариаций поля и плазмы, нормированная на текущее среднее значение, составляет $\delta B / B = 0.1 \dots 0.2$,
- после пересечения ударной волны уровень флуктуаций увеличивается в несколько раз по сравнению с форшоком и составляет $\delta B / B = 0.4 \dots 0.5$.

Для исследования особенностей функции плотности вероятности флуктуаций магнитного поля выбирался сдвиг по времени τ , кратный 0.0445 с. Анализировались статистические свойства абсолютного значения вариаций магнитного поля $dB = B(t + \tau) - B(t)$ в разных областях околоземного пространства и для разных временных масштабов. К сожалению, несмотря на большую частоту опроса, интервалы пересечения ударной волны оказались очень короткими для статистически достоверного анализа. Из полученных зависимостей эволюции значения максимума функции распределения плотности вероятности флуктуаций магнитного поля $P_0(\tau)$ от сдвига по времени τ был определен показатель степени s . Результаты для разных рассмотренных событий и разных областей представлены в табл. 1. При этом акцент был сделан на анализ именно маломасштабной турбулентности, ко-

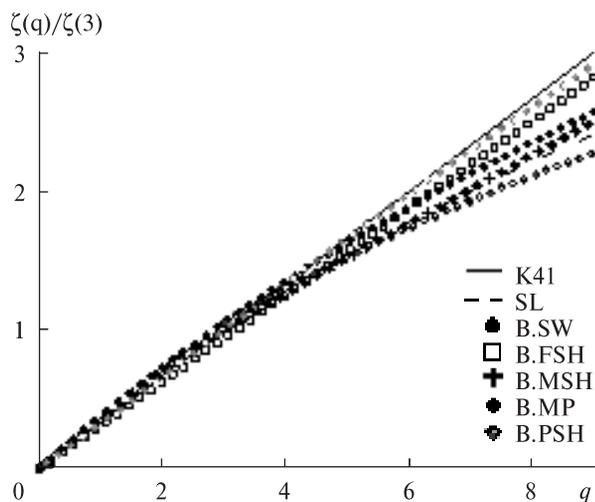


Рис. 19. Отношение экспоненциального значения структурной функции q -го порядка к третьему порядку для 15 мая 2010 г.: K41 — значение рассчитанные по модели Колмогорова, SL — значение рассчитанные по изотропной лог-пуассоновский каскадной модели, B, SW — экспериментальные данные для плазмы солнечного ветра, B, FSH — экспериментальные данные для области форшока, B, MSH — экспериментальные данные для магнитослоя, B, MP — экспериментальные данные для области магнитопаузы, B, PSH — экспериментальные данные для постшоковой области

торая наименее всего изучена из-за недостатка данных с хорошей разрешающей способностью.

Пример проведенного ESS-анализа показан на рис. 19 и 20, где проведено сравнение с трехмерными моделями турбулентных процессов: рассмотрено отношение степени структурной функции q -го порядка к степени третьего порядка для разных областей. Символы — экспериментальные данные по магнитному полю, пунктирная линия показывает значение, рассчитанное по формуле лог-пуассоновской каскадной (SL) модели турбулентности, непрерывная линия соответствует модели Колмогорова (K41). ESS-анализ демонстрирует наибольшую перемежаемость турбулентных процессов в постшоковой области. На рис. 20 проведено сравнение с двумерными моделями, которые используются для описания турбулентных процессов — модель Ирошникова — Крейчнана и модель Политано — Пукке. При этом символы — экспериментальные значения магнитного поля, штриховая линия

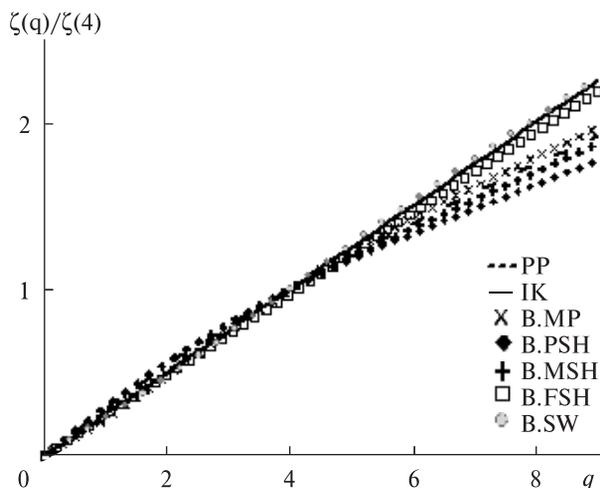


Рис. 20. Отношение экспоненциального значения структурной функции q -го порядка к четвертому порядку для 15 мая 2010 г.: PP — значение рассчитанные по модели Политано — Пукке, IK — значение рассчитанные по модели Ирошникова — Крейчнана, B, SW — экспериментальные данные для плазмы солнечного ветра, B, FSH — экспериментальные данные для области форшока, B, MSH — экспериментальные данные для магнитослоя, B, MP — экспериментальные данные для области магнитопаузы, B, PSH — экспериментальные данные для постшоковой области

показывает значение, рассчитанное по модели Политано — Пукке (PP), непрерывная линия соответствует модели Ирошникова — Крейчнана (ИК).

В результате ESS-анализа из экспериментально полученных зависимостей мы можем определить параметры β и Δ для разных областей. Важным является тот факт, что, зная данные параметры, мы можем найти зависимость от сдвига во времени обобщенного коэффициента диффузии $D(\tau)$. В классическом случае такая зависимость отсутствует, в случае супердиффузии $D(\tau)$ растет со временем, для субдиффузии — падает. Обобщенный коэффициент диффузии определяется через параметры β и Δ соотношением

$$D \propto \tau^R, R = \Delta (1/\beta - 1).$$

Такое соотношение используется для оценки переноса в статистически неоднородной среде. В общем случае показатель R определяется фрактальными свойствами среды.

В табл. 2 для экспериментально определенных индексов в разных областях магнитосферы Земли рассчитаны значения $R \approx 0.2...0.9$.

Закон смещения частичек задается соотношением: $\langle \delta x^2 \rangle \propto Dt \propto \tau^\gamma$ с показателем $\gamma \approx 1 + R \approx 1.2...1.9 > 1$. Такая зависимость обозначает наличие супердиффузии.

Определить тип диффузионных процессов можно и из PDF-анализа. Для этого нужно использовать уравнение для супердиффузии в турбулентной среде с «пролётами Леви» (Levy flights) из работы [92]: $\langle \delta x^2 \rangle \propto \tau^{2s}$, где s — показатель степени максимума распределения плотности вероятности флуктуаций магнитного поля и $\gamma = 2s$. Рассчитанные параметры при анализе аномальной диффузии показателя степени s (высоты максимума функции плотности вероятности флуктуаций магнитного поля) из ESS-анализа также представлены в табл. 2. Значения хорошо согласуются из полученными результатами проведенного PDF-анализа (табл. 1) и независимо подтверждают наличие супердиффузионных процессов в переходных областях магнитосферы Земли.

Из приведенных выше результатов следует, что разные виды спектров турбулентности, как

правило, соответствуют разным физическим процессам в исследуемых областях. Так, спектр Колмогорова описывает плазму с нулевым средним магнитным полем, а спектр Крейчнана — с отличным от нуля средним магнитным полем. Таким образом, переход от спектра первого типа ко второму может указывать на переход к крупномасштабным самоорганизующимся магнитным структурам, и мы получаем чувствительный индикатор их появления в плазменной системе.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МГД-ВОЛН В АКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ «ЛИТОСФЕРА — АТМОСФЕРА — ИОНОСФЕРА — МАГНИТОСФЕРА»

Общие методы для ЭМ- и МГД-волн в гиротропной, анизотропной, неоднородной (слоистой) и нелинейной среде. В последние годы был разработан ряд методов, которые при соответствующей модификации могут быть использованы в задачах проекта РЕЗОНАНС. Речь идет о методах, которые рассматривают волновые процессы в сильно нелинейной, активной и неоднородной (гиротропной и анизотропной) среде и позволяют осуществлять численное моделирование нелинейных волн в такой среде. Результаты авторов данной работы были широко представлены на украинских и международных конференциях, а также на семинарах.

Прежде всего в этом ряду следует отметить три модели сейсмоионосферной связи, основанные на каналах передачи энергии электромагнитной [37, 50—52] и электростатической — фотохимической [49] природы, а также на канале АГВ (атмосферных гравитационных волн) [73], которые привели к возникновению и развитию концепции системы «литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» (ЛАИМ) и последующей ее интерпретации как активного фильтра. На этой основе были определены характеристики электромагнитных волн (ЭМ), проходящих через эту систему.

В работе [52] впервые были одновременно рассмотрены пульсации $Pc1$ в активной системе ЛАИМ (с циклотронной неустойчивостью в радиационных поясах) и полноволновая электромагнитная задача распространения в ионосфере

Таблица 2. Параметры диффузионных процессов

Дата	Положение	β	Δ	$R = \Delta(1/\beta - 1)$	$s = (1 + R)/2$
04.03.2004 г.	MSH	0.5	0.4	0.81	0.9
	MP	0.26	0.12	0.33	0.68
	PSH	0.47	0.8	0.9	0.95
02.05.2009 г.	MSH	0.56	0.74	0.58	0.79
	MP	0.25	0.18	0.54	0.77
08.08.2008 г.	FSH	0.62	0.51	0.31	0.66
	PSH	0.5	0.9	0.9	0.95
	MP	0.34	0.15	0.29	0.65
15.05.2010 г.	MSH	0.52	0.6	0.64	0.82
	FSH	0.45	0.4	0.48	0.74
	PSH	0.71	2.22	0.91	0.96
	MP	0.17	0.05	0.25	0.63
05.04.2007 г.	MSH	0.51	0.8	0.76	0.88
	FSH	0.4	0.34	0.52	0.76
	PSH	0.52	0.89	0.82	0.91
	MP	0.48	0.2	0.22	0.61

ре в МГД-приближении с учетом сравнимости длины волны с толщиной ионосферы. Действительно, это была первая работа в теории активного ионосферно-магнитосферного резонатора (циклотронного мазера) с гирорезонансной неустойчивостью, учитывающая сравнимость длины волны с толщиной ионосферы (см. рис. 1, 2 в приложении к работе [51]). Затем идея сшивки полноволнового решения в ионосфере и решения на основе геометрической оптики в магнитосфере была впервые предложена в работе [49], но с использованием грубого качественного варианта такой сшивки. Далее, модель проникновения МГД-волн в ионосферу и прохождения через нее была развита в работах [49, 51] и других. В работе [37] была построена подробная модель отражения от многослойной системы ЛАИ (литосфера — атмосфера — ионосфера) МГД-волн, падающих наклонно из магнитосферы. В работах [30, 72] предложен более аккуратный алгоритм для «сшивки» полноволнового и «геометрооптического» решений в мезомасштабной среде с выводом новых граничных условий на границе областей с соответствующими рещениями. При этом была использована более адекватная новая версия комплексной геометрической оптики. Вообще говоря, в экспериментах проекта РЕЗОНАНС, прежде всего в активной его части, есть необходимость учета эффектов модификации «граничных условий между ионосферой и магнитосферой».

Была разработана общая методология моделирования нелинейных волн в слоистой и нелинейной структуре. Проект предполагает сильные нелинейности и необходимость исследований распространения нелинейных волновых пучков в ионосфере. При этом аналитические и численные методы, разработанные для нелинейных пучков и солитонов в гиротропной среде [31, 33], после некоторых модификаций применимы к замагниченной космической плазме.

Из работ [89, 91] следует, что целесообразной моделью волновых процессов для экспериментов проекта РЕЗОНАНС может быть модель некоторого устройства (мазера или гиротрона), взятая «как целое», «от входа до выхода». Аналогичный, с точки зрения общей методологии, подход был

разработан нами для возбуждения электромагнитных волн литосферным источником и их прохождения и усиления в системе ЛАИМ [50—52], а также для активных микроволновых устройств, в частности для моделирования сложного активного устройства (полевого транзистора) «от входа до выхода», включая электромагнитные волны в активной области [32].

Следует ожидать наличия в магнитосферно-ионосферном резонаторе как нелинейностей (благодаря искусственному нагреву ионосферы или воздействию солнечного терминатора), так и усиления (в радиационных поясах). Таким образом, моделированию подлежат волновые процессы в нелинейной и активной среде. Сильно нелинейные волны в магнитосфере и (усиление) солитонов в активной среде (солнечном ветре) было рассмотрено в работах [59, 74]. Необходимо также отметить, что недавно был предложен достаточно общий метод [29] для определения типа устойчивости в активной среде (абсолютной или конвективной), важный также и для исследований режима «циклотронного мазера». Методы для нелинейных волн в неоднородной гиротропной среде были развиты в работах [31, 53].

В работах [48] и [75] приведены примеры конкретных применений (для поверхностных плазменных волн и волн в слоистой гиротропной среде) развитого авторами общего метода для нелинейных волн в слоистых структурах различной физической природы с объемными и поверхностными нелинейностями и нелинейностями в граничных условиях. Данный метод может быть адаптирован к расчету плазменных, МГД- и электромагнитных волн в нелинейных волноводных структурах в ионосфере и магнитосфере, например в структурах на основе градиентов плазменной плотности.

Метод моделирования прохождения средне- и короткомасштабных ЭМ- и МГД-волн через мезомасштабную систему «литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера». Ниже предлагается метод, прежде всего предназначенный для моделирования волновых процессов в активном магнитосферно-ионосферном резонаторе для волн с масштабам УНЧ-пульса-

ций $Pc1$ и частотами порядка 0.5 Гц и выше. В перспективе можно будет развить этот метод и для ОНЧ-волн. Для МГД-волн диапазона пульсаций $Pc1$ с источником в магнитосфере или ионосфере, как показано в работах [37, 50, 51], длина волны сравнима с толщиной ионосферы и атмосферы. Более того, при падении из ионосферы волны проникают даже в литосферу, и для адекватного определения коэффициента отражения от ионосферы наличие атмосферы и литосферы в системе ЛАИМ [50, 51] должно быть учтено. Мы предлагаем исследование волновых процессов в системе с мезомасштабными относительно длины волны размерами. Все работы в основном выполнены с учетом наличия источника возмущения конечных размеров, соответствующих граничных условий и прохождения этих возмущений с преобразованием одних типов в другие в неоднородной среде. Среда может иметь плавную или непрерывную неоднородность. В работе [52] по сути была опубликована теория активного магнитосферно-ионосферного резонатора (с ионно-циклотронной неустойчивостью) для МГД-волн типа $Pc1$. При этом в ионосфере был использован полноволновой подход, а в магнитосфере — геометрическая оптика (ГО), но «сшивки» на границе была проведена лишь на полукачественном уровне (на основании потока энергии только альвеновских волн). Недавно, по крайней мере для электромагнитных волн, подобный алгоритм развит в более аккуратном приближении, и вместо ГО использована комплексная ГО (КГО), с комплексным эйконалом. Комплексная геометрическая оптика позволяет учесть изменение амплитуды в неоднородной среде, связанное с дисперсией, изменением формы пучка (например, его геометрической фокусировкой в неоднородной среде) и наличием диссипации (положительной или отрицательной в активной среде). При этом выведены аналитически граничные условия для «сшивки» геометрооптического и полноволнового решений. К тому же теперь добавлена нелинейность в области полноволнового решения уравнений Максвелла [30, 72]. Метод разрабатывался для «электромагнитного концентратора поля —

электромагнитной черной дыры» в цилиндрической геометрии, и может сейчас быть развит для электромагнитных, МГД- или альвеновских волн в системе ЛАИМ и применен в эксперименте РЕЗОНАНС для моделирования распространения МГД- и электромагнитных волн в неоднородной ионосферно-магнитосферной системе с неоднородностями, связанными с дактами и нагревом. При этом для аккуратного расчета отражения «на границе ионосферы и магнитосферы» для волн типа ОНЧ или УНЧ (с частотами выше 0.1 Гц) нельзя применять приближение «тонкой ионосферы». Причина в том, что, например, МГД-волны диапазона $Pc1$ будут «чувствовать» даже атмосферу и литосферу, не говоря уже о необходимости учета детальной структуры ионосферы, толщины которой сравнима с длиной альвеновских волн при частотах диапазона $Pc1$. Таким образом, упомянутая выше граница фактически будет моделироваться как соответствующий участок неоднородной системы ЛАИМ. Что касается области нагрева, то в зависимости от длин рассматриваемых волн она может рассматриваться или в приближении заданного поверхностного токового источника, или как участок распределенной среды.

Идея возможного применения метода КГО-ПВП в проекте РЕЗОНАНС. Данные предложения касаются разделов научных целей «Волны $Pc1$ » и «ОНЧ-хоры и шипения» [52]. Целью является выяснение влияния тонкой структуры ионосферы и области на границе магнитосферного мазера на распространение соответствующих волн в мазере и межмодовое взаимодействие. Поскольку длины соответствующих альвеновских волн порядка толщины системы «атмосфера — ионосфера», а для ОНЧ-волн длины значительно меньше, в целом адекватной моделью является модель, состоящая из трех частей: 1) полноволновая модель в области ионосферы, 2) модель комплексной геометрической оптики (КГО) в области магнитосферы, 3) их аккуратная сшивка на условной границе между ионосферой и магнитосферой. В очень грубом приближении такая модель была построена для пульсаций $Pc1$ в работе [49]. Детальная модель прохождения электромагнитных волн была построена в цикле работ

[49, 50, 51], но только для прохождения электромагнитных волн через систему «литосфера — атмосфера — ионосфера». Для настоящей работы предлагается детальная модель распространения электромагнитных волн в системе «атмосфера — ионосфера — магнитосфера» с учетом многомодовости и «полевой» сшивки электромагнитного полноволнового решения и решения на основе нового варианта КГО, в отличие от [49].

Такая модель, даже для «пассивного» эксперимента (без нагревного стенда) нужна для интерпретации наблюдаемого волнового спектра и выяснения влияния невозмущенных и возмущенных граничных условий на распространение волн в «магнитосферном резонаторе». Граничные же условия должны быть выведены с учетом того, что границы резонатора являются размытыми, волны из магнитосферного резонатора проникают в ионосферу, а «усреднение» по высоте ионосферы невозможно для рассматриваемых диапазонов (в которых длины волн по крайней мере не превышают толщину ионосферы, а для ОНЧ-волн значительно меньше толщины ионосферы). Таким образом, необходимо рассмотрение структуры «атмосфера — ионосфера», сравнимое по степени детализации с работами [49—51, 73] с учетом непрерывного изменения параметров в этой системе и того, что в рассматриваемых масштабах кривизной этой системы можно пренебречь. В магнитосфере же, с учетом кривизны, необходимо применение комплексной геометрической оптики (с комплексным эйконалом, действительными координатами и корректным определением групповой скорости в приближении малой (положительной или отрицательной) диссипации). Таким образом, описанная модель необходима для корректной интерпретации измерений характеристик полей и частиц, связанных с магнитосферным циклотронным мазером, даже в отсутствие искусственного нагрева ионосферы.

В случае применения нагревных стендов, в области ионосферы, подвергнутой нагреванию, нужно учитывать не только вертикальную, но и горизонтальную неоднородность, что приводит к появлению взаимодействий между модами с различными горизонтальными волновыми чис-

лами, даже в линейном приближении. С учетом же нелинейности при нагревании возникает целый ряд новых задач и возможностей при спутниковых и наземных наблюдениях в условиях активного эксперимента, для решения которых нужна развиваемая модель. К числу этих дополнительных задач можно отнести следующие.

1. Когда в ионосфере формируются под воздействием нагрева ионосферные дакты и/или нелинейные волновые структуры, это влияет на отражение волн, надающих из магнитосферного резонатора на ионосферу. Создается дополнительная нелинейность, влияющая на мазерный резонатор, которая может быть конкурентной к нелинейности, связанной с высыпанием частиц из конуса потерь в резонаторе [31, 33, 37]. Вопрос состоит во влиянии этой нелинейности на распространение электромагнитных волн в ионосфере и магнитосфере и режимы работы резонатора, включая генерацию волн и модуляцию потока частиц. Отметим, что возмущение граничных условий имеют место также при прохождении терминатора и магнитосферных/ионосферных бурях, и соответствующие задачи возникают и в этих ситуациях.

2. При тепловом воздействии возникает вопрос о возможности под влиянием модуляции «граничных условий» синхронизации работы мазерного генератора, сдвига или даже захвата частоты.

Метод КГО необходим также для моделирования распространения УНЧ- и ОНЧ-волн в околоземной плазме при наличии искусственных и естественных неоднородностей, если неоднородность достаточно слабая в масштабах длины волны.

3. Наряду с определенными выше задачами относительно влияния граничных условия и тонкой структуры ионосферы на генерацию волн в магнитосферном мазере [52], разработка данной модели необходима также для расчета характеристик электромагнитных волн, возбуждаемых заданным током, или заданным с помощью тепловой модуляции возмущением ионосферных (авроральных) токов. В этом случае разрабатываемая модель будет развитием, а для волн диапазона Pc1 — прямым продолжением моделей [49—51, 73].

В качестве необходимых для интерпретации физической картины генерируемых и модулируемых волн в магнитосферном резонаторе и прилегающих областях ионосферы будут привлекаться данные наземных и спутниковых измерений электрических и магнитных полей в указанных диапазонах, а также данные о характеристиках частиц.

В настоящее время разрабатывается теория «суперконцентраторов поля и энергии» ИК-диапазона на изотропных и анизотропных метаматериалах, включающая «сшивку» полноволнового нелинейного и линейного геометрооптического решений на границах линейной неоднородной и нелинейной однородной областей [30]. Вместе с тем развитие данного метода является первым этапом построения модели, необходимой для интерпретации измерений волновых полей и характеристик частиц в проекте РЕЗОНАНС.

Модель будет развита сначала для изотропно-неоднородного слоистого, а затем для анизотропно-неоднородного слоистого нелинейного метаматериала, т. н. «гиперболического метаматериала». Распространение электромагнитных волн в таком метаматериале может качественно моделировать волновой процесс в анизотропной (и негиротропной) F-области ионосферы. В целом такая задача и модель являются новыми. В дальнейшем будет проведено развитие построенных моделей распространения электромагнитных волн на анизотропную и гиротропную плазменные среды и моделирование распространения этих волн в системе «атмосфера — ионосфера — магнитосфера». Будет проведено сравнение с экспериментальными данными и интерпретация результатов наблюдений.

Упомянутые подходы планируется использовать в решении следующих задач.

1. С помощью развитых методов можно провести моделирование проникновения электромагнитных волн через активную систему ЛАИМ как в естественных условиях, так и при нагревании ионосферы. Для условий активного эксперимента можно определить добротность и наиболее эффективный вид модуляции альвеновского резонатора с точки зрения вариации собственных частот и других характеристик. Ме-

тод может быть использован для моделирования МГД-волн, возбужденных в области высокочастотного нагрева (или другими ионосферными источниками); расчетов модификации граничных условий, коэффициентов прохождения, отражения и усиления в активном магнитосферно-ионосферном резонаторе; распространения электромагнитных/МГД-волн в искусственных/естественных дактах; нелинейного взаимодействия различных мод и типов волн в активном магнитосферно-ионосферном резонаторе. Данные расчеты будут необходимы для моделирования вариаций характеристик циклотронного лазера под действием нагрева и возбужденных при этом МГД-волн, и как следствие — целого ряда наблюдаемых эффектов, таких как возмущение потоков высыпавшихся частиц, частот магнитосферных МГД-колебаний и пр. Также планируется определить влияние атмосферных гравитационных волн (АГВ) на добротность резонатора «атмосфера — ионосфера» и характеристики МГД-возмущений в нем.

2. Планируется исследовать планетарные электромагнитные волны (ПЭМВ) как чувствительный индикатор влияния на ионосферу «сверху» (токи и МГД-возмущения от солнечного ветра и магнитосферы) и «снизу» (возмущения из нижней атмосферы).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Комплексное использование данных спутниковых и наземных (США, Канада, северная Европа) измерений даст возможность для исследования самосогласованной (волна — частица) динамики радиационных поясов и внутренней магнитосферы и успешно решить следующие научные задачи.

- МГД-УНЧ-пульсации в магнитосфере Земли: разрешение пространственно-временной неопределенности МГД-волн в магнитосфере Земли; определение структуры поля УНЧ-волны вдоль силовой линии магнитного поля и разделение МГД-мод.

- Определение источников генерации УНЧ-пульсаций в магнитосфере Земли: полоидальные БМЗ-пульсации в дневной магнитосфере; неустойчивость Кельвина — Гельмгольца на

флангах магнитоферы; связывание БМЗ-волн, бегущих в экваториальной плоскости магнитосферы с собственными модами альвеновского и ММЗ-типа; УНЧ-пакеты, генерируемые во время взрывной фазы суббури.

- Поперечная структура УНЧ-волн различной природы.

- Связывание МГД-волн и перекачка энергии между модами.

- Механизмы затухания УНЧ-волн: затухание на непрерывном спектре в магнитосфере.

- Ускорение частиц в поле УНЧ-волны с продольной составляющей электрического поля.

- В последние годы был разработан ряд методов и получен ряд важных результатов в физике радиационных поясов, которые, при соответствующей модификации, могут быть использованы в задачах проекта РЕЗОНАНС: исследование источников и особенностей генерации и распространения структурированных (типа хоров) и неструктурированных (типа шипений) КНЧ/ОНЧ-эмиссий в магнитосфере Земли по многоточечным измерениям в окрестности источника.

- Определение характерных пространственных масштабов источников КНЧ-эмиссий в магнитосфере Земли на основе оригинальной методики [27] кросскорреляционного фазового анализа многоточечных измерений волной формы.

2. Радиоастрономический институт НАН Украины в рамках проекта РЕЗОНАНС предлагает использовать уже разработанные и опробованные, а также при необходимости создать новые интерференционные и поляризационные алгоритмы обработки синхронных бортовых и наземных измерений вариаций УНЧ-НЧ-полей для оценивания характеристик распространения МГД-волн, восстановления их модового состава и идентификации источников. В частности, многопозиционные наземно-космические измерения дадут возможность восстанавливать форму интерференционной картины МГД-волн, по которой, в свою очередь, можно будет оценивать коэффициент стоячей волны и коэффициент отражения волн от нижней ионосферы, а также оценивать интегральные холловскую и педерсеновскую проводимости. Предполагается исследовать запитку магнито-

сферных резонаторов снизу, и оценивать параметры МГД-волн, возбуждаемых приземными источниками (скорость распространения, поляризацию, модовый состав). Также представляют интерес магнитосферные измерения полей в УНЧ-СНЧ-диапазонах, сформированных шумановским и ионосферным альвеновским резонаторами. Несомненный физический интерес представляет проблема нелинейного взаимодействия МГД-волн с плазменными неоднородностями. Ее решение позволит прояснить многие открытые вопросы турбулизации ионосферы во время геомагнитных возмущений в высоких широтах.

3. Статистический анализ измерений параметров плазмы в рамках проекта РЕЗОНАНС позволит ответить на ряд вопросов, которые активно обсуждаются на сегодняшний момент. Среди них можно выделить: 1) наличие анизотропии свойств плазмы для описания особенностей генерации хоров, 2) особенности механизмов нагрева частиц, 3) радиальная диффузия как из внешней магнитосферы Земли, так и из области ионосферы.

Что касается приложений, то отработаны методы и подходы для анализа флуктуаций параметров плазмы на разных временных (пространственных) масштабах. Представленные в данной работе две различные методики — а именно PDF-анализ и ESS-анализ — для рассмотрения турбулентных и диффузионных процессов показали аналогичные результаты.

Кроме того, установленное соответствие между видами спектров турбулентности и физическим процессам в исследуемых областях (например, спектр Колмогорова описывает плазму с нулевым средним магнитным полем, а спектр Крейчнана — с отличным от нуля средним магнитным полем) позволяет трактовать переход от спектра первого типа ко второму как переход к крупномасштабным самоорганизующимся магнитным структурам, и дает чувствительный индикатор их появления в плазменной среде.

4. Одной из целей научной программы экспериментов является выяснение влияния тонкой структуры ионосферы и области на границе магнитосферного мазера на распространение соот-

ветствующих волн в мазере и межмодовое взаимодействие. Поскольку длины соответствующих альвеновских волн порядка толщины системы «атмосфера — ионосфера», а для ОНЧ-волн длины значительно меньшие, в целом адекватной моделью является модель, состоящая из трех частей: 1) полноволновая модель в области ионосферы, 2) модель комплексной геометрической оптики (КГО) в области магнитосферы, 3) их аккуратная сшивка на условной границе между ионосферой и магнитосферой.

Такая модель в случае «пассивного» эксперимента (без нагревного стенда) нужна для интерпретации наблюдаемого волнового спектра и выяснения влияния невозмущенных и возмущенных граничных условий на распространение волн в «магнитосферном резонаторе». Граничные же условия должны быть выведены с учетом того, что границы резонатора являются размытыми, волны из резонатора проникают в ионосферу, а «усреднение» по высоте ионосферы невозможно для рассматриваемых диапазонов диссипации (в которых длины волн по крайней мере не превышают толщину ионосферы, а для ОНЧ-волн значительно меньше толщины ионосферы). Таким образом, описанная модель необходима для корректной интерпретации измерений характеристик полей и частиц, связанных с магнитосферным циклотронным мазером, даже в отсутствие искусственного нагрева ионосферы.

В случае применения нагревных стендов, в области ионосферы, подвергнутой нагреванию, нужно учитывать не только вертикальную, но и горизонтальную неоднородность, что приводит, вообще говоря, к появлению взаимодействий между модами с различными горизонтальными волновыми числами, даже в линейном приближении. С учетом же нелинейности при активном эксперименте и/или воздействии естественных факторов возникает целый ряд новых задач и возможностей при спутниковых и наземных наблюдениях, для решения которых нужна развиваемая модель.

Метод КГО необходим также для моделирования распространения УНЧ- и ОНЧ-волн в околоземной плазме при наличии искусственных и естественных неоднородностей, если неодно-

родность достаточно плавная в масштабах длины волны.

5. Изложенные выше и основанные на результатах уже проведенных исследований предложения по участию в экспериментах программы РЕЗОНАНС и использованию полученных в них данных представляют собой первый шаг в реализации украинской программы РЕЗОНАНС-У. Несомненно, что в дальнейшем надлежит проанализировать ситуацию, возникающую в связи с планируемым запуском в 2012 г. КА RBSP (США) и КА ORBITALS (Канада — США) для исследования динамики радиационных поясов, а в 2015 г. — КА ERG (Япония) с задачей исследования волн и частиц в кольцевом токе и радиационных поясах. Заявлено, что эти проекты будут выполняться согласованно и будут использоваться наземные исследовательские комплексы, такие как SuperDARN, CPMN и другие. Для реализации научных задач проекта РЕЗОНАНС появляется возможность использования данных измерения проектов THEMIS (измерения УНЧ/ОНЧ/КНЧ-диапазона и динамика магнитопаузы) и RBSP (волновые измерения КНЧ-диапазона и измерения параметров потоков частиц в экваториальной области радиационных поясов). Главное же в том, что участие космических аппаратов (и наземных установок) проекта РЕЗОНАНС в таком сотрудничестве создаст распределенную флотилию космических аппаратов, позволяющую ставить и решать совершенно новые задачи исследования и прогнозирования процессов Геокосмоса и космической погоды.

1. Агапитов А. В., Парновский А. С., Черемных О. К. Спектр поперечно-мелкомасштабных возмущений во внутренней магнитосфере Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2006. — 22, № 6. — С. 387—401.
2. Агапитов А. В., Черемных О. К. Генерация солнечным ветром собственных ULF мод магнитосферы Земли // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 4. — С. 72—81.
3. Агапитов А. В., Черемных О. К. Поляризация резонансных УНЧ-возмущений в магнитосфере Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2011. — 27, № 3. — С. 17—27.
4. Белей В. С., Галушко В. Г., Зализовский А. В. и др. Коэффициент отражения МГД-волн от ионосферы //

- Геомагнетизм и аэрономия. — 1997. — 37, № 6. — С. 91—98.
5. Беленов А. Ф., Пономаренко П. В., Сеницын В. Г., Ямпольский Ю. М. О природе квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты КВ сигналов, рассеянных областью ИИТ // Изв. вузов. Радиофизика. — 1993. — 33, № 12. — С. 1089—1095.
 6. Будаев В. П. Обобщенная масштабная инвариантность и лог-Пуассоновская статистика турбулентности краевой плазмы в токамаке Т-10 // Физика плазмы. — 2008. — 34, № 9. — С. 1—18.
 7. Гуревич А. В., Шварцбург Б. А. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 272 с.
 8. Зализовский А. В. Роль тропосферных процессов в формировании спорадических слоев E-области ионосферы над Антарктическим полуостровом // Радиофизика и радиоастрономия. — 2008. — 13, № 1. — С. 26—38.
 9. Зализовский А. В., Сеницын В. Г., Ямпольский Ю. М. Поляризация геомагнитных пульсаций P_{с3}/P_{с4} в Северном и Южном полушариях: экспериментальные данные и численное моделирование // Радиофизика и радиоастрономия. — 2001. — 6, № 4. — С. 302—309.
 10. Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М. F-рассеяние как индикатор тропосферно-ионосферного взаимодействия // Радиофизика и радиоастрономия. — 2007. — 12, № 1. — С. 33—42.
 11. Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М., Корепанов В. Е., Доценко И. Ф. Поляризационные исследования пульсаций P_{с3}, P_{с4} на антарктической станции «Академик Вернадский» («эффект подсолнуха») // Радиофизика и радиоастрономия. — 2000. — 5, № 2. — С. 118—124.
 12. Козак Л. В., Луи А. Т. Статистический анализ турбулентности плазмы по спутниковым измерениям магнитного поля // Кинематика и физика небес. тел. — 2008. — 24, № 4. — С. 72—80.
 13. Козак Л. В., Пилипенко В. А., Чугунова О. М., Козак П. Н. Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя Земли // Космич. исслед. — 2011. — 49, № 3. — С. 202—212.
 14. Козак Л. В., Савин С. П., Будаев В. П. и др. Характер турбулентности в пограничных областях магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — 52, № 4. — С. 470—481.
 15. Колосков А. В., Сеницын В. Г., Герасимова Н. Н., Ямпольский Ю. М. Околосемные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 5. — С. 49—64.
 16. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983. — 192 с.
 17. Новиков Е. А., Стюарт Р. У. Переменяемость турбулентности и спектр флюктуаций диссипации энергии // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. — 1964. — № 3. — С. 408—413.
 18. Парновский А. С., Черемных О. К. Желобковые и несжимаемые возмущения во внутренней магнитосфере Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2006. — 22, № 1. — С. 46—55.
 19. Проненко В., Корепанов В. Индукционный магнитометр «LEMI-606» для проекта «Резонанс» // Многоспутниковые исследования внутр. магнитосферы: Матер. конференции-совещания по проекту РЕЗОНАНС. — Киев: ИКИ РАН, 2012. — С. 49—52.
 20. Черемных О. К. К вопросу о резонансных МГД-возмущениях в магнитосферной плазме // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 1. — С. 61—67.
 21. Черемных О. К., Данилова В. В. Поперечно-мелкомасштабные МГД-возмущения в космической плазме с магнитными поверхностями // Кинематика и физика небес. тел. — 2011. — 27, № 2. — С. 63—79.
 22. Ямпольский Ю. М. «Эхо-рассеяние» КВ радиосигналов на искусственной ионосферной турбулентности // Изв. вузов. Радиофизика. — 1989. — 32, № 4. — С. 519—521.
 23. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. — 2004. — 9, № 2. — С. 130—151.
 24. Agapitov O., Cheremnykh O. Natural oscillations of the Earth magnetosphere associated with solar wind sudden impulses // Ukr. Phys. J. — 2008. — 53. — P. 506—510.
 25. Agapitov O. V., Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Ballooning perturbations in the inner magnetosphere of the Earth: spectrum, stability and eigenmode analysis // Adv. Space Res. — 2008. — 41. — P. 1682—1687.
 26. Agapitov O. V., Glassmeier K.-H., Plaschke F., et al. Surface waves and field line resonances // J. Geophys. Res. — 2009. — 114. — doi 10.1029/2008JA013553.
 27. Agapitov O., Krasnoselskikh V., Dudok de Wit T., et al. Multispacecraft observations of chorus emissions as a tool for the plasma density fluctuations' remote sensing // J. Geophys. Res. — 2011. — 116. — P. A09222.
 28. Belikovitch V. V., Grach S. M., Karashtin A. N., et al. The "Sura" facility: Study of the atmosphere and space (a review) // Radiophys. and Quantum Electronics. — 2007. — 50, N 7. — P. 497—526.
 29. Boardman A. D., Grymalsky V. V., Kivshar Yu. S., et al. Active and tunable metamaterials // Laser and Photonics Revs. — 2011. — 5, N 2. — P. 287—307.
 30. Boardman A. D., Grimalsky V. V., Rapoport Yu. G. Nonlinear Transformational Optics and Electromagnetic and

- Acoustic Fields Concentrators // AIP Conf. Proc. — 2011. — **1398**. — P. 120—122.
31. Boardman A. D., Hess O., Mitchell-Thomas R. C., et al. Temporal Solitons in Magneto-optic and Metamaterial Waveguides // Photonics and Nanostructures — Fundamentals and Applications. — 2010. — **8**, N 4. — P. 228—243.
32. Bovy V. I., Rapoport Yu. G., Senchenko V. V. FET model taking into account wave characteristics of the active region and input circuits // IEEE Microwave Theory Tech. — 1995. — **43**, N 7. — P. 1453—1460.
33. Buttner O., Bauer M., Demokritov S. O., et al. Spatial and spatiotemporal self-focusing of spin waves in garnet films observed by space- and time-resolved Brillouin light scattering // J. Appl. Phys. — 2000. — **87**, N 9. — P. 5088—5090.
34. Carvet W. The auroral plasma cavity // Geophys. Res. Lett. — 1981. — N 8. — C. 919—921.
35. Cheng C. Z., Chang T. C., Lin C. A., Tsai W. H. Magneto-hydrodynamic theory of field line resonances in the magnetosphere, // J. Geophys. Res. — 1993. — **98**, N 7. — P. 11339—11347.
36. Chen L., Hasegawa A. A theory of long-period magnetic pulsations. I. Steady state excitation of field line resonance // J. Geophys. Res. — 1974. — **79**. — P. 1024—1032.
37. Cheremnykh O. K., Ivchenko V. M., Kremenetsky I. A., et al. Reflection of Alfvén waves from the ionosphere and active magnetospheric resonator possibility // Ukr. J. Phys. — 2000. — **45**, N 11. — P. 1324—1332.
38. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Influence of ionospheric conductivity on the ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth // Adv. Space Res. — 2006. — **37**. — P. 599—603.
39. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Flute and Ballooning Modes in the Inner Magnetosphere of the Earth: Stability and Influence of the Ionospheric Conductivity // Space Science: New Research / Ed. by Nick S. Maravell. — New York: Nova Science Publishers, 2006. — P. 71—108.
40. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S., Burdo O. S. Ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth // Planet. and Space Sci. — 2004. — **52**. — P. 1217—1229.
41. Demekhov A. G., Mogilevsky M. M., Zelenyi L. M. Project "Resonance": main scientific objectives and the experiment design // EPSC Abstracts. — 2010. — **5**. — P. EP-SC2010-208.
42. Demekhov A. G., Trakhtengerts V. Y., Mogilevsky M. M., Zelenyi L. M. Current problems in studies of magnetospheric cyclotron masers and new space project "RESONANCE" // Adv. Space Res. — 2003. — **32**, N 3. — P. 355—374.
43. Duffy P. The acceleration of cometary ions by Alfvén waves // J. Plasma Phys. — 1989. — **42**. — P. 13—25.
44. Dungey J. M. Electrodynamics of the outer magnetosphere. — Pa. State Ionos. Res. Lab., 1954. — Sci. Rep. 69.
45. Eccles V., Armstrong R. Upper atmospheric effects of the HF active auroral research program ionospheric research instrument (HAARP IRI). — Mission Research Corp Nashua NH, 1993. — Sci. Rep. N 2. — 19 p.
46. Engebretson M. J., Zanetti L. J., Potemra T. A., Acuna M. H. Harmonically structured ULF pulsations observed by the AMPTE CCE magnetic field experiment // Geophys. Res. Lett. — 1986. — N 13. — P. 905—908.
47. Getmantsev G. G., Zuikov N. A., Kotik D. S., et al. Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma // Sov. JETP Lett. — 1974. — **20**. — P. 229—232. — (Engl. Transl.).
48. Grimal'skii V. V., Rapoport Yu. G. Modulation instability of surface plasma waves in the second-harmonic resonance region // Plasma Phys. Reports. — 1998. — **24**, N 11. — P. 980—982.
49. Grimal'skiy V. V., Hayakawa M., Ivchenko V. N., et al. Penetration of electrostatic field from the lithosphere into the ionosphere and its effect on the D-region before earthquake // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2003. — **65**, N 4. — P. 391—407.
50. Grimal'skiy V. V., Kremenetsky I., Cheremnykh O. K., Rapoport Yu. G. Spatial and frequency filtration properties of ULF EM radiation of a lithospheric origin in the lithosphere — ionosphere — magnetosphere system // Seismo electromagnetics: lithosphere — atmosphere — ionosphere coupling / Eds Ma. Hayakawa, O. A. Molchanov. — Tokyo: TERRAPUB, 2001. — P. 363—370.
51. Grimal'skiy V. V., Kremenetsky I. A., Rapoport Yu. G. Excitation of EMW in the lithosphere and propagation into magnetosphere // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. — Tokyo: TERRAPUB, 1998. — P. 777—787.
52. Grimal'skiy V. V., Kremenetsky I. A., Rapoport Yu. G. Excitation of electromagnetic waves in the lithosphere and their penetration into ionosphere and magnetosphere // J. Atmospheric Electricity. — 1999. — **19**, N 2. — P. 101—117.
53. Grimal'skiy V. V., Rapoport Yu. G. Nonlinear magnetostatic waves in ferrite films in an inhomogeneous magnetic field // J. Magn. Magn. Mater. — 1996. — **157/158**. — P. 727—729.
54. Hasegawa A., Chen L. Plasma heating by Alfvén-wave phase mixing // Phys. Fluids. — 1974. — **17**. — P. 1399.
55. Hollweg J. V. Resonance absorption of propagating fast waves in a cold plasma // Planet. and Space Sci. — 1990. — **38**. — P. 1017—1030.
56. Kepko L., Spence H. E. Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // J. Geophys. Res. — 2003. — **108**. — P. 1257.

57. Klimushkin D., Mager P., Glassmeier K. Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wavenumbers in a finite pressure plasma in the Earth's magnetosphere // *Ann. geophys.* — 2004. — **22**. — P. 267–287.
58. Kossey P. A., Battis J. C. HAARP Diagnostic Instruments; High Frequency Active Auroral Research Program. — Air Force Research Lab, Hanscom AFB, MA Space Vehicles Directorate, 2002. — N AFRL-VS-TR-2003-1570. — 71 p.
59. Kotsarenko N. Ya., Rapoport Yu. G., Shvidkij A. A., Khotyaintsev Yu. V. Oblique Alfvén and magnetosonic solitons and nonlinear structures in magnetized plasmas // *Phys. scr.* — 1998. — **58**. — P. 499–504.
60. Kraichnan R. H. Lagrangian — history closure approximation for turbulence // *Phys. Fluids.* — 1965. — **8**. — P. 575–598.
61. Mann I. R., Wright A. N., Mills K. J., Nakariakov V. M. Excitation of magnetospheric waveguide modes by magnetosheath flows // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **104**. — P. 333.
62. Mathie R. A., Mann I. R., Menk F. W. Pc5 ULF pulsations associated with waveguide modes observed with the IMAGE magnetometer array // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **104**. — P. 7025–7036.
63. Mathie R. A., Menk F. W., Mann I. R., Orr D. Discrete field line resonances and the Alfvén continuum in the outer magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 1999. — **26**. — P. 659–662.
64. Mills K. J., Wright A. N., Mann I. R. Kelvin — Helmholtz driven modes of the magnetosphere // *Phys. Plasmas.* — 1999. — **6**. — P. 4070.
65. Mogilevsky M. M., Zelenyi L. M., Demekhov A. G., et al. RESONANCE Project for Studies of Wave-Particle Interactions in the Inner Magnetosphere // *Geophys. Monograph Ser.* — 2012. — **199**. — P. 117–126.
66. Nishida A. Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. — New York: Springer-Verlag, 1978. — 256 p.
67. Papadopoulos D., Bernhardt P. A., Carlson H. C., et al. HAARP, research and applications. — Washington DC, Naval Research Lab., 1990. — 19 p.
68. Papadopoulos D., Wallace T., McCarrick M., et al. On the Efficiency of ELF/VLF generation using HF heating of the auroral electrojet // *Plasma Phys. Reports.* — 2003. — **29**. — P. 561–565.
69. Parnowski A. S. Eigenmode analysis of ballooning perturbations in the inner magnetosphere of the Earth // *Ann. geophys.* — 2007. — **25**. — P. 1391–1403.
70. Ponomarenko P. V., Yampolski Yu. M., Zalozovskiy A. V., et al. Interaction between artificial ionospheric irregularities and natural MHD waves // *J. Geophys. Res.* — 2000. — **105**. — N A1. — P. 171–181.
71. Rae I. J., Donovan E. F., Mann I. R., et al. Evolution and Characteristics of Global Pc5 ULF Waves During a High Solar Wind Speed Interval // *J. Geophys. Res.* — 2005. — **110**. — A12211. — doi 10.1029/2005JA011007.
72. Rapoport Yu., Boardman A., Grimalsky V., et al. Metamaterials for space physics and the new method for modeling isotropic and hyperbolic nonlinear concentrators // *International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*. — Kharkiv, 2012. — P. 76–79. — doi: 10.1109/MMET.2012.6331154
73. Rapoport Yu. G., Hayakawa M., Gotynyan O. E., et al. Stable and unstable plasma perturbations in the ionospheric F region, caused by spatial packet of atmospheric gravity waves // *Phys. Chem. Earth.* — 2009. — **34**. — P. 508–515.
74. Rapoport Yu. G., Sirenko E. K., Fedun V. N. Interaction of magnetosonic solitons with an ion beam in magnetized plasma // *Ukr. J. Phys.* — 1998. — **43**. — P. 169–176.
75. Rapoport Y. G., Zaspel C. E., Grimalsky V. V., Sanchez-Mondragon J. Nonlinear Lorenz lemma with the influence of exchange interaction and propagation of the magnetostatic waves with higher diffraction and dispersion // *14th International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology: CriMico 2004*. — Sevastopol, 2004. — P. 361–363.
76. Samson J. C., Harrold B. G., Ruohoniemi J. M., Walker A. D. M. Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 1992. — **19**. — P. 441.
77. Savin S., Amata E., Zelenyi L., et al. Super fast plasma streams as drivers of transient and anomalous magnetospheric dynamics // *Ann. geophys.* — 2012. — **30**. — P. 1–7.
78. She Z., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence // *Phys. Rev. Lett.* — 1994. — **72**. — P. 336–339.
79. Singer H. J. Multisatellite observations of resonant hydro-magnetic waves // *Planet. and Space Sci.* — 1982. — **30**. — P. 1209.
80. Sinitsin V. G., Kelley M. C., Yampolski Yu. M., et al. Ionospheric conductivities according to Doppler radar observations of stimulated turbulence // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* — 1999. — **61**. — P. 903–912.
81. Sinitsin V. G., Yampolski Yu. M., Zalozovskiy A. V., et al. Spatial field structure and polarization of geomagnetic pulsations in conjugate areas // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* — 200. — **65**, N 10. — P. 1161–1167.
82. Southwood, D. J. Some features of field line resonances in the magnetosphere // *Planet. and Space Sci.* — 1974. — **22**. — P. 483.
83. Southwood D. J., Kivelson M. G. The effect of parallel inhomogeneity on magnetospheric hydromagnetic wave coupling // *J. Geophys. Res.* — 1986. — **91**. — P. 6871.
84. Streltsov A. V., Pedersen T. R., Mishin E. V., Snyder A. L. Ionospheric feedback instability and substorm development // *J. Geophys. Res.* — 2010. — **115**. — A07205.
85. Summers D., Ni B., Meredith N. P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant

- wave-particle interactions: 1. Theory // *J. Geophys. Res.* — 2007. — **112**. — A04206. — doi 10.1029/2006JA011801.
86. Summers D., Ni B., Meredith N. P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions. I. Evaluation for VLF chorus, ELF hiss and EMIC waves // *J. Geophys. Res.* — 2007. — **112**. — A04207. — doi 10.1029/2006JA011993.
87. Takahashi K., Cheng C. Z., McEntire R. W., et al. Observation and theory of Pc5 waves with harmonically related transverse and compressional components // *J. Geophys. Res.* — 1990. — **95**, N A2. — P. 977–989.
88. Tamao T. Transmission and coupling resonance of hydro-magnetic disturbances in the non-uniform Earth's magnetosphere // *Sci. Rep. Tohoku Univ.* — 1965. — Ser. 5. — **17**. — P. 43–72.
89. Trakhtengerts V. Y. Magnetosphere cyclotron maser: Backward wave oscillator generation regime // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**, N 9. — P. 17205–17210.
90. Trakhtengerts V. Yu., Belyaev P. P., Polyakov S. V., et al. Excitation of Alfvén waves and vortices in the ionospheric Alfvén resonator by modulated powerful radio waves // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* — 2000. — **62**. — P. 267–276.
91. Trakhtengerts V. Yu., Rycroft M. J. Whistler and Alfvén mode cyclotron masers in space. — Cambridge: Univ. Press, 2008. — 354 p.
92. Treumann R. A. Theory of super-diffusion for the magnetopause // *Geophys. Res. Lett.* — 1997. — **24**. — P. 1727–1730.
93. Tverskoy B. A. Main mechanisms in the formation of the Earth's radiation belts // *Rev. Geophys.* — 1969. — **7**, N 1-2. — P. 219–221.
94. Yampolski Y. M., Beley V. S., Kascheev S. B., et al. Bistatic HF radar diagnostics of induced field aligned irregularities // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**, N A4. — P. 7461–7467.
95. Zalizovski A. V. The role of the ozonosphere in the interaction between atmospheric layers as deduced from observation at the Antarctic base "Akademik Vernadsky" // *Int. J. Remote Sens.* — 2011. — **32**, N 11. — P. 3187–3197. — doi 10.1080/01431161.2010.541511.

Стаття надійшла до редакції 06.11.12

О. К. Черемных, Ю. М. Ямпольский, О. В. Агапитов, А. В. Зализовский, В. М. Ивченко, Л. В. Козак, О. С. Парновский, Ю. Г. Рапопорт, Ю. О. Селиванов, А. В. Колосков, С. О. Черемных

ДОСЛІДЖЕННЯ МГД-КОЛИВАНЬ ВНУТРІШНЬОЇ МАГНІТОСФЕРИ ЗЕМЛІ У КОСМІЧНОМУ ПРОЕКТІ РЕЗОНАНС

Активну фазу міжнародного орбітального космічного проекту РЕЗОНАНС, в якому беруть участь 12 країн, заплановано розпочати в 2014–2016 рр. Українські вчені беруть участь у проекті вже з підготовчої фази: визначаються теоретичні моделі явищ у магнітосферній плазмі, в радіаційних поясах, моделі взаємодії магнітосфери та іоносфери, генерації магнітогідродинамічних хвиль, уточнюються методики інтерпретації космічних та наземних вимірювань, їхнього комплексування, в ЛЦ ІКД створені бортові магнітометри для супутників проекту. Розглянуто деталі вказаних питань та визначено завдання для реалізації українськими вченими у проекті.

О. К. Черемных, Ю. М. Ямпольский, О. В. Агапитов, А. В. Зализовский, В. Н. Ивченко, Л. В. Козак, А. С. Парновский, Ю. Г. Рапопорт, Ю. А. Селиванов, А. В. Колосков, С. О. Черемных

STUDIES OF MHD OSCILLATIONS OF THE EARTH'S INNER MAGNETOSPHERE IN THE RESONANCE MISSION

The active phase of the international orbital space mission RESONANCE, with the participation of 12 countries, is planned to begin in 2014–2016. Ukrainian scientists are involved in the mission from the preparation phase. They develop theoretical models of phenomena in magnetospheric plasma and in radiation belts, elaborate models of magnetosphere-ionosphere interactions and of MHD wave generation mechanisms. Some procedures for space and ground-based data interpretation and fusion are improved. On-board magnetometers for the mission satellites are developed at the LC SRI of the NASU and SSAU. We consider the above-mentioned points and determine some problems to be solved during the mission.