

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 19
2(81) + 2013

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ



ЗМІСТ

Черемных О. К., Ямпольский Ю. М., Агапитов А. В., Зализовский А. В., Ивченко В. Н., Козак Л. В., Парновский А. С., Рапопорт Ю. Г., Селиванов Ю. А., Колосков А. В., Черемных С. О. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте РЕЗОНАНС

Дегтярев А. В. Актуальные вопросы развития ракетно-космической деятельности в Украине

Макаров А. Л., Меланченко А. Г., Нагорнов В. С. Об одном направлении совершенствования бортовых систем измерения параметров космических аппаратов

Карачун В. В., Мельник В. Н., Калинина М. Ф. Гиперзвуковой прорыв: перспективы и проблемы

Лялько В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Апостолов О. А. Дистанційне визначення строків сівби соняшнику

НАШІ АВТОРИ

CONTENTS

5 *Cheremnykh O. K., Yampolski Yu. M., Agapitov O. V., Zalizovski A. V., Ivchenko V. N., Kozak L. V., Parnovski A. S., Rapoport Yu. G., Selivanov Yu. A., Koloskov A. V., Cheremnykh S. O.* Studies of mhd oscillations of the Earth's inner magnetosphere in the RESONANCE mission

43 *Degtyarev A. O.* The topical questions of rocket and space activity in Ukraine

53 *Makarov A. L., Melanchenko A. G., Nagornov V. S.* One approach to improvement of spacecraft on-board measurement systems

63 *Karachun V. V., Mel'nick V. N., Kalinina M. F.* Hypersound breach: prospects and problems

74 *Lyalko V. I., Sakhatsky O. I., Zholobak G. M., Apostolov O. A.* Remote detection of sunflower sowing time

79 OUR AUTHORS

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 28.04.13. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс.
Ум. друк. арк. 8,61. Обл.-вид. арк. 9,04. Тираж 100 прим. Зам. № 3570.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України,
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

*7 травня 2013 р. виповнюється 75 років
члену редколегії журналу «Космічна наука і технологія»,
директорові Радіоастрономічного інституту
Національної академії наук України,
академіку Національної академії наук України,
Леоніду Миколайовичу ЛИТВИНЕНКУ*

*Редакційна колегія журналу сердечно вітає
Леоніда Миколайовича
з ювілеєм і зичить йому міцного здоров'я та наснаги
для здійснення усіх його творчих задумів*

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 лазера [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 лазере, 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

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

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

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-

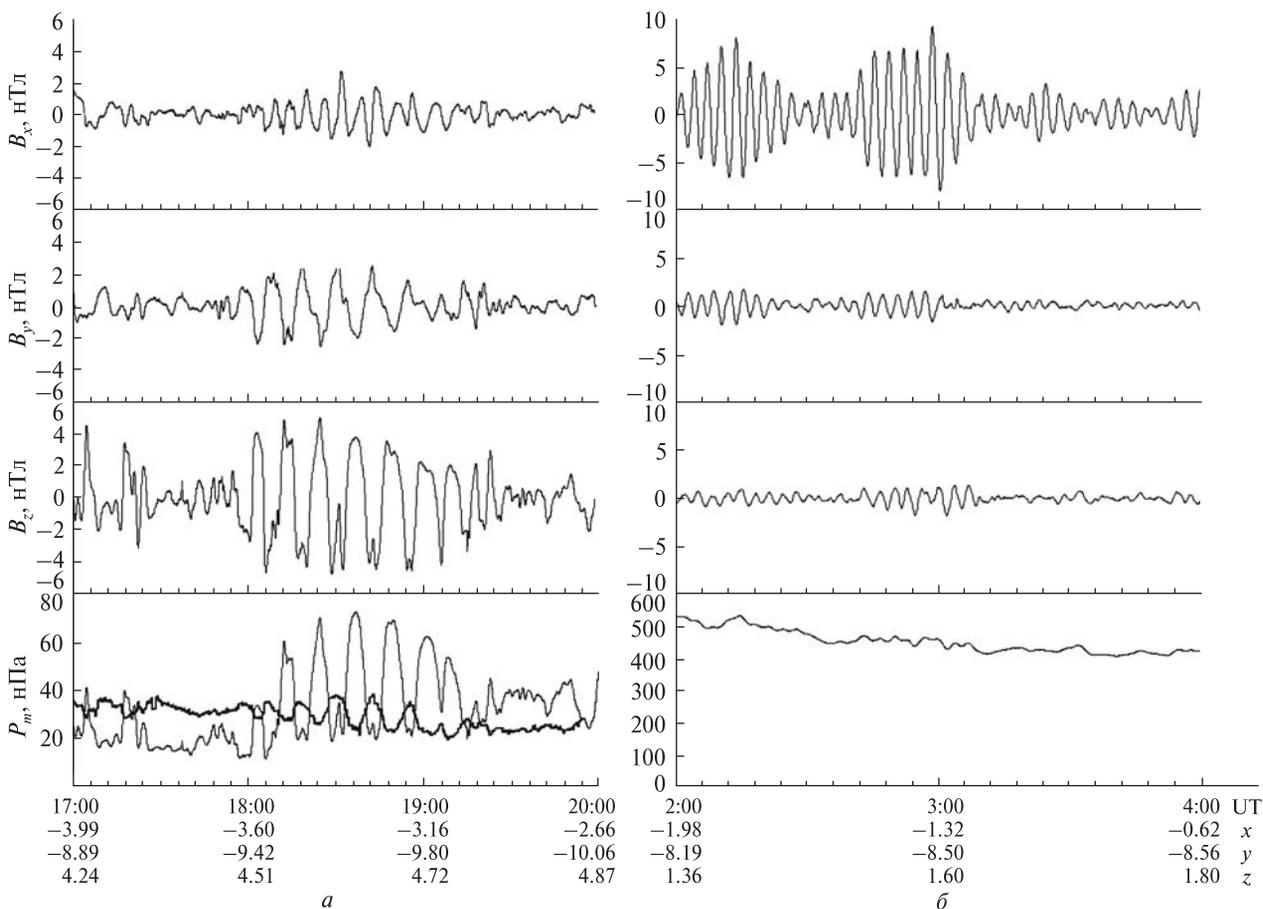


Рис. 1. Компоненты магнитного поля в системе координат локального магнитного поля 18.03.1998 г., давление магнитного поля для 17:00 — 20:00 UT (а) и 02:00 — 04:00 UT (б). Внизу приведены координаты космического аппарата «Экватор-S» в системе координат GSE

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

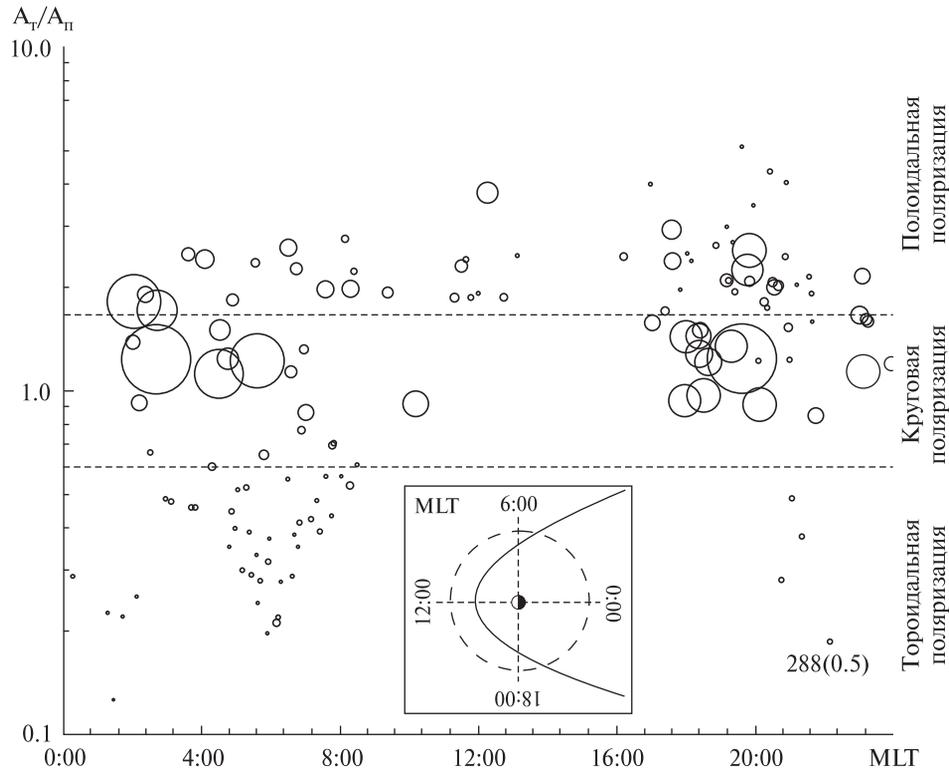


Рис. 2. Распределение УНЧ-событий, зарегистрированных на борту АМРЕ/ССЕ в 1986 г., в зависимости от магнитного локального времени наблюдения и поляризации магнитного поля в волне

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

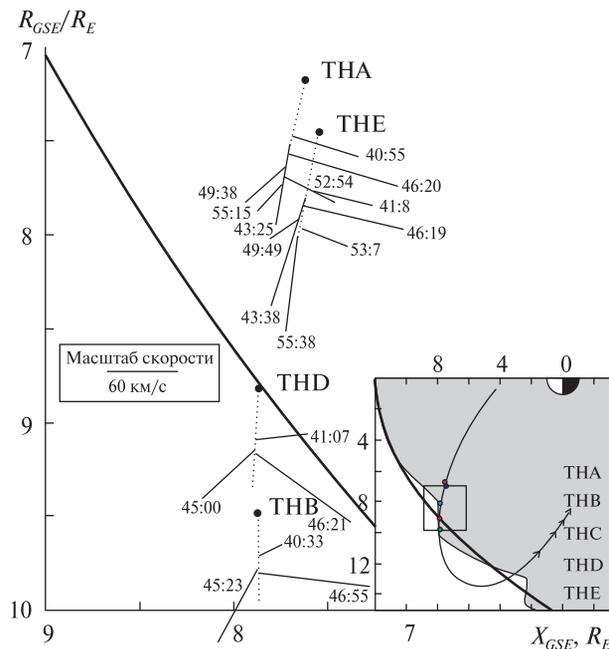


Рис. 3. Нормали к поверхности, определенные при пересечениях системой THEMIS, и реконструкция динамики смещения поверхности магнитопаузы в интервале времени 3:00—6:00 UT 15 мая 2007 г. Приняты обозначения: $R_{GSE} \equiv (Y_{GSE}^2 + Z_{GSE}^2)^{1/2}$, A — амплитуда волн, Φ — фаза волн

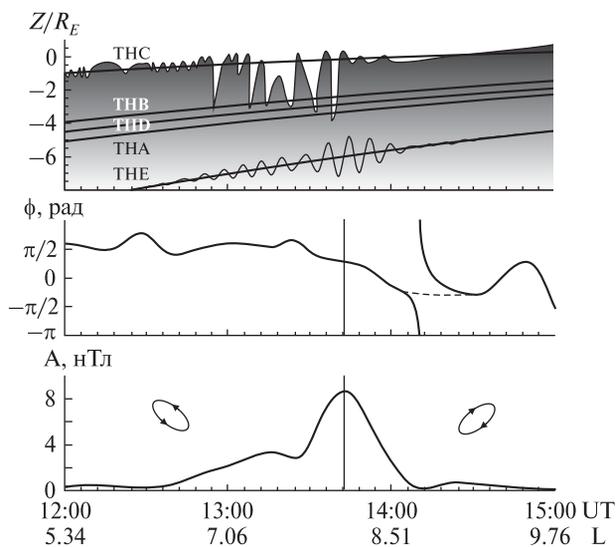


Рис. 4. Схематическая реконструкция возмущения поверхности магнитопаузы, построенная по измерениям четырех космических аппаратов системы THEMIS; приведены траектории движения космических аппаратов, на траектории космического аппарата THEMIS показано возмущение магнитного поля

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

пульсации Psb, 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 Psb-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,

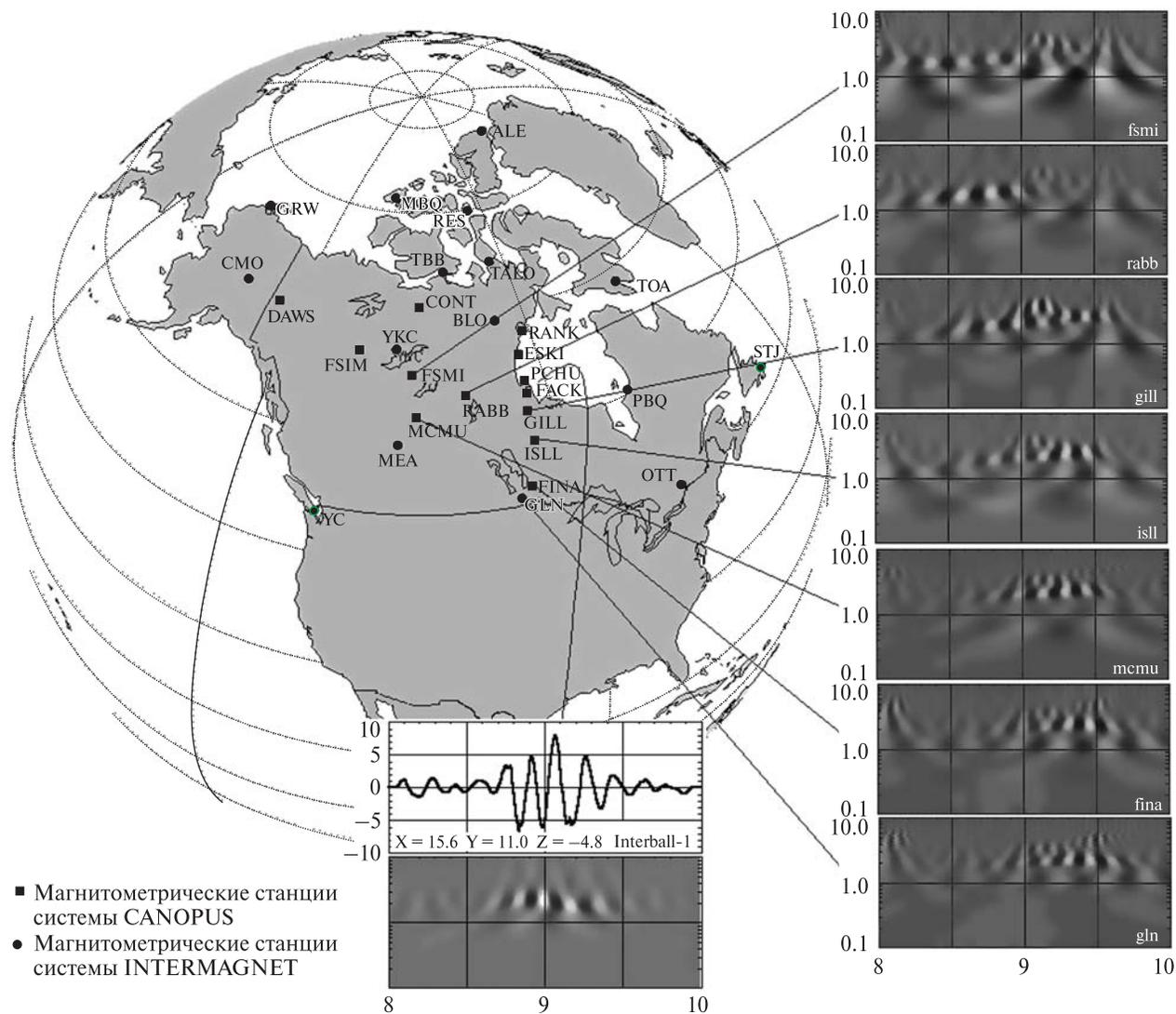


Рис. 5. Распространение волнового пакета Ps6 по наблюдениям наземных магнитометрических станций «Канопус» и на борту КА «Интербол-1». Показаны вейвлет-спектры модуля магнитного поля

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 позволяют 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

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

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

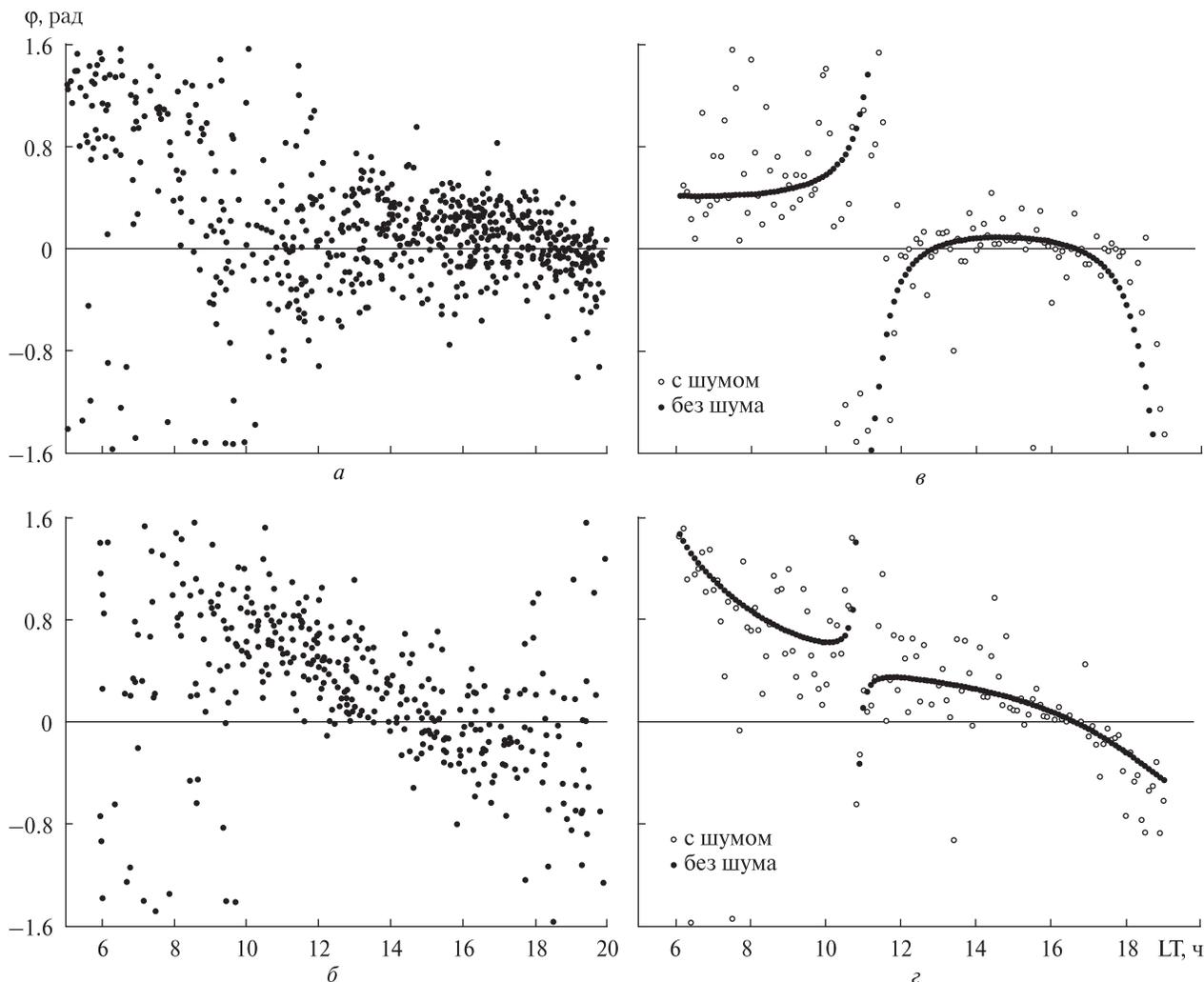


Рис. 6. Вариации позиционного угла φ эллипса поляризации пульсаций Pc4: a, b — наблюдения на станции «Академик Вернадский» в декабре 2002 г. (летом) и в июне 2002 г. (зимой), b — модельные вариации при постоянном пространственном спектре волн в F-области ионосферы без учета суточных вариаций волнового 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, в, г. 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, г) весьма напоминает «эффект подсолнуха», часто наблюдавшийся в эксперименте (рис. 6, б).

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-

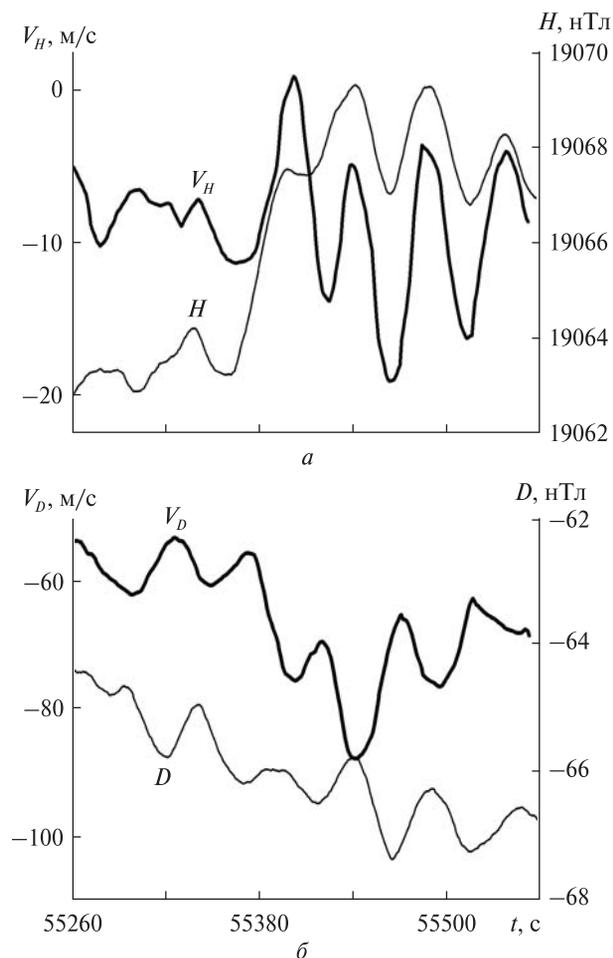


Рис. 7. Вариации H - и D -составляющих магнитного поля на РАО и вариаций скорости дрейфа неоднородностей ИИТ над НС «Сура» 22.08.2010 г. в 15:21 — 15:26 UT

рическом и магнитном полях МГД-природы. На РАО им. Брауде под Харьковом регистрировались ВЧ-сигналы станции РВМ (Москва, Россия) и широкоэвещательного 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

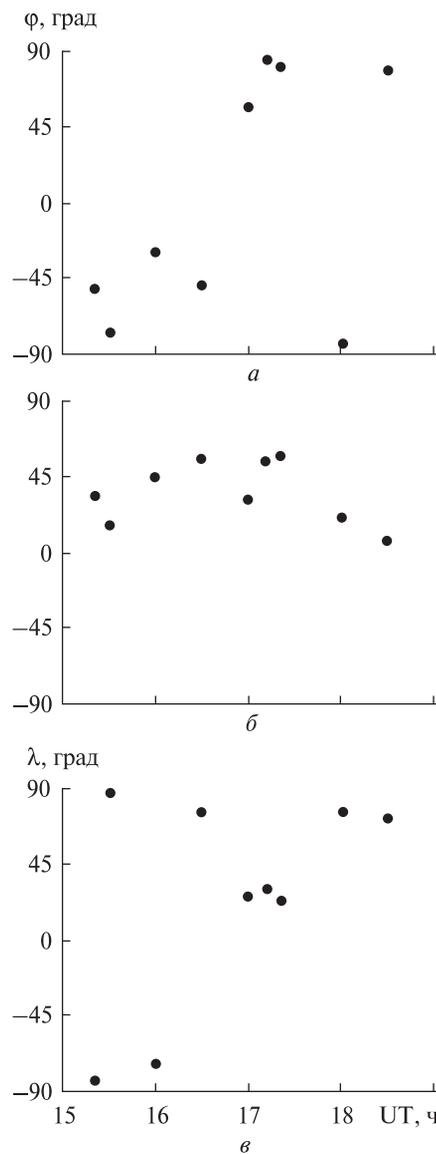


Рис. 8. Значение позиционного угла ϕ пульсаций скорости дрейфа плазмы в F-области ионосферы над НС «Сура» (а), позиционного угла пульсаций магнитного поля на поверхности Земли (б) и поворот плоскости поляризации α при переходе от пульсаций в скоростях дрейфа плазмы к пульсациям в магнитном поле на поверхности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

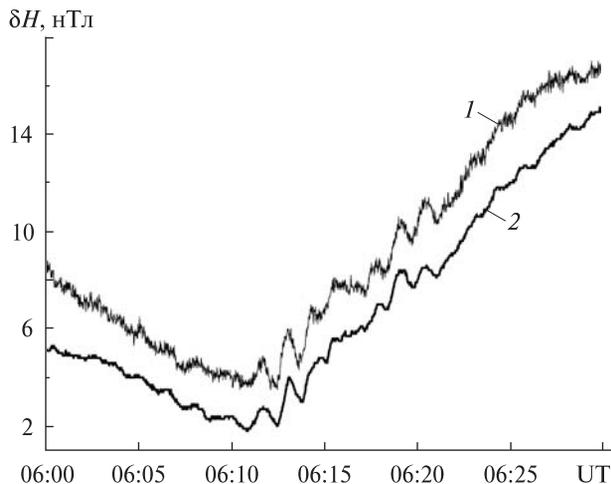


Рис. 9. Синхронные регистрации геомагнитных микро-пульсаций Pc4, зарегистрированных 6 сентября 1999 г., в сопряженных регионах: 1 — Милстоун Хилл, 2 — «Академик Вернадский»

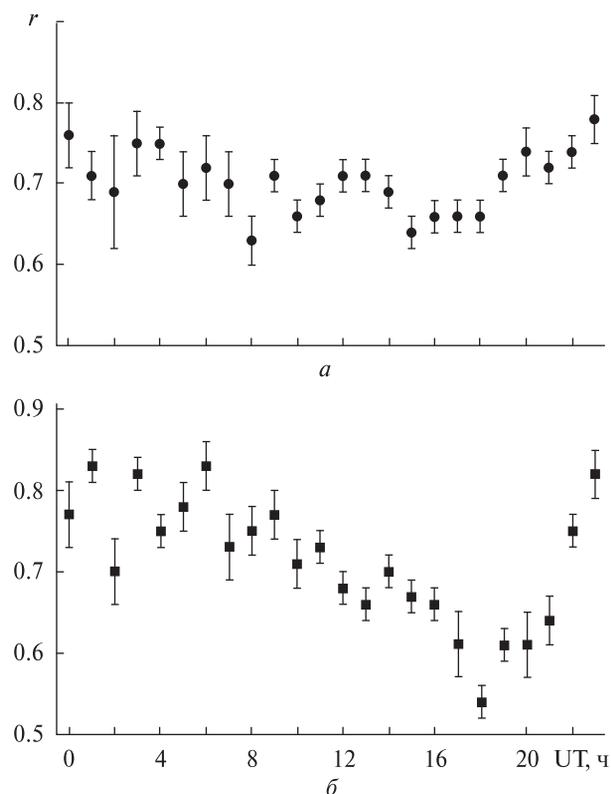


Рис. 10. Суточная вариация экстремума коэффициента корреляции r пульсаций в Милстоун Хилл и на станции «Академик Вернадский» в сентябре 1999 г.: a — в H -компонентах магнитного поля, b — в D -компонентах

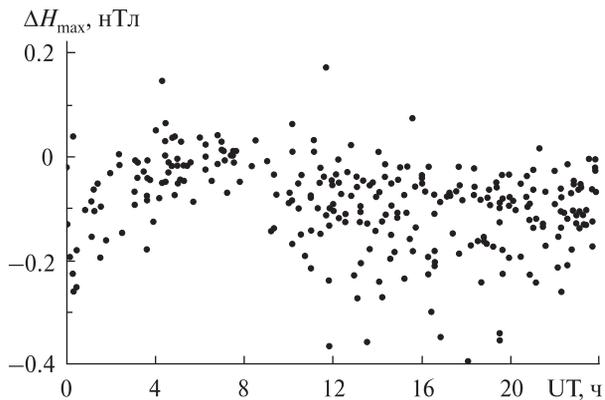


Рис. 11. Разность $\Delta H \equiv H_{\max AIA}$ амплитуд пульсаций H -составляющих магнитного поля между станцией УАС и Милстоун Хилл в августе 1999 г.

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.

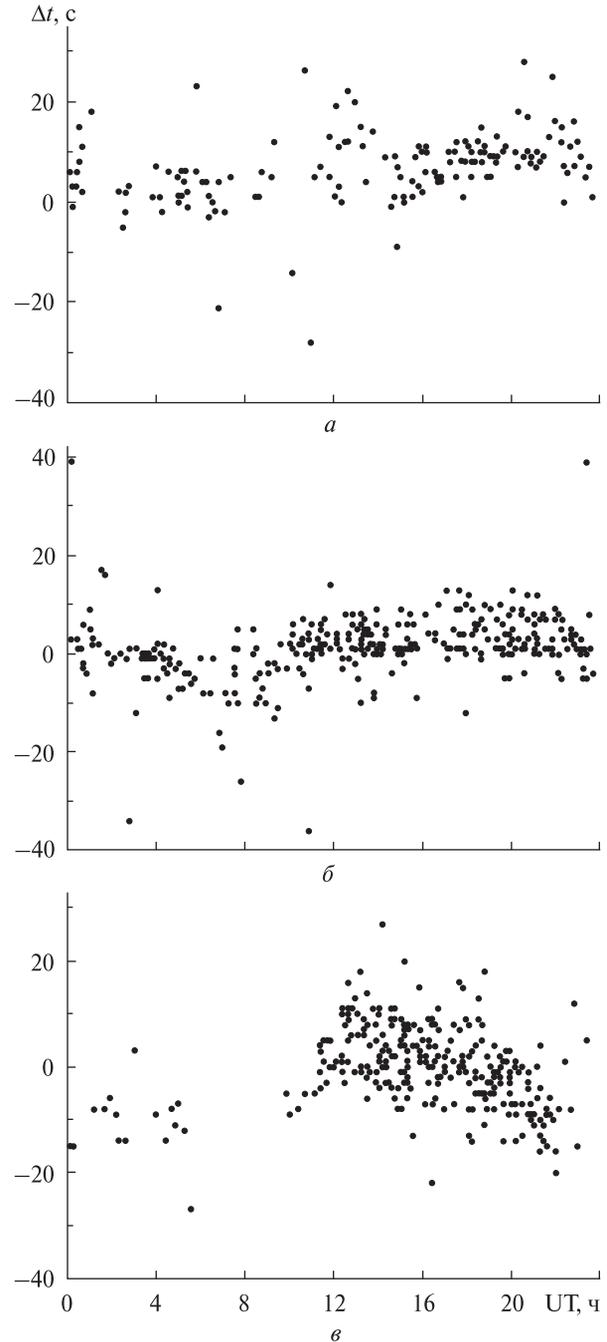


Рис. 12. Временные сдвиги Δt между пульсациями УАС — Милстоун Хилл: а — в июле 1999 г., б, в — в сентябре и декабре 2000 г.

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

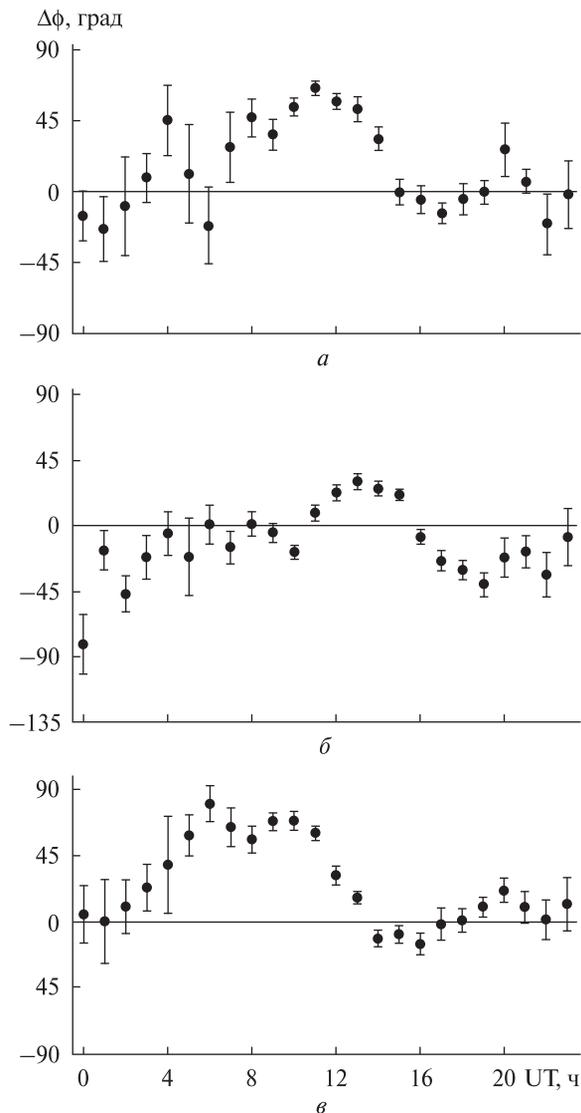


Рис. 13. Суточные вариации разности $\Delta\phi$ позиционных углов эллипсов поляризации пульсаций, измеренных в несопряженных точках на УАС и НЧО в 2010 г.: *a* — март, *b* — июнь, *v* — декабрь

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. Мартовая (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, *b*, *v*). 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-

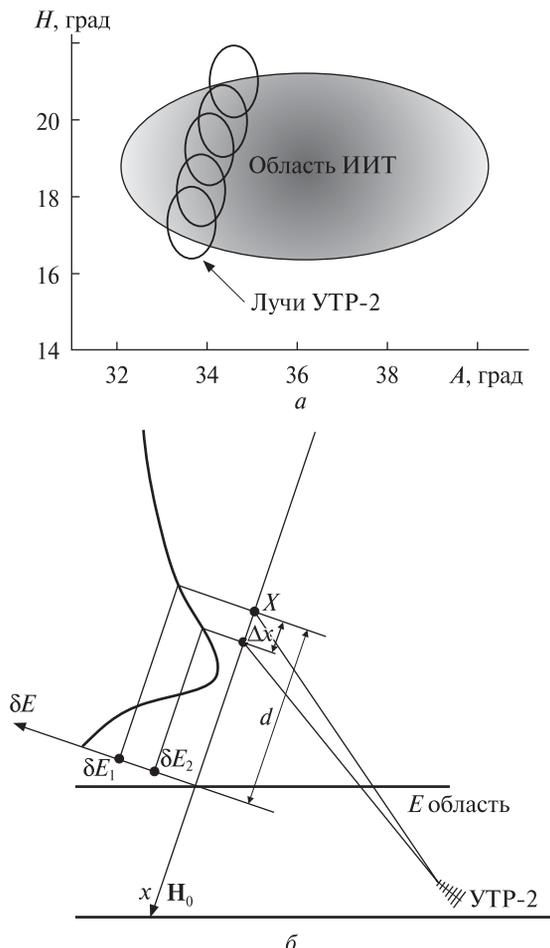


Рис. 14. Схема измерения вариации ДСЧ-сигналов, ракурсно рассеянных искусственными ионосферными неоднородностями, стимулированными НС «Сура»: *a* — взаимное расположение диаграмм направленности лучей радиотелескопа УТР-2 и области искусственной ионосферной турбулентности (*A* — азимут, *H* — угол места),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

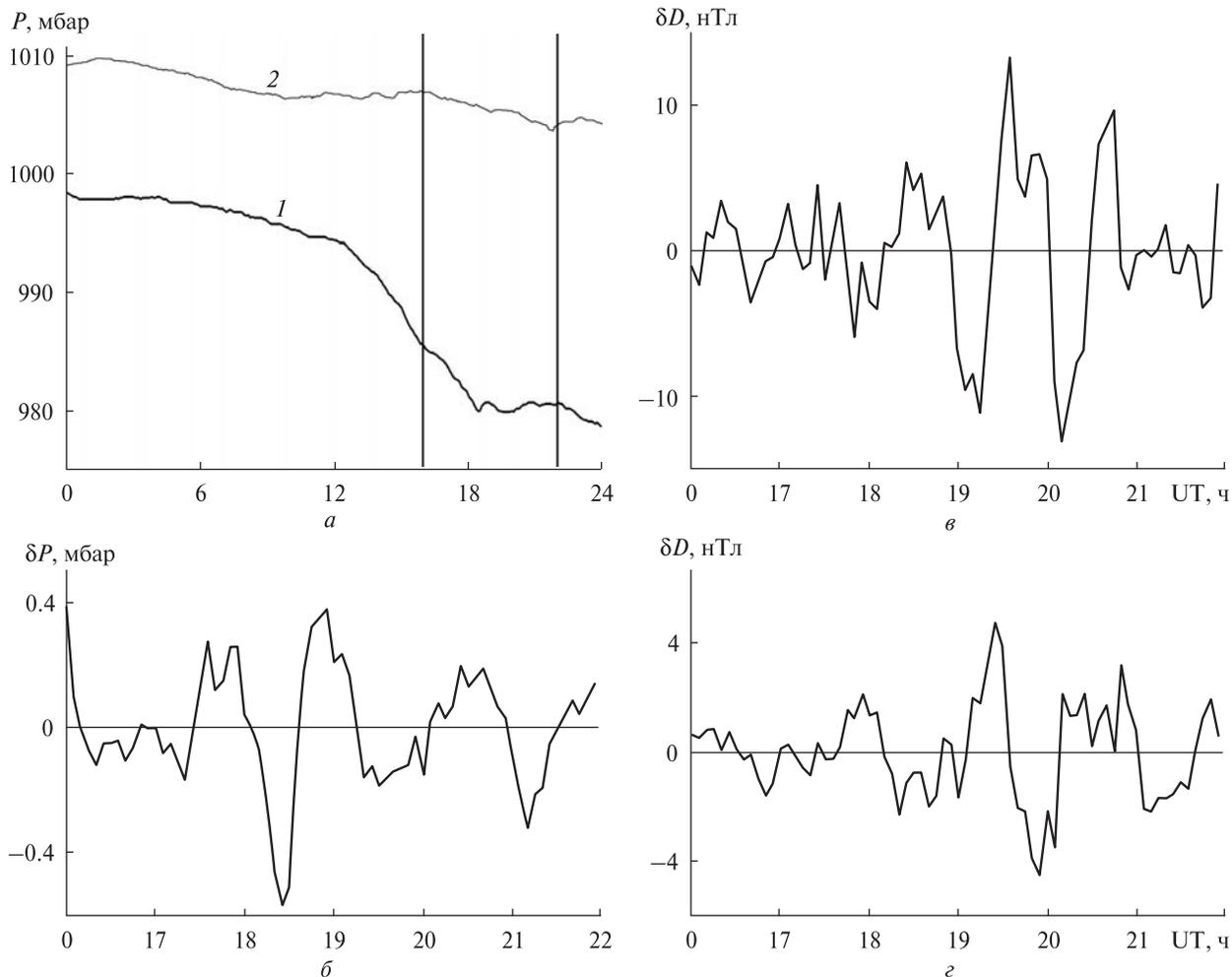


Рис. 15. Вариации приземного давления и составляющих магнитного поля в сопряженных регионах 21 сентября 1999 г.: *a* — давление на УАС и в Милстоун Хилл, *б* — отфильтрованные вариации давления на УАС, *в*, *г* — отфильтрованные вариации *D*-составляющей на УАС и Милстоун Хилл

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 возбуждении 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-

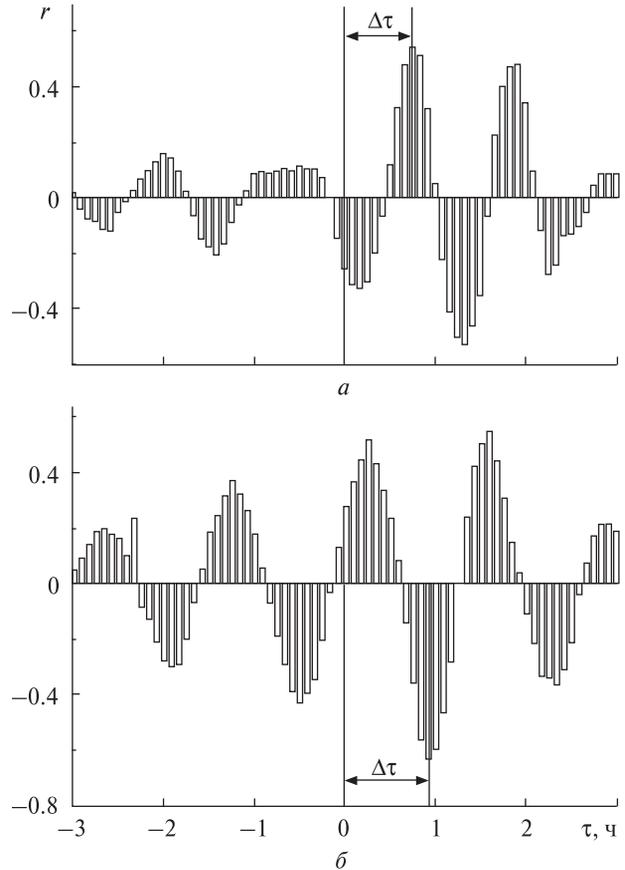


Рис. 16. Взаимные корреляционные функции между вариациями давления и D-составляющей на УАС (а) и Милстоун Хилл (б)

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.

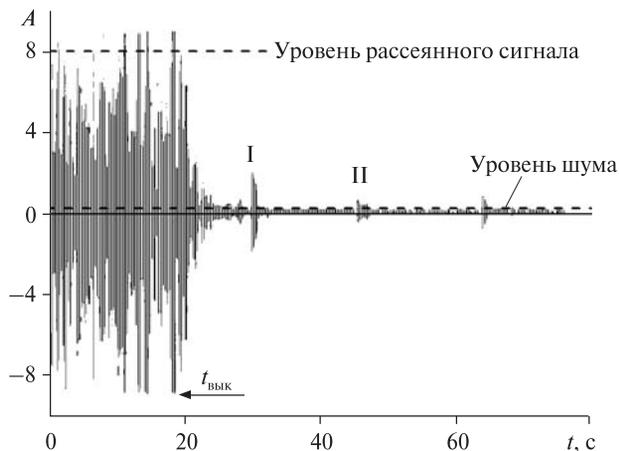


Рис. 17. «Эхо-рассеяние» — периодическое усиление ракурсно-рассеянного сигнала после отключения $t_{\text{вык}}$ излучения нагревного стенда НС «Сура»: I и II — первый и второй эхо-сигналы

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]:

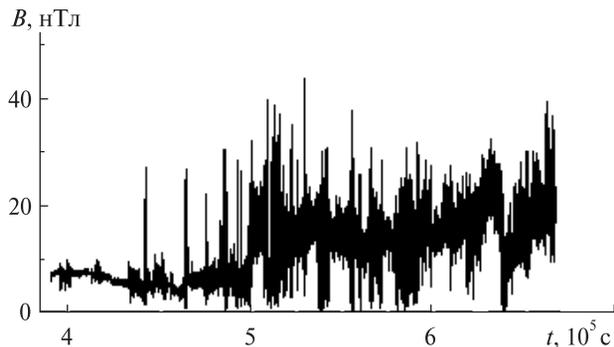


Рис. 18. Пример проанализированных флуктуаций магнитного поля для 15 мая 2010 г.

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-

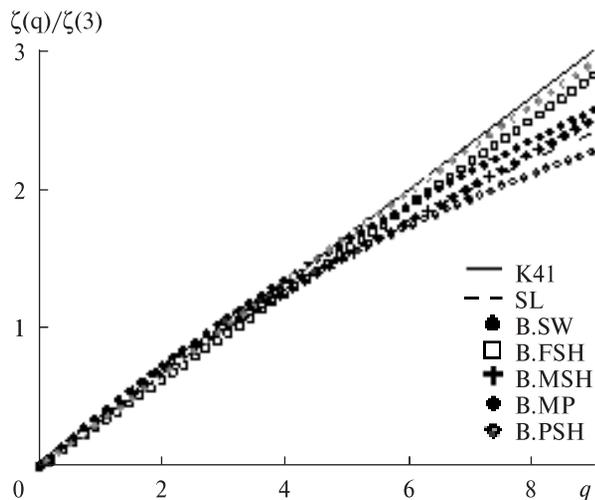


Рис. 19. Отношение экспоненциального значения структурной функции q -го порядка к третьему порядку для 15 мая 2010 г.: K41 — значение рассчитанные по модели Колмогорова, SL — значение рассчитанные по изотропной лог-пуассоновский каскадной модели, B, SW — экспериментальные данные для плазмы солнечного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

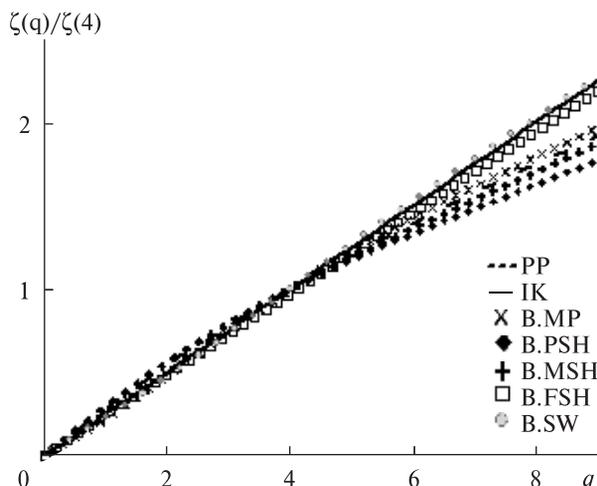


Рис. 20. Отношение экспоненциального значения структурной функции q -го порядка к четвертому порядку для 15 мая 2010 г.: PP — значение рассчитанные по модели Политано — Пукке, IK — значение рассчитанные по модели Ирошникова — Крейчнана, B, SW — экспериментальные данные для плазмы солнечного ветра, B, 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 высыпающихся 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 магнито-сферы 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 Pc3/Pc4 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 Pc3, Pc4 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. Belikov 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., Grymalky 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. Grimalskiy 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. Grimalskiy 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. Grimalskiy 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. Grimalskiy 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. Grimalskiy 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 // *Revs 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.

УДК 629.783(09)

А. В. Дегтярев

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УКРАИНЕ

Приведены результаты анализа работ по созданию и эксплуатации космических и ракетно-космических систем в Украине. Показан эффект от их использования. Сформулированы основные направления проведения дальнейших работ. Отмечена целесообразность внедрения идей государственно-частного партнерства при создании ракетно-космических комплексов в международной кооперации. Предложен возможный вариант реформирования системы управления ракетно-космической отраслью. Рассмотрены основные проблемные вопросы развития ракетно-космической деятельности и указаны пути их решения.

Ракетно-космическая отрасль занимает особое место среди стратегических наукоемких отраслей Украины. Она формирует имидж государства как технологически развитой державы и свидетельствует о том, что государство имеет в машиностроительном комплексе развитый интеллектуальный и научно-технический потенциал, который может эффективно использоваться для развития экономики и повышения обороноспособности страны.

Украина входит в клуб ведущих космических государств мира, который насчитывает не более десяти стран, среди которых США, РФ, страны ЕС, Китай, Индия и другие. Отрасль способна создавать и реализовывать крупномасштабные космические и ракетно-космические проекты как в интересах экономики и обороны Украины, так и в интересах решения глобальных проблем человечества (участие в создании глобальной системы прогнозирования сейсмической активности Земли и предупреждения землетрясений, быстрого реагирования на чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера и другие).

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сегодня можно выделить два основных направления исследований: околоземное и межпланетное [7].

Первое связано исключительно с ближним космосом. К настоящему времени исследование и использование околоземного космического пространства в своем развитии достигло уровня, позволяющего решать множество практических задач, связанных с развитием экономики страны. Мировой рынок создания и запуска КА на околоземные орбиты составляет сегодня 250–300 млрд долларов США. Количество стран, у которых возникает потребность в запусках КА, ежегодно возрастает на 2-3 государства.

Реализация первого направления для нас пока является основной. Речь идет о решении задач по обеспечению Украины спутниковой информацией по результатам зондирования поверхности Земли, космической связью, телекоммуникативным спутниковым вещанием, навигационными услугами, а также модерниза-

ции существующих и разработке новых ракетно-космических комплексов (РКК) [2, 5]. Не менее важной государственной задачей является создание современного ракетного вооружения для Вооруженных Сил Украины с ориентацией на обеспечение окупаемости вложенных бюджетных средств за счет последующего его экспорта.

Так как модернизация существующих и создание новых РКК только за счет государственных средств проблематичны, в качестве одного из основных направлений работ принята разработка комплексов в международной кооперации на долеговой основе [1, 3, 4].

Такой подход отвечает принятому внешнеполитическому курсу Украины в области разработки в сложившихся условиях наукоемкой высокотехнологичной продукции и позволяет уменьшить бюджетную нагрузку на отрасль.

Второе направление — исследование дальнего космоса — связано с созданием:

- новых пилотируемых космических кораблей, постоянно действующих орбитальных станций, с длительным пребыванием экипажей на борту;
- новых тяжелых и сверхтяжелых экологически чистых ракетно-транспортных средств для обеспечения пилотируемых лунных миссий в целях исследования и освоения Луны и в дальнейшем — миссий к Марсу (поэтапно);
- систем защиты Земли от астероидной опасности;
- отработкой эффективных технологий полета за пределами околоземного пространства;
- систем энергообеспечения Земли из космоса;
- нанотехнологий для получения новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Обеспечение исследований дальнего космоса связано с мегазатратами, которые непосильны даже для ведущих космических держав.

В этом направлении Украина планирует свое участие в разработке международных проектов в рамках кооперации с этими странами.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ И РАКЕТНЫХ СИСТЕМ

Космический аппарат «Січ-1» — первый отечественный КА, созданный в независимой Украине. С его помощью было проведено дистанционное зондирование территории Украины. Полученные результаты использованы для оценки состояния почвы и растительного покрова, влажности грунта и состояния озимых культур, контроля динамики наводнения, а также для определения экологически загрязненных зон на территории Украины. На базе второго космического аппарата «Січ-2» была создана космическая система, в состав которой вошли собственно КА, центр управления полетом, а также станции приема информации и комплексы тематической ее обработки. КА «Січ-2» был выведен на орбиту в августе 2011 года ракетой-носителем «Днепр». За год им было проведено фотографирование земной поверхности площадью более чем 4.5 млн кв. км, в том числе 2.5 млн кв. км территории Украины. Полученные снимки переданы заинтересованным министерствам и ведомствам и использованы для контроля за аграрными ресурсами, земле- и лесопользованием, проведения мониторинга чрезвычайных ситуаций и разведки полезных ископаемых.

В стадии завершения находится разработка геостационарного КА «Либідь». Его запуск планируется в 2013 г. ракетой-носителем «Зенит-3SLB» с космодрома Байконур. Находясь в орбитальной позиции 48° восточной долготы КА «Либідь» будет обеспечивать покрытие Центральной и Восточной Европы, Индии, Центральной и Западной Африки и предоставлять услуги в сферах связи, спутникового телевидения и широкополосного доступа в интернет. Планируется, что половина мощности спутника будет использоваться государственными компаниями, вторая половина — сдаваться в аренду иностранным компаниям для проведения передач по своим каналам на территории Украины.

Созданы в международной кооперации комплексы «Морской старт», «Наземный старт»,

«Днепр». В стадии разработки находятся украинско-бразильский комплекс «Алкантара — Циклон-4» и американо-украинская ракета «Антарес». Проведен первый этап проектных исследований по созданию семейства ракет-носителей «Маяк». В истекшем году принято решение о проведении полномасштабных работ по созданию нового ракетно-космического комплекса (РКК) наземного базирования с РН «Маяк-22» [6]. В проектной разработке находятся транспортно-космическая система на базе высотного сверхзвукового летательного аппарата и аэрокосмический комплекс сверхлегкого класса.

Продолжается коммерческая эксплуатация первых трех РКК. С использованием РН «Зенит-3SL» выведены на геопереходные орбиты 32 космических аппарата США, Японии, Италии, Объединенных Арабских Эмиратов, Бразилии и других стран, в том числе в 2012 г. — три КА: «Intelsat-19», «Intelsat-21» и «Eutelsat-W5A», принадлежащие ведущим мировым операторам спутниковой связи.

С помощью РКК «Наземный старт» по состоянию на ноябрь 2011 г. проведено девять успешных запусков КА различных стран. На ГП ПО ЮМЗ изготовлены и отправлены заказчику четыре РН «Зенит-2S» (№ SL33-SL36).

С помощью РН «Днепр» на сегодняшний день было выведено на заданные орбиты более 62 космических аппаратов разных стран. Каждым пуском выводилось от двух до восьми космических аппаратов.

По количеству запусков КА на околоземные орбиты Украина занимает пятое-седьмое места в мире.

Реализация отрасли перечисленных проектов обеспечивает поступление в Украину валюты в объеме 140 — 310 млн долларов США в год. За последние пять лет общий объем валютных поступлений составил более одного миллиарда долларов США. Объем поступлений в бюджет Украины в форме налогов, отчислений и платежей только от ГП «КБ «Южное» составляет примерно 105—135 млн гривен ежегодно.

Однако незначительные объемы бюджетного финансирования, выделяемые ГП «КБ «Южное» в рамках Общегосударственной целевой научно-технической космической программы, не позволяют обеспечивать необходимые темпы развития ракетно-космической деятельности в Украине. Например, на ГП «КБ «Южное» в 2012 г. структура финансирования сложилась таким образом: 43.1 % — финансирование проектов иностранными заказчиками; 18.8 % — получено от российских заказчиков; 33.9 % — составили кредитные средства по проекту «Циклон-4»; 0.9 % — по договорам с украинскими заказчиками, а объем бюджетного финансирования, полученный от ГКА Украины, составил всего лишь 3,3 %. Ожидаемые объемы бюджетного финансирования ГП «КБ «Южное» в 2013 г. — не более 6.6 %.

О ВЫПОЛНЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ПО СОЗДАНИЮ ОТРК «САПСАН»

В современных условиях влияние на обороноспособность государства ракетных вооружений трудно переоценить. Например, наличие у одной из смежных континентальных стран 40—50 пусковых установок с оперативно-тактическими ракетами приводит к изменению стратегического баланса сил в регионе в пользу этой страны*. В этой связи созданию отечественного оперативно-тактического ракетного комплекса «Сапсан» уделяется серьезное внимание. К настоящему времени при поддержке Президен-

* Характерным примером может служить попытка Сирии закупить 18 комплексов «Искандер» в РФ. Использование 36 ракет этих комплексов с их высокой точностью поражения, трехсоткилометровой дальностью и невозможностью перехвата противоракетными средствами позволили бы Сирии поражать по всей территории Израиля жизненно важные военные, экономические и административные объекты. То есть для условий Ближнего Востока такой вид ракетного комплекса является стратегическим оружием. Под давлением США и Израиля этот контракт был отменен Президентом РФ В. Путиным.

та Украины и правительства ГП «КБ «Южное» выполнен этап предпроектных исследований по созданию ракетного комплекса (РК), разработан эскизный проект РК. В рамках эскизного проекта создан проектно-конструкторский задел, позволяющий, исходя из принципа модульности и максимальной унификации тактического и оперативного комплексов на уровне основных систем и агрегатов, создать семейство боевых ракетных комплексов для разных видов войск Вооруженных сил Украины: мобильный грунтовой оперативно-тактический комплекс первой категории (в соответствии с классификацией РКРТ с тактико-техническими характеристиками, отвечающими Договору по РСМ-1); оперативно-тактический ракетный комплекс берегового и корабельного видов базирования; для сухопутных войск — мобильный грунтовой комплекс с крылатыми ракетами, а также ракетные комплексы противовоздушной обороны малой и средней дальности. Согласовано тактико-техническое задание с учетом дополнений на опытно-конструкторскую разработку ОТРК «Сапсан», подготовлена программа по разработке специальных технологий и подготовки производства комплекса «Сапсан». Выполнен подэтап по подготовке организационно-технической документации в обеспечение разработки технического проекта, в том числе откорректированы технические задания, подготовлены проекты договоров на выполнение работ по техническому проекту, в адрес Министерства обороны Украины (МОУ) направлены соответствующие расчетно-калькуляционные материалы. Следующий шаг — выделение МОУ финансовых средств и разработка технического проекта.

ПЛАНЫ СОТРУДНИЧЕСТВА С НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИЕЙ НАУК УКРАИНЫ

Создание новых образцов РКТ неразрывно связано с проведением фундаментальных и прикладных научных исследований. В целях их усиления ГП «КБ «Южное» совместно с прези-

диумом НАНУ разработаны «Перспективный план совместной деятельности ГП «КБ «Южное» и научных структур НАН Украины на период до 2017 года» и Генеральное соглашение о сотрудничестве ГП «КБ «Южное» и НАНУ. Перспективный план утвержден постановлением от 10.10.2012 года, он охватывает 93 темы конкретных исследований по основным научным направлениям. Среди них — общие вопросы проектирования перспективных образцов РКТ, баллистика, аэродинамика, теплотехника, нагрузки и прочность конструкции, новые материалы, технологии и методы контроля, жидкостные и твердотопливные двигатели, системы управления, а также экономика и управление производством.

ГЕНЕРАЛЬНОЕ СОГЛАШЕНИЕ ПО СОТРУДНИЧЕСТВУ С ВУЗАМИ

Для усиления совместных научных и прикладных исследований в области создания современной РКТ, а также подготовки специалистов и научных кадров высшей квалификации, ГП «КБ «Южное» совместно с Министерством образования и науки (МОН Украины) и 25 его вузами разработало и согласовало «Генеральное соглашение между ГП «КБ «Южное» и вузами МОН Украины о совместных исследованиях в сфере ракетно-космической техники». Создан Координационный совет по реализации соглашения. В числе основных его задач — разработка общей стратегии взаимодействия вузов и промышленности, а также разработка рекомендаций по приоритетным направлениям работ. Исследования планируется проводить на основе двухсторонних договоров между ГП «КБ «Южное» и вузами как участниками кооперации по реализации Общегосударственной космической программы и международных коммерческих проектов, на основе позитивных результатов предварительно выполненных проработок.

На повестке дня — подготовка аналогичных документов для проведения исследований совместно с институтами Министерства обороны Украины.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ДАЛЬНЕГО КОСМОСА

На 63-м Международном астронавтическом конгрессе в Неаполе (1—5 октября 2012 г.) Генеральным конструктором РКК «Энергия» В. Лопотой была озвучена «Дорожная карта развития космонавтики», составленная ведущими ракетно-космическими компаниями мира: РКК «Энергия», концерном Lockheed Martin, Mitsubishi Heavy Industry, Astrium и Boeing. В ней предложены два возможных сценария освоения дальнего космоса: «Луна — астероиды — Марс» или «Астероиды — Луна — Марс».

Рано или поздно мировому сообществу придется бороться с астероидной опасностью. От 500 до 1000 массивных астероидов регулярно пересекают траекторию Земли и любой из них может вызвать глобальную катастрофу. Наиболее известным из них является астероид «Апофис». Сегодня ученые решают задачу насколько велик риск столкновения наиболее опасных из них с Землей. При возникновении реальной угрозы государствам, в том числе Украине, необходимо будет переключиться на разработку технологий по изменению орбит астероидов.

Пока что и американские и российские компании занимаются исследованиями возможности полета на Луну и дальше, на Марс с использованием беспилотных аппаратов.

США планируют полеты с использованием ракеты SLS грузоподъемностью 60—70 тонн и космического корабля «Орион». Запуск «Ориона» с использованием этого носителя планируется в 2017—2018 гг.

В РФ в стадии завершения разработки находится новый шестиместный космический корабль, который заменит «Союзы» и будет совершать полеты на МКС, Луну и обеспечивать более длительные полеты. Корабль будет создан к 2018 году. Проработки по созданию сверхтяжелого носителя с грузоподъемностью 65—70 тонн с использованием украинской ракеты-носителя «Зенит» проводятся российской РКК «Энергия» совместно с ГП «КБ «Южное». При проведении

проработок ГП «КБ «Южное» серьезное внимание уделяет обеспечению характеристик сверхтяжелого носителя, необходимых для полетов на Луну и создания лунной инфраструктуры. Это наш приоритет. Так как большая часть составляющих систем и блоков носителя успешно прошла летную отработку, последний может быть создан в течение пяти лет.

Таким образом, РФ при участии Украины может быть также готова к 2017—2018 гг. к полетам на Луну, созданию лунной инфраструктуры и более дальним полетам. Конечно, многое будет зависеть от принятых политических решений и ритмичности финансирования разработки сверхтяжелой РН.

Отдельно следует сказать о сложности обеспечения пилотируемого полета на Марс.

МЕГАПРОБЛЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

При использовании современных («химических») двигателей перелет на Марс будет длиться около двух лет. Осуществив посадку на Марс, необходимо находиться на его поверхности 2—3 недели для проведения исследований. В течение этого срока экспедицию необходимо обеспечивать теплом и энергией. Современные космические корабли, включая МКС, имеют уровень энергетического обеспечения 20 — 30 кВт. Осуществить марсианскую миссию с таким уровнем энергообеспечения практически невозможно. Одним из направлений решения этой проблемы является создание ядерных двигателей мегаваттного класса. Исследования в этом направлении проводятся в России, США, Европе и Китае. Лидером в создании ядерной электродвигательной установки (ЯЭДУ) является Россия. Удельный импульс ЯЭДУ должен возрасти в 20 раз. Стартовая масса марсианского экспедиционного комплекса при использовании ЯЭДУ в сравнении с комплексом на базе «химических» двигателей уменьшится в четыре раза — с 2000 до 500 т.

Для создания такой установки в России на период до 2020 г. запланировано выделение более

чем 0.5 млрд долларов США. Нельзя исключать, что в дальнейшем может быть принята Международная программа разработки ЯЭДУ по примеру Международной программы сотрудничества в сфере управления термоядерным синтезом.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Несмотря на успешный опыт в создании современных образцов РКТ, дальнейшее развитие отрасли наталкивается на необходимость решения ряда проблем системного характера. К их числу следует отнести хроническую нехватку бюджетных средств, выделяемых для обеспечения ракетно-космической деятельности. Из-за экономической нестабильности реальное финансирование составляет примерно 40 % утверждаемых плановых объемов.

Износ технологического и производственного оборудования превышает 50 %, а для некоторых предприятий — 80 %. Среднее время эксплуатации технологической и промышленной баз превышает 35 лет. Это приводит к значительным издержкам при создании новых технологий.

Учитывая перспективные планы создания РКК в международной кооперации, а также плановое задание по созданию оперативно-тактического ракетного комплекса (ОТРК), особую остроту приобретает необходимость модернизации испытательных и производственных мощностей отрасли.

В первую очередь это относится к модернизации и созданию мощностей по разработке и изготовлению жидкостных ракетных двигателей в широком диапазоне тяг, производству и сборке корпусов и сопловых блоков твердотопливных двигателей, а также к модернизации стендовой базы испытаний двигателей.

Необходимо вкладывать средства в создание промышленных мощностей по производству смесевых и баллистических твердых топлив, а также изготовлению эффективных по массе узлов и конструкций из полимерных композиционных материалов.

Имеет место зависимость отрасли от поставок сырья, материалов и комплектующих из других

стран, в первую очередь из Российской Федерации, в том числе стратегических алюминиевого и титанового проката, углерод-углеродных и наноструктурных материалов, что приводит к повышению стоимости разработки.

К этому следует добавить недостаточные темпы реформирования и структурной перестройки системы управления отраслью. Вопросы реформирования отрасли сегодня находятся на уровне дискуссий.

При реализации крупных международных проектов не используются рыночные механизмы, позволяющие уменьшить стоимость разработок, в том числе механизмы государственно-частного партнерства.

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА

Государственно-частное партнерство (ГЧП) определяется как среднесрочные или долгосрочные отношения между государственными и частными секторами, основанные на совместных ресурсах, разделении рисков и объединении профессиональных знаний. Очевидным преимуществом использования ГЧП является уменьшение бюджетной нагрузки при выполнении проектов. Примером эффективно действующей государственно-частной компании может служить итальянская Finmecanica — ведущая европейская корпорация в сфере высоких технологий двойного и военного назначения. В корпорации государству принадлежат 34 % акций. Остальные принадлежат частным компаниям других стран. Участие государства носит стратегический характер и связано, прежде всего, с разработкой стратегических проектов. Менеджмент компании свободен в принятии и реализации тех или иных идей, которые способствуют созданию более конкурентоспособной продукции и расширению ее рынков сбыта.

Попытка внедрить государственно-частное партнерство при создании ракетно-космических комплексов пока что наталкивается на ряд препятствий.

В соответствии с действующим Законом Украины «О государственно-частном партнерстве»

(№ 2404 от 01.07.2010 г.) ГЧП может проводиться лишь в форме договоров между органами государственной власти (или органами самоуправления) и частными партнерами. Возможность создания государственно-частных структур между государственными предприятиями и частными партнерами, как это предусмотрено в европейском законодательстве, исключается. При этом имеют место ограничения для представителей органов государственной власти отвечать по своим обязательствам в рамках ГЧП. Как признают авторы «Концепции инвестиционной реформы», принятой в 2011 году при участии Президента Украины, до сих пор формы государственно-частного партнерства еще не получили своего развития из-за отсутствия практических инструментов. Основная причина этого состоит в том, что логика организации ГЧП предусматривает подготовку профессиональных предложений со стороны государства, а государство сегодня не владеет такими возможностями.

При доработке Закона целесообразно предусмотреть положение, дающее право государственным предприятиям создавать совместные предприятия, базирующиеся на идеях государственно-частного партнерства. При этом должна быть определена государственная собственность, входящая в качестве стартового капитала предприятия, как такая, которая может использоваться для реализации различных бизнес-идей, целью которых является увеличение объемов производства ракетно-космической техники и расширение рынка ее сбыта.

О РЕФОРМИРОВАНИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТРАСЛЬЮ

Во второй половине 2012 — начале 2013 г. в некоторых структурах власти, на межотраслевых конференциях и семинарах начаты дискуссии по возможным вариантам реформирования системы управления оборонными предприятиями и отдельно ракетно-космической отраслью. К сожалению, при аргументации в пользу того или иного варианта реформирования превалирует либо недостаточно комплексный, либо ведомственный подход.

В некоторых предложенных вариантах изменений в системе управления отраслью недостаточно учитываются факторы, которые могут негативно повлиять на успешно функционирующую конкурентоспособную отрасль.

Среди предлагаемых вариантов реформирования есть такие, которые требуют пересмотра действующих государственных и межгосударственных контрактов, в том числе контрактов по созданию ракетно-космических комплексов «Алкантара — Циклон-4», «Антарес», эксплуатации РКК «Морской старт», «Наземный старт», «Днепр» и других.

При анализе того или иного варианта изменений в управлении не учитывается тот факт, что отрасль должны соблюдаться международные обязательства Украины в ракетно-космической сфере в рамках ООН и других организаций, в том числе обязательства по соблюдению международного режима нераспространения ракетных технологий.

Вариант изменения управления, требующий объединения ракетно-космических организаций и предприятий в рамках одной головной организации без их отраслевого структурирования может привести к разбалансированию деятельности. Доказательством этого является попытка РФ сконцентрировать предприятия оборонной промышленности в одном ведомстве, которая провалилась. Сегодня идет обратный процесс. В соответствии с Указом Президента РФ от 21.05.2012 г. предусматривается создание структур, управляющих оборонными предприятиями, таких как Федеральное космическое агентство (подчиненное правительству), Федеральная служба по оборонным заказам (подчиненное правительству), Федеральное агентство по поставкам вооружения, военной техники и материалов (подчиненное Министерству обороны и Президенту РФ) и другие.

В наших условиях для повышения эффективности ракетно-космической деятельности в рыночных условиях целесообразно создать «Ракетно-космический концерн «Южный» (ГП «РКК Южный») в форме холдинга. При такой схеме возможно проведение единой стратегии разви-

тия отрасли с внедрением принципов государственно-частного партнерства через акционирование отдельных предприятий. Однако делать это нужно только при безусловной уверенности в получении требуемых результатов.

ОПЫТ РЕФОРМИРОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

Россия по темпам реформирования отрасли несколько опережает Украину. Основная идея реформирования состоит в корпоратизации и приватизации организаций и предприятий ракетно-космической отрасли с последующим созданием интегральных структур в форме холдингов.

В 1996 году Российским космическим агентством (25 %) и Самарским конструкторским бюро «Прогресс» (25 %) совместно с европейским консорциумом «Арианспейс» (15 %) и французской фирмой «Аэроспасьяль» (35 %) было создано совместное предприятие «Старсем». Франция таким образом получила доступ к российским ракетам-носителям, а Россия — финансовую поддержку и выход на международный коммерческий рынок пусковых услуг. Научно-производственное объединение «Энергия» было преобразовано в ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» с государственной долей капитала 32,22 % (в форме обычных акций), НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко — в ОАО с одноименным названием и государственной долей уставного капитала 80 %.

В настоящее время с учетом заданий, сформулированных в «Стратегии развития космической деятельности РФ на период до 2030 года», предлагается сформировать семь крупных интегрированных структур: две — в интересах разработки ракетно-космической продукции, пять — в интересах создания оборонной продукции.

В ракетно-космической сфере планируется создание:

- ОАО «Российская космическая корпорация», в состав которой будут входить «РКК «Энергия», ОАО «Научно-производственная корпорация «Космические системы монито-

ринга информационного управления и электромеханические комплексы», а также ФГУП «Научно-исследовательский институт машиностроения» и ФГУП «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»;

- ОАО «Российская ракетно-космическая корпорация», в состав которой будут включены шесть крупных предприятий: ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», ФГУП «Конструкторское бюро «Арсенал», ОАО «Красмаш», ФГУП «Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения им. академика Н.А. Пилюгина», ФГУП «Московское опытно-конструкторское бюро «Марс».

Кроме того, в составе этого холдинга будет создан отдельный дивизион двигателестроения: ФГУП «Воронежский механический завод», ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики», ОАО «Протон-ПМ», ОАО «Научно-производственное объединение «Энергомаш».

В ближайшее время предлагаемая схема реформирования будет рассмотрена на заседании правительства РФ.

ВЫВОДЫ

1. Основной задачей ракетно-космической отрасли является разработка и реализация первоочередных экономически целесообразных национальных проектов в космической сфере. Учитывая реальные возможности бюджетного финансирования отрасли в ближайшей и среднесрочной перспективе считать одной из основных задач ракетно-космической деятельности международное сотрудничество с ведущими космическими и ракетостроительными компаниями мира на долевой основе.

2. Целесообразно создать «Ракетно-космический концерн «Южный» (ГП «РКК Южный») в форме холдинга. При такой схеме возможно проведение единой стратегии развития отрасли с внедрением принципов государственно-частного партнерства через акционирование отдельных предприятий, что позволит повысить

эффективность ракетно-космической деятельности Украины в рыночных условиях.

3. В интересах развития ракетно-космической отрасли в рыночных условиях целесообразно:

- дополнить первую статью Закона Украины «О государственно-частном партнерстве» положением, в соответствии с которым юридическое право организации государственно-частных структур разрешается государственным предприятиям;

- предусмотреть в Законе «О государственно-частном партнерстве» при создании государственно-частной структуры определение государственной собственности, входящей в стартовый капитал структуры, как такой, которая может использоваться для реализации бизнес-идей с целью увеличения объемов производства ракетно-космической техники и расширения рынка ее сбыта.

4. В положении «Центра государственно-частного партнерства», создание которого предусмотрено принятой «Концепцией инвестиционной реформы», предусмотреть разработку прозрачного механизма привлечения капитала частных партнеров (государственно-частное партнерство в ракетно-космической сфере должно стать привлекательным предложением государства частным инвесторам).

5. Разработать и подать на утверждение в КМУ «Государственную целевую программу развития экспериментальной и промышленной баз ракетно-космической отрасли», предусмотрев в ней, в частности, создание:

- производств проката и заготовок из алюминиевых и титановых сплавов, углерод-углеродных материалов, новых композиционных и наноструктурных материалов на основе углерод-базальто-стекло-органопластиков, а также новых видов соединения разнородных металлов;

- испытательных и промышленных мощностей ГП «КБ «Южное» и ГП «ПО «ЮМЗ» по разработке и производству жидкостных ракетных двигателей с широким диапазоном тяг;

- производств корпусов и сопловых блоков твердотопливных двигателей на ГП «ПО «ЮМЗ»,

а также производств для их сборки и испытаний на ГП ПО ПХЗ;

- производств смесевых твердых топлив на ГП ПО ПХЗ, а также баллистических топлив в ХКО им. Г.И. Петровского.

6. Обеспечить научное сопровождение проблемных вопросов обновления технологической базы и своевременное решение задач моделирования тепловых, газодинамических и прочностных расчетов турбин, газогенераторов, насосов, камер сгорания узлов автоматики отраслевыми институтами и институтами НАН Украины, как это предусмотрено «Перспективным планом совместной научно-исследовательской деятельности ГП «КБ «Южное» и научных ведомств НАН Украины на период до 2017 года» и «Генеральным соглашением между ГП «КБ «Южное» и ВУЗаами МОН Украины о совместных исследованиях в сфере ракетно-космической техники».

7. Обеспечить стабильное финансирование проектов, предусмотренных Государственной космической программой Украины и Государственной целевой программой создания ОТРК, исключив практику уменьшения реального ежегодного финансирования, а также выделения бюджетных средств в конце года. Оказывать государственную поддержку подготовке и разработке международных ракетно-космических проектов выделением кредитов под государственные гарантии.

1. Гурский А. И., Дегтярев А. В., Кашанов А. Э. Методологический подход к управлению проектами создания ракетных комплексов // Системне озброєння і військова техніка. — 2012. — Вып. 12. — С. 61—68.
2. Дегтярев А. В. Модернизация ракетных комплексов ГП «КБ «Южное» в условиях международной кооперации // Техническая механика. — 2011. — Вып. 4. — С. 45—51.
3. Дегтярев А. В., Кашанов А. Э. Основные направления и особенности модернизации отечественных и зарубежных ракетных комплексов: Науч.-техн. отчет. — 21.17246.102 ОТ. — 2011. — 265 с.
4. Дегтярев А. В., Кашанов А. Э. Методический подход к оценке конкурентоспособности ракетных комплексов // Техническая механика. — 2012. — Вып. 1. — С. 61—63.

5. Дегтярев А. В., Кашанов А. Э., Сюткина С. В. К выбору приоритетных вариантов модернизации ракетно-космических комплексов // *Техническая механика*. — 2012. — Вып. 2. — С. 94—105.
6. Дегтярев А. В., Кушнарев А. П., Кашанов А. Э. и др. Облик и основные характеристики ракетно-космического комплекса с РКН «Маяк-12» и «Маяк-22»: Техн. отчет. — Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2010. — 424 с.
7. Дегтярев А. В., Шеховцов В. С. Основные тенденции и перспективы развития мировой космической деятельности // *Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. техн. ст.* — 2010. — Вып. 1. — С. 3—11.

Стаття надійшла до редакції 07.03.13

О. В. Дегтярев

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗВИТКУ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УКРАЇНІ

Приведено результати аналізу робіт з створення та експлуатації космічних і ракетно-космічних систем в Україні. Показано ефект від їхнього використання. Сформу-

льовано основні напрями проведення подальших робіт. Відзначено доцільність впровадження ідей державно-приватного партнерства при створенні ракетно-космічних комплексів у міжнародній кооперації. Запропоновано можливий варіант реформування системи управління ракетно-космічною галуззю. Розглянуто основні проблемні питання розвитку ракетно-космічної діяльності та вказано шляхи їхнього рішення.

A. O. Degtyarev

THE TOPICAL QUESTIONS OF ROCKET AND SPACE ACTIVITY IN UKRAINE

We present some results of our analysis of development and operation of space and rocket systems in Ukraine. The effect of the application of the results is shown. The main lines for further works are stated. We consider the reasonability of the realization of ideas of state and private partnership for development of space and rocket systems in international cooperation. A way to reform the management system of rocket and space industry is proposed. The main problems of rocket and space activity development and some ways to solve them are considered.

УДК 629.7.05

А. Л. Макаров, А. Г. Меланченко, В. С. Нагорнов

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ОБ ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматриваются вопросы использования систем измерения с распределенным интеллектом в составе перспективных автоматических космических аппаратов (АКА) разработки ГП «КБ «Южное». Представлены результаты анализа применимости стандарта IEEE 1451 для создания бортовых систем измерения АКА. На примере АКА «Сич-2» показаны возможные преимущества реализации предложенного подхода.

ВВЕДЕНИЕ

Управление сложной технической системой, каковой является космический аппарат, невозможно без осуществления контроля параметров системы (движения, состояния подсистем, качества выполняемых функций и т. п.) и наличия обратных связей по контролируемым параметрам. Для контроля параметров используются датчики, или, по терминологии стандарта IEEE1451 [3], измерительные преобразователи (transducers) — «устройства, преобразующие энергию из одной формы в другую, и откалиброванные для минимизации погрешностей преобразования». Помимо собственно датчиков, в состав системы измерения (СИ) входят также устройства согласования по уровню и форме сигнала, или просто согласующие устройства (signalconditioners), регистрации, обработки или передачи данных контроля.

Бортовые системы измерения автоматических космических аппаратов (АКА) традиционно используют датчики, формирующие на выходе электрические сигналы, и состоят из двух подсистем. Первая из них входит в состав системы управления (СУ) АКА и содержит датчики, задействованные в контуре автоматического управления полетом: прежде всего это датчики

параметров движения АКА и его ориентации, а также датчики состояния аппаратуры СУ. Вторая подсистема — это подсистема телеметрических измерений (СТИ), обеспечивающая контроль параметров состояния всех подсистем АКА (включая параметры состояния самой СТИ), параметров окружающей среды, ресурсные параметры АКА. Основным отличием СТИ является то, что обработка ее информации осуществляется не на борту АКА, а на Земле, в Центре управления полетом. Бортовые СИ пилотируемых КА (ПКА), как правило, дополнительно имеют в своем составе специфические подсистемы, такие как подсистема биомедицинского контроля состояния экипажа, подсистема отображения контролируемых параметров на бортовых мониторах и т. п.

Несмотря на функциональное сходство подсистем СИ АКА, их технический облик существенно различается. Датчики СУ, в особенности измерители параметров углового движения АКА, обладают встроенными средствами предварительной обработки измерений, подключаются к СУ через цифровые каналы связи и выполняются резервированными, по крайней мере на уровне интерфейса обмена данными с бортовым компьютером СУ. С другой стороны, в составе СТИ до сих пор используется большое количество индивидуальных датчиков различных типов, каждый из которых подключается к устройству

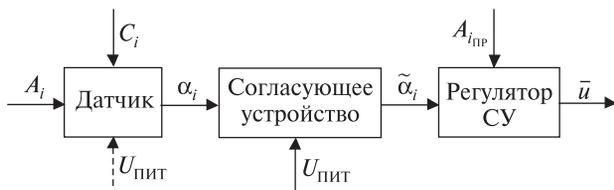


Рис. 1. Архитектура измерительной части системы управления (см. текст)

сбора данных подсистемы отдельной линией связи. Большое количество этих линий и, соответственно, значительная масса кабельной сети СТИ не позволяет резервировать датчики, что неизбежно снижает надежность измерений.

Повышение требований к отказоустойчивости и живучести АКА в целом и СУ в частности требует дооснащения системы управления развитыми средствами обнаружения и локализации отказов (СОЛО). Их работа потребует подключения к СУ значительного количества датчиков, которые в настоящее время контролируются средствами СТИ, что, в свою очередь, предполагает ужесточение требований к датчикам в части сопряжения с бортовым компьютером и резервирования.

Настоящая статья посвящена созданию бортовой СИ для перспективных АКА, обладающей распределенным интеллектом. Рассматривается архитектура основных подсистем СИ АКА — измерительной части СУ и СТИ, представлены результаты анализа возможностей применения стандарта IEEE 1451 для совершенствования СТИ и информационного обеспечения СОЛО. На примере СТИ АКА «Сич-2» будут приведены некоторые количественные показатели, характеризующие эффективность построения СИ с распределенным интеллектом.

АРХИТЕКТУРА ПОДСИСТЕМ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Рассмотрим вначале архитектуру измерительной части СУ. В общем виде ее можно отобразить структурной схемой, представленной на рис. 1. Здесь α_i — электрический сигнал, соответствующий контролируемому параметру A_i , C_i — сигнал калибровки i -го датчика, $\tilde{\alpha}_i$ — сигнал α_i , преобразованный по уровню и форме для согласо-

вания с регулятором СУ, $A_{i\text{пр}}$ — программное (целевое) значение параметра A_i , \mathbf{u} — вектор управления, обычно формируемый замкнутой СУ по рассогласованию между векторами \mathbf{a} и $A_{i\text{пр}}$, $U_{\text{пит}}$ — внешнее питание (для собственно датчиков оно обычно не требуется, а для согласующих устройств необходимо).

Характеристики сигналов α_i изменялись по мере изменения технологии создания регуляторов СУ. Вначале, когда регуляторы представляли собой аналоговые приборы управления, использовались в основном аналоговые датчики с сигналами в виде изменения напряжения в некотором диапазоне (обычно от 0 до 6 В или от -3 до 3 В), пропорционального величине контролируемого параметра (например, угловой скорости), и дискретные датчики с сигналами в виде фиксированных уровней сопротивления, которые имеют контакты электромагнитных реле при их замыкании/размыкании, и интерпретируемых как булевы переменные (единица — прибор включен, ориентир в поле зрения; ноль — прибор отключен, ориентир вне поля зрения). Каждый датчик подключался к регулятору по отдельной двух- или трехпроводной линии связи.

Затем, когда регуляторы СУ стали создаваться по технологии дискретных аппаратно-реализованных автоматов, широкое распространение получили датчики с импульсно-кодовым выходом, пришедшие на смену чисто аналоговым датчикам. Согласующие устройства таких датчиков обеспечивали формирование сигнала $\tilde{\alpha}_i$ в виде последовательности импульсов, частота следования которых была пропорциональна величине контролируемого параметра. Эта последовательность поступала на реверсивный счетчик на входе регулятора, обеспечивающий подсчет количества импульсов, поступивших в регулятор за фиксированный интервал времени, по которому и вычислялся аргумент управления. Импульсно-кодовые датчики обладали существенно более высокой помехозащищенностью по сравнению с аналоговыми датчиками, и применялись даже после перехода к программно-реализованным регуляторам на базе бортовых компьютеров.

Вместе с тем импульсно-кодовые датчики требовали использования множества радиаль-

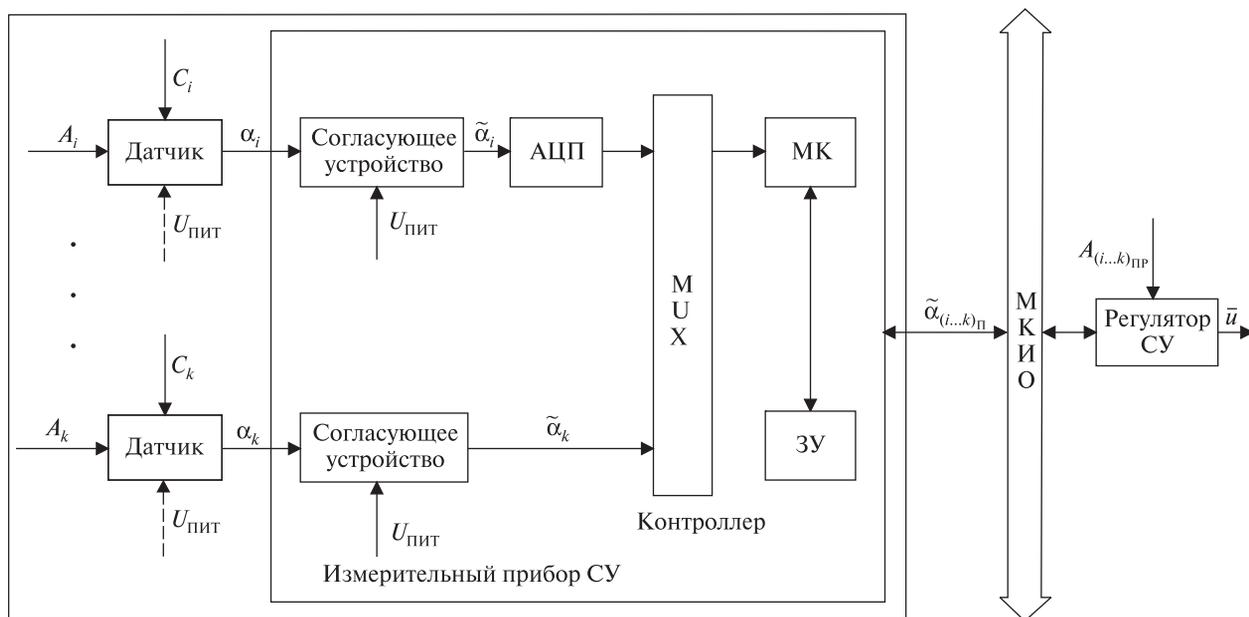


Рис. 2. Архитектура модернизированной измерительной части системы управления (АЦП — аналого-цифровой преобразователь, МУХ — мультиплексор, МК — микроконтроллер, ЗУ — запоминающее устройство, МКИО — мультиплексный канал информационного обмена, — информационный пакет, содержащий оцифрованные и преобразованные значения сигналов $\alpha_{(i...k)П}$, формируемых датчиками $i...k$, остальные обозначения см. на рис. 1)

ных линий связи с бортовым компьютером, а последний должен был комплектоваться развитым устройством ввода-вывода для поддержки интерфейса датчиков. Все это приводило к неудовлетворительным показателям массы и потребляемой мощности СУ в целом. Ситуация изменилась во второй половине восьмидесятых годов прошлого века после разработки и внедрения в космической технике стандартов, определяющих последовательные каналы обмена данными с магистральной (шинной) топологией, таких как Mil-Std-1553B (ГОСТ 26765.52-87) и RS-485 (ГОСТ 18145-81). Поддержка этих стандартов потребовала дооснащения датчиков СУ специальными контроллерами, обеспечивающими форматирование данных измерений в соответствии с требованиями стандартов и обмен с бортовым компьютером. В дальнейшем те же контроллеры стали использовать и для предварительной обработки результатов измерений (фильтрация аномальных значений, преобразование координат и т. п.). Кроме того, контроллеры измерительных приборов СУ стали исполь-

зоваться в качестве локальных устройств сбора и обработки информации низкоуровневых датчиков, встроенных в приборы и характеризующих их состояние (питание, температура и т. п.). Такое изменение архитектуры измерительной части СУ позволило существенно повысить надежность информационного обмена между измерительными приборами и бортовым компьютером, сократить количество линий связи между ними и, тем самым, заметно снизить массу СУ. Структурная схема модернизированной измерительной части СУ представлена на рис. 2.

Однако эти новации практически не затронули архитектуру СТИ, структурная схема которой представлена на рис. 3.

В первых моделях СТИ автоматических КА сбор информации осуществлялся только от отдельных датчиков; ЦТМИ стала использоваться значительно позже, после появления бортовых компьютеров. В настоящее время именно ЦТМИ составляет основной объем данных, проходящих через СТИ, однако количество отдельных датчиков на борту АКА, подключаемых к СТИ собст-

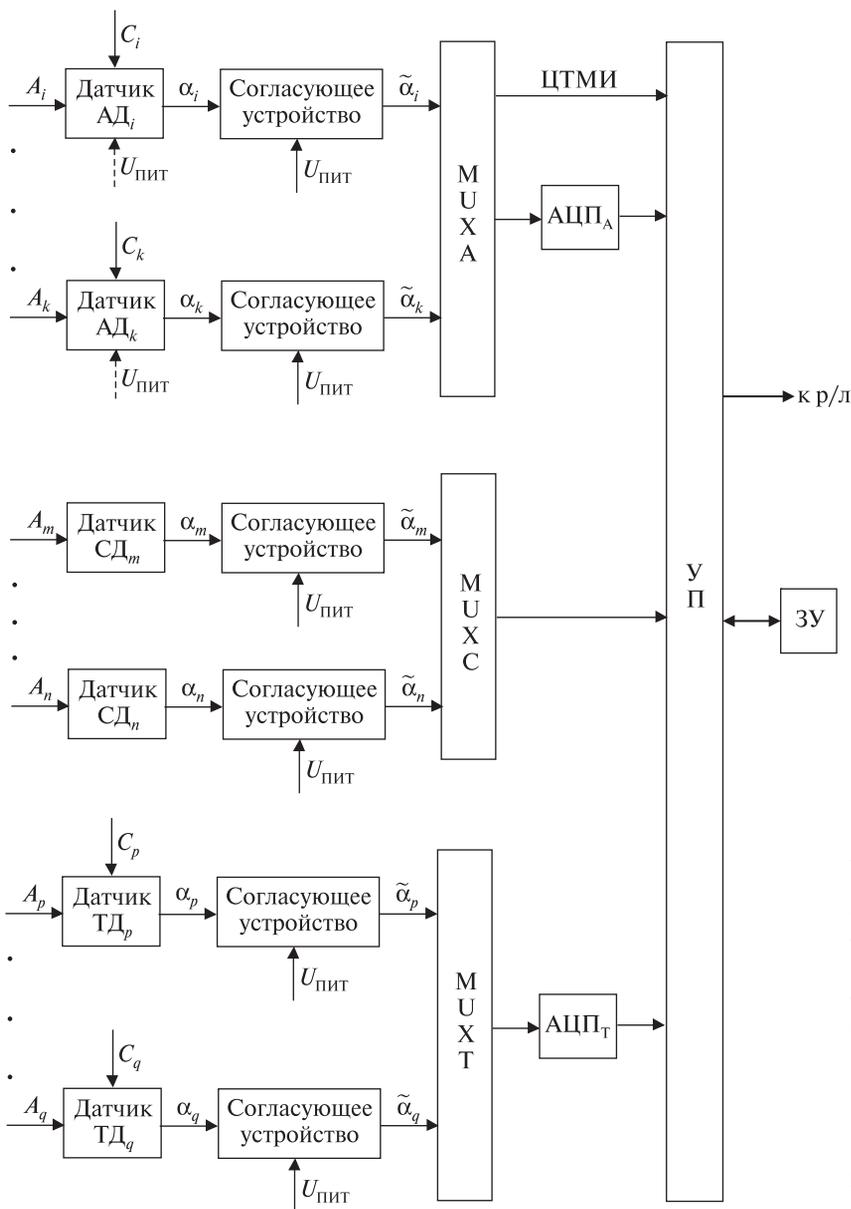


Рис. 3. Архитектура системы телеизмерений (АД — аналоговый датчик, СД — сигнальный датчик, ТД — температурный датчик, МУХА ... МУХТ — мультиплексоры соответствующих датчиков, АЦПА ... АЦПТ — аналого-цифровые преобразователи соответствующих датчиков, ЦТМИ — цифровая телеметрическая информация, УП — устройство пакетирования информации, р/л — радиолиния передачи телеметрии, остальные обозначения см. на рис. 2)

венными линиями связи, по-прежнему остается достаточно большим (десятки — сотни). Для уменьшения длины (и массы) этих линий связи на «больших» КА применялось каскадирование мультиплексоров, принимающих информацию датчиков различных типов. Для современных малых КА этот способ неэффективен, поскольку экономия массы линий связи компенсируется возрастанием массы мультиплексоров. Соответственно для традиционной архитектуры СТИ

сохраняются проблемы низкой помехозащищенности линий связи с датчиками и сложности резервирования последних, что ограничивает возможности использования информации таких датчиков для решения задач СОЛО.

Решение задачи совершенствования архитектуры СТИ в направлении повышения достоверности измерений при одновременном уменьшении массы подсистемы видится в реализации концепции распределенного интеллекта на осно-

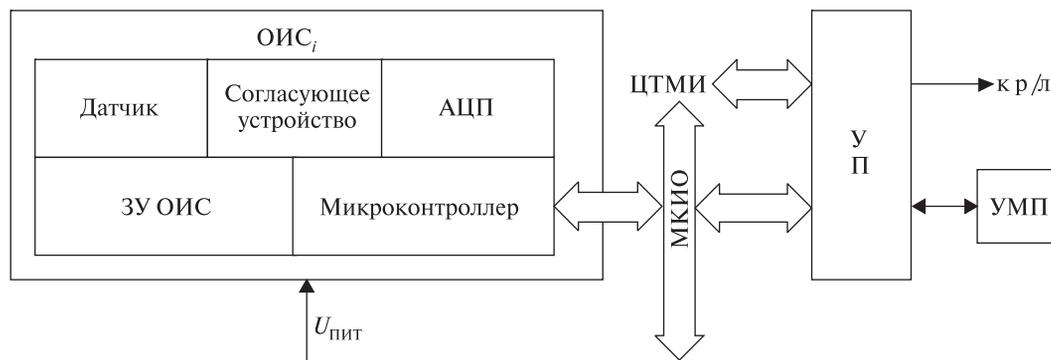


Рис. 4. Архитектура СТИ с распределенным интеллектом (ОИС_{*i*} — однокристалльная измерительная система, УМП — устройство массовой памяти, остальные обозначения см. на рис. 2, 3)

ве использования стандарта IEEE 1451. Этот вопрос будет рассмотрен в следующей части статьи.

АРХИТЕКТУРА СТИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ НА БАЗЕ СТАНДАРТА IEEE 1451

Целью разработки стандарта IEEE 1451 фактически является определение общего набора правил, команд и структур данных, обеспечивающих подключения датчиков к СИ с использованием различных каналов связи и соответствующих стандартных протоколов связи «датчик — микропроцессор» в формате электронных таблиц измерительных преобразователей. Ключевым понятием стандарта является «интеллектуальный датчик» (smart sensor) — датчик, выполняющий, помимо корректного представления контролируемой величины, некоторые функции, направленные на упрощение интеграции датчиков в сетевое окружение.

Появление интеллектуальных датчиков обусловлено прогрессом микроэлектроники, в частности переходом к применению пьезоэлектрических, оптоэлектронных и других датчиков, основанных на полупроводниковых технологиях. Полупроводниковые датчики используют эффекты зависимости электрических характеристик транзисторов от температуры, освещенности, давления, напряженности магнитного поля и других физических величин. С другой стороны, применение полупроводниковых датчиков позволяет интегрировать их с микроконтроллерами, в результате чего создаются специализи-

рованные однокристалльные информационные системы — интеллектуальные датчики.

Интеграция датчика с микроконтроллером позволяет решить две основные задачи — упростить интеграцию датчиков в систему измерения и компенсировать погрешности измерения в самом датчике. Эти задачи решаются путем перераспределения функций СТИ таким образом, чтобы датчики можно было подключать непосредственно к входу УП, аналогично ЦТМИ, как показано на рис. 4.

Такая архитектура предполагает, что датчики, преобразованные в однокристалльные измерительные системы, выдают информацию в УП в цифровом виде через мультиплексный канал информационного обмена после выполнения всех необходимых операций калибровки и предварительной обработки. Данные, необходимые для предварительной обработки измерений, хранятся локально в ЗУ ОИС, а общая (массовая) память СТИ используется только для хранения сформированных в УП пакетов информации ОИС и пакетов ЦТМИ. Подключение ОИС непосредственно к МКИО СТИ существенно упрощает задачу модернизации подсистемы в процессе экспериментальной отработки КА и расширяет возможности применения подсистемы в различных проектах.

Разработка стандарта IEEE 1451 была начата в 1990-е годы Институтом инженеров по электротехнике и электронике и Национальным институтом стандартов и технологии США. На

ретным форматом данных, сведения о котором хранятся в ЭТД. Сформированный пакет через ФИН передается в ППС по командному запросу последнего. Сведения о допустимых для данного ИМД запросах также содержатся в ЭТД. Кроме того, в соответствии со стандартом ИМД должен иметь два 32-разрядных регистра состояния, в которых хранятся данные о состоянии ОИС. Эти данные также могут быть считаны по командному запросу ППС. Стандарт допускает также возможность самостоятельного формирования запросов в ИМД для информирования ППС о потенциальных проблемах ОИС.

ППС фактически является шлюзом между интеллектуальными датчиками и внешней сетью. Он обеспечивает инвариантность СТИ по отношению к типу используемой внешней сети. Стандарт IEEE 1451 не определяет спецификацию соединения ППС с внешней сетью, что позволяет разрабатывать различные модификации ППС и интегрировать СТИ в различные сетевые окружения.

ЭТД хранится, как правило, в энергонезависимой памяти ИМД и содержит информацию о датчике, соединенном с ИМД и о реализации ФИН данного ИМД. Стандарт IEEE 1451.0 определяет широкую номенклатуру данных, хранимых в ЭТД, что позволяет использовать различные типы датчиков. В общем случае ЭТД должна содержать всего четыре поля: метаданные (уникальный идентификатор данного ИМД

и сведения о датчиках, если к ИМД подключено более одного датчика), данные измерительного преобразователя (тип датчика, физическая единица его выходной информации, диапазон ее изменения, тип цифрового представления информации датчика, постоянные времени инициализации датчика и формирования выходной информации), наименование измерительного преобразователя (имя датчика, присваиваемое пользователем СТИ), и параметры ФИН данного ИМД. Дополнительно в состав ЭТД могут быть включены данные о калибровке датчика, его передаточной функции, и другая информация, определяемая изготовителем датчика. Таким образом, ЭТД представляет собой стандартизованный инструмент определения свойств различных датчиков, что позволяет разработчикам программного обеспечения СТИ использовать один и тот же код при изменениях состава и количества датчиков, подключаемых к СТИ в различных проектах.

Стандарт IEEE 1451.2 определяет ФИН как 10-проводный тактируемый последовательный интерфейс, аналогичный последовательному синхронному периферийному интерфейсу SPI. Назначение линий связи приведено в таблице. Тип используемого соединителя стандартом не регламентируется. Как видно, стандарт не предусматривает явным образом резервирования линий интерфейса, однако не исключают его. Учитывая сформулированную выше цель ис-

Сигнальные линии и линии управления физического интерфейса по стандарту IEEE 1451.2
 [<http://www.edtn.com/embapp/emba041.htm>]

Линия	Источник	Приемник	Функция
DIN	ППС	ИМД	Передача адреса и данных из ППС в ИМД
DOUT	ИМД	ППС	Передача данных из ИМД в ППС
DCLK	ППС	ИМД	Тактирование данных в линиях DIN и DOUT по переднему фронту
NIOE	ППС	ИМД	Сигнализация активности передачи данных и разделение кадров данных
NTRIG	ППС	ИМД	Стартовый/стоповый сигналы
NACK	ИМД	ППС	Квитирование стартового/стопового сигналов и передачи данных
NINT	ИМД	ППС	Используется ИМД для запроса обслуживания от ППС
NSDET	ИМД	ППС	Используется ППС для обнаружения наличия ИМД на интерфейсе
POWER	—	ИМД	Питание напряжением (5 ± 0.2) В постоянного тока
COMMON	—	ИМД	Общий

пользования информации СТИ для решения задач СОЛО, резервирование линий интерфейса представляется необходимым.

Однако с учетом даже однократного резервирования количество линий ФИН возрастает до 20, что делает его применение нерациональным. Учитывая наличие микроконтроллеров на обоих концах ФИН (ИМД и ППС), представляется целесообразным реализовать ФИН в виде асинхронного полудуплексного интерфейса типа RS-485 на базе унифицированных асинхронных приемопередатчиков, которые физически входят в состав большинства современных микроконтроллеров. Если при этом в качестве протокола использовать протокол YSSP, применяемый для обмена информацией между СУ и смежными подсистемами АКА, то отпадает необходимость использования отдельных сигнальных линий для управления процессом обмена данными, так как протокол YSSP обеспечивает управление с помощью специальных запросов.

С учетом изложенного количество линий связи ИМД с ППС может быть сокращено до трех (прямой и инверсный дифференциальный вход/выход и общий), а с учетом резервирования — до шести. Что касается линии питания ИМД (и ОИС в целом), то стандарт IEEE 1451.2 допускает подачу питания как через интерфейс связи ИМД с ППС (этот вариант показан в таблице), так и по отдельной линии от внешнего источника питания. При использовании предлагаемого интерфейса типа RS-485 организация питания ОИС через интерфейс потребует введения дополнительно двух линий (положительной и отрицательной полярности), поскольку использование на борту АКА однополярного питания относительно общего провода нежелательно с точки зрения электромагнитной совместимости.

Для питания ОИС, встроенных в электрические подсистемы или приборы АКА, предпочтительным представляется использование вторичных источников питания, входящих в состав соответствующих подсистем. ОИС, обеспечивающие контроль параметров конструкции АКА (прежде всего температуры), целесообразно запитывать от ППС (УП СТИ) через интерфейсные кабели RS-485. Ниже будет рассмотрено

на реализация фрагмента СИ с распределенным интеллектом на примере контроля параметров сканера среднего ИК-диапазона (ССИК), входящего в состав полезной нагрузки АКА «Egypt-Sat-1» и «Сич-2».

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ НА ПРИМЕРЕ АКА «СИЧ-2»

Состояние и режимы работы ССИК [1] на борту АКА «Сич-2» контролируется тремя сигнальными и пятью температурными датчиками. Сигнальные датчики, в качестве которых использовались незапитанные контакты электромагнитных реле, обеспечивали контроль наличия включения питания ССИК, включения основного или резервного комплекта системы стабилизации температуры оптико-механического блока прибора. Резервирование сигнальных датчиков не предусматривалось. Каждый датчик подключался к соответствующему входу мультиплексора (на рис. 3 посередине) с помощью двухпроводной линии связи; всего для контроля сигнальных параметров состояния ССИК использовалось шесть проводов.

Для контроля температуры ССИК использовалось пять термометров сопротивления ТМ-232: три из них контролировали температуру оптико-механического блока сканера, а два других — температуру каждого из двух электронных блоков обработки сигналов. Размеры термометра сопротивления ТМ-232 в плане — 10 × 20 мм. Резервирование температурных датчиков также не предусматривалось. Каждый датчик подключался к соответствующему входу мультиплексора (на рис. 3 внизу) с помощью трехпроводной линии связи; всего для контроля температуры ССИК использовалось 15 проводов. Измерение температуры обеспечивалось с погрешностью ±3 % (примерно 1.5 °С).

Вместо термометров сопротивления ТМ-232 целесообразно использовать полупроводниковые датчики температуры типа TMP05 [http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/.pdf], серийно производимые компанией AnalogDevices, США, и совместимые со стандартом IEEE 1451. Эти датчики выпускаются в

миниатюрных корпусах Sc70 (размеры в плане 2×2.1 мм), обладают высокой точностью (от 1.0 °С в диапазоне 70 °С до 0.3 °С в диапазоне 25 °С), совместимы по уровням выходных сигналов (CMOS/TTL) с большинством современных микроконтроллеров и допускают последовательное подключение нескольких датчиков к одному контроллеру.

На выходе такой датчик формирует последовательности импульсов высокого уровня Т1 с постоянной длительностью и низкого уровня Т2 с переменной длительностью, которая пропорциональна измеряемой температуре. Длительность импульсов Т1 и Т2 можно подсчитать таймером-счетчиком, который входит в состав практически любого микроконтроллера, после чего температура вычисляется программно по формуле вида

$$T = K_1 + K_2 \frac{\tau_1}{\tau_2},$$

где T — измеряемая температура, τ_1 и τ_2 — измеренная длительность импульса Т1 и Т2 соответственно, K_1 и K_2 — индивидуальные калибровочные коэффициенты датчика, которые хранятся в его локальной памяти.

Датчики TMP05 последовательно подключаются ко входу микроконтроллера, реализующего функции ИМД ССИК, который будет принимать результаты всех температурных измерений прибора. Выход микроконтроллера используется для запуска измерений температуры цепочкой датчиков. Измерение температуры начинается после приема первым в цепочке температурным датчиком стартового импульса с выхода микроконтроллера. Стартовый импульс ИМД поступает на вход CONV/IN датчика. Первый температурный датчик после приема стартового импульса осуществляет измерение температуры, и результат измерения в виде последовательности импульсов Т1 и Т2 пересылает на вход CONV/IN второго датчика. После импульсной последовательности на этот же вход второго датчика первый датчик посылает стартовый импульс для начала измерения температуры вторым датчиком. Таким образом, вход CONV/IN датчика выполняет две функции: он служит для приема импульсной последовательности от предыдущих

датчиков и для приема стартового импульса для проведения собственных измерений. При последовательном подключении каждый температурный датчик, за исключением первого, выступает в качестве буфера для сигналов температурных измерений от стоящих перед ним датчиков. После того как датчик TMP05 передаст ИМД последовательность результатов измерений других датчиков, он добавляет в конец этой последовательности свои результаты измерений. После импульсной последовательности результатов измерений всегда следует стартовый импульс. В итоге на вход микроконтроллера поступают результаты измерений от температурных датчиков со стартовым импульсом от последнего датчика в конце последовательности.

Взамен ранее применявшихся сигнальных датчиков целесообразно использовать оптопары с логическим выходом, например типа HCPL2611 производства компании Fairchild, США, которые достаточно широко используются в бортовом оборудовании АКА «Сич-2». Такие сигнальные датчики подключаются к микроконтроллеру СТИ, вновь вводимому в состав ССИК, который будет формировать готовые телеметрические пакеты с информацией о состоянии датчиков. В итоге необходимость подвода к каждому датчику отдельных линий от коммутаторов исключается, вся информация о состоянии датчиков собирается в приборе, и по одной цифровой линии интерфейса RS-485 передается в систему измерения.

Таким образом, для контроля параметров состояния ССИК потребуется не 21, а всего 6 проводов, при этом будет обеспечено дублирование линий связи, что позволит повысить достоверность измерения и использовать информацию датчиков СТИ для информационного обеспечения СОЛО.

Для измерения малых токов в тех приборах АКА, где это необходимо (например, для контроля мощности выходного сигнала в радиопередающих устройствах), вместо используемых в настоящее время аналоговых датчиков различных типов также целесообразно перейти к применению полупроводниковых датчиков, таких как датчики тока серии MAX471 со встроенным

шунтом и усилительной схемой производства компании Maxim-Dallas, США.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГПКБ «Южное» имеет достаточно большой опыт применения полупроводниковых датчиков для создания систем измерения АКА. Однако такие датчики до последнего времени применялись преимущественно в составе измерительной части СУ [2]. Применение полупроводниковых датчиков носило несистематический характер, т. е. датчики подключались к мультиплексорам СТИ индивидуальными линиями связи аналогично «традиционным» датчикам, что не позволяло реализовать их потенциальные преимущества. Более того, такая несистематичность сдерживает распространение полупроводниковых датчиков, поскольку каждый датчик представляет собой функционально более сложное устройство. Например, температурный датчик ТМР05 имеет пять контактов и требует питания напряжением 3—5 В постоянного тока, тогда как «традиционный» температурный датчик ТМ232 имеет всего два контакта и питания не требует (кроме интервала опроса).

С другой стороны, как было показано выше, применение системы полупроводниковых датчиков в соответствии со стандартом IEEE 1451 позволяет существенно повысить эффективность системы измерения АКА. Повышение эффективности СИ при этом достигается как с точки зрения улучшения физических показателей (прежде всего, за счет уменьшения массы кабельной сети СТИ — в рассмотренном примере в семь раз без учета резервирования), так и с точки зрения улучшения функциональных показателей (прежде всего, повышения точности и достоверности измерения). Это, в свою очередь, позволяет упростить интеграцию СТИ и СОЛО, и в конечном итоге создает предпосылки для повышения уровня отказоустойчивости АКА и автономности его функционирования.

1. Система «Січ-2». Космический аппарат МС-2-8. Сканер среднего ИК-диапазона. Документ контроля интерфейсов. MS2 CON ICD 006 03. ГНИП «Конэкс», 2007. — 37 с.
2. Пат. 37505 С2 Україна, МПК (2002) G 01 R 31/02. Електромагнітна система формування керуючих моментів космічного апарату / Большакова І. А., Гладілін В. С., Дмитрієв Б. В. і др.; Заявник і власник патенту — Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля. — № 9904 2336; Заявл. 24.04.1999; Опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.
3. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators — common functions, communication protocols, and transducer electronic data sheet (TEDS) formats, IEEE 1451.0-2007 Standard, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1451.0-2007.html>.
4. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators — transducer to microprocessor communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats, IEEE 1451.2 Standard, <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1451.2-1997.html>.

Стаття надійшла до редакції 29.03.13

О. Л. Макаров, О. Г. Меланченко, В. С. Нагорнов

ПРО ОДИН НАПРЯМОК УДОСКОНАЛЕННЯ БОРТОВИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Розглядаються питання використання систем вимірювань з розподілим інтелектом у складі перспективних автоматичних космічних апаратів (АКА) розробки ДП «КБ «Південне». Представлено результати аналізу застосовності стандарту IEEE 1451 для створення бортових систем вимірювань АКА. На прикладі АКА «Січ-2» показано можливі переваги реалізації запропонованого підходу.

A. L. Makarov, A. G. Melanchenko, V. S. Nagornov

ONE APPROACH TO IMPROVEMENT OF SPACE- CRAFT ON-BOARD MEASUREMENT SYSTEMS

We consider some questions of the use of measurement systems with distributed intelligence on-board advance spacecrafts developed at the Yuzhnoye SDO. Some results of an analysis of IEEE 1451 standard applicability to design spacecraft on-board measurement systems are presented. Based on the example of the Sich-2 spacecraft, some possible advantages of the proposed approach implementation are shown.

УДК 629.7.054

В. В. Карачун, В. Н. Мельник, М. Ф. Калинина

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

ГИПЕРЗВУКОВОЙ ПРОРЫВ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ

Анализируется состояние развития в мире гиперзвуковых технологий, перспективы в этой сфере для решения задач освоения космоса, вооруженной сфере, антитеррористических мероприятий и т. п. Обращается внимание на сверхжесткие эксплуатационные условия, проблемы навигации и управления движением.

ВВЕДЕНИЕ

Реалии гиперзвуковой летной эксплуатации убедительно доказывают, что упруго-напряженное состояние элементной базы приборов инерциальной навигации приводит к появлению возмущающих моментов, воспринимаемых бортовой аппаратурой как полезный сигнал. Это порождает особенности динамики ЛА со всеми вытекающими последствиями нештатного проявления девиации, а в некоторых случаях и дрейфа, оси фигуры инерциальных сенсоров.

Сверхзвуковые крылатые ракеты. Гиперзвуковое оружие. Аналитики и специалисты утверждают, что страна, которая сможет первой в мире обеспечить серийное производство высокоточных гиперзвуковых ракет, создаст тем самым для себя серьезное военное стратегическое преимущество в мире. Дело в том, что ракеты, летящие со скоростью 7 М, практически неуязвимы для современных средств ПВО, сами же способны уничтожать защищенные по последнему слову техники не только наземные, но и подводные объекты. По своему потенциалу гиперзвуковое оружие сравнимо только с тактическими ядерными боеприпасами [<http://www.cnews.ru/news/tpp/print.shtml?2012/07/02/494977>].

Россия и Индия в настоящее время уже тестируют совместно разработанную сверхзвуковую крылатую ракету «Брамос», которая летит со скоростью, в два раза превышающей скорость

звука. В завершающей фазе находится также новая ее модификация «Брамос-2», которая будет гиперзвуковой и достигнет скорости 7 М. Подобного оружия пока нет ни в одной стране мира. Эта ракета может стартовать с морской, наземной и воздушной платформ. Летные испытания планируются уже в 2017 г.

Россия успешно испытала гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель на водородном топливе еще в 1983 г. При испытаниях опытного образца в Казахстане скорость полета ракеты составила 6.4 М. Следует помнить, между прочим, что гиперзвуковое оружие на базе ГПВРД корнями своими уходит в недалекое прошлое феноменальных достижений советских КБ в области гиперзвукового движения.

На своей экспериментальной ракете ГПВРД Х-51 «Вэйврайдер» (Waverider), американцам удалось эти проблемы успешно решить. Таким образом, ракета Х-51 без труда достигала скорости в 6 М. Опытный гиперзвуковой аппарат Х-43 даже превысил этот показатель. Его скорость составила 10 М.

Первые в мире летные испытания ГПВРД состоялись в последние дни существования СССР. Пальма первенства в создании действующей модели двигателя этого типа также принадлежит СССР. Основную часть работ в этой области провел ЦИАМ им. Л. И. Баранова. Летящая лаборатория для испытаний ГПВРД создавалась на основе зенитной ракеты 5В28 ЗРК С-200 и получила название «Холод». Вместо боевой час-

ти в ракету встраивались емкость для жидкого водорода, системы управления и сам двигатель Э-57. Первое испытание состоялось 28 ноября 1991 года на полигоне Сары-Шаган в Казахстане. В ходе испытаний была достигнута скорость 1855 м/с. В 1998 году испытания летной лаборатории проходили по контракту с НАСА [Новости космонавтики: 6—12 июня 2012 г. О. 489].

В качестве альтернативы баллистическим ракетам США разрабатывают гиперзвуковые летательные аппараты (ГЗЛА) в виде крылатой ракеты, т. е. с собственным двигателем, обычно ГПВРД, или в виде планирующего снаряда, гиперзвуковую скорость которому сообщают маршевые ступени обычных баллистических ракет. Так, разрабатываемая ныне в США противоракета SM-3 «Блок ПА» (SM-3 Block PA) чаще всего упоминается в связи с модернизацией американской ПРО. Она, подобно предыдущим модификациям SM-3, будет принята на вооружение системы ПРО морского базирования «Иджис» (Aegis). Особенностью «Блок ПА» является заявленная способность перехвата на определенном участке траектории межконтинентальных баллистических ракет, что послужит основанием для включения системы «Иджис» в состав стратегической противоракетной обороны США.

Американские военные объявили в 2010 г., что на базе SM-3 «Блок ПА» будет также создана ударная система большой дальности под кодовым названием «Эйре Лайт» («Are Light»). Предполагается, что маршевые ступени противоракеты выведут на гиперзвуковую скорость планирующий аппарат, который способен пролететь до 600 км и доставить к цели боеголовку массой 50—100 кг. Общая дальность полета всей системы составит 3800 км, причем на участке самостоятельного движения гиперзвуковой планер полетит не по баллистической траектории. Это создаст возможность маневрирования с целью обеспечения точного наведения на объект поражения. Настоящей изюминкой проекта можно считать ту особенность, что благодаря унификации с SM-3 ракетная система «Are Light» сможет размещаться в тех же вертикальных пусковых установках, которые предназначены для противоракет. Таких «гнезд» в распоряжении ВМС

США насчитывается около 8500. Причем никто, кроме американских военнослужащих, не знает точно — размещены ли на данном корабле противоракеты, или же сосредоточено оружие «глобального мгновенного удара».

Гиперзвуковой прорыв: DARPA замахнулась на 20 М. Гиперзвуковой планер. Еще в 2003 г. агентство DARPA, главный «мозговой центр» американской оборонной промышленности, совместно с ВВС США объявили программу FALCON. В переводе с английского, эта аббревиатура расшифровывается как «Приложение силы при запуске с континентальной территории США».

Программа предусматривала разработку не только разгонных ступеней, но также и разработку гиперзвукового планера в интересах программы «Prompt global strike». Частью этой программы было создание беспилотного самолета HTV-3X на гиперзвуковых прямоточных двигателях.

Планер HTV-2 (Hypersonic Technology Vehicle-2), имеющий вид разрезанного по длине конуса, в апреле 2010 г. прошел летные испытания с помощью носителя «Минотавр IV» и достиг абсолютно баллистической скорости в 20 М.

В 2011 г. аппарат ANW (Advanced Hypersonic Weapon), в чем-то схожий с HTV-2, успешно стартовал в составе трехступенчатой разгонной системы с пусковой площадки на острове Кауаи Гавайского архипелага и достиг испытательного полигона им. Рейгана на атолле Кваджелейн.

Американские конструкторы параллельно идеологии гиперзвукового планера стали осуществлять разработку гиперзвуковых крылатых ракет — самодвижущихся аппаратов. Разработанная корпорацией «Боинг» ракета X-51 под названием «Вэйврайдер» благодаря своей конструкции может использовать для получения дополнительной подъемной силы энергию ударных волн гиперзвукового полета. Планируется принятие этой ракеты на вооружение в 2017 году.

Очевидно, что в обозримом будущем надежные гиперзвуковые технологии на основе ГПВРД со временем займут свое место не только в оборонной промышленности США, но и в целом ряде других стран.

Гиперзвуковой самолет. Оборонное научное агентство DARPA США приняло решение уско-

ритель разработку гиперзвуковых летательных аппаратов в ходе программы ИН, которая призвана решить технические проблемы гиперзвукового полета. Пентагон твердо придерживается позиции перспективности разработки гиперзвуковых систем оружия, непрекаемой способности гиперзвуковых технологий обеспечить военное доминирование США для решения общенациональных задач в сфере безопасности.

Первые полномасштабные испытания гиперзвукового самолета НХ (X-plane) намечены на 2016 г. Самолет будет запускаться ракетой-носителем, а после выполнения полетного задания — опускаться на Землю с помощью парашюта. Это позволит снизить технологические риски разработки, а также увеличить интенсивность тестирования перспективных систем [<http://www.cnews.ru/news/top/print.shtml?2012/07/12/496232>].

Гиперзвуковой полет на скорости 20 М позволяет доставить полезный груз в течение одного часа в любую точку планеты. Кроме того, нет необходимости использования неядерных баллистических ракет, пуск которых может спровоцировать ответный ядерный удар, да к тому же обнаруживается с достаточно большого расстояния.

Гиперзвуковые средства нападения и внешней разведки имеют более пологую траекторию движения, а также обладают способностью появляться в воздушном пространстве противника неожиданно, что позволяет без труда преодолевать любую систему ПВО. В рамках программы ИН намечены масштабные исследования гиперзвуковых технологий по пяти магистральным направлениям: системы теплозащиты, аэродинамика, наведение, навигация и управление движением, оборудование и двигатели.

При скорости 20 М самолет НХ нагреется до температуры, превышающей 2000 °С. Это соответствует температуре доменной печи. Таким образом, проблемы с нагревом и последующим разрушением обшивки весьма актуальны и являются основной причиной многих неудачных испытаний гиперзвуковой ракеты Х-51 и гиперзвукового бомбардировщика НТВ-2.

Конечной целью программы ИН является доведение до пригодного к серийному производству уровня технологий гиперзвукового полета. В ре-

зультате американские военные получают оружие глобального удара с невероятной дальностью стрельбы 37 тысяч километров. Это позволит США наносить удары со своей территории по объектам, находящимся в любой точке планеты. При этом нужно отметить, что ни одно современное средство ПВО не способно поразить ракету, летящую со скоростью 20 М. Исключение, пожалуй, составляют лишь лазеры FEL на свободных электронах мощностью свыше 1 МВт. Однако кроме США масштабную их разработку в настоящее время никто не ведет.

Праматерью всех крылатых ракет можно считать ракету V-1 с пульсирующим воздушно-реактивным двигателем. Ойген Зингер мечтал о сверхдальнем антиподном ракетоплане-бомбардировщике. Вольф Троммсдорф отдавал предпочтение стратегической крылатой ракете с прямоточным двигателем. После войны по обе стороны «железного занавеса» были скопированы германской разработки ракета V-1 и баллистическая ракета V-2. Американцам всегда был ближе «авиационный» подход, что в конечном счете стало одной из основных причин первоначального отставания США в области баллистических технологий, несмотря на присутствие самого Вернера фон Брауна.

Именно поэтому, и именно в США, была построена фактически первая и единственная из когда-либо принятых на вооружение крылатых ракет SM-62 «Снарк» с межконтинентальным радиусом действия в 10000 км. Создавали ее в стенах корпорации «Нортроп Грумман». Она была беспилотным самолетом, выполненным по схеме «безхвостка». Этот аппарат можно было при необходимости даже вернуть с задания, конечно, если еще не произошел отстрел БЧ, и посадить на аэродром. Затем использовать повторно. «Снарк» стартовал с помощью ракетных ускорителей, затем включался авиационный турбореактивный двигатель, и ракета начинала свой путь к цели. За 80 км до нее, на высоте 18 км, от снаряда с помощью пиропатронов отстреливалась БЧ, штатно содержащая 4-мегатонный термоядерный боеприпас. Далее боеголовка следовала к цели по баллистической кривой, а оставшаяся часть ракеты разрушалась и превра-

щалась в облако обломков, которые могли также выполнять роль ложных целей для ПВО.

Самостоятельный полет снаряда обеспечивала, новаторская для того времени, астрокоррекция с помощью трех телескопов, нацеленных на разные звезды. В 1961 г. едва заступившие на боевое дежурство «Снарки» были сняты с вооружения как морально устаревшие. Военных не устраивал ни досягаемый советской системой ПВО потолок в 17000 м, ни скорость, которая не превышала средней скорости современного лайнера, так что путь к далекой цели занимал бы долгие часы. Немногим раньше был закрыт другой проект, даже не доживший до принятия на вооружение. Речь идет о сверхзвуковой крылатой ракете SM-64 «Навахо» (Navaho) межконтинентальной дальности (6500 км) производства компании «Норд Америкен Авиэйшн». Она использовала стартовые ракетные ускорители и прямоточный воздушно-реактивный двигатель для достижения скорости в 3700 км/час. Снаряд проектировался под термоядерную БЧ.

Постепенно сошла на нет тема пилотируемых орбитальных и суборбитальных ракетопланов, представленных у американцев проектами «Дайна-Соар» (Dyna Soar) и X-15, а в СССР — разработками КБ Мясищева, КБ Челомея и КБ Туполева, включая знаменитую «Спираль».

Однако в наши дни интерес к небаллистическому ракетному оружию межконтинентального радиуса действия стал с новой силой проявляться опять.

Беспилотные летательные аппараты. Особое место среди авиационных автономных технических средств занимают многороторные плоские многоцелевые воздушные платформы (импеллеры) — беспилотные летательные аппараты (БПЛА), предназначенные для размещения специальной наблюдательной аппаратуры — радаров, лидаров, фотоаппаратов, видеокамер — или же для доставки негабаритных грузов на большие расстояния.

Нельзя оставить без внимания также новый тип оружия на основе БПЛА — беспилотники-камикадзе. Компания MBDA представила оружие, разработанное в соответствии с концепцией развития перспективных беспилотных систем вооружения, сочетающих в себе как ударные,

так и разведывательные функции. Эти образцы поступят в серийное производство в течение ближайших 20 лет. Как утверждают аналитики, беспилотники-камикадзе во многом сформируют облик войн будущего.

И самое главное — беспилотники находятся в воздухе намного дольше, чем любой пилотируемый самолет (ведь операторы могут работать посменно). Это означает, что с точки зрения тактики боя над противником непрерывно находится и неусыпно следит за ним «недремлющее око» беспилотной машины. Таким образом, за один только вылет MQ-9 «Рипер» (Reaper) может поразить больше целей, чем, например, А-10С. Особенно в условиях асимметричной войны, когда противника необходимо выслеживать на протяжении многих часов. Эта машина отлично зарекомендовала себя не только во время боевых действий в Ираке, Афганистане, но и в охоте за террористами по всему миру.

Нет сомнения в том, что армии ударный БПЛА, безусловно, нужен. И прежде всего для принятия мер контртеррористической идеологии. Затем — в конфликтах более низкой интенсивности, где беспилотники становятся основным средством борьбы с минированием дорог, засадами и т. п. Будущее вырисовывается в создании сплошь автоматизированных военных систем как гораздо более быстродействующих и более надежных, чем живой солдат.

Таким образом, большие и средние БПЛА все острее и настойчивей требуют современных технологий спутниковой связи.

С этой целью беспилотники подключаются к системам автоматизированного планирования и поддержки миссий ВВС (AFMSS) путем подключения к тактической линии связи, например L-3, а в перспективе — к единой автоматизированной сети HART (Heterogeneous Air borne Reconnaissance Team). Все эти технологии сделают БПЛА достаточно устойчивыми против электронных средств борьбы.

К тому же параллельно осуществляется разработка современных инерциальных навигационных систем. В первую очередь, на основе микрогироскопов, которые в состоянии частично, или полностью, заменить спутниковые датчики GPS

Ku-диапазона, подверженные привнесенным искусственным помехам [<http://www.cnews.ru/reviews/index.shtml?2012/06/09/492754>].

Созданию автономных навигационных систем, не зависящих от спутниковых сигналов, начинает повсеместно уделяться все большее внимание.

Пентагон работает над рядом проектов по созданию микроспутников. Например, в проекте «Си Ми» (See Me) предполагается оперативное выведение на орбиту целого роя недорогих наноспутников, которые в состоянии обеспечить связь с БПЛА и наземными войсками. Для этих целей, кстати, можно использовать и беспилотный шаттл X-57B.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты MQ-9 «Рипер» штатно вооружены ракетами класса «воздух-воздух» АТМ-9, которые предназначены не только для самообороны, но также для уничтожения вертолетов. При необходимости тяжелые БПЛА, например X-47B, могут быть вооружены более мощными ракетами, в частности AIM-120.

Первые прототипы российских ударных беспилотников поступят на вооружение армии уже 2020 г.

Беспилотные летательные аппараты со временем станут основной огневой поддержки сухопутных войск и смогут обеспечить молниеносное нанесение ударов, частично отодвинув на задний план артиллерию и тяжелые пилотируемые истребители.

Значительное расширение возможностей беспилотников на боевом дежурстве будет реализовано с помощью многоцелевых БЧ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В системах управления ракетами-носителями (РН) широкое применение нашли так называемые поплавковые гироскопы, конструктивно лишенные основных недостатков «сухих» приборов — значительного по величине (и, главное, непостоянного) момента сил сухого трения на выходной оси, а также недопустимо высокой чувствительности к ударным и вибрационным воздействиям, особенно нежелательных для интегрирующих гироскопов. Отличительной особенностью поплавковых модификаций ста-

ло наличие погруженной в тяжелую фторорганическую (удельный вес 1.9 Н/м^3) или хлорорганическую (удельный вес 2.7 Н/м^3) жидкость подвижной части прибора. Гироскоп располагается в герметичном, заполненном гелием или водородом, цилиндрическом поплавке, который продольными цапфами устанавливается в наружном, также герметичном, коаксиальном круглом цилиндре, выполняющем роль корпуса прибора. Опоры подвижной части в некоторых случаях изготавливаются из камней [5, 9, 10].

Такое техническое решение характерно для целого ряда конструкций. Плавающие приборы, в отличие от поплавковых, не имеют остаточного веса.

Зазор между цилиндрической частью кожуха и корпусом весьма мал и составляет приблизительно 0.2 мм в радиальном направлении. Большая вязкость жидкости и малая величина рабочего зазора позволяют достичь требуемого коэффициента демпфирования в интегрирующем гироскопе.

В плане решаемой проблемы самым уязвимым элементом конструкции РН к постоянно изменяющимся требованиям пусковых услуг является головной аэродинамический обтекатель (ГАО), в подобтекательном пространстве (ПП) которого размещается космический аппарат (КА). Происходящие динамические изменения в спектре КА, планируемых для выведения на орбиту, приводят к тому, что, с одной стороны, увеличиваются абсолютные значения массы КА, вплотную приближаясь к нижней границе возможностей РН тяжелого класса, а с другой — растет удельный вес задач по доставке КА на высокие орбиты.

Таким образом, оставляя неизменной саму идею взвешивания гироскопа, актуальной представляется задача уточнения теории поплавковых гироскопов, которая позволила бы не только объяснить и описать аналитически уже известное, но и очертить круг прикладных задач анализа и синтеза поплавковых приборов с оптимальными функциональными свойствами и минимальными погрешностями измерений механических величин при летной эксплуатации РН. Для этого, прежде всего, необходимо обосновать выбираемую геометрию, массогабаритные характеристики и динамические свойст-

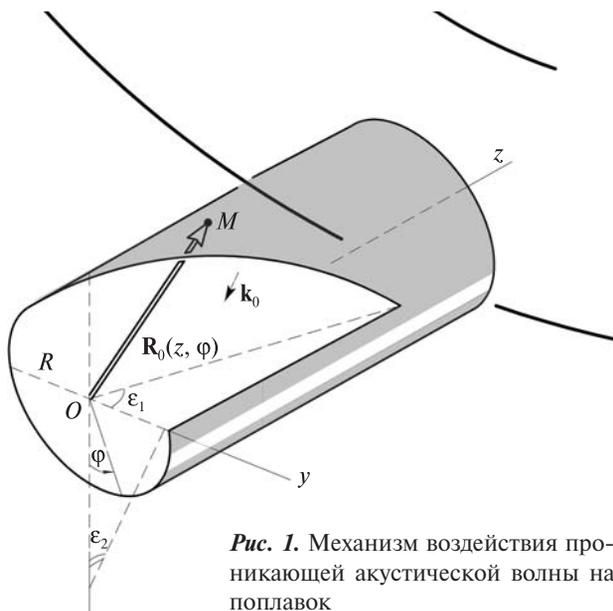


Рис. 1. Механизм воздействия проникающей акустической волны на поплавки

ва основного элемента подвеса — поплавок. И здесь на первый план выступают задачи учета вязко-упругих свойств поверхности поплавка при взаимодействии с прошедшей внутрь акустической волной, образование пузырьков в жидкости, их динамика в звуковых полях и влияние на погрешность измерений [1, 6].

В качестве кинематического возмущения логично рассмотреть угловое движение РН относительно ее центра масс, передающееся гироскопу, как известно, через опоры подвеса.

Акустическим воздействием является аэродинамический шум маршевых двигателей РН. Это возмущение, в отличие от кинематического, проходит внутрь не только через опоры подвеса, но и через корпус прибора и окружающую среду.

Представляется целесообразным все дальнейшие рассуждения строить, ориентируясь на конкретную техническую реализацию серийно выпускаемого авиационной промышленностью поплавкового прибора. Например, на унифицированный гироскопический датчик угловых скоростей класса ДУСУ2-6АС, предназначенный для использования в летальных аппаратах длительного действия.

Помимо самостоятельного интереса, кинематическое и акустическое воздействия формируют широкий круг актуальных прикладных задач

анализа и синтеза инерциальных систем в плане изучения природы их совместного проявления. К слову сказать, такой подход оправдан и в том смысле, что в большей степени соответствует эксплуатационным условиям ЛА [3, 4]. Так, например, в момент старта тяжелых носителей класса «Протон», «Зенит», «Циклон-4» или «Маяк», либо при выполнении операций разделения и разведения при старте с орбитальной ступени АКС на ракете-носителе одновременно выполняются как операции вывода на номинальный режим работы разгонных блоков двигательных установок, так и построение опорной системы координат (или предусмотренных тактическими задачами системы ориентирных направлений). Аналогичные процедуры выполняются при решении маршевых задач ближнего космоса по доставке КА на заданную орбиту (или перевод с опорной на геостационарную).

Сосредоточим внимание на упруго-напряженном состоянии поплавкового подвеса при летной эксплуатации. В качестве возмущающих факторов ограничимся рассмотрением проникающего акустического излучения и углового движения корпуса РН. Генерируемая в поверхности подвеса гироскопа акустическая вибрация на качающемся основании будет порождать возмущающие моменты эйлеровых сил инерции, приводящие к упруго-напряженному состоянию поверхности, что будет восприниматься прибором как полезный сигнал. Это очертит дополнительную погрешность измерений.

ПОГРЕШНОСТИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО СЕНСОРА В ПОЛЕТНЫХ УСЛОВИЯХ

Проникающее акустическое излучение. Схему воздействия звуковых волн представим в виде, изображенном на рис. 1.

Звуковое давление в падающей волне примем равным

$$P_1 = P_{10} \exp i[\omega t - \mathbf{k}_0 \mathbf{R}_0(z, \varphi)], \quad (1)$$

где P_{10} — давление в падающей волне, $\mathbf{k}_0 = \mathbf{n} \frac{\omega}{c}$ — волновой вектор, c — скорость звука, \mathbf{n} — единичный вектор направления распространения волны, \mathbf{R}_0 — радиус-вектор точки поверхности поплавка.

С учетом принятых на схеме обозначений, принимая также для простоты равными по величине углы падения, отражения и прошедшей волн, звуковые давления можно записать в виде

$$P_1 = P_{10} \exp i[\omega t - k_0(R \cos \varphi \cos \varepsilon_1 - R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)], \quad (2)$$

$$P_2 = P_{20} \exp i[\omega t - k_0(-R \cos \varphi \cos \varepsilon_1 - R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)], \quad (3)$$

$$P_3 = P_{30} \exp i[\omega t - k_0(R \cos \varphi \cos \varepsilon_1 - R \sin \varphi \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 - z \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2)], \quad (4)$$

Упругие перемещения поверхности подвеса в среднем шпангоуте. Диффузное поле. Эксплуатационным условиям ЛА адекватно соответствует диффузная структура звукового поля. В этом случае перенос звуковой энергии равновероятен под всеми углами падения.

Максимальные значения упругих перемещений поверхности подвеса в среднем шпангоуте представлены в таблице.

Вычисления показали, что максимальные упругие перемещения при $P_{10} = 400 \text{ Н/м}^2$ составляют 9.8 нм в направлении протяженности

Максимальные значения упругих перемещений $U_{z\max}$ вдоль протяженности подвеса, $U_{\phi\max}$ вдоль параллели и W_{\max} в плоскости среднего шпангоута

$\omega, \text{с}^{-1}$	Упругие перемещения			
	$P_{10} = 100 \text{ Н/м}^2$	$P_{10} = 200 \text{ Н/м}^2$	$P_{10} = 300 \text{ Н/м}^2$	$P_{10} = 400 \text{ Н/м}^2$
Перемещения $U_{z\max}$				
600	2.444	4.888	7.332	9.776
1200	1.665	3.33	4.995	6.66
1800	0.9223	1.8446	2.7669	3.6892
2400	0.5072	1.0144	1.5216	2.0288
3000	0.3764	0.7528	1.1292	1.5056
3600	0.3449	0.6898	1.0347	1.3796
4200	0.3075	0.615	0.9225	1.23
4800	0.265	0.53	0.795	1.06
5400	0.2361	0.4722	0.7083	0.9444
6000	0.2163	0.4326	0.6489	0.8652
Перемещения $U_{\phi\max}$				
600	13.84	27.68	41.52	55.36
1200	14.05	28.1	42.15	56.2
1800	14.25	28.5	42.75	57
2400	14.36	28.72	43.08	57.44
3000	14.38	28.76	43.14	57.52
3600	14.37	28.74	43.11	57.48
4200	14.37	28.74	43.11	57.48
4800	14.36	28.72	43.08	57.44
5400	14.34	28.68	43.02	57.36
6000	14.32	28.64	42.96	57.28
Перемещения W_{\max}				
600	30	60	90	120
1200	29.86	59.72	89.58	119.44
1800	29.71	59.42	89.13	118.44
2400	29.58	59.16	88.74	118.32
3000	29.48	58.96	88.44	117.92
3600	29.41	58.82	88.23	117.64
4200	29.33	58.66	87.99	117.32
4800	29.24	58.48	87.72	116.96
5400	29.15	58.3	87.45	116.6
6000	29.04	58.08	87.12	116.16

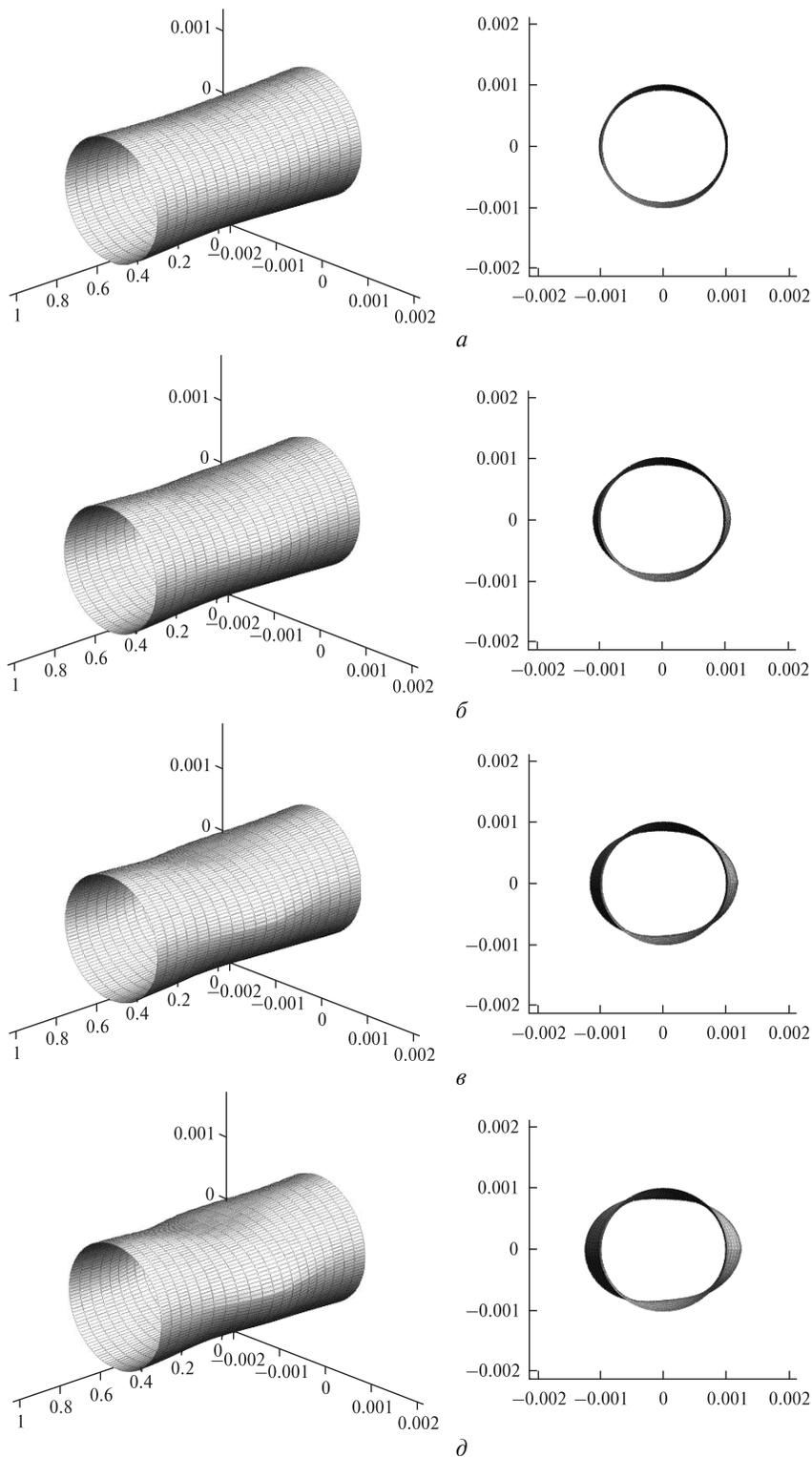


Рис. 2. Упруго-напряженное состояние поверхности подвеса в диффузном поле в аксонометрии и во фронтальной плоскости: а) $P_{10} = 100 \text{ Н/м}^2$, б) $P_{10} = 200 \text{ Н/м}^2$, в) $P_{10} = 300 \text{ Н/м}^2$, д) $P_{10} = 400 \text{ Н/м}^2$

подвеса, 57.5 нм вдоль параллели и 120 нм в радиальном направлении. При звуковом давлении 100 Н/м² они ограничены значениями 2.4, 14.4 и 30 нм соответственно.

Если при $P_{10} = 400$ Н/м² в случае диффузного поля максимальные значения упругих перемещений вдоль протяженности уменьшились на 9 нм, а в окружном направлении — на 4 нм, то в поперечной плоскости увеличились на 67 нм. В свою очередь, при $P_{10} = 100$ Н/м² они уменьшились на 2.3 нм вдоль протяженности и на 0.1 нм вдоль параллели, но увеличились на 26.6 нм в радиальном направлении.

Внешний вид подвеса в диффузном поле изображен на рис. 2 для четырех значений избыточно-го давления при частоте излучения $\omega = 3000$ с⁻¹.

Вполне понятно, что рассматривая нестационарную задачу следует ввести множитель $\exp i\omega t$, что изменит картину упругих перемещений, придав ей периодический характер во времени.

Координатные функции подвеса. В случае *циклического* ($k \geq 2$) нагружения, координатные функции будут иметь вид

$$U_z(t, z, \varphi) = 4 \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} [a_k^{(1)}(t) z^2 (1-z)^2 \cos k\varphi \cos z + a_k^{(2)}(t) z^2 (1-z)^2 \sin k\varphi \sin z] \right\} \times \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_1 d\varepsilon_2, \quad (5)$$

$$U_\varphi(t, z, \varphi) = 4 \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} [b_k^{(1)}(t) z^2 (1-z)^2 \sin k\varphi \cos z + b_k^{(2)}(t) z^2 (1-z)^2 \cos k\varphi \sin z] \right\} \times \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_1 d\varepsilon_2, \quad (6)$$

$$W(t, z, \varphi) = 4 \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} [c_k^{(1)}(t) z^4 (1-z)^4 \cos k\varphi \cos z + c_k^{(2)}(t) z^4 (1-z)^4 \sin k\varphi \sin z] \right\} \times \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_1 d\varepsilon_2. \quad (7)$$

В случае осесимметричного нагружения ($k = 1$), координатные функции изменятся:

$$U_z(t, z, \varphi) = 4 \exp i\omega t \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} [a_1^{(1)} z^2 (1-z)^2 \times \cos \varphi \cos z + a_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \sin \varphi \sin z] \times \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_1 d\varepsilon_2, \quad (8)$$

$$U_\varphi(t, z, \varphi) = 4 \exp i\omega t \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} [b_1^{(1)} z^2 (1-z)^2 \sin \varphi \cos z + b_1^{(2)} z^2 (1-z)^2 \cos \varphi \sin z] \times \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_1 d\varepsilon_2, \quad (9)$$

$$W(t, z, \varphi) = 4 \exp i\omega t \int_{\varepsilon_1=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varepsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} [c_1^{(1)} z^4 (1-z)^4 \cos \varphi \cos z + c_1^{(2)} z^4 (1-z)^4 \sin \varphi \sin z] \times \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_1 d\varepsilon_2. \quad (10)$$

Угловое движение ракет-носителей. Угловую скорость РН можно представить в виде разложения по ортам $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ осей $O\eta_1, O\zeta$ и Ox

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{e}_1 \dot{\varphi} + \mathbf{e}_2 \dot{\psi} + \mathbf{e}_3 \dot{\theta}$$

или в проекциях на оси, связанные с корпусом РН:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{e}^x \omega_x + \mathbf{e}^y \omega_y + \mathbf{e}^z \omega_z.$$

В случае наземного старта с открытых стартовых позиций (оси $O\xi\eta\zeta$ неподвижны), проекции угловой скорости на оси $Oxuz$, связанные

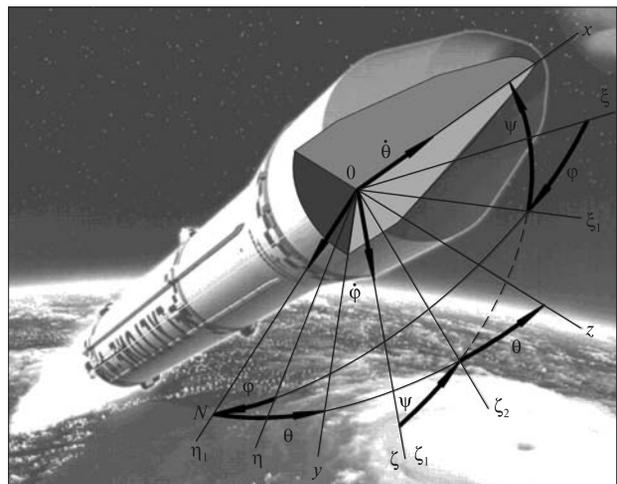


Рис. 3. Ракета-носитель «Циклон-4». Открытые стартовые позиции. Схема углов поворота корпуса ракеты: φ — угол рыскания, ψ — угол тангажа, θ — угол крена

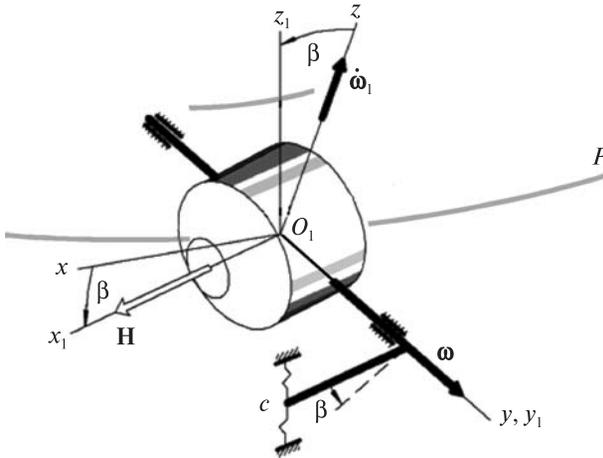


Рис. 4. Природа появления дополнительного ускорения $\dot{\omega}_1^a(t)$

с корпусом РН, будут определяться формулами (рис. 3):

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\phi} \sin \psi, \quad \omega_{x_1} = \omega_x \cos \beta - \omega_z \sin \beta, \\ \omega_y &= \dot{\phi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta, \quad \omega_{y_1} = \omega_y + \dot{\beta}, \\ \omega_z &= \dot{\phi} \cos \theta \cos \psi - \dot{\psi} \sin \theta, \\ \omega_{z_1} &= \omega_x \sin \beta + \omega_z \cos \beta, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\theta = \theta(t)$, $\psi = \psi(t)$, $\phi = \phi(t)$.

Если старт осуществляется с орбитальной ступени (либо с платформы мобильного базирования), необходимо предварительно угловую скорость ее движения разложить по осям $O\xi\xi_1\zeta$. Это в равной степени относится и к случаю, когда возникает необходимость учета угловой скорости суточного вращения Земли.

Полагаем, что углы ψ и θ , а также их производные по времени достаточно малы. Угловую скорость рыскания представим в наиболее общем виде, предполагая движение по программной траектории:

$$\dot{\phi} = \omega_0 + \omega_z, \quad (12)$$

где ω_0 — постоянная величина, измеряемая датчиком угловых скоростей, например при выполнении циркуляции РН, а $\omega_z \ll \omega_0$ — малое возмущение этой угловой скорости.

Очевидно, что составляющие $(\omega_x)_{x_1}$ и $(\omega_z)_{x_1}$ не будут оказывать влияния на погрешность

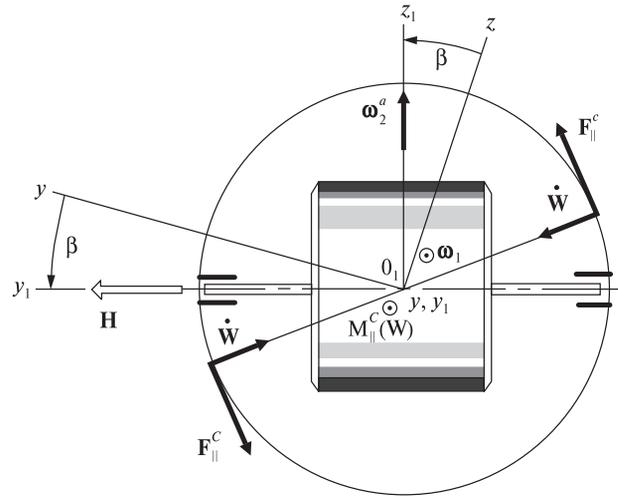


Рис. 5. Природа совместного действия акустического излучения и углового движения корпуса РН на двухступенчатый поплавковый гироскоп

гироскопа, так как совпадают по направлению с осью фигуры. В то же время кинематические возмущения $(\omega_x)_{z_1}$ и $(\omega_z)_{z_1}$ приведут к дополнительной погрешности измерений $\omega_1^a(t)$ (рис. 4):

$$\begin{aligned} \omega_1^a(t) &= \frac{2}{HR} [(\dot{\theta} - \dot{\phi} \sin \psi) \sin \beta + \\ &+ (\dot{\phi} \cos \theta \cos \psi - \dot{\psi} \sin \theta) \cos \beta] \times \\ &\times \{I_n [\dot{V}(t) + \pi \dot{W}(t)] + m_T RL \dot{W}_T(t)\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Векторы угловой скорости $\omega_1^a(t)$ и углового ускорения $\dot{\omega}_1^a(t)$ направлены вдоль выходной оси прибора.

Анализ показывает, что угловая скорость ω_y корпуса ракеты при акустической вибрации торцов поплавка приводит к винтовому движению, что само по себе является положительным фактором, так как уменьшает сухое трение на выходной оси.

Но в совокупности с упругими радиальными перемещениями $\dot{W}(t)$ боковой поверхности поплавка угловая скорость ω_y приведет к появлению момента сил инерции Кориолиса и, естественно, к возникновению угловой скорости ω_2^a , направленной параллельно входной оси (оси чувствительности) прибора (рис. 5):

$$\omega_2^a = \frac{4I_n}{HR} (\dot{\phi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta) \dot{W}(t). \quad (14)$$

Тангенциальные упругие перемещения $V(t)$ боковой поверхности при наличии угловой скорости ω_y приведут к появлению сил инерции Кориолиса, линии действия которых пересекают центр подвеса и, таким образом, возмущающего момента не создают.

В итоге угловое движение РН со скоростями ω_x и ω_y будет способствовать нежелательному воздействию акустической вибрации на показания прибора в виде появления дополнительного углового ускорения $\dot{\omega}_1^a(t)$ относительно выходной оси. В свою очередь, угловая скорость ω_y корпуса ракеты будет подчеркивать только радиальные упругие перемещения боковой поверхности поплавка $W(t)$ и имитировать тем самым наличие входной величины ω_2^a , будучи в действительности «ложной».

ВЫВОДЫ

Представленные результаты раскрывают природу появления эйлеровых сил инерции, действующих на импедансную поверхность поплавкового подвеса гироскопа. Эти силы служат причиной появления дополнительных погрешностей инерциальных сенсоров при летной эксплуатации.

Угловое движение РН осуществляет избирательность акустической вибрации поверхности подвеса, что приводит к появлению систематической девиации (либо систематического дрейфа) оси фигуры.

1. Анфимов Н. А., Синельщиков М. В., Суворов В. В., Цымбалюк М. М. Методология формирования целевой программы пилотируемого космического комплекса (ПКК) // Сб. тр. Первой украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — Киев, 2001. — С. 11—15.
2. Даэр И. Колебания корпуса космического аппарата под действием шума ракетных двигателей // Случайные колебания / Пер. с англ. под ред. С. Крендела. — М.: Мир, 1967. — С. 192—211.

3. Карачун В. В., Мельник В. Н. Инерциальный указатель направления. Абсолютно твердый и импедансный подвес. — К.: «Корнейчук», 2013. — 128 с.
4. Мельник В. Н. Особенности циклического нагружения оболочек // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2007. — № 8 (44). — С. 56—59.
5. Сломьянский Г. А., Прядилов Ю. Н. Поплавковые гироскопы и их применение. — М.: Оборонгиз, 1958. — 378 с.
6. Тимошенко В. И., Гусынин В. П. Использование гиперзвуковых технологий при создании перспективных транспортных систем // Космічна наука і технологія. — 1999. — 5, № 1. — С. 78—89.
7. Феодосьев В. И., Синярев Г. Б. Введение в ракетную технику: Уч. пособие. — М.: Оборонгиз, 1960. — 531 с.
8. Фокс Вильямс Д. Е. Шум высокоскоростных ракет // Случайные колебания / Пер. с англ. под ред. С. Крендела. — М.: Мир, 1967. — С. 45—49.
9. Фридлендер Г. О. Инерциальные системы навигации: Уч. пособие. — М.: Физматгиз, 1961. — 435 с.
10. Ягодкин В. В., Хлебников Г. А. Гироскопы баллистических ракет: Уч. пособие. — М.: Воениздат, 1967. — 197 с.

Стаття надійшла до редакції 05.03.13

V. V. Karachun, V. M. Mel'nick, M. F. Kalinina

ГИПЕРЗВУКОВИЙ ПРОРИВ: ПЕРСПЕКТИВИ І ПРОБЛЕМИ

Аналізується стан розвитку в світі гіперзвукових технологій, перспективи цієї галузі для вирішення задач освоєння космосу, оборонної галузі, антитерористичних заходів тощо. Звертається увага на надзорські експлуатаційні умови, проблеми навігації і керування рухом.

V. V. Karachun, V. N. Mel'nick, M. F. Kalinina

HYPERSOUND BREACH: PROSPECTS AND PROBLEMS

We discuss the state of the development of hypersound technology in the world and the prospects of this industry for the space exploration, defensive industry, counterterrorist measures and for others like that. Attention is given to ultra-hard operating terms as well as to some problems of navigation and traffic control.

УДК 528.8:633.854.78

В. І. Лялько, О. І. Сахацький, Г. М. Жолобак, О. А. Апостолов

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ДИСТАНЦІЙНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СТРОКІВ СІВБИ СОНЯШНИКУ

Проаналізовано зміни вегетаційного індексу нормалізованої різниці (NDVI) за даними супутникових знімків MODIS (28.05–09.07.2011 р.) для виробничих посівів соняшнику різного строку сівби під урожай 2011 р. на Миколаївщині. Виявлено, що поля соняшнику зі строком сівби у квітні за досліджений період акумулюють більш ніж удвічі вищі значення суми NDVI, у порівнянні з висіяними на початку червня. Водночас вперше дистанційно встановлено, що переважну більшість полів соняшнику у межах центральної частини Миколаївської області під урожай 2011 р. було засіяно у травні.

ВСТУП

В Україні соняшник забезпечує майже 95 % загального виробництва олії, і тому є провідною олійною культурою [1]. За даними іноземного аграрного представництва при Міністерстві сільського господарства США, обсяги експорту соняшникової олії (2.9 млн т) в 2011/12 маркетинговому році вивели нашу державу за цим показником на перше місце у світі [<http://www.fas.usda.gov>]. Проте стрімке нарощування валового збору соняшникового насіння як основної олійної сировини впродовж останніх років забезпечується переважно екстенсивним шляхом за рахунок різкого розширення посівних площ соняшнику.

Як засвідчують праці фахівців Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва УААН [4], науково обґрунтований рівень посівів соняшнику в Україні знаходиться в межах 2.0–2.5 млн га. Такі розміри посівні площі соняшнику займали до 1997 р. З 2003 р. вони вийшли за межі 3 млн га, а від 2008 р. вже перевищують 4 млн га. За даними Міністерства аграрної політики України найбільші площі під соняшник відводяться у Дніпропетровській, Запорізькій, Миколаївській і Донецькій областях [<http://www.minagro.gov.ua>].

Недотримання науково обґрунтованих оптимальних площ посіву соняшнику призводить до низки негативних явищ: поширення і посилення інтенсивності розвитку хвороб і шкідників, зниження родючості ґрунтів та ін. При цьому спостерігаються численні порушення технології вирощування соняшнику, коригування 8-9-пільних сівозмін і введення 3-4-пільних. Відомі посіви цієї культури і щорічно на одному місці без застосування спеціальних заходів. Це завдає значних збитків врожаю не тільки соняшнику, а й інших культур сівозміни через порушення агротехнічних вимог.

Вирішення виниклих проблем можливе лише за умови оптимізації площ вирощування олійних культур. В цьому ракурсі важливо вчасно отримувати незалежну та об'єктивну інформацію про фактичні розміри, відведені під посіви провідної олійної культури. Проте така задача ускладнюється через досить розтягнуті у часі строки сівби соняшнику, які у степовій зоні України переважно охоплюють період від другої декади квітня до третьої декади травня. Вищесказане зумовлює актуальність дистанційного дослідження посівів соняшнику.

Метою нашої роботи було вивчення можливості дистанційного (за допомогою знімків MODIS) визначення строків сівби соняшнику на основі диференціації його посівів, що перебувають на різних фазах першої половини вегетації.

ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень були виробничі посіви соняшнику культурного (*Helianthus cultus* Wenzl.), які вирощувались у степовій зоні України. Наземні маршрутні обстеження проводились нами на території Миколаївської області 10—11 червня 2011 р. у межах її центральної частини (див. рис. 1 на кольоровій вклейці). В цей час більшість посівів знаходилась у фазі листкоутворення та росту стебла, проте були зафіксовані поля як зі сходами соняшнику і появою першої пари справжніх листків, так і з рослинами, що перебували на початку бутонізації.

Для дистанційної ідентифікації посівів були використані знімки MODIS з розрізненністю 250 м за такі дати 2011 р.: 28 травня, 4, 7, 19, 23 червня та 9 липня. За допомогою програми ERDAS Imagine для кожного знімка було розраховано вегетаційний індекс нормалізованої різниці (*NDVI*), що дорівнює частці від ділення різниці показників відбиття об'єктів у ближній інфрачервоній та червоній області спектра на їхню суму. Далі на знімках було локалізовано обстежені посіви та за допомогою інструмента AOI виділено їх для наступного визначення вегетаційного індексу.

Серед обстежених посівів відповідно до їхньої площі та розрізненності знімків відібрано по однаковій кількості полів (сім), на яких соняшник перебував у тотожних фазах вегетації (сходи — перша пара справжніх листків, ріст стебла та початок бутонізації). Для них за даними всіх знімків розраховано середню суму акумульованого *NDVI* із середніх значень індексу для кожного поля, взятих з таблиці сигнатур.

Для комбінації знімків MODIS в середовищі програми ERDAS Imagine було проведено керувану класифікацію з метою виявлення посівів соняшнику вказаних фаз вегетації у межах центральної частини Миколаївської області.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

На основі дистанційних даних отримано такі значення акумульованого *NDVI* для різних фаз розвитку: 0.997...1.338 відносних одиниць (фаза сходи — перша пара справжніх листків, 19, 23 червня, 9 липня), 1.239...1.886 (фаза росту стебла,

4, 7, 19, 23 червня, 9 липня), 2.282...2.614 (фаза початку бутонізації, 28 травня, 4, 7, 19, 23 червня, 9 липня). Значення акумульованого *NDVI* для досліджених полів становлять відповідно 1.17 (сходи), 1.62 (ріст стебла) та 2.42 (початок бутонізації) відносних одиниць (рис. 2).

З рис. 2 видно, що значення акумульованого *NDVI* для всіх трьох вивчених фаз достовірно (на рівні значущості $\alpha = 0.05$) відрізняються. Зокрема видно, що посіви соняшнику, які перебували 10—11 червня 2011 р. на початку бутонізації, за досліджений період нагромадили більш ніж удвічі вищі значення *NDVI*, ніж ті, що були у фазі сходів — утворення першої пари справжніх листків.

Отримані відмінності значень *NDVI* спричинені зміною архітекtonіки посівів впродовж вегетаційного періоду. Як відомо, у розвитку соняшнику від сівби до повного досягання розрізняють такі фази (рис. 3): сходи, перша пара справжніх листків, листкоутворення та ріст стебла, утворення кошика (бутонізація), цвітіння, досягання [7].

Тривалість міжфазних періодів у найпоширенішій середньостиглої групи сортів (гібридів) соняшнику становить: від сівби до сходів 14—16 діб, від сходів до початку утворення кошика 37—43, від початку утворення кошика до цвітіння

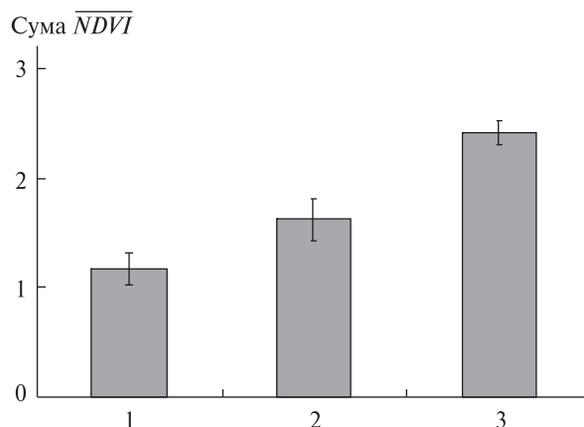


Рис. 2. Значення акумульованого \overline{NDVI} посівів соняшнику, які 10—11 червня 2011 р. перебували у різних фазах розвитку: 1 — фаза сходів — першої пари справжніх листків, 2 — фаза росту стебла, 3 — фаза початку бутонізації. Межі довірчого інтервалу відповідають рівню значущості $\alpha = 0.05$



Сходи Перша пара справжніх листків Ріст стебла Бутонізація Початок цвітіння Кінець цвітіння Дозрівання

Рис. 3. Фази вегетації соняшнику (за матеріалами сайту <http://www.nutritech.com.ua/custom/image/2008/Kultura/sonax-sxema.jpg>)

27—30, а від цвітіння до досягання 44—50 діб. У ранньостиглих форм міжфазні періоди скорочуються, у середньопізніх — подовжуються. Період вегетації сортів і гібридів соняшнику (від сівби до досягання насіння), які вирощуються в Україні, триває від 80 до 130 діб [5]. За період від сівби до сходів середня висота рослин досягає 10—12 см, від сходів до початку утворення кошика на рослині формується 10—12 справжніх листків (у скоростиглих — 8 листків, у пізньостиглих 12—18 листків), а висота посіву становить 1—1.3 м. До початку бутонізації рослини досягають приблизно 40—50 % своєї максимальної висоти (щодобовий приріст 1—1.5 см) [3].

Беручи до уваги наведені дані, можемо стверджувати, що ті поля, де рослини соняшнику на момент їхнього моніторингу перебували у фазі сходів, були засіяні наприкінці травня — на початку червня (тривалість міжфазного періоду сівба — сходи становить 14 діб). Строком сівби переважної більшості полів, де під час наземного обстеження відбувались процеси росту стебла та листкоутворення, був травень, а для полів з рослинами соняшнику на початку бутонізації — кінець квітня. Таким чином, дистанційна інформація та врахування відомих значень тривалості міжфазних періодів вегетації соняшнику умож-

ливають встановлення дат проведення його сівби. Враховуючи те, що за умов оптимального зволоження період сівба — сходи залежить від температури повітря [3], для надійнішого визначення строків сівби слід брати до уваги ще й ці параметри.

Оскільки доведено, що тривалість періоду сходи — бутонізація корелює з кількістю листків на рослині ($r = 0.66$) і є визначальною до загальної тривалості вегетаційного періоду ($r = 0.78$), а отже пов'язана з урожайністю соняшнику [2, 8], то ці дані можна використати для розробки методики дистанційного прогнозування його продуктивності. Звісно, при цьому слід враховувати метеорологічні умови конкретного року, бо, як зазначає І. А. Нейштадт [6], у теплі роки сівба соняшнику і його розвиток відбуваються швидше, ніж у прохолодні роки, що спричиняє різний час досягнення максимумів значень перпендикулярного індексу (PVI), використаного цим автором для класифікації знімків MODIS. До того ж максимальні значення PVI також дуже коливаються з року в рік, залежно від наявних метеоумов. Тому темпоральна поведінка вегетаційних індексів посівів соняшнику впродовж кількох вегетаційних сезонів має бути предметом подальшого вивчення.

Наступним кроком наших досліджень було виділення посівів соняшнику у межах центральної частини Миколаївської області за матеріалами знімків спектрорадіометра MODIS із супутників EOS («Terra EOS AM-1»). На новоствореному знімку, синтезованому за три дати 28 травня, 19 червня та 9 липня 2011 р. за значеннями *NDVI*, поля соняшнику, засіяні в різний час, мали різні відтінки синього кольору (див. рис. 4 на кольоровій вклейці). Зокрема, поля з рослинами, які перебували на початкових фазах розвитку, зображались майже темно-синіми. Площі, де рослини знаходились у фазі листкоутворення та росту стебла, візуалізувались блакитним кольором, а зайняті соняшником на початку бутонізації — світло-голубим. Накладання ГІС-даних меж районів на синтезований знімок дало можливість зафіксувати, що в Новобузькому та Єланецькому районах переважали посіви зі строком сівби у травні, оскільки більшість з них перебувала у фазі росту стебла. У Новоодеському та Миколаївському районах виділялись посіви з різними строками сівби, але в Новоодеському знаходились чималі площі з пізнім посівом цієї культури (відображені темно-синім кольором у центральній частині району), а у Миколаївському на окремих полях соняшник вступив у фазу початку бутонізації (зображення полів на знімку ідентифікуються як світло-голубі). Виявлені відмінності створюють принципові передумови для визначення розмірів площ посівів соняшнику, висіяного у різні строки, у межах окремих адміністративних одиниць. Наведене зображення демонструє, що на загал у центральній частині Миколаївської області найбільші за розмірами площі посівів цієї культури відповідали полям, засіяним у травні (на знімку переважає блакитний колір). Це підтверджується і даними про хід сівби соняшнику у 2011 р., отриманими зі сайту Головного управління статистики у Миколаївській області (<http://mk.ukrstat.gov.ua/>). Згідно з ними станом на 29 квітня 2011 р. посівна площа під соняшником на зерно складала 121.9 тис. га, станом на 1 червня 2011 р. вона розширилась до 322.9 тис. га, а у підсумку сягнула 382.0 тис.

га. З приведених цифр випливає, що переважну більшість площ (201 тис. га) під соняшник на зерно у 2011 р. у Миколаївській області було засіяно у травні, на що й вказала отримана нами дистанційна інформація.

ВИСНОВКИ

Таким чином, аналіз акумульованого *NDVI* впродовж першої половини вегетації соняшнику під урожай 2011 р. за даними супутникових знімків MODIS дозволив виявити достовірні відмінності його сумарного значення на рівні значущості $\alpha = 0.05$ для виробничих посівів різного строку сівби. Зокрема, для полів соняшнику, засіяних у квітні, характерні більш ніж удвічі вищі значення суми *NDVI* за досліджений період, ніж для полів, засіяних на початку червня. На підставі аналізу динаміки акумуляції цього вегетаційного індексу встановлено, що переважну більшість полів соняшнику у межах центральної частини Миколаївської області під урожай 2011 р. було засіяно у травні. Отже, отримана супутникова інформація та врахування відомих значень тривалості міжфазних періодів вегетації соняшнику вперше в Україні уможливили дистанційне встановлення дат проведення його сівби на території центральної частини Миколаївської області під урожай 2011 р.

1. Бойко С. М. Стан олійно-жирової галузі України, проблеми і перспективи розвитку // Вісник Державного агроекологічного ун-ту. — 2003. — Вип. 1. — С. 281—285.
2. Бурлов В. В., Редько В. В. Корреляционный анализ некоторых хозяйственных признаков, определяющих длину вегетационного периода и урожайность подсолнечника // Научно-технический бюллетень ВСГИ. — 1982. — Вып. 2. — С. 47—53.
3. Вольф В. Г. Соняшник. — К.: Урожай, 1972. — 228 с.
4. Кириченко В. В., Коломацька В. П., Макляк К. М., Сивенко В. І. Виробництво соняшнику в Україні: стан і перспективи // Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. — 2010. — Вип. 7. — С. 281—287.
5. Наукове забезпечення сталого розвитку сільського господарства в Лісостепу України: В 2-х т. — К.: АЛЕФА, 2003. — Т. 1. — 886 с.
6. Нейштадт И. А. Методы обработки данных спутниковых наблюдений MODIS для мониторинга пахотных земель: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Москва, 2007. — 24 с.

7. Семихненко П. Г. Подсолнечник, особенности биологии и важнейшие приемы его возделывания: Автореф. дис... д-ра с.-х. наук. — Краснодар, 1970. — 36 с.
8. Троценко В. І., Жатова Г. О., Жатов О. Г. Залежність продуктивності соняшнику від тривалості вегетаційного періоду // Вісник Сумського НАУ. — 2003. — Вип. 7. — С. 117—122.

Стаття надійшла до редакції 28.12.12

*В. І. Лялько, А. І. Сахацький,
Г. М. Жолобак, О. А. Апостолов*

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКОВ СЕВА ПОДСОЛНЕЧНИКА

Проанализированы изменения вегетационного индекса нормализованной разницы (NDVI) по данным спутниковых снимков MODIS (28.05.—09.07.2011 г.) для производственных посевов подсолнечника разных сроков сева под урожай 2011 г. в Николаевской области. Обнаружено, что поля подсолнечника со сроком сева в апреле за исследованный период аккумулируют более чем в два

раза большие значения суммы NDVI, чем засеянные в начале июня. В то же время впервые дистанционно установлено, что преобладающее большинство полей подсолнечника в пределах центральной части Николаевской области под урожай 2011 г. было засеяно в мае.

*V. I. Lyalko, O. I. Sakhatsky,
G. M. Zholobak, O. A. Apostolov*

REMOTE DETECTION OF SUNFLOWER SOWING TIME

We analyzed changes of normalized difference vegetation index (NDVI) value on the basis of satellite images MODIS (28.05—09.07.2011) for the production crops of sunflower with different sowing time in the Mykolaiv region for the harvest in 2011. It was found that for the time interval under study the sunflower fields sown in April accumulated more than twice greater value of the NDVI sum as compared with the fields sown in early June. It was revealed for the first time with the use of satellite data that most of sunflower fields within the central part of the Mykolaiv region were planted in May for the harvest in 2011.

АГАПТОВ Олексій Володимирович — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколоремний космічний простір.

АПОСТОЛОВ Олександр Анатолійович — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — інформатика та програмування, дистанційне дослідження Землі.

ДЕГТЯРЬОВ Олександр Вікторович — Головний конструктор — Генеральний директор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», академік Міжнародної академії астронавтики, Заслужений машинобудівник України, кандидат економічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ЖОЛОБАК Галина Михайлівна — старший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат біологічних наук, доцент.

Напрямок науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

ЗАЛІЗОВСЬКИЙ Андрій Владиславович — старший науковий співробітник відділу Радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геокосмічні дослідження

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — навколоремний космічний простір.

КАЛІНІНА Мирослава Федорівна — аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Напрямок науки — динаміка механічних систем носіїв.

КАРАЧУН Володимир Володимирович — завідувач кафедри технічної механіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», доктор технічних наук, професор, академік Аерокосмічної академії України.

Напрямок науки — динаміка бортової апаратури носіїв.

КОЗАК Людмила Володимирівна — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколоремний космічний простір.

КОЛОСКОВ Олександр Валерійович — старший науковий співробітник відділу радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — дистанційне зондування геокосмосу.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

Напрямок науки — географія, енергомасообмін в геосистемах, дистанційні дослідження природних ресурсів.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — Головний конструктор — начальник конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, «Заслужений машинобудівник України», лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

МЕЛАНЧЕНКО Олександр Геннадійович — начальник відділу конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук.

Напрямок науки — динаміка, балістика та керування рухом літальних апаратів.

МЕЛЬНИК Вікторія Миколаївна — професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», доктор технічних наук.

Напрямок науки — динаміка механічних систем носіїв.

НАГОРНОВ Володимир Сергійович — провідний інженер-конструктор конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ПАРНОВСЬКИЙ Олексій Сергійович — завідувач лабораторії астрофізики Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика плазми, астрофізика.

РАПОПОРТ Юрій Григорович — старший науковий співробітник фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — хвильові явища в космічній плазмі та наноструктурованих метаматеріалах.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — завідувач лабораторії Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», доктор геологічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з

метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

СЕЛІВАНОВ Юрій Олександрович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретична фізика, обчислювальна фізика.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинівич — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЧЕРЕМНИХ Сергій Олегович — провідний інженер відділу дистанційних методів та перспективних приладів Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Юрій Мусійович — завідувач відділу радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України.

Напрямок науки — геокосмічні дослідження.

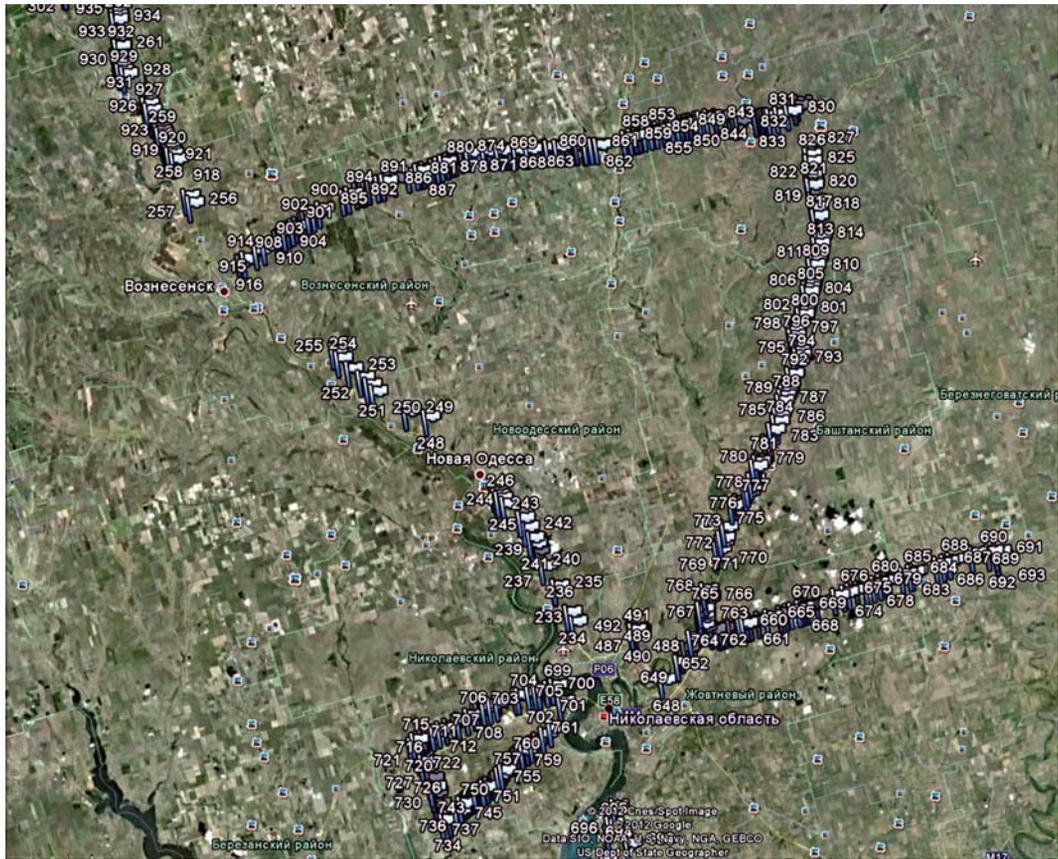


Рис. 1. Схема маршрутных обстежень Миколаївської області у 2011 р.

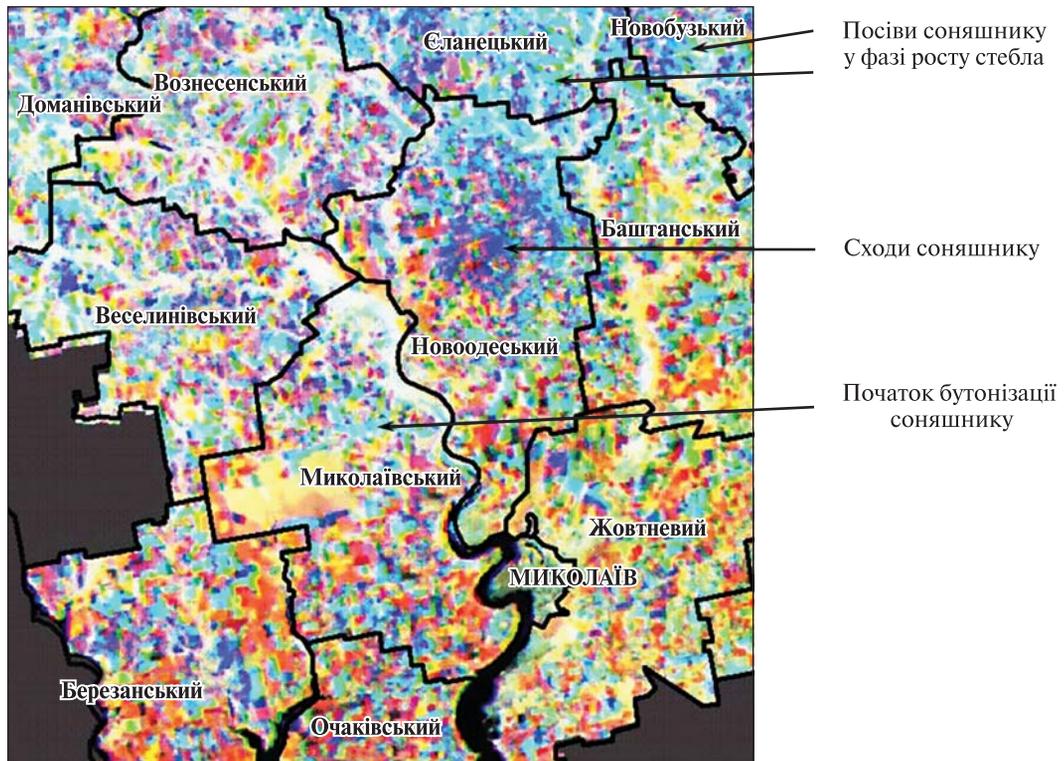


Рис. 4. Виділення посівів соняшнику у межах центральної частини Миколаївської області на синтезованому знімку MODIS за 28 травня, 19 червня та 9 липня 2011 р.