

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ♦ Виходить 6 разів за рік

київ

Том 14, № 4, 2008

KYIV

ЗМІСТ

Лизунов Г. В., Глемба В. І., Корепанов В. Е., Крючков Е. І., Луценюк А. А., Скорочод Т. В., Федоров О. П., Шувалов В. А. Космічний експеримент «Потенціал» на борту спутника «Сич-2»

Конорев Б. М., Алексеєв Ю. Г., Засуха С. А., Семенов Л. П., Харченко В. С., Чертков Г. Н. Кваліфікаційні испытания критического программного обеспечения космических систем: целевая технология независимой верификации и прогнозирования скрытых дефектов

Шувалов В. А., Приймак А. І., Бандель К. А., Кочубей Г. С., Токмак Н. А. Ефекти магнитогидродинамічного управління теплообменом і торможенiem намагнічених тел в атмосфері і магнітосфері Землі

CONTENTS

- 3 *Lizunov G. V., Glemba V. I., Korepanov V. E., Krjuchko E. I., Lukenjuk A. A., Skorokhod T. V., Fedorov O. P., Shuvalov V. A.* Space experiment «Potential» onboard the «Sich-2» satellite
- 9 *Konorev B. M., Alekseev Yu. G., Zasukha S. A., Semenov L. P., Kharchenko V. S., Chertkov G. N.* Qualification tests of the critical software for space systems: Target technology of independent verification and latent defect prediction
- 27 *Shuvalov V. A., Priymak A. I., Bandel K. A., Kochubey G. S., Tokmak N. A.* Effects of magnetohydrodynamic control in heat exchange and deceleration of magnetized bodies in the Earth's atmosphere and magnetosphere

- Жалило А. А., Желанов А. А., Шелковенков Д. А., Шокало В. М.** Оцінка точності калибровки положення і варіацій фазових центрів приемних GPS/GNSS-антенн
- Боднар О. М., Козлов З. В., Федоровський О. Д.** Системне моделювання природних процесів на основі космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень
- Євтушевський О. М., Грицай А. В., Мілінєвський Г. П.** Антарктична тропопауза у зимово-весняний період
- Агапітов А. В., Черемных О. К.** Генерація соннечним ветром собственных УНЧ-мод магнітосфери Землі
- Бурмака В. П., Черногор Л. Ф.** Волнові возмущення в іоносфері в період весеннего равноденствия 2006 г.
- Черногор Л. Ф., Шамота М. А.** Геомагнітні пульсації, супутствувавши стартам ракет з космодромів КНР
- НАШІ АВТОРИ**
- 39** *Zhalilo A. A., Zhelanov A. A., Shelkovenkov D. A., Shokalo V. M. The accuracy estimation of GPS/GNSS antennas calibration of phase centre and its variations*
- 53** *Bodnar E. N., Kozlov Z. V., Fedorovsky A. D. System modelling of the natural processes on the basis of remote sensing data and ground-based observations*
- 58** *Evtushevsky O. M., Grytsai A. V., Milinevsky G. P. Antarctic tropopause in winter and spring*
- 72** *Agapitov A. V., Cheremnykh O. K. The generation of inherent ULF modes in the Earth's magnetosphere by solar wind*
- 82** *Burmaka V. P., Chernogor L. F. The wave-like disturbances in the ionosphere during vernal equinox in 2006*
- 92** *Chernogor L. F., Shamota M. A. Geomagnetic pulsations associated with rocket launches from the China cosmodromes*
- 100** **OUR AUTHORS**

УДК 550.38

Г. В. Лизунов¹, В. И. Глемба², В. Е. Корепанов²,
Е. И. Крючков¹, А. А. Лукенюк², Т. В. Скороход¹,
О. П. Федоров¹, В. А. Шувалов³

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Київ

²Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Львів

³Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Дніпропетровськ

Космический эксперимент «Потенциал» на борту спутника «Сич-2»

Надійшла до редакції 27.11.07

Наприкінці 2008 р. на циркулярну сонячно-синхронну орбіту з висотою 650км і нахиленням $i = 98^\circ$ планується вивести супутник дистанційного зондування Землі «Січ-2». У корисне навантаження супутника введено приладовий комплекс «Потенциал» для діагностики польового, нейтрального і заряджених компонентів верхньої атмосфери, що включає давачі вимірювання параметрів нейтральних часток ДН1, ДН2, зонд Ленгмюра ДЕ, давач електричного потенціалу ЕЗ, ферозондовий магнітометр ФЗМ і систему збору наукової інформації. Описано основні наукові задачі проекту.

ВВЕДЕНИЕ

Решением Национального космического агентства Украины от 10 октября 2007 г. в полезную нагрузку спутника дистанционного зондирования Земли «Сич-2» включен комплект научной аппаратуры (КНА) «Потенциал» для измерения параметров частиц и полей в верхней атмосфере Земли. Эксперимент ставит целью отработку методов диагностики космической среды и апробацию в летных условиях соответствующего приборного комплекса. Эксперимент «Потенциал» предваряет более масштабный проект космической программы Украины «Ионосат».

Конструктивно КНА «Потенциал» состоит из прибора для диагностики нейтральных частиц ДН, включающего два идентичных датчика ДН1 и ДН2, датчика заряженных частиц ДЭ, электрического зонда ЭЗ, магнитометра ФЗМ, а так-

же системы сбора научной информации ССНИ (табл. 1). Датчики ДН и ДЭ являются разработкой Института технической механики Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины (ИТМ), остальные приборы изготовлены в Львовском центре Института космических исследований Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины (ЛЦ ИКИ).

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА «ПОТЕНЦИАЛ»

Стратегической целью космических проектов «Потенциал» и «Ионосат» [1] помимо проведения научных исследований является отработка методов мониторинга космической погоды и геофизических эффектов в ионосфере. Следует отметить, что ближний космос сегодня стал «сре-

Таблица 1. Комплект научной аппаратуры проекта «Потенциал»

Датчик	Измеряемая величина	Технические характеристики	Разработчики
Датчики кинетических параметров ДН, ДЭ	концентрация нейтральных частиц n_n : $10^4 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$ давление: $10^{-8} \dots 10^{-2} \text{ Па}$ концентрация заряженных частиц n_e : $10^3 \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$ температура электронов T_e : 0.01...1.5 эВ	габариты (без кабелей): ДН: $\varnothing 50 \times 85 \text{ мм}$ ДЭ: $\varnothing 12 \times 248 \text{ мм}$ потребляемая мощность < 2 Вт	ИТМ, Днепропетровск
Электрический зонд ЭЗ	потенциал электрического поля диапазон частот DC — 200 КГц шум $10 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$	потребляемая мощность ≤ 0.2 Вт вес < 0.2 кг габариты (без кабелей): $\varnothing 60 \times 182 \text{ мм}$	ЛЦ ИКИ, Львов
Феррозондовый магнитометр квазипостоянного поля ФЗМ	вектор магнитного поля \mathbf{B} диапазон частот DC — 1 Гц динамический диапазон $\pm 65000 \text{ нТл}$	потребляемая мощность < 0.4 Вт, вес: датчика < 0.2 кг, блока электр. < 0.5 кг габариты (без кабелей): $116 \times 45 \times 40 \text{ мм}$	ЛЦ ИКИ, Львов
Система сбора научной информации ССНИ	объем памяти 4 Гб	потребляемая мощность < 4 Вт, вес < 1 кг	ЛЦ ИКИ, Львов

дой обитания» пилотируемых космических аппаратов и разнообразных технических средств: связи, навигации, дистанционного зондирования Земли и пр. А поскольку количество систем спутникового базирования из года в год возрастает, проблемы и задачи диагностики, изучения и предсказания изменений параметров космической среды актуальны сегодня и в перспективе.

К важнейшим характеристикам околоземной космической среды относятся пространственно-временные распределения нейтральных и заряженных частиц, электромагнитных полей и токов. Эти характеристики взаимозависимы и вариативны, что затрудняет их экспериментальный контроль и адекватное теоретическое прогнозирование.

На высотах ниже 800 км, где концентрация заряженных компонентов не превосходит 10 %, динамика нейтрального газа играет важную, а во многих случаях — определяющую роль в поведении ионосферы. Основная экспериментальная информация о процессах в верхней нейтральной атмосфере получена в наземных наблюдениях именно плазменных возмущений,

в то время как прямые спутниковые измерения параметров нейтральных частиц очень редки. Практически все они были получены несколькими спутниками серии «Эксплорер» (AE-C, AE-E, DE2 и др.) в 1970-х и начале 1980-х гг. С позиций сегодняшнего дня объем информации, переданной на Землю спутниками тех лет, выглядит весьма скромно. Современный космический эксперимент с длительным мониторингом атмосферно-ионосферных параметров позволит исследовать динамику верхней атмосферы на качественно новом уровне.

Для диагностики нейтральных частиц «Эксплореры» оснащались сложными приборными комплексами, включающими инструменты для определения температуры нейтрального газа и масс-спектрометры для измерения концентраций отдельных газовых компонентов. Спутник «Сич-2» предлагается оснастить прибором ДН — датчиком давления для измерения температуры и концентрации нейтральных частиц без определения химического состава; его апробация на борту спутника «Сич-2» является одной из основных задач проекта «Потенциал».

Остальные инструменты КНА предназначены

для синхронной регистрации плазменных и электромагнитных параметров. Для измерения электронной концентрации и температуры служит разработанный в ИТМ датчик заряженных частиц ДЭ, являющийся реализацией зонда Ленгмюра [6].

В качестве служебного магнитометра на спутнике «Сич-2» установлен высокоточный научный прибор — феррозондовый магнитометр ФЗМ, разработанный и изготовленный в ЛЦ ИКИ. Данные этого прибора будут записываться в ССНИ проекта «Потенциал». Говоря о необходимости магнитных измерений, особо подчеркнем актуальность изучения вариаций магнитного поля Земли δB и их связи с динамикой нейтральной атмосферы. Значительный интерес представляют электромагнитные эффекты атмосферных гравитационных волн (АГВ). На высотах E -области АГВ индуцируют системы электрических токов, заполняющих силовую трубку магнитного поля — от части ионосферы, возмущенной прохождением АГВ, до магнитосопряженной ионосферы. Существование таких токонесущих силовых трубок было теоретически предсказано в работе [4] и косвенно подтверждено в этой же работе данными наземных метеомагнитных наблюдений. Поиск электромагнитных структур АГВ в космосе является совершенно новой научной задачей, которая может быть решена с помощью КНА «Потенциал».

Еще один изготовленный в ЛЦ ИКИ прибор полезной нагрузки — электрический зонд ЭЗ — служит для измерения потенциала корпуса спутника относительно плазмы. По данным ЭЗ будет определена компонент квазистационарного электрического поля δE , что позволит оценивать параметр $\delta E/\delta B$, важный для правильной интерпретации магнитогидродинамических процессов в ионосфере.

Измерение потенциала спутника создает дополнительную возможность плазменной диагностики по методике измерения параметров солнечного ветра, предложенной и описанной в работе [5]. Оценка параметров ионосферы с помощью электрического зонда ЭЗ будет одновременно служить независимым тестом работоспособности датчика заряженных частиц ДЭ.

Наличие прибора ЭЗ на борту «Сич-2» открывает возможность проведения технологического эксперимента по измерению собственных элект-

ромагнитных шумов платформы МС-2-8 (разработанной и изготовленной в ГКБ «Южное»). Вопрос об электромагнитной чистоте платформы представляет интерес для ее дальнейшего использования в других космических экспериментах, в частности в проекте «Ионосат».

Космический эксперимент «Потенциал», как и любой другой ионосферный и магнитосферный проект, должен максимально использовать возможности наземной диагностики и активного воздействия на ионосферу. Время от времени «Сич-2» будет проходить над наземными испытательными полигонами, в том числе мощными КВ-передатчиками, что позволит проводить комбинированные эксперименты с нагревом ионосферы и регистрацией эффекта на спутнике. Значительный интерес представляют эксперименты с использованием аврорального стенда Европейской ассоциации ионосферного рассеяния EISCAT (г. Тромсе, Норвегия), сверхмощных стендов HAARP, NIPAS (Аляска, США) и «Сура» (Россия), а также национальных средств: нагревного стенда некогерентного рассеяния Института ионосферы Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины (Харьков), акустического источника ЛЦ ИКИ и пр.

Еще одной актуальной задачей проекта «Потенциал» является проведение синхронных измерений магнитного поля на спутнике и на цепочках многочисленных наземных магнитометрических станций. Такие станции достаточно неравномерно распределены по земному шару: главным образом в высоких широтах обоих полушарий. Регистрация магнитных вариаций в одной силовой трубке на борту «Сич-2» и на земной поверхности позволит решить ряд оригинальных задач наземно-космической интерферометрии собственных и вынужденных колебаний магнитного поля Земли. Особый интерес представляют измерения над Украинской антарктической станцией (УАС) «Академик Вернадский», оснащенной современной магнитной обсерваторией.

Резюмируя вышеизложенное, сформулируем задачи предлагаемого эксперимента.

1. Разработка методологии синхронной регистрации параметров электромагнитного, нейтрального и заряженного компонентов верхней атмосферы. Апробация в космическом эксперименте

датчиков кинетических параметров частиц ДН, ДЭ.

2. Отработка методики диагностики параметров ионосферной плазмы по данным измерений флуктуаций потенциала спутника с помощью электрического зонда ЭЗ.

3. Изучение волновой активности верхней атмосферы. Анализ отдельных событий (case study) и статистических закономерностей.

4. Выявление электромагнитных структур АГВ по данным прямых спутниковых измерений.

5. Измерение характеристик электромагнитных шумов платформы МС-2-8.

6. Проведение комбинированных экспериментов с наземными средствами диагностики и активного воздействия на ионосферу.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРНОМУ КОМПЛЕКСУ И ЦИКЛОГРАММАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Запуск «Сич-2» планируется на конец 2008 г. Спутник предполагается вывести на циркулярную солнечно-синхронную орбиту с высотой около 650 км и наклонением $i = 98^\circ$. Такая орбита пересекает все широтные районы ионосферы: полярные шапки, авроральные овалы, L-оболочки радиационных поясов и пр. В циклограммах включений КНА «Потенциал» следует предусмотреть приоритетные «окна» для проведения экспериментов с наземными средствами дистанционного зондирования ионосферы. К пунктам включений следует отнести прежде всего места расположения национальных геофизических полигонов: г. Харьков и его окрестности, где находятся радар некогерентного рассеяния и станция вертикального зондирования ионосферы (Институт ионосферы Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины), система ионосферного зондирования на базе крупнейшей фазированной антенной решетки радиотелескопа УТР-2, низкочастотная обсерватория (Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины), установки частичного отражения и многочастотного доплеровского зондирования (Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина), магнитометрические системы (Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина и Радиоастрономический

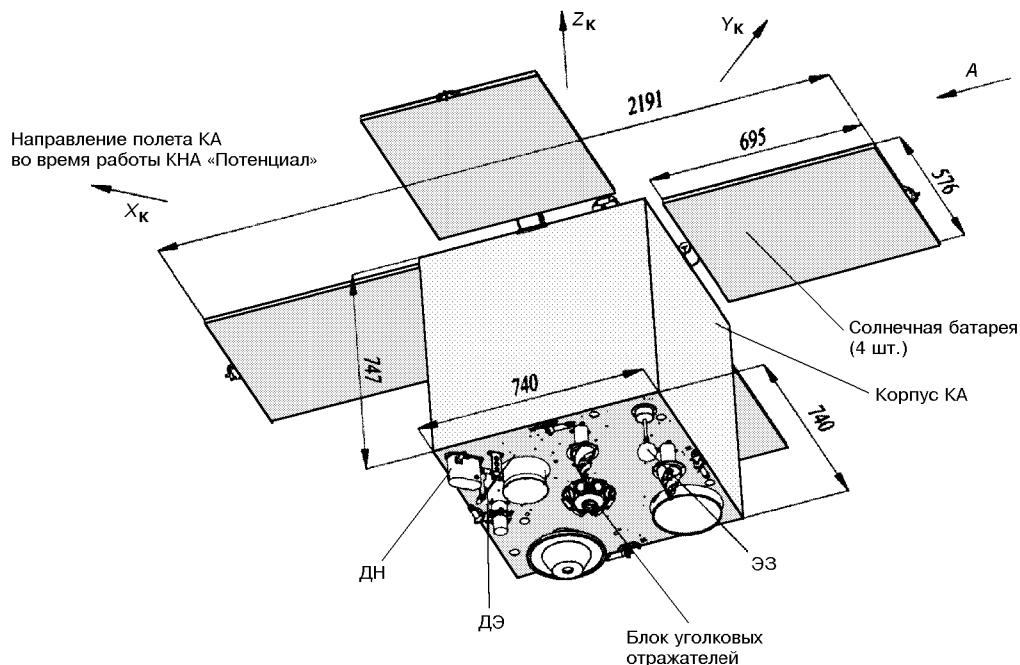
институт Национальной академии наук Украины). Кроме того, на территории Украины расположены такие уникальные системы диагностики, как радиоинтерферометр УРАН (г. Змиев, Полтава, Одесса, Шацк), стенд мощного инфразвукового воздействия (г. Львов, ЛЦ ИКИ), сеть магнитных и метеорологических станций (Госгидромет, ИГУ Национальной академии наук Украины). Необходимо также предусмотреть сеансы измерений при пролете спутника над испытательным полигоном УАС [2, 3].

Средние значения и диапазоны вариаций ионосферных параметров и электромагнитных полей на высотах «Сич-2» хорошо известны. Параметры нейтрального компонента атмосферы изучены недостаточно. Высота 650 км соответствует экзосфере; здесь нейтральные частицы движутся без столкновений по индивидуальным баллистическим траекториям, и атмосферный газ не обладает упругостью. В таких условиях квазиволновые вариации экзосферных параметров возникают вследствие бесстолкновительного переноса возмущений снизу, а экзосферные неоднородности воспроизводят волновую активность атмосферы на высоте экзобазы (около 350 ... 500 км в зависимости от уровня солнечной активности).

Характеристики сигналов, регистрацию которых должен обеспечивать КНА «Потенциал», приведены в табл. 2. Частота опроса датчиков задается быстродействием самого медленного прибора ДН ($f = 1$ Гц). Поскольку при этом

Таблица 2. Характерные величины возмущений электромагнитного поля, плазмы и нейтральных частиц на высоте 650 км

Явление	Параметры сигнала
Квазипостоянные поля и их вариации	магнитное поле Земли: 30000 ... 60000 нТл, вариации: $\delta B \sim 1$ нТл, $\delta B_{\max} \sim 300$ нТл
Заряженные частицы	электростатическое поле: $\delta E \sim 1$ мВ/м, $\delta E_{\max} \sim 0.1$ В/м
Нейтральные частицы	$n_e \sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, $\delta n_e \sim 10^2 \dots 10^4 \text{ см}^{-3}$, $\delta n_{e\max} \sim n_e$ $n_n \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$, $\delta n_n \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, $\delta n_{n\max} \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$



Расположение датчиков эксперимента «Потенциал» на борту «Сич-2»

орбитальное смещение спутника между двумя последовательными отсчетами составляет 7.7 км, масштаб Найквиста, определяющий минимально разрешимую длину волны, равен $2 \times 7.7 \text{ км} = 15.4 \text{ км}$. Этого вполне достаточно для измерения тонкой структуры экзосферных неоднородностей, систем продольных магнитосферно-ионосферных токов, магнитогидродинамических волн, электромагнитных полей, генерируемых АГВ, плазменных «баблов», перемещающихся ионосферных возмущений и пр. Вместе с тем диагностика мелкомасштабных плазменных неоднородностей (минимальные размеры которых сравнимы с величиной дебаевского радиуса около 10 см) в эксперименте «Потенциал» невозможна. Размещение датчиков КЭ на спутнике «Сич-2» показано на рисунке.

РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведение эксперимента «Потенциал» выдвигает определенные требования к ориентации «Сич-2». Прибор для регистрации параметров

нейтральных частиц ДН содержит датчики ДН1 и ДН2, входные отверстия которых направлены взаимно перпендикулярно. Оптимальным является такое положение спутника, когда одно из входных отверстий направлено по вектору движения, что позволяет по комбинации показаний ДН1 и ДН2 разделить динамический напор набегающего на спутник газа и тепловое давление. При иной ориентации спутника «Сич-2» измерения по-прежнему возможны, но интерпретация данных ДН потребует дополнительных расчетов.

Спутник дистанционного зондирования Земли «Сич-2» предусматривает два базовых режима ориентации:

- 1) «на Землю», когда оси спутниковой платформы устанавливаются совершенно определенным образом для проведения измерений приборами дистанционного зондирования Земли. Такое положение удерживается в течение сеанса измерений — около 15 мин;

- 2) ориентация «на Солнце» для зарядки солнечных батарей. В этом режиме спутник проводит основную часть времени, неуправляемо прецессируя вокруг главной оси.

С учетом сказанного можно предложить следующие основные режимы измерений.

1. Мониторинговый-1. Включается в режиме ориентации платформы «Сич-2» «на Землю» (приблизительно на 15 мин). Частота опроса всех датчиков 1 Гц.

2. Мониторинговый-2. Включен непрерывно в режиме ориентации «на Солнце». Частота опроса всех датчиков 1 Гц.

3. Высокочастотный. Имеет целью измерение электромагнитных шумов спутниковой платформы. Длительность включения определяется заполнением квоты памяти эксперимента «Потенциал» в бортовом цифровом вычислительном комплексе. Частота опроса электрического зонда ЭЗ в этом режиме 1 КГц, остальных датчиков — 1 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплект научной аппаратуры «Потенциал» предназначен для длительного мониторинга параметров полевого, нейтрального и заряженного компонентов космической среды на высотах термосфера и экзосфера. Помимо проведения геофизических исследований апробация приборного комплекса «Потенциал» на борту «Сич-2» имеет целью подготовку проекта «Ионосат» Общегосударственной космической программы Украины на 2008—2012 гг.

Работа поддержана контрактами Национального космического агентства Украины № 1 02/03, № 1-05/03 и № 12-14/07.

1. Івченко В. Н., Корепанов В. Є., Лізунов Г. В. та ін. Іоносферний супутниковий проект «Іоносат» // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 3.—С. 55—66.
2. Розробка науково-технічних пропозицій щодо дослідження «космічної погоди»: (Заключний звіт) / ЛЦ ІКД НАНУ і НКАУ; Керівник робіт В. Є. Корепанов. — № 0104V007930 (шифр «КОСМОКАРТА-ЛЦ»). — Львів, 2004.—37 с.
3. Електромагнітні проявлення геофізических ефектів в Антарктиде / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. — Харків: РАІ НАНУ, 2005.—343 с.
4. 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.
5. Grard, R. J. L. Spacecraft potential control and plasma diagnostic using electron field emission probe // Space Sci. Instrum.—1975.—1.—P. 363—373.
6. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Priymak A. I., Kochubey G. S. A probe diagnostics for high-speed flows of rarefied partially dissociated plasma // Instruments and Experimental Techniques.—2007.—5, N 3.—P. 370—378.

SPACE EXPERIMENT «POTENTIAL» ONBOARD THE SICH-2 SATELLITE

*G. V. Lizunov, V. I. Glemba, V. E. Korepanov,
E. I. Krjuchkov, A. A. Lukenjuk, T. V. Skorokhod,
O. P. Fedorov, V. A. Shuvalov*

The remote sensing satellite Sich-2 is planned to be placed in the circular solar-synchronous orbit with the altitude of 650 km and inclination of 98° in late 2008. The satellite payload includes the instrumentation set for diagnostics of neutral, plasma and field components of the upper atmosphere. The set «Potential» includes the sensors DN1, DN2 for the detection of neutral particles, a Langmuir probe, the EZ sensor of electric potential, flux-gate magnetometer FZM and data acquisition system. We describe the main scientific purposes of the project.

Б. М. Конорев^{1, 2}, Ю. Г. Алексеев¹, С. А. Засуха³,
Л. П. Семенов³, В. С. Харченко², Г. Н. Чертков¹

¹Сертифікаційний центр АСУ, Харків

²Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського, Харків

³Національне космічне агентство України, Київ

Квалификационные испытания критического программного обеспечения космических систем: целевая технология независимой верификации и прогнозирования скрытых дефектов

Надійшла до редакції 12.12.07

Представлено концепцію і методологію доказової незалежної верифікації критичного програмного забезпечення (ПО), основаної на кількісних оцінках ступеня різноманітності методів верифікації (вимірювання характеристик ПО). Концепція полягає у використанні методу диверсифікованого вимірювання семантичних, інтервално-точісних, логічних та інших інваріантів (незмінних властивостей) ПО на платформі статичного аналізу первинних текстів ПО. Враховано вимоги гарантоздатності і безпеки сучасних міжнародних стандартів у сфері космічної діяльності.

ВВЕДЕНИЕ

Структура космического комплекса. Критичность программного обеспечения. Развитие космической техники связано с непрерывным ростом требований к функциональным возможностям и эффективности элементов космического комплекса. Способность гибкой программной реализации функций высокой сложности обуславливает тенденцию непрерывного роста объемов программно-реализованных и программно-поддерживаемых функций и степени влияния качества критического программного обеспечения (ПО) на гарантированность и функциональную безопасность элементов космического комплекса [15].

Критическое программное обеспечение — это программное обеспечение, выполняющее функции, важные для безопасности, отказ которых из-за наличия дефектов и ошибок в ПО или неправильная эксплуатация могут привести к катастрофическим последствиям в диапазоне «материальные потери — ущерб окружающей среде — угроза здоровью и жизни людей». Наиболее часто критические функции связаны непосредственно с функционированием физического оборудования при выполнении необратимых операций в реальном времени. Отказы ПО из-за скрытых дефектов в таких случаях могут явиться причиной возникновения аварийных ситуаций и рисков нарушения безопасности при эксплуатации космического комплекса.

Применительно к ПО гарантоспособность (надежность, готовность, обслуживаемость) и функциональная безопасность представляют два связанных, но не идентичных понятия. Гарантоспособность концентрируется на анализе критичности, прогнозировании вероятности скрытых дефектов и обеспечении безотказности ПО. Функциональная безопасность непосредственно связана с тяжестью последствий отказов, а не просто с наличием дефектов ПО. Программное обеспечение становится критическим для безопасности в случаях программной реализации функций управления потенциально опасными системами или процессами [19, 20].

Особенности программного обеспечения космических систем. Оценки гарантоспособности и функциональной безопасности критического ПО необходимо проводить с учетом следующей специфики:

- высокий уровень критичности программно реализуемых функций элемента космического

комплекса и предельно высокие требования к качеству ПО;

- разработка, как правило, оригинального, сложного ПО для создаваемого космического комплекса;
- частые модификации и реинжиниринг ПО в процессе эксплуатации космического комплекса;
- жизненный цикл превышает продолжительность использования обычных компьютерных программ;
- отсутствие достоверных статистических данных по ПО космических систем.

Указанные особенности делают критическое ПО элементов космического комплекса важным (актуальным) объектом нормативного регулирования, разрешительной деятельности и сертификации при создании и эксплуатации космической техники.

Схема контура нормативного регулирования качества (гарантоспособности и функциональ-

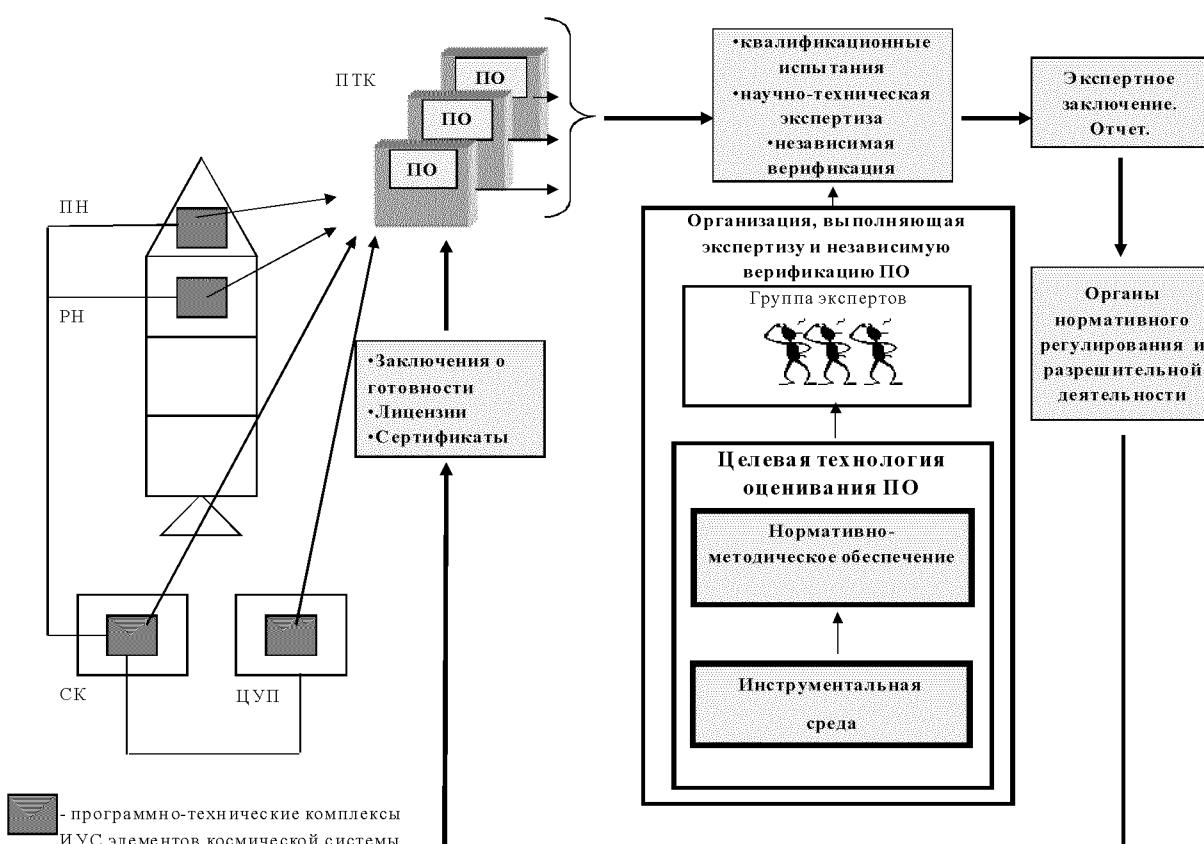


Рис. 1. Контур нормативного регулирования качества программного обеспечения элементов космической системы

ной безопасности) критического ПО представлена на рис. 1. Контур нормативного регулирования определяет общую инфраструктуру и нормативно-методическое обеспечение проведения квалификационных испытаний для всех уровней иерархии космического комплекса.

Применительно к ПО термин «квалификационные испытания» в стандартах ECSS [15] используется для обозначения «общего множества действий по верификации и валидации критического ПО».

В более широком контексте для системного уровня нормативными документами Национального космического агентства Украины этот термин используется для обозначения оценки «готовность к серийному производству» и к использованию по назначению оборудования элемента космического комплекса, включающего в общем случае аппаратные и программные компоненты [10].

Уровень нормативно-методического и инструментального оснащения работ в контурах нормативного регулирования качества критического ПО в значительной мере определяет реальные возможности достижения требуемых показателей гарантоспособности и функциональной безопасности космического комплекса в целом.

Нормативная база квалификационных испытаний критического программного обеспечения. Согласно таксономии международных стандартов в сфере информационных технологий и программной инженерии может быть определена 3-уровневая классификационная схема процессов квалификационных испытаний критического ПО, представленная на рис. 2.

Иерархия структуры классификационной схемы образуется на основе отношений «состоит из» или «входит в состав» элементов архитектуры процессов квалификационных испытаний и обеспечивает представление требований в диапазоне «что-как» («какая работа должна быть выполнена: цели, задачи» — «как выполнить конкретную работу: технологические инструкции»).

На верхнем уровне таксономии определяются требования к «Процессам» квалификационных испытаний, исходя в большей степени из того, какая работа должна быть выполнена или какие результаты должны быть достигнуты, а не из того, как организовать и выполнить конкретную



Рис. 2. Таксономия требований к процессам квалификационных испытаний критического программного обеспечения: 1 — процессы (фундаментальные методики квалификационных испытаний), 2 — методология (модели, методы, метрики, целевые технологии), 3 — технологические инструкции

работу. Это позволяет предприятиям и организационным структурам использовать имеющиеся в их распоряжении методы везде, где они эффективны, исключая необходимость в переделке действующих стандартов. Процессы анализа и оценки гарантоспособности и функциональной безопасности критического ПО при квалификационных испытаниях представлены набором стандартных фундаментальных методик.

На уровне таксономии «Методология» определяются требования к моделям, методам, метрикам, представляющим целевые технологии процессов квалификационных испытаний критического ПО.

И наконец, на уровне таксономии «Технологические инструкции» определяются производственные инструкции целевых технологий — стандарты конкретного предприятия, включающие конкретные технологические операции и измерение их результатов с использованием установленных на уровне «Методология» метрик.

Стандартами ECSS определяются требования, методы и методики анализа критичности и оценки характеристик гарантоспособности и функциональной безопасности на системном уровне для космического комплекса в целом и для его элементов [17, 18]. На их базе формируется профиль требований для критического ПО, гармонизированный со стандартами системного уровня [11—13, 19, 20].

Профиль требований регламентирует обязательное использование базового набора фундаментальных методик, включающих:

- независимую верификацию и валидацию критического ПО (IS V & V);
- анализ видов, влияния и критичности отказов критического ПО (SFMEA/SFMECA);
- анализ дерева дефектов ПО (SFTA);
- обнаружение, изоляция и удаление отказов ПО (SFDIR);
- анализ аппаратно-программных взаимодействий (HSIA);
- анализ безопасности и анализ эксплуатационной безопасности для ПО (HAZOP);
- анализ отказа по общей причине (SCCFA);
- историю эксплуатации ПО.

Фундаментальные методики квалификационных испытаний критического ПО полностью интегрированы в соответствующие методики системного уровня. Их проведение на всех этапах жизненного цикла в виде набора итеративных процедур является активным инструментом улучшения характеристик проекта ПО или процессов. Стандартный набор фундаментальных методик представляет спецификацию, семантику и объемы работ по «Программам обеспечения безопасности и гарантии продукта», в которых определяется полный объем квалификационных испытаний проекта критического ПО.

Реализация фундаментальных методик (процессов) квалификационных испытаний критического ПО основана на разработке соответствующих целевых технологий. Общими требованиями к целевым технологиям являются:

- обеспечение необходимой достоверности результатов, выраженной как точность или степень неопределенности оценок при использовании предлагаемых моделей, методов, метрик;
- компьютеризация и использование утилит как путь повышения достоверности результатов и снижения трудоемкости работ;
- рентабельность как комплексная характеристика, выражающая достижение установленной степени неопределенности квалификационных оценок при допустимых (минимальных) затратах ресурсов.

Методология целевых технологий должна быть представлена сбалансированной совокупностью моделей, методов и метрик, обеспечиваю-

щей эффективное решение задач квалификационных испытаний критического ПО.

В силу отмеченных ранее особенностей ПО космической техники целевая технология независимой верификации критического ПО является одной из самых информативных и значимых при квалификационных испытаниях. Это определяет ее высокую актуальность как важного механизма достижения требуемых уровней гарантоспособности и функциональной безопасности космического комплекса в целом и его элементов при реализации критических функций.

Модель переходов состояний проекта критического программного обеспечения. Важным механизмом управления разработкой космического комплекса является проведение обзоров (совместных пересмотров — Review). Базовый принцип проведения обзоров состоит в том, что они реализуются с привлечением независимой экспертизы для полной и всесторонней оценки технического состояния проекта на ключевых этапах создания элементов космического комплекса.

Результативная реализация процессов обзоров позволяет квалифицировать состояние проекта критического ПО [15]. Модель переходов состояний проекта ПО приведена на рис. 3. Цели и задачи обзоров варьируются в зависимости от фазы работ. Обязательная спецификация обзоров проекта критического ПО включает:

- обзор требований (SSR);
- предварительный обзор проекта (PDR);
- критический обзор проекта (CDR);
- обзор квалификационных испытаний (QR);
- обзор приемо-сдаточных испытаний (AR).

Обзор квалификационных испытаний должен содержать результаты реализации фундаментальных методик анализа и оценки гарантоспособности и функциональной безопасности критического ПО, представляющих основное содержание «Программ обеспечения качества (гарантии продукта) и безопасности» конкретного проекта ПО.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработка методологии и нормативно-методического обеспечения целевой технологии доказа-

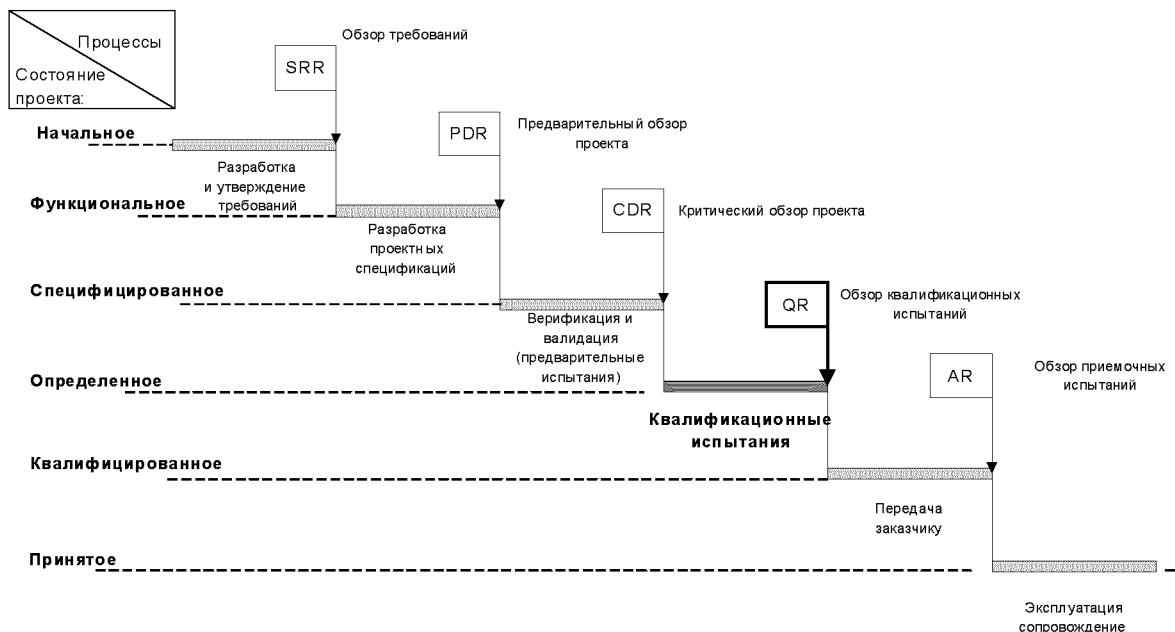


Рис. 3. Модель переходов состояний проекта программного обеспечения космической системы

тельной независимой верификации критического ПО, обеспечивающей:

- повышение достоверности результатов независимой верификации на основе метода диверсифицированного измерения семантических, интервально-точностных, логических и др. инвариантов (неизменных свойств ПО) на платформе статического анализа исходных текстов ПО.
- рентабельное прогнозирование вероятности скрытых дефектов с требуемой степенью неопределенности оценок;
- оценку полноты тестового покрытия при доказательной независимой верификации.

Связь с «Общегосударственной космической программой Украины на 2008–2012 гг.». Разработка целевой технологии доказательной независимой верификации критического ПО представляет базовую междисциплинарную задачу раздела 5 «Космические комплексы», тем 5.5 «Качество», 5.6 «Сертификация», 5.7 «Стандарты» «Общегосударственной космической программы Украины на 2008–2012 гг.» [6].

Предлагаемый подход основан на нормативной базе Национального космического агентства

Украины [11–13] и гармонизирован с соответствующими стандартами Европейской кооперации по стандартизации в сфере космической деятельности ECSS [17–20].

Учет опыта квалификационных испытаний критического программного обеспечения при создании ракетно-космической техники в СССР. При разработке целевой технологии независимой верификации критического ПО учтен также и актуальный в настоящее время для космической отрасли Украины 25-летний опыт разработки критического ПО систем управления профилирующих объектов ракетно-космической техники СССР в период 1965–1990 гг. организацией АО «Хартрон» [2]. Перечень профилирующих объектов включает:

- сверхмощную ракету-носитель «Энергия» космического комплекса «Энергия — Буран» [5];
- несколько поколений стратегических межконтинентальных баллистических типов 15А14, 15А18, 15А30, 15А35 и др. [3];
- тяжелые орбитальные модули «Квант», «Кристалл», «Природа» и орбитальные пилотируемые станции «Салют» и «Мир» [1].

В частности, в настоящее время продолжает оставаться весьма актуальной многоверсионная

технология квалификационных испытаний критического ПО с использованием на заключительном этапе «электронного пуска». Многоверсионная технология включает испытания критического ПО в связанных технологических контурах с использованием разомкнутых и замкнутых схем моделирования [2]. Синхронизация и привязка результатов к шкале жесткого регламента времени производится с использованием механизма контрольных точек, которыми оснащается инструментированная версия критического ПО. «Электронный пуск» представляет цикл имитационного моделирования, проводимый на специальных исследовательских стендах [4], включающих инструментальную ЭВМ, реализующую математическую модель объекта управления, реальную БЦВМ, актуальную для конкретного цикла натурных испытаний версию ПО БЦВМ и полетное задание конкретного запуска ракеты (или соответственно суточное, недельное полетное задание проведения динамических операций на орбите космического аппарата).

Вариант многоверсионной технологии квалификационных испытаний критического ПО с проведением «электронного пуска» на стартовой позиции с полетным заданием конкретного за-

пуска реализован при квалификационных испытаниях критического ПО СУ ракеты-носителя «Энергия» [5]. В настоящее время многоверсионная методология с использованием метода «электронного пуска» активно применяется в программах создания ракеты-носителя «Циклон-4», коммерческих запусков ИСЗ с использованием МБР «Днепр», «Стрела», «Рокот».

Эффективность этой методологии квалификационных испытаний критического ПО подтверждена результатами проведенных в 1970—1980 гг. свыше 300 циклов натурных испытаний различных типов профилирующих объектов ракетно-космической техники [2].

КОНЦЕПЦИЯ

Предлагаемая целевая технология доказательной независимой верификации и прогнозирования скрытых дефектов критического ПО основана на использовании усовершенствованной методологии статического анализа исходных текстов ПО, обеспечивающей:

- повышение достоверности оценок характеристик ПО за счет реализации принципов



Рис. 4. Функциональная IDEF0-модель сценария независимой верификации

технологического разнообразия (диверсности) и независимости на основе метода диверсифицированного измерения семантических, интервально-точностных, логических и других инвариантов ПО (физических или абстрактных свойств ПО, не изменяющихся по определению в течение жизненного цикла);

- прогнозирование вероятности скрытых дефектов ПО на основе экспериментальной калибровки чувствительности и степени разнообразия диверсных методов измерения инвариантов в условиях конкретного проекта ПО, методом посева тестовых дефектов;
- управление рентабельностью (путем минимизации расходуемых ресурсов) прогноза вероятности скрытых дефектов с использованием индикатора снижения вероятности остаточных дефектов ПО в процессе реализации композиции диверсных методов измерения инвариантов, при этом функциональная безопасность космической системы трактуется как нахождение системы в условиях проектного риска аномального функционирования в течение установленного срока эксплуатации. В качестве метрики оценки риска в общем случае используется двумерная величина (мера) прогнозируемых уровней рисков $m_{ij} = (B, T)$, связывающая вероятность скрытых дефектов B и тяжесть последствий их проявления на системном уровне T .
- оценку полноты тестового покрытия критического ПО при доказательной независимой верификации методом прямой и обратной трассировки множеств дизьюнктов: а) опорной (ссылочной) и оценочной моделей качества ПО; б) технического задания (спецификации требований к ПО); в) проектных определений и обоснований (проектно-конструкторской документации ПО).

Методология. Основные положения. Модели и методы. Методология целевой технологии доказательной независимой верификации критического ПО космических систем базируется на следующих основных положениях.

1. Процессный подход. Сценарий целевой технологии независимой верификации представляет сеть взаимодействующих процессов, реализующих три концепт-методики:

- нормализация проекта ПО как объекта экспертизы;

- измерение инвариантов и оценка характеристик качества ПО;
- калибровка чувствительности и степени разнообразия методов измерения инвариантов и прогноз вероятности скрытых дефектов ПО.

Функциональная модель сценария (рис. 4) разрабатывается на основе методологии IDEF0 моделирования [14] и представляет иерархию моделей различных уровней детализации процессов сценария.

Аксиоматикой построения функциональной модели сценария определяются следующие элементы процессного подхода:

- концепт-методики, которые представляют сложно протекающие процессы, определяющие спецификации частично упорядоченных множеств задач или рабочих пакетов.
- рабочий пакет, который является базовым элементом сценария, определяющим функционально завершенную процедуру, а полная спецификация рабочих пакетов обеспечивает построение и поддержку работ сценария на аналитическом, информационном и организационном уровнях. Рабочий пакет является основной единицей планирования работ сценария.
- процедуры выполнения рабочих пакетов, которые по способу реализации могут быть: не автоматизированными, компьютеризированными (с использованием утилит), комбинированными. Утилиты представляют инструментальные средства решения проблем фиксации, накопления, распространения и повторного использования передового опыта в сфере оценивания соответствия критического ПО нормативным (регулирующим) требованиям.
- механизм управления работами сценария (входы на верхней грани прямоугольника, обозначающего концепт-методику) представлены «Планом сценария», «Нормативным профилем проекта ПО», «Ограничениями».
- механизмы исполнения рабочих пакетов (входы на нижней грани концепт-методик) представлены «Методиками», «Утилитами», «Инструментариями».
- результаты реализации концепт-методик (выходы правых граней) представлены «Схемой измерения инвариантов проекта ПО», «Результатами решения систем линейных уравнений и неравенств, описывающих отображения инвариантов на всех уровнях иерархии проек-

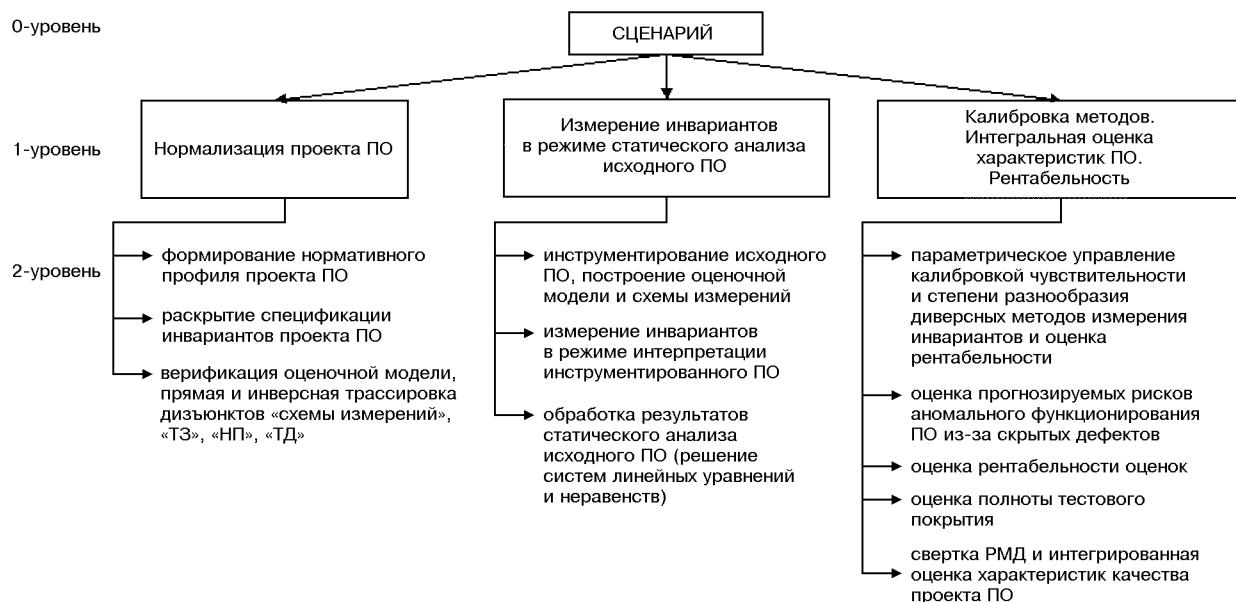


Рис. 5. Дерево узлов функциональной IDEF0-модели сценария

та ПО» и «Оценками: характеристик качества ПО, прогноза вероятности скрытых дефектов, полноты тестового покрытия и рентабельности независимой верификации в целом».

- экспериментальная калибровка чувствительности и степени разнообразия диверсных методов измерения инвариантов для получения количественных оценок и достижения установленной рентабельности сценария независимой верификации критического ПО в целом осуществляется с использованием контура «Калибровка» на основе обратной связи типа «выход-управление».

Полная спецификация рабочих пакетов (заданий) сценария независимой верификации представлена деревом узлов 0-1-2 уровней иерархии функциональной IDEF0-модели на рис. 5.

Критерий завершенности сценария независимой верификации формулируется как достижение установленной степени неопределенности (достоверности) оценок вероятности скрытых дефектов ПО при приемлемом (минимальном) уровне затрат ресурсов. Критерий в целом определяет уровень рентабельности целевой технологии доказательной независимой верификации критического ПО.



Рис. 6. Общая схема измерения характеристик программного обеспечения. Опорная и оценочная модели

В целом же измеренные при независимой верификации инварианты ПО представляют базу первичных атрибутов (примитивов), с использованием которых могут быть оценены (вычислены метрики) базовые характеристики внутреннего и внешнего качества и качества в использовании критического ПО в соответствии

с международной и национальной нормативной базой [11–13, 21–23].

2. Нормализация проекта программного обеспечения. Цель нормализации заключается в построении верифицированных: опорной (ссылочной) модели (ОМ) и совместимой оценочной модели (СОМ), обеспечивающих достоверную оценку соответствия характеристик качества конкретного проекта ПО предъявляемым требованиям при независимой верификации. Качественно совместимость ОМ и СОМ см. на рис. 6.

Для нормализации проекта критического ПО необходимо наличие:

- спецификации требований, содержащихся в техническом задании (ТЗ) или технических условиях;
- файлов проектных определений и обоснований, содержащих полный комплект технической (проектно-конструкторской) документации (ТД) проекта ПО;
- ссылочная нормативная база, содержащая перечень стандартов и нормативных документов, выполнение которых является обязательным или рекомендуемым для конкретного проекта ПО.

Опорная (ссылочная) модель (ОМ) представляет нормативный профиль (НП) проекта ПО, включающий спецификацию гармонизированных дизьюнктов требований общепромышленных и отраслевых стандартов ссылочной нормативной базы проекта ПО.

Формирование НП производится с использованием скрининг-технологии, обеспечивающей отбор (просеивание) и гармонизацию дизьюнктов ссылочной базы проекта.

Общая схема использования скрининг-технологии приведена на рис. 7. Основные этапы скрининг-технологии:

- скрининг 1 — формирование структуры (шаблона) препарированной профилюобразующей базы (ППБ) на основе общей таксономии международных стандартов программной инженерии и информационных технологий.
- скрининг 2 — формирование содержания ППБ на основе отбора дизьюнктов ссылочной профилюобразующей базы (ПБ) проекта в соответствии со структурой ППБ.
- скрининг 3 — гармонизация дизьюнктов на уровнях «Процессы», «Методология», «Про-

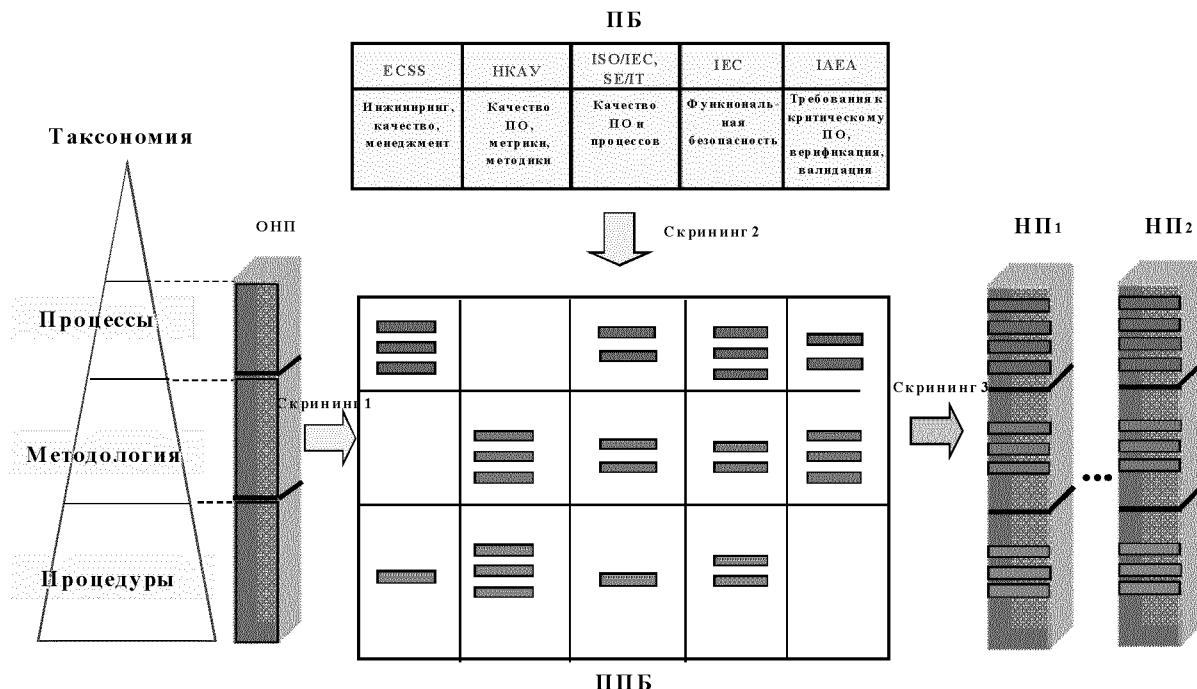


Рис. 7. Профилирование требований. Скрининг-технология формирования опорной (ссылочной) модели

цедуры» ППБ и формирование НП конкретного проекта ПО.

Совместная оценочная модель (СОМ) представляет расширение ОМ, выполняемое с целью определения метрик (методов и шкал) измерения атрибутов ПО конкретного проекта ПО.

Базовой процедурой формирования СОМ является раскрытие спецификаций атрибутов-инвариантов конкретного проекта ПО и определение спецификации (состава) методик их измерения и оценки.

Формально СОМ может быть описана как декартово произведение множеств дизъюнктов

$$\text{СОМ} \subseteq \text{НП} \times \text{TЗ} \times \text{ТД}.$$

Раскрытие спецификации инвариантов проекта ПО производится на базе модели консолидированной оценки качества ПО. Основные элементы моделей соответствуют стандартам [21–23] и представлены в секторах А, Б, В рис. 8.

В секторе А представлены модели внутреннего качества ПО, внешнего качества ПО и качества ПО в использовании, относящиеся к стадиям

(фазам) жизненного цикла «Спецификация ПО», «Интеграция ПО», «Функционирование на реальной платформе» соответственно.

Каждой модели качества ПО поставлены в соответствие множество A_1, A_2, A_3 атрибутов и метрик для их измерения.

В секторе Б представлена модель оценки качества процессов ПО — модель технологической зрелости (Capability Maturity Model — СММ) и общий вид статистических моделей точности прогноза и распределения разбросов (дисперсии) оценок целевых функций для различных (пяти) уровней технологической зрелости процессов организации-разработчика ПО.

В результате консолидированного рассмотрения моделей качества продукта и процессов ПО формируется суперпозиция — объединение множеств атрибутов и метрик A_1, A_2, A_3 , определяющих базу анализа и оценки качества ПО (сектор В). Такая база является отправной точкой формирования СОМ при нормализации проекта ПО.

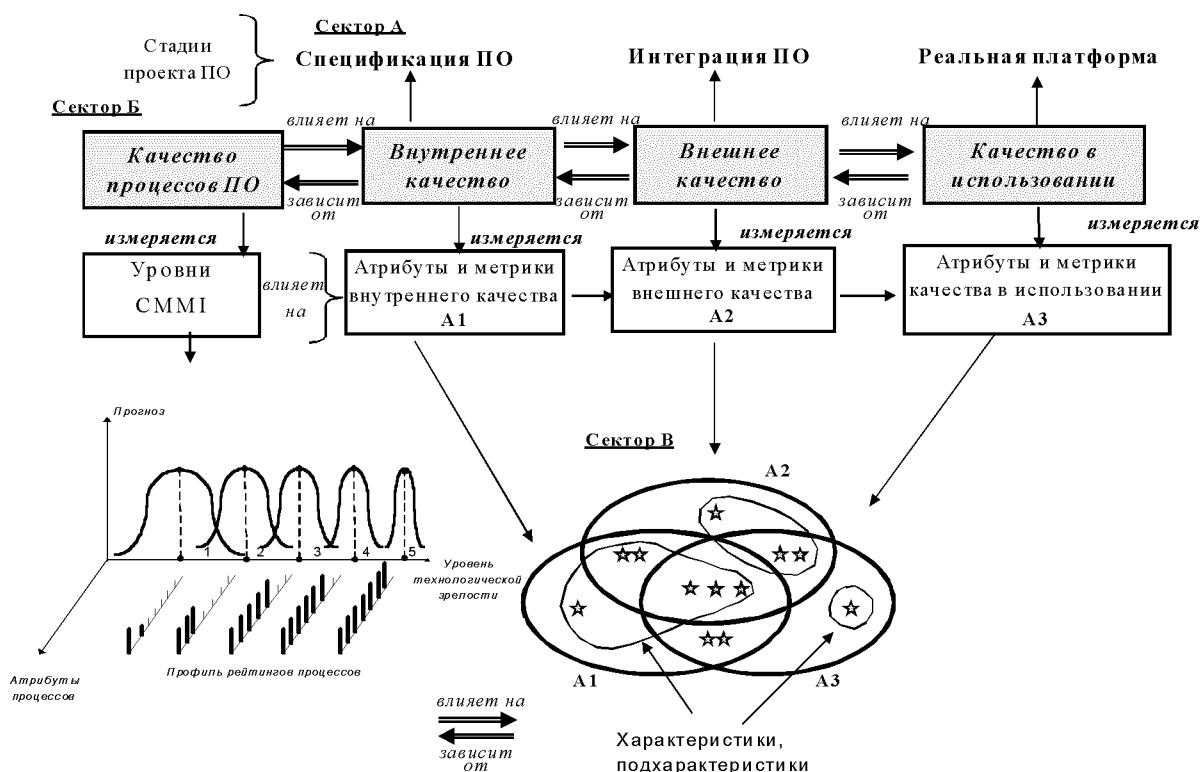


Рис. 8. Консолидированная опорная (сырьичная) модель измерения качества программного обеспечения

Основные задачи СОМ состоят в том, чтобы:

- создать основу (платформу) для объединения состояния проекта ПО в процессе его разработки с ответственностью за обеспечение (гарантии) качества;
- обеспечить раннюю идентификацию и устранение проблемы;
- обеспечить базис для ключевых выборов (проектных решений) как с технической так и с управлеченческой точек зрения при учете проектных ограничений, таких как стоимость, график, качество и функциональность;
- прослеживать специфические цели проекта;
- защищать и обосновывать проектные решения в течение жизненного цикла.

Верификация СОМ проводится методом исчерпывающей прямой и обратной трассировки взаимного соответствия дизьюнктов множеств НП, ТЗ, ТД. Трассировка — это процедура специфирования и анализа отношений между дизьюнктами (элементами) множеств.

Главной задачей верификации является представление доказательств истинности отношений следствия и эквивалентности между дизьюнктами на основании выполнения процедур трассировки. Критерием являются значения «истина/ложь» при анализе отношений эквивалентности (\Leftrightarrow) или импликации (следствия) (\rightarrow) между дизьюнктами (элементами) этих множеств. Исчерпывающая трассировка достигается при последовательной реализации трассировки соответствия дизьюнктов проекций декартова произведения СОМ \subseteq НП \times ТЗ \times ТД, $\Pi_{p1.2} \subseteq$ НП \times ТЗ, $\Pi_{p2.3} \subseteq$ ТЗ \times ТД, $\Pi_{p1.3} \subseteq$ НП \times ТД.

Верифицированная СОМ является необходимым промежуточным продуктом реализации сценария целевой технологии независимой верификации.

3. Диверсифицированное измерение инвариантов ПО на платформе статического анализа исходных текстов. Формальная модель ПО может быть представлена отображением $\Gamma: X \rightarrow Y$, где Γ — формула или операторное отображение, содержащее упорядоченный перечень математических (компьютерных) операций, таких как сложение, умножение, деление, корень, степень, логарифм, ветвление, логика и т. п. Относительные количества таких операций в проекте ПО образуют операционный спектр (профиль), являющийся также статистическим инвариан-

том конкретного ПО.

При отображении реализуются заданные для конкретного проекта ПО отношения между элементами области определения X и области значений Y . Свойство неизменности (постоянства) реализованных отношений в течение жизненного цикла определяет возможность рассматривать ПО в целом как инвариант. В общем случае реализованное ПО отображение может быть представлено спецификацией, включающей в первом приближении следующие типы инвариантов:

- физическая размерность переменных (семантика);
- числовая размерность переменных (интервал);
- логическая схема вычислений переменных (алгоритмы решаемой задачи);
- спецификация требований к ПО (функциональные возможности и ограничения);
- требуемые ресурсы вычислительной платформы (объемы ЗУ, производительность).

Для оценки качества ПО в общем случае [16, 19, 23] используются базовые характеристики: функциональность, надежность, эффективность, практичность, переносимость, обслуживаемость (удобство эксплуатации), качество в использовании (включая функциональную безопасность). При выборе метрик для оценки этих характеристик в качестве примитивов — первичных атрибутов в предлагаемом подходе используются инварианты ПО, представляющие неизменные физические или абстрактные свойства ПО [7].

Модель консолидированной оценки качества ПО, представленная на рис. 8, позволяет сформировать базу анализа и оценки качества ПО в виде суперпозиции (объединения) множеств атрибутов UA_i , $i = \overline{1, 3}$ внутреннего качества ($i = 1$), внешнего качества ($i = 2$) и качества в использовании ($i = 3$), устанавливаемых в общем случае с учетом статистической связи с моделью технологической зрелости процессов жизненного цикла ПО.

Возможные скрытые дефекты ПО могут быть причиной искажения инвариантов, проявляющегося как потеря свойств неизменности или ошибки ПО. Проявление скрытых дефектов (ошибка ПО) в процессе эксплуатации ПО может приводить к отказам на системном уровне.

Методы измерения различных типов инвариантов характеризуются различной чувствительностью к скрытым дефектам ПО. На этом основана концепция диверсифицированного измерения инвариантов и реализации многоверсионных технологий на платформе статического анализа для повышения достоверности и точности результатов независимой верификации критического ПО. Дефекты ПО могут быть причиной искажения инвариантов. Критерием для оценки измеренного значения атрибута-инварианта ПО является его неизменность.

Методы измерения инвариантов характеризуются в общем случае разной чувствительностью, выражаемой вероятностью обнаружения дефекта ПО. Степень разнообразия каждой пары методов в общем виде представлена вероятностью дефектов ПО, не обнаруживаемых обоими методами. Совокупность диверсных методов измерения инвариантов, реализованных на платформе статического анализа исходных текстов ПО, образует многоверсионную технологию диверсифициро-

ванного измерения атрибутов-инвариантов ПО. Реальное разнообразие диверсных методов является необходимым условием повышения достоверности (уменьшения неопределенности) при использовании многоверсионной технологии измерения инвариантов ПО [8].

Количественная оценка степени разнообразия представляет базовую характеристику метода диверсифицированного измерения инвариантов ПО при независимой верификации.

Общая схема диверсифицированного измерения инвариантов и теоретико-множественная модель интегральной проверяющей способности (чувствительности) композиции диверсных технологий верификации, основанных на измерении инвариантов ПО, представлена на рис. 9. Иллюстрируется случай измерения двух типов инвариантов, являющихся подмножествами базы консолидированной оценки качества UA_i , $i = \overline{1, 3}$. Схема включает две базовые процедуры:

- инструментирование исходного ПО, заключающееся в формировании технологической

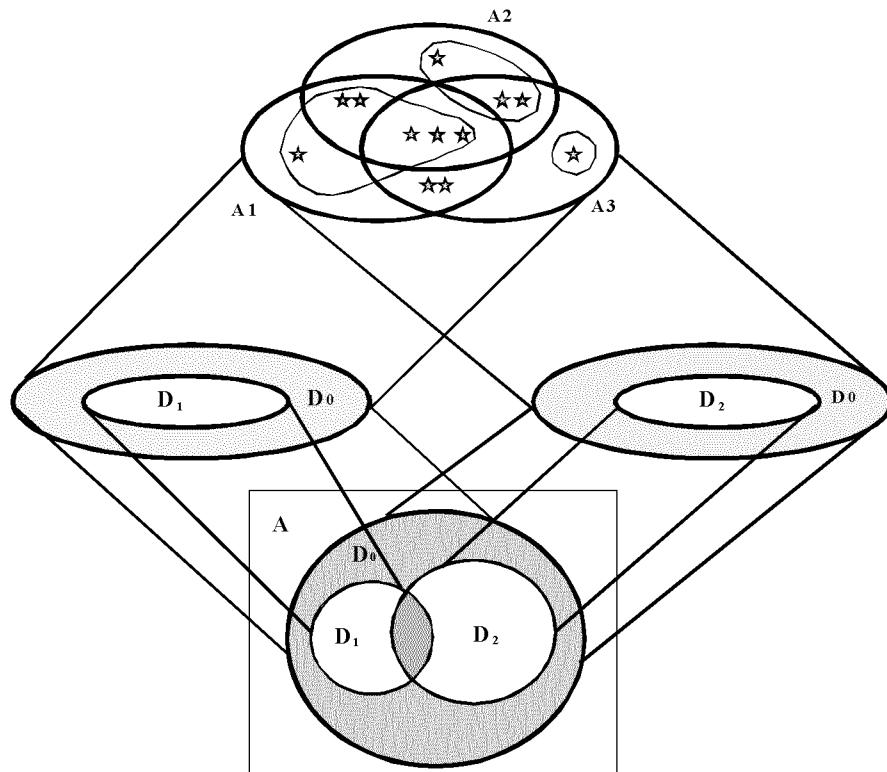


Рис. 9. Диверсифицированное измерение инвариантов программного обеспечения

- версии — инструментированной модели исходного ПО, в которой определены контрольные точки — зонды, содержащие исходные данные и алгебру оценки различных инвариантов;
- интерпретация инструментированной версии исходного ПО и измерение в контрольных точках инвариантов для реализованных в ПО операторных отображений и ветвлений и оценка сохранения значений инвариантов.

Результаты измерения представлены с помощью диаграммы Эйлера — Венна, на которой A — адресное пространство ПО, D_0 — исходное множество дефектов, D_1 и D_2 — множества дефектов, обнаруженных при диверсифицированном измерении двух типов инвариантов ПО.

Различная чувствительность к дефектам ПО разных типов диверсных методов измерения инвариантов определяют мощности множеств $|D_1|$ и $|D_2|$. Взаимное положение множеств D_1 и D_2 определяет степень разнообразия (диверсности) методов измерения инвариантов $|D_1 \cap D_2| / |D_1 \cup D_2|$ и множество остаточных дефектов, не обнаруживаемых обоими методами после последовательной реализации (композиции) двух диверсных методов $D_0 \setminus (D_1 \cup D_2)$, определяющих интегральную чувствительность композиции реализованных методов измерения инвариантов.

Для прогнозирования вероятности скрытых дефектов критического ПО при независимой верификации используется инверсная теоретико-множественная модель остаточных дефектов композиции диверсных методов измерения инвариантов (см. рис. 10).

Модель представлена диаграммой Эйлера — Венна для суперпозиции виртуальных подмножеств остаточных дефектов $D_1 \dots D_i \dots D_n$ композиции диверсных методов измерения инвариантов с различными чувствительностью и степенью диверсности (разнообразия).

Главным параметром модели является $\cap D_i$ — множество остаточных дефектов, не обнаруженных ни одним из методов. Модель обеспечивает проведение анализа и оценки возможных вариантов суперпозиции (взаимного расположения) множества скрытых дефектов ПО, не обнаруженных на предыдущих этапах до независимой верификации (позиции 1, 2, 3) и множества дефектов, не обнаруженных ни одним из мето-

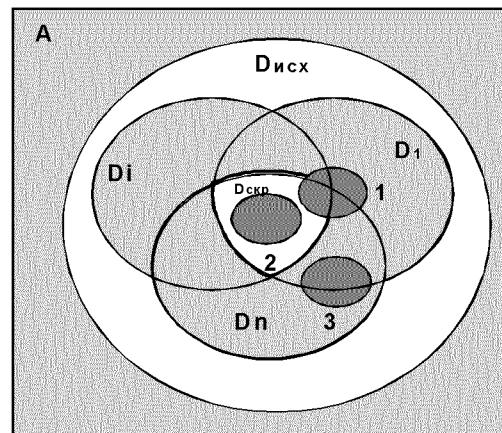


Рис. 10. Инверсная модель остаточных (скрытых) дефектов программного обеспечения для композиции диверсных методов измерения инвариантов

дов композиции диверсных методов при независимой верификации.

Индикатором оценки достигаемого эффекта является величина (в %), на которую уменьшается вероятность скрытых дефектов $P(D_{\text{скр}})$ в процессе последовательной реализации композиции диверсных методов измерения инвариантов при независимой верификации

$$I = P(D_{\text{скр}}) - \frac{|\cap D_i \setminus D_{\text{скр}}|}{|D_{\text{скр}}|} \cdot P(D_{\text{скр}}).$$

Если при независимой верификации не будут обнаружены $D_{\text{скр}}$, то $I = 0$, и величина отношения $|\cap D_i| / |D_i|$ может служить основой рамочной оценки вероятности скрытых дефектов.

Возможны варианты:

- теоретически возможный случай уменьшения вероятности скрытых дефектов на 100 % ($(\cup D_i) \cap D_{\text{скр}} = \emptyset$, $I = 1$ (позиция 3, рис. 10),
- максимально неблагоприятный вариант $D_{\text{скр}} \subset \cap D_i$ (позиция 2, рис. 10),
- общий случай $(\cup D_i) \cap D_{\text{скр}} \neq \emptyset$, $I = \overline{0, 1}$ (позиция 1, рис. 10).

Таким образом, целевая технология доказательной независимой верификации обеспечивает оценку снижения вероятности скрытых дефектов на величину в диапазоне 0—100 % (в пределе на 100 %) в зависимости от характеристик конкретного проекта ПО.

4. Количественная оценка вероятности скрытых дефектов на основе экспериментальной калибровки чувствительности и степени разнообразия диверсных методов измерения инвариантов. Целью независимой верификации критического ПО является предоставление объективных (достоверных) доказательств соответствия ПО предъявляемым требованиям. Такими доказательствами в предлагаемом подходе служат результаты диверсифицированного измерения инвариантов ПО. Естественным критерием для оценки результатов измерений является подтверждение неизменности (сохранения) инвариантов ПО.

В то же время задача прогнозирования скрытых дефектов критического ПО, наряду с фундаментальными практиками анализа и оценки гарантированности и функциональной безопасности ПО космических систем, обуславливает необходимость количественных вероятностных оценок бездефектности критического ПО. Реализация количественных оценок основана на экспериментальной калибровке чувствительности (как вероятности обнаружения дефектов) и степени разнообразия диверсных методов измерения инвариантов в условиях конкретного проекта ПО. Калибровка осуществляется методом «посева» тестовых дефектов в ПО в соответствии с установленным профилем дефектов и последующего обнаружения их с использованием мето-

дов измерения инвариантов. Специфика конкретного проекта учитывается путем использования для посева профиля дефектов, отражающего типы и процентный состав операций конкретного проекта ПО.

Реализация калибровки методом «посева» тестовых дефектов производится с помощью модифицированного метода «капельной» (точечной) инъекции единичных тестовых дефектов и итеративного выполнения процедуры «инъекция — обнаружение — устранение». Инъекция единичных тестовых дефектов по определению исключает вредные эффекты интерференции и мутации тестовых дефектов в адресном пространстве ПО. Последовательная реализация такой процедуры при калибровке позволяет определять виртуальные подмножества остаточных дефектов, характеризующие парциальную (по типам дефектов) и полную (по профилю дефектов в целом) чувствительность каждого метода измерения инвариантов.

Использование откалиброванных методов является основой для количественной оценки с необходимой точностью интегральной чувствительности реализованной композиции диверсных методов измерения инвариантов, выражаемой как вероятность остаточных дефектов ПО. Оценка интегральной чувствительности проводится с использованием индикатора уменьшения вероятности остаточных дефектов после реали-

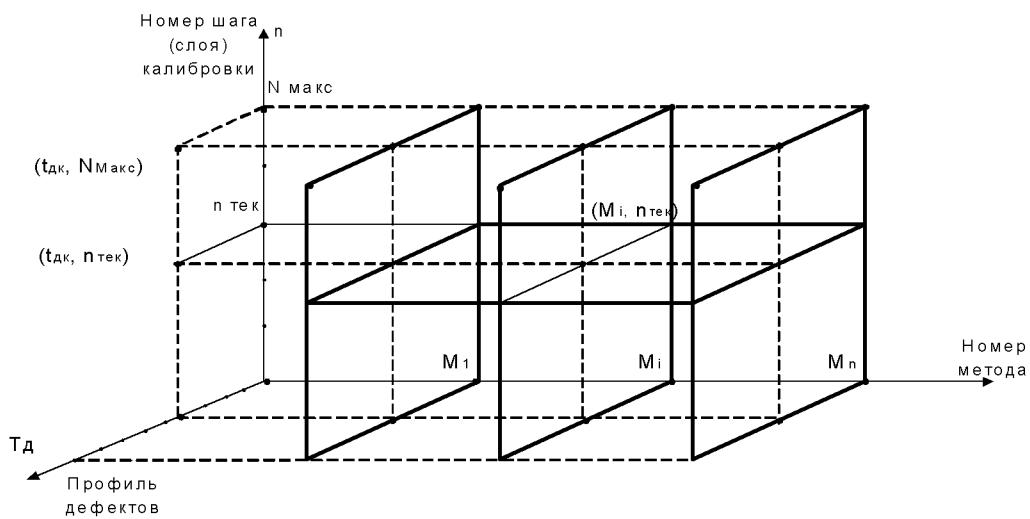


Рис. 11. Пространство результатов реализации процедуры инъекция-обнаружение тестового дефекта при калибровке методом посева дефектов

зации каждого последующего метода измерения инвариантов. Итоговое значение индикатора для композиции методов может лежать в диапазоне 0–100 % (в пределе вероятность скрытых дефектов ПО может быть уменьшена теоретически на 100 %, т. е. до 0 в зависимости от характеристик конкретного проекта).

Экспериментальная калибровка парциальной и полной чувствительности каждого метода и интегральной чувствительности композиции диверсных методов производится в контексте пространства калибровочных испытаний (рис. 11), представляющего декартово произведение

$$\Pi_{\text{ки}} \subseteq N \times M \times T,$$

где $N = \{n_i\}$ — множество инъекций тестовых дефектов, реализованных при калибровке; $M = \{m_j\}$ — множество калибруемых методов измерения инвариантов; $T = \{t_k\}$ — множество типов инъектируемых тестовых дефектов или профиль дефектов. $\Pi_{\text{ки}}$ — определяет множество (кортеж) исходов — результатов экспериментов при калибровке. Значение элемента $\Pi_{\text{ки}}$ с координатой $(n_i; m_j; t_k)$ может принимать значение 0, если тестовый дефект не обнаружен, или 1, если тестовый дефект обнаружен.

Инъекция кортежа $T = t_k$ при калибровке метода $M = m_j$ представляет шаг или слой калибровки в пространстве $\Pi_{\text{ки}}$.

На каждом шаге n_i для каждого метода m_j выполняется итеративная параметрически управляемая процедура, включающая последовательность операций:

- определение на основании спектра операций конкретного проекта ПО в адресном пространстве точки (адреса) для инъекции тестового дефекта;
- инъекция тестового дефекта в инструментированную версию исходного ПО;
- цикл интерпретации инструментированной версии исходного ПО, оснащенной контрольными точками — зондами измерения инвариантов, и извлечение тестового дефекта;
- регистрация результатов обнаружения дефекта и формирование множеств обнаруженных и не обнаруженных (остаточных) дефектов;
- формирование для каждой пары калибруемых методов текущих значений элементов

матрицы разнообразия $m_{ij} = 1 - (\cap D_i / \cup D_i)$, где D_i — множество остаточных дефектов и индикатора I уменьшения вероятности остаточных дефектов ПО;

По результатам обработки полного объема калибровки для условий конкретного проекта ПО определяются:

- гистограмма распределения значений парциальной (по типам дефектов профиля) чувствительности методов измерения инвариантов (см. рис. 12);
- полная (для полного профиля дефектов) чувствительность диверсных методов измерения инвариантов;
- интегральная чувствительность композиции диверсных методов измерения инвариантов с учетом их степени разнообразия на основе модели остаточных дефектов (см. базовый принцип 3).

На гистограмме (рис. 12) значком «минус» обозначены объемы работ, которые могут быть исключены при калибровке для уменьшения затрат ресурсов и повышения рентабельности.

Прекращение инъекций дефектов при формировании гистограммы значений парциальной чувствительности метода производится, исходя из величин среднего значения P и дисперсии σ вероятности обнаружения дефекта.

Минимальный объем выборки $n_{i \min}$ (число шагов калибровки метода по типу дефекта) определяется по схеме [9]:

- устанавливается достоверность оценки γ ;
- определяется аргумент t функции Лапласа $\Phi(t) = \gamma/2$;
- устанавливается точность оценки $\delta = t\sigma/\sqrt{n}$;
- определяется доверительный интервал $\bar{P} \pm \delta$;
- определяется минимальный объем выборки при калибровке парциальной чувствительности метода $n_{i \min} = t^2\sigma^2/\delta^2$;
- определяется минимальный объем выборки для всех методов композиции, обеспечивающий достижение установленной точности прогноза вероятности скрытых дефектов критического ПО после независимой верификации, составляет $n_{\Sigma} = \max(n_{i \min})$.

5. Оценка полноты тестового покрытия и рентабельности целевой технологии независимой верификации. Полнота тестового покрытия, достигаемая при использовании целевой техно-

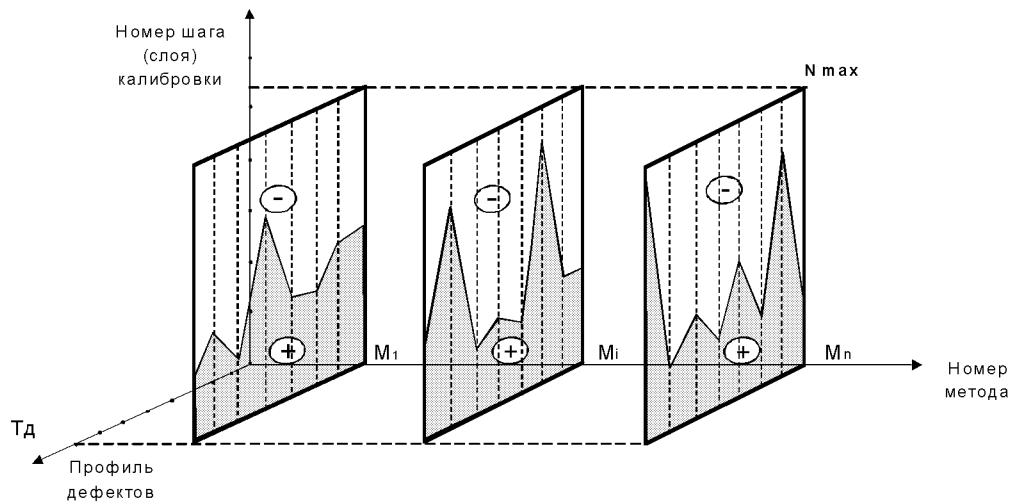


Рис. 12. Гистограмма значений парциальной (к типам дефектов профиля) калибровки чувствительности методов измерения инвариантов программного обеспечения в условиях конкретного проекта

логии независимой верификации, оценивается для двух уровней представления проекта ПО:

- 1) спецификации требований, проектные определения и проектные обоснования;
- 2) исходные тексты (коды) ПО.

Для первого уровня в качестве метрики оценки тестового покрытия используется мера полноты оценок отношений эквивалентности и импликативности дизъюнктов множеств НП, ТЗ, ТД при верификации совместимой оценочной модели на этапе нормализации проекта ПО. По результатам измерения инвариантов ПО в соответствии с совместимой оценочной моделью мера полноты тестового покрытия уточняется.

Для второго уровня в качестве метрики и меры используется интегральная чувствительность реализованной при независимой верификации композиции диверсных методов измерения инвариантов ПО. Общей стратегией является достижение максимальных значений обоих показателей полноты тестового покрытия на уровнях спецификации требований и программной реализации, определяющих общую достоверность результатов и прогноза скрытых дефектов ПО.

Рентабельность целевой технологии независимой верификации определяется как достижение установленной степени неопределенности (достоверности) прогноза скрытых дефектов ПО

при минимальных затратах ресурсов. В качестве индикатора количественной оценки используется величина изменения вероятности скрытых дефектов ПО. Значение индикатора определяется для каждого шага калибровки композиции диверсных методов измерения инвариантов. Калибровка чувствительности и степени разнообразия диверсных методов в условиях конкретного проекта ПО обеспечивает требуемую точность (достоверность) индикатора.

Ресурсоемкость (затратность) независимой верификации определяется рядом факторов. Эффект рентабельности определяется минимизацией главных из них:

- выбор минимально необходимого числа шагов калибровки методов измерения инвариантов n_{\min} для получения статистически достоверных результатов;
- выбор профилей тестовых дефектов для калибровки на основе экспериментально измеренного спектра операций конкретного проекта ПО;
- выбор спецификации диверсных методов измерения инвариантов на основе спектра операций конкретного проекта и статистики по чувствительности методов;
- выбор для анализа областей адресного пространства (модулей) ПО при калибровках,

исходя из предположений (доказательств) стационарности статистических характеристик конкретного проекта ПО.

Наиболее значимым параметром является число шагов калибровки n_{\min} . Шаг калибровки представляет итеративно выполняемую процедуру, для кортежа профиля дефектов включающую «инъекцию единичного дефекта — обнаружение — протоколирование — исключение дефекта и обработку результатов». Параметры управления итерациями — «инвариант ПО», «тип дефекта», «число шагов калибровки».

Число шагов $n_{i \min}$ калибровки метода M_i определяется по выбранным значениям сводных показателей достоверности, точности и доверительного интервала оценки матожидания вероятности бездефектности (чувствительности) калибруемого метода M_i измерения инвариантов. Определение n_{\min} производится в процессе калибровки и используется как признак останова итеративной процедуры.

В результате для калибровки композиции M_i суммарное число шагов равно $N_k \min = \max(n_{i \min})$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целевая технология доказательной независимой верификации и прогнозирования вероятности скрытых дефектов критического ПО представляет одну из ключевых методик анализа критичности и оценок гарантоспособности и функциональной безопасности при квалификационных испытаниях космических систем. Эффективность и рентабельность такой технологии в значительной мере определяют реальные возможности достижения необходимых уровней гарантоспособности и функциональной безопасности разрабатываемой космической системы в целом.

Предложенный подход (концепция, методология, модели и методы):

- расширяет реальные возможности организаций — разработчиков и регулирующих органов в части повышения достоверности и точности прогнозирования рисков аномального функционирования космических систем из-за дефектов критического ПО в общем контексте квалификационных испытаний.
- обеспечивает возможность количественно оценивать предельные значения и управлять

снижением вероятности скрытых дефектов критического ПО в диапазоне 0—100 % (в пределе на 100 % в зависимости от характеристик проекта ПО и приемлемых уровней рентабельности);

- определяет методологическую основу для решения актуальной междисциплинарной задачи разработки нормативно-методического и инструментального обеспечения оценок гарантоспособности и функциональной безопасности критического ПО космических систем в рамках раздела 5 «Космические комплексы», тем 5.5 «Стандарт», 5.6 «Сертификат», 5.7 «Качество» «Общегосударственной космической программы Украины на 2008—2012 гг.»

1. Айзенберг Я. Е., Бек А. В., Конорев Б. М. и др. Система управления транспортного корабля снабжения и функционально-грузовых орбитальных модулей «Квант», «Кристалл», «Спектр», «Природа». Теоретические принципы построения, управляющие алгоритмы и программы, разработка, отработка, натурные испытания // Цикл работ. — Харьков: Хартрон, 1966—1996.
2. Айзенберг Я. Е., Бек А. В., Конорев Б. М. и др. Динамическая отработка программного обеспечения бортовых цифровых вычислительных машин систем управления объектов ракетно-космической техники // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 1/2.—С. 61—74.
3. Айзенберг Я. Е., Златкин Ю. М., Конорев Б. М. и др. Система управления семейства межконтинентальных баллистических ракет. Теоретические принципы построения, алгоритмы управления и контроля, ПО БЦВМ, разработка, отработка, натурные испытания // Цикл работ. — Харьков: Хартрон, 1964—1991 гг.
4. Айзенберг Я. Е., Конорев Б. М. Организация имитационного моделирования в автоматизированных системах производства программ реального времени // УСиМ.—1982.—№ 4.—С. 83—87.
5. Айзенберг Я. Е., Конорев Б. М., Щербаченко В. Т. и др. Комплекс автономного управления ракеты-носителя «Энергия». Теоретические принципы построения, управляющие алгоритмы и программы, разработка, отработка, натурные испытания // Цикл работ. — Харьков: Хартрон, 1985—1990 гг.
6. Загальнодержавна космічна програма України на 2008—2012 рр. — Київ: НКАУ, 2007. <http://www.nkau.gov.ua>
7. Конорев Б. М., Алексеев Ю. Г., Засуха С. А. и др. Модель оценивания качества ПО ИУС критического применения на основе инвариантов // Радиоэлектронные и компьютерные системы.—2006.—№ 7.—С. 162—170.
8. Конорев Б. М., Засуха С. А., Семенов Л. П. и др. Методология оценки качества и функциональной безопасности критического программного обеспечения эле-

- ментов космических систем // Сучасні тренажерно-навчальні комплекси та системи: Зб. наук. праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. — Київ, 2006.—Т. 2.—С. 85—89.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1970.—720 с.
 10. Правила космічної діяльності в Україні. Проведення наукової і науково-технічної експертизи проектів, науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення і вимоги: Затверджено НКАУ України УРКТ-10.03. — Київ, 2006.—91 с.
 11. СОУ-Н НКАУ 0012:2006. Галузева система управління якістю. Вимоги до якості програмного забезпечення програмно-технічних комплексів критичного призначення / НКАУ. — Запров. 01.09.06. — Київ, 2006.—118 с.
 12. СОУ-Н НКАУ 0031:2007. Галузева система управління якістю. Методи оцінки показників якості програмного забезпечення програмно-технічних комплексів критичного призначення / НКАУ. — Запров. 01.01.08. — Київ, 2007.—128 с.
 13. СОУ-Н НКАУ 0058:2008. Галузева система управління якістю. Вимога до функціональної безпеки ПЗ програмно-технічних комплексів критичного призначення / НКАУ. — 2008.—60 с.
 14. Функциональное моделирование. Методология IDEF0. Стандарт. Русская версия. — М.: Мета Технология, 1993.—108 с.
 15. ECSS-E-40 Part 1B—2003. Космічний інжиніринг. Програмне забезпечення. Ч. 1: Принципи та вимоги = Space engineering. Software. Part 1: Principles and requirements.
 16. ECSS-E-40 Part 2B—2005. Космічний інжиніринг. Програмне забезпечення. Ч. 2: Визначення вимог до документів = Space engineering. Software. Part 2: Document requirements definitions (DRDs).
 17. ECSS-Q-30B-2002. Гарантія продукції космічного призначення. Гарантоздатність = Space product assurance. Dependability.
 18. ECSS-Q-40B-2002. Гарантія продукції космічного призначення. Безпека = Space product assurance. Safety.
 19. ECSS-Q-80B-2002. Гарантія продукції космічного призначення. Гарантія програмного продукту = Space product assurance. Software product assurance.
 20. ECSS-Q-80-2003. Гарантія продукції космічного призначення. Методи та методики оцінки надійності та безпеки програмного забезпечення = Space product assurance. Methods and techniques to support the assessment of software dependability and safety.
 21. ISO 25000:2005. Космічний інжиніринг. Вимоги до якості та оцінка програмного забезпечення (SQuaRE) — Настанова з SQuaRE = Software Engineering — Software Product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE.
 22. ISO/IEC 14598-1:1999. Інформаційні технології — оцінювання програмного продукту. Ч. 1: Загальний огляд = Information technology — Software product evaluation — Part 1: General.
 23. ISO/IEC TR 9126-1-4:2001-2004. Інжиніринг програмного забезпечення — Якість продукту = Software Engineering — Product Quality.

**QUALIFICATION TESTS OF THE CRITICAL SOFTWARE FOR SPACE SYSTEMS:
TARGET TECHNOLOGY OF INDEPENDENT
VERIFICATION AND LATENT DEFECT PREDICTION**

*B. M. Konorev, Yu. G. Alekseev, S. A. Zasukha,
L. P. Semenov, V. S. Kharchenko, G. N. Chertkov*

We present a conception and methodology for independent verification and validation of critical software (SW) which are based on the quantitative estimation of measure of verification methods variety (software characteristic measurement). The conception consists in using the diverse measurement method for interval-precision, logical and other software invariants (constant properties) on the basis of static analysis of SW sources. The dependability and safety requirements of existed international standards in space activity area are taken into account.

УДК 533.95

В. А. Шувалов, А. И. Приймак, К. А. Бандель,
Г. С. Кочубей, Н. А. Токмак

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України,
Дніпропетровськ

Эффекты магнитогидродинамического управления теплообменом и торможением намагниченных тел в атмосфере и магнитосфере Земли

Надійшла до редакції 03.04.08

Показано, что повертання власного магнітного поля тіла у потоці плазми є ефективним засобом управління конвективним теплообміном та аеродинамічною якістю діелектричного тіла при осесиметричному обтіканні.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитогидродинамическое (МГД) взаимодействие намагниченного тела с потоками разреженной плазмы типично для Земли, других планет Солнечной системы и спускаемых аппаратов (СА), оснащенных сверхпроводящим бортовым магнитом [3, 11, 32]. Для спускаемых аппаратов МГД-система может служить альтернативой неразрушающейся многоразовой теплозащите. Магнитное поле с индукцией порядка 1 Тл экранирует поверхность СА от прямого контакта с набегающим потоком плазмы. Сила Лоренца, возникающая в результате воздействия магнитного поля СА на плазму в сжатом ударном слое, тормозит поток и отодвигает ударную волну от поверхности тела. Вследствие такого взаимодействия происходит изменение теплового потока и сил, действующих на тело, контролируемым образом — с помощью МГД-системы. Техноло-

гии создания сильных магнитных полей на основе сверхпроводящих материалов сделали идею МГД-управления для СА вполне реальной. По данным [31, 32] такая система создается для капсулы OREX (Япония).

Планета Земля в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы солнечного ветра — естественная МГД-система. Собственное магнитное поле тела гидродинамизирует картину обтекания. Несмотря на отличия в режимах обтекания, свойствах плазмы, можно выделить общие закономерности, характеризующие взаимодействие в системе «намагниченное тело — плазма».

К настоящему времени выполнено значительное количество работ, посвященных численному моделированию и исследованию различных аспектов проблемы. Экспериментальные исследования скучны и ограничены узким диапазоном параметров МГД-взаимодействия. Это обусловлено в первую очередь сложностью физического

моделирования процессов и явлений, сопровождающих МГД-взаимодействие в системе «плазма — тело». Данные приближенного численного анализа [5, 6, 15, 29, 31, 32, 35, 37] и экспериментальных исследований [17, 35, 34, 36, 20] свидетельствуют о наличии эффектов МГД-торможения и снижения теплового потока на поверхность диэлектрического намагниченного тела, когда вектор индукции \mathbf{B} собственного магнитного поля тела и вектор скорости \mathbf{V} набегающего потока плазмы направлены навстречу друг другу.

Цель данной работы — расширить диапазон параметров МГД-взаимодействия, исследовать эффекты влияния взаимной ориентации векторов \mathbf{B} и \mathbf{V} на величину конвективного теплового потока и аэродинамические характеристики намагниченного тела, обосновать возможность и эффективность МГД-управления аэродинамическим качеством и теплообменом тела вращением собственного магнитного поля относительно вектора скорости набегающего потока плазмы.

ПАРАМЕТРЫ ПОДОБИЯ МГД-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ПЛАЗМА — ТЕЛО»

В системе «плазма — тело» рассматривается взаимодействие намагниченного тела и невозмущенного его магнитным полем потока плазмы:

«солнечный ветер — Земля» — взаимодействие невозмущенного потока разреженной плазмы солнечного ветра (СВ) с магнитным полем Земли;
 «спускаемый аппарат — набегающий поток» — взаимодействие невозмущенной магнитным полем спускаемого аппарата плазмы за ударной волной с собственным магнитным полем СА;
 «поток плазмы — модель на стенде» — взаимодействие невозмущенного магнитным полем тела потока разреженной плазмы с собственным магнитным полем модели.

Характерным параметром подобия в системе «солнечный ветер — Земля» является магнитное число Рейнольдса $Re_{m_1} = 4 \pi \mu \sigma_1 R_3 V_1$, где μ — магнитная проницаемость, σ_1 — проводимость,

V_1 — скорость невозмущенного потока плазмы СВ, R_3 — радиус Земли. Вблизи орбиты Земли концентрация ионов солнечного ветра (протонов) $N_{i1} = 8.7 \text{ см}^{-3}$, скорость ионов солнечного ветра $V_{i1} = 468 \text{ км/с}$, температура ионов $T_{i1} = 7 \cdot 10^4 \text{ К}$, температура электронов $T_{e1} = 1.4 \cdot 10^5 \text{ К}$, индукция межпланетного магнитного поля $B_1 = 5...5.2 \text{ нТл}$ [3, 7].

Вторым параметром подобия, характеризующим взаимодействие в системе «плазма — намагниченное тело» при $Re_{m_1} \gg 1$, является отношение единичной объемной магнитной силы $B^2/4\pi R$ к силе инерции $\rho_1 V_1^2/R$, (R — характерный размер тела, ρ_1 — плотность невозмущенного потока плазмы) или $P_B/P_{g1} = B^2/(4\pi\mu\rho_1 V_1^2)$ — отношение магнитного давления $P_B = B^2/(8\pi\mu)$ к скоростному напору $P_{g1} = \rho_1 V_1^2/2$ [2].

Для системы «солнечный ветер — Земля» (на экваторе магнитное поле Земли $B_3 = 31 \text{ мкТл}$, на полюсе — 62 мкТл) отношение $P_B^{\text{Земля}}/P_{g1}^{\text{СВ}} \approx 10^4...10^5$.

Для системы «спускаемый аппарат — набегающий поток» на высоте $h = 60 \text{ км}$ (например для спускаемого модуля OREX) в невозмущенном потоке давление равно $P_1 = 23.6 \text{ Па}$, температура $T_1 = 250 \text{ К}$, концентрация нейтральных частиц $N_{n1} = 7.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, молекулярная масса частиц $M_1 = 29$, плотность $\rho_1 = 3.5 \cdot 10^{-7} \text{ г/см}^3$, скорость потока $V_1 = 5.562 \text{ км/с}$ [32].

За ударной волной с учетом диссоциации и ионизации параметры среды равны: $P_2 = 500 \text{ Па}$, $\rho_2/\rho_1 = 13.4$, $T_2 \approx 5300 \text{ К}$, $N_{n2} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, степень ионизации плазмы $\alpha_i \approx 0.01$ [14, 12, 10, 21].

На высоте $h = 60 \text{ км}$ проводимость невозмущенной магнитным полем тела плазмы за ударной волной для СА OREX ($R_{CA} = 1.7 \text{ м}$) равна $\sigma_2 \approx 115 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ [32]; и $Re_{m_2} = 4\pi\mu\sigma_2 V_2 R_{CA} = 1.3$ (здесь $V_2 = V_1 \rho_1 / \rho_2$). За ударной волной с учетом степени ионизации α_i динамическое давление плазмы можно представить в виде

$$P_{g2} = \alpha \rho_2 V_2^2 / 2 \approx \alpha \rho_1 V_1^2 / (2\xi),$$

тогда

$$P_B^{CA}/P_{g_2} = \xi B_{CA}^2/(4\pi\mu\alpha\rho_1 V_1^2),$$

где $\xi = \rho_1/\rho_2$. Для СА OREX при $\alpha_i \approx 0.01$ и индукции магнитного поля $B_{CA} = 0.5$ Тл [32] следует $P_B^{CA}/P_{g_2} = 2600$.

МГД-взаимодействие СА с плазмой за ударной волной относится к случаю взаимодействия тела со средой с конечной проводимостью. Иногда в качестве параметра подобия МГД-взаимодействия спускаемых аппаратов с атмосферой Земли используется величина $Q_B = Re_{m_2} P_B^{CA}/P_{g_2} = \sigma_2 B_{CA}^2 R_{CA}/(\rho_1 V_1)$, как правило, без учета степени ионизации плазмы за ударной волной. На высоте $h = 60$ км для СА OREX в соответствии с таким определением параметра МГД-взаимодействия $Q_B = 26$ при $B_{CA} = 0.5$ Тл и $Q_B = 104$ при $B_{CA} = 1.0$ Тл. Эти значения Q_B согласуются с оценками работ [34, 30].

При физическом (стендовом) моделировании МГД-взаимодействия намагниченных тел со сверхзвуковыми потоками плазмы, как и для системы «солнечный ветер — Земля», определяющими являются параметры потока плазмы, не возмущенной магнитным полем тела. В вакуумной камере стенда Института технической механики (ИТМ) при концентрации ионов $N_{i_1} \approx \approx 10^{15} \dots 10^{17} \text{ м}^{-3}$, индукции магнитного поля в критической точке модели (затупленное тело) $B_M \approx 5 \dots 1000$ мТл, скоростях ионов атомарно-молекулярного азота $V_1^{N_2} \approx 8.3 \dots 21.6 \text{ км/с}$, степени диссоциации плазмы $\zeta_{d_1} \approx 0.6$, степени ионизации среды $0.001 \leq \alpha_{i_1} \leq 0.1$, рабочих давлениях $0.1 \dots 0.01 \text{ Па}$ и $T_{e_1} \approx 1 \dots 3 \text{ эВ}$, $T_{i_1}/T_{e_1} \approx 0.1 \dots 0.3$ реализованы следующие значения параметров подобия [26]:

- отношение магнитного давления к скоростному напору невозмущенного потока плазмы $1.1 \leq P_B/P_{g_1} \leq 29000$, где $P_B/P_{g_1} = B_M^2/(4\pi\mu\rho_1 V_1^2)$, магнитное число Рейнольдса $1.8 \leq Re_{m_1} \leq 13.7$ — (здесь $Re_{m_1} = 4\pi\sigma_1\mu V_1 R_M$, R_M — характерный размер модели),
- параметр МГД-взаимодействия $2 \leq Q_B \leq 4 \cdot 10^5$ для моделей радиусом $R_M \geq 0.04$ и $Q_B = \sigma_1 B_M^2 R_M / (\rho_1 V_1)$.

На плазмодинамическом стенде при $R_M \geq 4.3$ см реализуется режим МГД-взаимодействия тела со средой с конечной проводимостью. Магнитное поле гидродинамицирует картину обтекания. При отсутствии собственного магнитного поля и обтекании тела плазмой в бесстолкновительном режиме структуру возмущенной зоны при $R/\lambda_d \gg 10$ (λ_d — дебаевский радиус невозмущенной плазмы) определяет спутный след (КА, Луна). С появлением собственного магнитного поля у поверхности тела формируются магнитосфера, ударная волна, полярные каспы и т. д. Такая структура формируется при

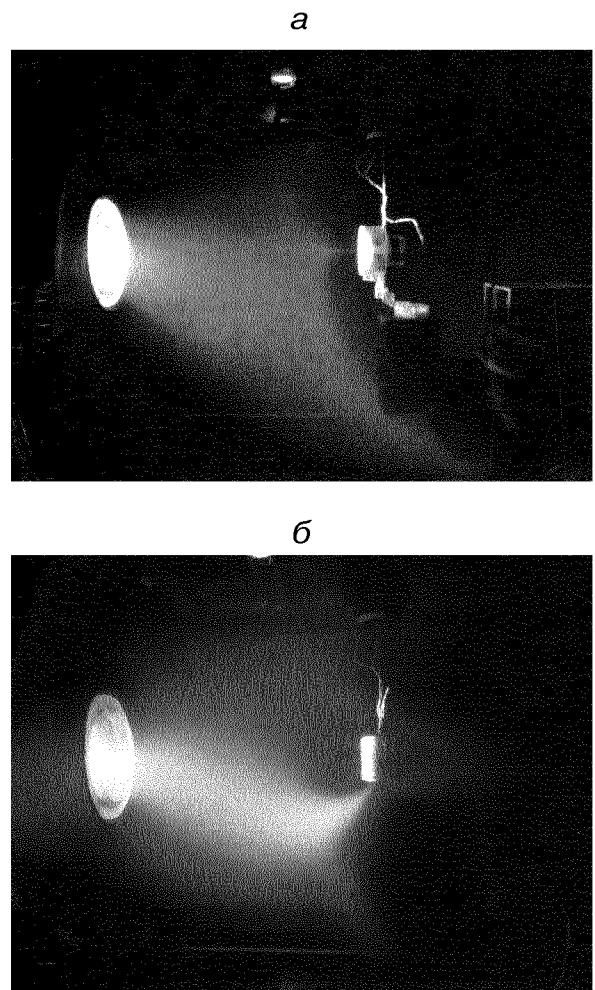


Рис. 1. Обтекание модели (короткого цилиндра) потоком плазмы при $V_1 \parallel B_M$ (а) и $V_1 \perp B_M$ (б)

Таблица 1. Параметры подобия МГД-взаимодействия намагниченного тела с потоками плазмы

Модель	P_B/P_g	Re_m	Q_B	R/ρ_e	R/ρ_i	ρ_i/d_p	$B_{\text{внеш}}/B_{\text{тело}}$
Солнечный ветер — Земля	$10^4 - 10^5$	10^{12}	$10^{16} - 10^{17}$	> 1	> 1	10^{-4}	10^{-4}
Спускаемый аппарат — плазма, OREX, $h = 60$ км	2600	1.3	26—104	> 1	< 1	~ 1.0	10^{-4}
Плазма — модель на стенде	1.0—30000	1.8—13.7	$2.0 - 4 \cdot 10^5$	> 1	< 1	~ 1.0	0.01—0.001

обтекании Земли солнечным ветром, обтекании намагниченных тел сверхзвуковым потоком разреженной плазмы на стенде [23, 25]. На рис. 1 показана картина обтекания короткого намагниченного цилиндра сверхзвуковым потоком разреженной плазмы частично диссоциированного азота при $V_1 \parallel B_M$ (рис. 1, *a*, векторы V_1 и B_M направлены друг навстречу другу) и $V_1 \perp B_M$ (рис. 1, *б*).

В рассматриваемых выше случаях набегающий на тело поток плазмы движется во внешнем магнитном поле:

- плазма солнечного ветра движется в межпланетном магнитном поле;
- для СА плазма за ударной волной движется в магнитном поле Земли;
- на стенде поток плазмы движется во внешнем магнитном поле плазменного ускорителя.

Поэтому при исследовании взаимодействия намагниченного тела с потоком плазмы целесообразно использовать традиционные параметры подобия, такие как отношение характерного размера тела к ларморовским радиусам ионов R/ρ_i и электронов R/ρ_e , а также отношение индукции внешнего магнитного поля к индукции собственного магнитного поля тела.

Для системы «солнечный ветер — Земля» $R_3/\rho_e^{\text{СВ}} \approx 2700 \gg 1$ и $R_3/\rho_i^{\text{СВ}} \approx 90 \gg 1$ (реализуется модель сильного магнитного поля).

В системе «СА — плазма» (например OREX) для индукции магнитного поля «экватор — полюс» имеем $R_{\text{СА}}/\rho_e \approx 10 \gg 1$ и $R_{\text{СА}}/\rho_i \approx 0.1 \ll 1$, т. е. реализуется модель сильного поля по отношению к электронам и слабого для ионов. На стенде ИТМ для моделей радиусом $R_M \geq 4.3$ см при индукции внешнего магнитного поля $B_1 \approx 1.0$ мТл реализуется модель слабого магнит-

ного поля по отношению к ионам: $R_M/\rho_e \gg 1$ и $R_M/\rho_i \ll 1$.

Для отношения индукции внешнего магнитного поля B_1 к индукции собственного магнитного поля имеем:

«межпланетное магнитное поле — Земля»

$$B_1/B_3 \approx 0.0001,$$

«магнитное поле Земли — спускаемый аппарат»

$$B_1/B_{\text{СА}} \approx 0.0001,$$

«поток плазмы — модель на стенде»

$$B_1/B_M \approx 0.001 \dots 0.01.$$

По аналогии с обтеканием Земли солнечным ветром для классификации режима МГД-взаимодействия тел с потоком плазмы используется параметр ρ_i/d_p . Здесь

$$d_p \approx (3 - 4) [P_m^2 / (2\pi\rho_i V_i^2)]^{1/6}$$

— характерный размер магнитосферы [3, 16], $r_{mp} = [P_m^2 / (2\pi\rho_i V_i^2)]^{1/6}$ — расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы, P_m — магнитный момент собственного поля намагниченного тела.

Для магнитного диполя, расположенного в центре тела, следует

$$\begin{aligned} \rho_i/r_{mp} &= \rho_i / 0.8R(B^2/4\pi\mu\rho_i V_1^2)^{1/6} = \\ &= \rho_i / 0.8R(P_B/P_{gl})^{1/6}, \end{aligned}$$

где B — индукция магнитного поля на поверхности тела.

Для рассматриваемых трех случаев имеем

$$\rho_i^{\text{СВ}}/d_p^{\text{Земля}} \approx 0.0001;$$

$$\rho_i^{\text{СА}}/d_p^{\text{СА}} \approx 1;$$

$$\rho_i^{(M)}/d_p^{(M)} \approx 1.$$

Если классифицировать режимы МГД-течения по аналогии с числом Кнудсена, то при $\rho_i/d_p \ll 1$ солнечный ветер можно рассматривать как сплошную среду. Параметр $\rho_i/d_p \approx 1$ соответствует переходному режиму, $\rho_i/d_p \gg 1$ — свободномолекулярному течению [3]. Значения рассмотренных параметров подобия приведены в таблице. Видно, что на стенде ИТМ для системы «намагниченное тело — поток плазмы» практически по всем параметрам подобия моделируется режим МГД-взаимодействия «СА — плазма за ударной волной» на высоте $h = 60$ км (СА ОРЕХ) и частично МГД-взаимодействие «солнечный ветер — Земля».

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Стенд, модели для исследования теплообмена намагниченных тел. Экспериментальные исследования проводились на плазмодинамическом стенде. Стенд относится к классу плазмо-газодинамических труб. Схема стенда и измерений в потоке плазмы приведена в работе [28]. Откачивающая система стенда производительностью около $100 \text{ м}^3/\text{с}$, наличие криогенелей, охлаждаемых жидким азотом (LN_2), дают возможность реализовать в рабочей камере (цилиндр диаметром 1.2 м и длиной 3.5 м) статическое разрежение 10 мкПа. Применение в качестве рабочих газов с молекулярной массой от 2 до 131 позволяет при различных режимах работы плазменного газоразрядного ускорителя с саморазгоном плазмы создавать потоки с широким диапазоном параметров.

Для контроля точности измерения параметров плазменных потоков стенд снабжен системой электрических зондов и СВЧ-интерферометрами, работающими в частотном диапазоне от 3 до 37.5 ГГц. Зонды размещены на подвижных платформах верхнего и нижнего координатников с четырьмя степенями свободы каждый: продольное и поперечное перемещение в горизонтальной плоскости, перемещение в вертикальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси. Погрешность отсчета линейных перемещений равна 0.5 мм, угловых — 0.5° . Для измерения параметров заряженных и нейтрального компонентов потоков неравновесной разреженной плазмы применяется также контактная

диагностика — электрические зонды и зонд давления — с интерпретацией выходных сигналов по процедуре работы [27].

В качестве модели использовался короткий диэлектрический (фторопласт-4) цилиндр диаметром 110 мм и высотой 25 мм, плоская торцевая поверхность которого дренирована термопарами. Термопары размещены на диаметре торца с шагом 15 мм. Во внутренней полости цилиндра на свободном подвесе, позволяющем менять ориентацию вектора индукции магнитного поля модели \mathbf{B}_M относительно вектора скорости набегающего потока плазмы \mathbf{V}_1 , расположен соленоид длиной 90 мм и диаметром 65 мм.

Второй моделью служила диэлектрическая (фторопласт-4) дренированная термопарами полусфера диаметром 130 мм, во внутренней полости которой размещен соленоид.

Модели и микровесы для измерения сил давления потока плазмы. При исследовании динамического (силового) взаимодействия намагниченных тел со сверхзвуковым потоком разреженной плазмы использовались полые сферы диаметром 87 мм, изготовленные из алюминиевой, медной фольги и диэлектрические, покрытые пленкой фторопласта-4. В качестве источника собственного магнитного поля тела служил соленоид с внешним диаметром 50 мм и длиной 45 мм. Измерения проводились в сечении струи с равномерным распределением параметров: плотность потока, индукция внешнего магнитного поля, энергия ионов. Диаметр рабочей части струи равен 25 см.

При измерениях использовались микровесы компенсационного типа с магнитоэлектрической системой управления. Принципиальная схема микровесов приведена в работе [24]. Исследуемое тело с расположенным во внутренней полости закрепленным на стационарной опоре соленоидом является чувствительным элементом магнитоэлектрической системы. Стационарная опора установлена на поворотном устройстве, снабженном потенциометрическим датчиком пространственного положения соленоида. Поворотное устройство позволяет изменять угловое положение соленоида относительно вектора скорости набегающего потока плазмы. Погрешность угловой ориентации соленоида в потоке не превышает $\pm 20'$. Токоподводом соленоид соединен с источником постоянного тока. Микровесы из-

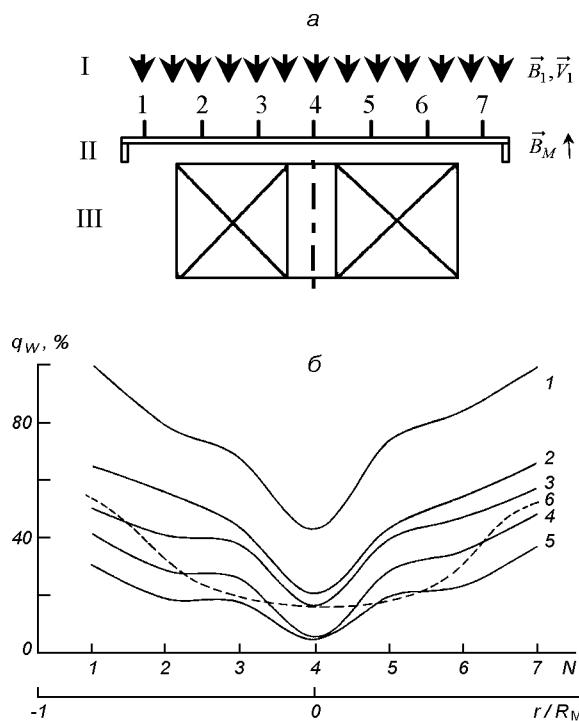


Рис. 2: а — схема размещения термопар (I — поток плазмы, II — дренированная термопарами торцевая поверхность короткого цилиндра, III — соленоид), б — уменьшение теплового потока на плоскую торцевую поверхность намагниченного цилиндра за счет собственного магнитного поля при $V_1 \parallel B_M$: 1 — при $P_B/P_{g1} = 25000$, 2 — 4000, 3 — 2800, 4 — 1000, 5 — 870, штриховая кривая 6 — расчеты [32] для СА OREX при $P_B/P_{g2} \approx 2600$

готовлены на базе стандартного магнитоэлектрического механизма миллиамперметра постоянного тока. Компенсационный ток, протекающий через рамку прибора, прямо пропорционален приложенному механическому моменту — силе воздействия потока плазмы на модель. Магнитоэлектрический механизм помещен в корпус, выполненный из магнитомягкого материала. Модель (полое тело) заданной формы закреплена на одном конце электропроводной державки. Второе плечо соединено с магнитоэлектрическим механизмом весов. Державка модели, опора соленоида, магнитоэлектрический механизм весов и поворотное устройство защищены от воздействия потока плазмы диэлектрическими экранами. Державкой модели и опорой соленоида служит

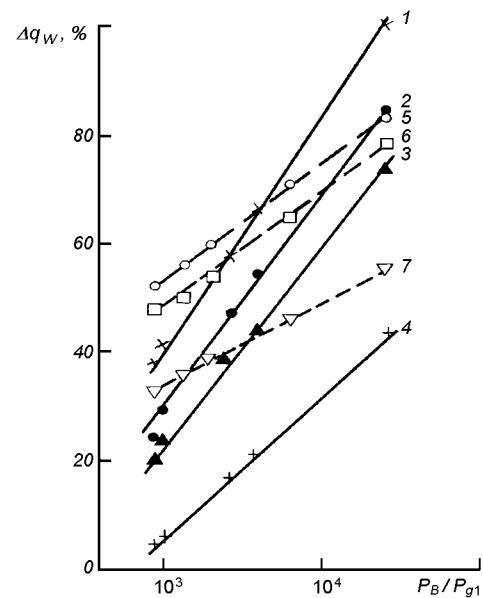


Рис. 3. Изменение теплового потока Δq_W от параметра P_B/P_{g1} : кривые 1, 2, 3, 4 — данные термопар 1—4; 5 — данные термопар 3—5; 6 — данные термопар 2, 6; 7 — данные термопар 1, 7

тонкостенная алюминиевая трубка, канал которой используется для подачи потенциала на проводящие поверхности модели и размещения элементов термопары. На плече длиной 500 мм диапазон измеряемых сил составляет 0.02...2500 мкН.

ТЕПЛООБМЕН И ТОРМОЖЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОГО ТЕЛА В ПОТОКЕ РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Теплообмен тела. Экспериментальные исследования проводились при рабочих давлениях в вакуумной камере 0.1—0.01 Па. Для моделей в отсутствие собственного магнитного поля реализованы бесстолкновительный и переходный режимы обтекания потоками разреженной плазмы. Для намагниченных моделей в соответствии с критерием ρ_i/d_ρ реализован переходный режим обтекания магнитосферы.

Схема размещения термопар и векторов V_1 , B_M и B_1 приведена на рис. 2, а. Рис. 2, б

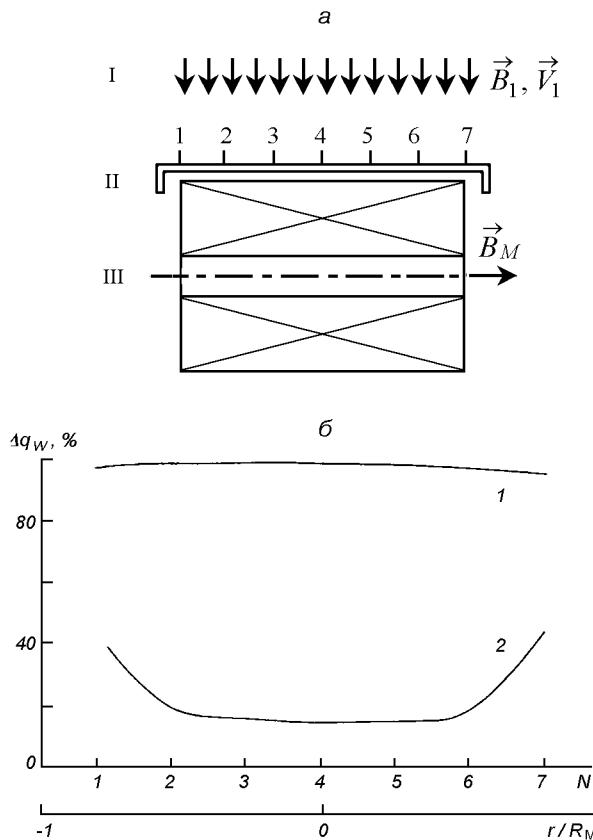


Рис. 4. Уменьшение теплового потока на плоскую торцевую поверхность намагниченного цилиндра за счет собственного магнитного поля при $\mathbf{V}_1 \perp \mathbf{B}_M$: 1 — воздействие потока плазмы при $P_B/P_{g1} = 0$, 2 — при $P_B/P_{g1} = 2.5 \cdot 10^4$

илюстрирует уменьшение конвективного теплового потока Δq_W за счет влияния собственного магнитного поля короткого диэлектрического цилиндра при $\mathbf{V}_1 \parallel \mathbf{B}_M$, где $\Delta q_W = |q_W - q_{0W}| / q_{0W}$, q_{0W} — тепловой поток при $B_M = 0$. При оценке Δq_W учтено воздействие только потока плазмы за вычетом радиационного потока от катода источника плазмы и соленоида. Изменение температуры поверхности $\Delta T_W = |T_W - T_{0W}| / T_{0W}$ пропорционально изменению теплового потока Δq_W (T_{0W} — температура при $B_M = 0$). Зависимость Δq_W от параметра P_B/P_{g1} для этого случая показана на рис. 3 сплошными линиями 1—4.

Схема размещения термопар и векторов \mathbf{V}_1 , \mathbf{B}_M и \mathbf{B}_1 показана на рис. 4, а. Изменение

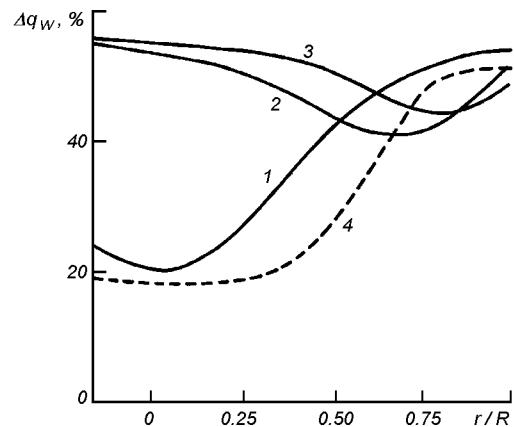


Рис. 5. Уменьшение теплового потока на поверхность диэлектрической полусфера при $P_B/P_g \approx 1000$: 1 — $\theta = \pi$, 2 — $\theta = \pi/3$, 3 — $\theta = 5\pi/12$, штриховая кривая — расчеты [32] для CA OREX, 2R — длина хорды капсулы

конвективного теплового потока q_W на плоскую торцевую поверхность короткого диэлектрического цилиндра из-за воздействия собственного магнитного поля тела при $\mathbf{V}_1 \perp \mathbf{B}_M$ иллюстрирует рис. 4, б. Зависимости Δq_W от P_B/P_{g1} для случая $\mathbf{V}_1 \perp \mathbf{B}_M$ представлены штриховыми линиями 5—7 на рис. 3.

Представленные на рис. 3 зависимости Δq_W от P_B/P_{g1} свидетельствуют, что для одних и тех же значений P_B/P_{g1} эффективность магнитной экранировки поверхности тела при $\mathbf{V}_1 \perp \mathbf{B}_M$ в целом сильнее.

Сопоставляя результаты измерений распределения заряженных частиц, температуры поверхности и структуры обтекания тела при $\mathbf{V}_1 \parallel \mathbf{B}_M$ (угол между векторами $\theta = \pi$) [25, 23], следует отметить, что перед телом образуется осесимметричная область МГД-взаимодействия. Сравнительно слабое уменьшение конвективного теплового потока в критической точке (термопара-4) обусловлено более высокой плотностью заряженных частиц и фокусировкой их к осевой линии тока (рис. 1, а). В случае $\mathbf{V}_1 \perp \mathbf{B}_M$ ($\theta = \pi/2$) структура возмущенной зоны имеет только одну плоскость симметрии, перпендикулярную к оси соленоида. Снижение теплового потока в этом случае обусловлено образованием

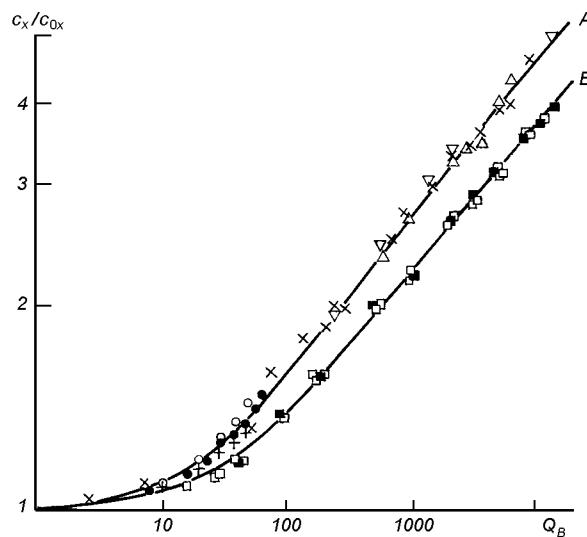


Рис. 6. Зависимость коэффициента лобового сопротивления намагниченного тела от параметра МГД-взаимодействия: точки — измерения [34], крестики — полное сопротивление полусферы [19], кружки — вклад силы Лоренца [19], косые крестики и квадратики — данная работа при $N_{i_1} \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ и $V_1 \approx 10.5 \text{ км/с}$, темные треугольники и квадратики — данная работа при $N_{i_1} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $V_1 \approx 7.5 \text{ км/с}$, светлые треугольники — данная работа при $N_{i_1} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ и $V_1 \approx 8.3 \text{ км/с}$, кривая A — проводящая модель, кривая B — диэлектрическая модель

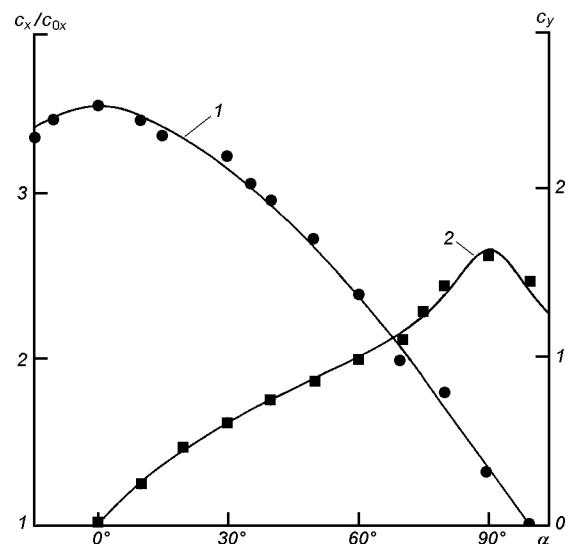


Рис. 7. Зависимость коэффициентов лобового сопротивления c_x/c_{0x} и подъемной силы c_y диэлектрической сферы от ориентации вектора индукции магнитного поля \mathbf{B}_M относительно вектора скорости набегающего потока \mathbf{V}_1 : точки, квадратики — аппроксимации (1) и (2) соответственно, 1, 2 — результаты измерений на стенде

каверны (рис. 1, б): плазма практически не проникает в область перед телом. Перетекание заряженных частиц происходит только в районе полярных каспов. Кроме того, для параметра Холла $\omega_e \tau_e \geq 1$ (ω_e — электронная циклотронная частота, τ_e — время соударений частиц в плазме) имеет место сильная анизотропия коэффициентов переноса: в направлении, перпендикулярном к магнитному полю, они уменьшаются в $(1 + \omega_e^2 \tau_e^2)^{-1}$ раз [4]. Это усиливает эффект уменьшения теплового потока на поверхность тела.

Результаты измерений температуры на поверхности дренированной термопарами диэлектрической полусферы радиусом $R_M \approx 6.5 \text{ см}$ (рис. 5) подтверждают эти выводы.

МГД-торможение тела. В качестве одной из моделей при исследовании динамического взаимодействия намагниченных тел с потоком разреженной плазмы служила полусфера диаметром $2R_M = 87 \text{ мм}$ с цилиндрической юбкой

длиной 50 мм. Диэлектрическая модель изготовлена из плотной бумаги, покрытой пленкой фторопластика-4, проводящая — из алюминиевой фольги.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента лобового сопротивления модели c_x/c_{0x} с размещенным во внутренней полости соленоидом от параметра МГД-взаимодействия $Q_B = \sigma_1 B_M^2 R_M / (\rho_1 V_1)$ при $\theta = \pi$ (B_M — индукция магнитного поля в критической точке тела), c_{0x} — коэффициент лобового сопротивления при $B_M = 0$. Измерения проводились при давлениях в рабочей камере стенда около 0.01 Па. В отсутствие собственного магнитного поля реализовался свободномолекулярный режим обтекания тела плазмой с конечной проводимостью. С учетом данных из [34, 19] значения c_x/c_{0x} охватывают режимы МГД-взаимодействия от вязкого до почти свободномолекулярного.

Влияние ориентации вектора индукции магнитного поля \mathbf{B}_M диэлектрической сферы (диаметр 87 мм) относительно вектора скорости набегающего потока плазмы на величину коэф-

фициентов лобового сопротивления c_x/c_{0x} и подъемной силы c_y иллюстрирует рис. 7. Точки и квадратики — аппроксимации

$$\begin{aligned} c_x/c_{0x} &= \\ &= 1 + \xi^{0.67} [\cos\alpha + 0.134 |\sin\alpha| (|\sin\alpha| - \cos\alpha)] \end{aligned} \quad (1)$$

и

$$c_y = \xi^{0.35} [\sin\alpha - |\cos\alpha| (1 - |\cos\alpha|)]. \quad (2)$$

Кривые 1, 2 — результаты измерений силы давления потока плазмы при $\xi \approx 4.0$, $V_1 \approx \approx 8.3$ км/с и $P_B/P_{g_1} \approx 5300$. Здесь $\alpha = \pi - \theta$, $\xi = \beta [eP_m/(M_i V_i)]$ — отношение силы торможения намагниченного тела, пропорциональной $eN_i V_i P_m$, к скоростному напору потока плазмы в отсутствие магнитного поля $A_s N_i M_i V_i^2$; P_m — магнитный момент соленоида, $A_s = \pi R_M^2$ — мидель тела, β — коэффициент пропорциональности.

Параметр $[eP_m/(M_i V_i)]^{0.5}$ для дипольного момента P_m — штермеровская длина C_{st} [1], т. е. $\xi \approx \beta C_{st}^2$. Поле соленоида является дипольным только на достаточно большом расстоянии. Для сферической модели данной работы $\xi = 10^{-4} [eP_m/(M_i V_i)]$. С другой стороны, для диапазона $1.0 \leq P_B/P_{g_1} \leq 10^5$ с погрешностью не более 3 % параметр ξ может быть представлен в виде зависимости от P_B/P_{g_1} :

$$\xi = (0.12 + 0.0625 \operatorname{erf} K) \left[\frac{P_B}{P_{g_1}} \right]^{0.413 - 0.065 \operatorname{erf} K}, \quad (3)$$

где $\operatorname{erfx} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$ — интеграл вероятности, $K = (\lg P_B/P_{g_1} - 3)/2$.

Приведенные на рис. 7 зависимости $c_x(\alpha)/c_{0x}$, $c_y(\alpha)$ свидетельствуют о возникновении ненулевой подъемной силы и аэродинамического качества у намагниченной сферы, возможности управления аэродинамическим качеством за счет собственного магнитного поля в потоке разреженной плазмы.

Сопротивление и подъемная сила Земли в потоке плазмы солнечного ветра. Магнитосфера намагниченной диэлектрической сферы Земля в плоскости эклиптики — приближенно

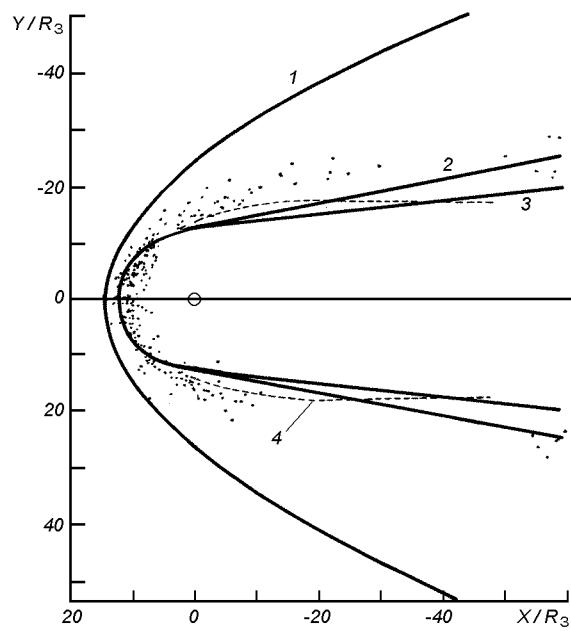


Рис. 8. Положение магнитопаузы в плоскости эклиптики (X , Y) [23, 32]: точки — измерения космическими аппаратами IMP, 1 — ударная волна, 2 — магнитопауза — затупленный конус с диаметром основания около $50R_3$ при длине хвоста магнитосферы $60R_3$, 3 — магнитопауза — затупленный конус с диаметром основания $40R_3$ при длине хвоста магнитосферы $60R_3$, 4 — теоретическая конфигурация магнитопаузы на экваторе

затупленный конус с касательным эллиптическим носком (меньшая полуось около $11R_3$, большая полуось — $15R_3$, поперечник — $(40 \dots 50)R_3$) [16, 18].

Можно предположить, что эллиптический носок влияет на поток аналогично сферической поверхности эквивалентного радиуса [10], и рассматривать магнитосферу Земли как затупленный конус с секущей сферой радиуса $r_{\text{оф}} \approx 13R_3$, диаметром основания $(40 \dots 50)R_3$ при длине хвоста магнитосферы около $60R_3$ (рис. 8). Вклад сферической поверхности в сопротивление при гиперзвуковом (число Maxa $M_1 \approx 8$) обтекании затупленного конуса в приближении Ньютона составляет 96 % для диаметра основания $40R_3$ и 83 % для диаметра $50R_3$ [9, 13].

Измерения данной работы (рис. 7) соответствуют переходному режиму обтекания магнито-

сферы намагниченной диэлектрической сферы при $\rho_i/d_p \approx 1$ и $M_1 \approx 6\dots10$. Для магнитосферы Земли в потоке плазмы солнечного ветра реализуется континуумный режим обтекания при $\rho_i/d_p \approx 10^{-3}\dots10^{-4}$ и $M_1 \approx 8$. С учетом вывода о преобладающем вкладе в сопротивление затупленного конуса — магнитосфера — его сферического носка переход от измерений сопротивления намагниченной диэлектрической сферы данной работы к сопротивлению магнитосферы Земли (и Земли как сферы) может быть осуществлен введением коэффициента $k_{tr} = c_{x_{cont}}/c_{x_{tr}}$, где

$$c_{x_{cont}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} \right) \left[\frac{(\gamma + 1)^2}{4\gamma} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}}, \quad (4)$$

— коэффициент сопротивления сферы при континуумном обтекании ($M_1 \gg 1$) [8, 10], $c_{x_{tr}}$ — коэффициент сопротивления сферы при переходном режиме обтекания, γ — показатель адиабаты.

В гиперзвуковом потоке разреженного газа при $6 < M_1 < 12$, $\gamma = 1.4$ для неохлаждаемых сфер ($t_w = T_w/T_0 \approx 1.0$, T_0 — температура торможения) по данным из [22, 33] значение $c_{x_{tr}} \approx 2.06$. С учетом расчетных значений по (4) и результатов измерений из работы [10] значение $c_{x_{cont}} \approx 0.916$, т. е. $k_{tr} \approx 0.445$. Для охлаждаемых сфер ($t_w < 1.0$) значение $c_{x_{tr}} \approx 1.7$ и $k_{tr} \approx 0.539$.

С другой стороны, коэффициенты сопротивления и подъемной силы намагниченной диэлектрической сферы при гиперзвуковом обтекании ее магнитосферы в переходном режиме характеризуют эмпирические зависимости (1) и (2).

Обтекание намагниченной сферы Земля гиперзвуковым ($M_1 \approx 8$) потоком разреженной плазмы солнечного ветра происходит при $\theta = 78.5^\circ$, $B_3 \approx 62$ мТл и $P_B/P_{g_1} \approx 7.7 \cdot 10^4$. В соответствии с зависимостями (1), (3) для намагниченной сферы Земля при переходном режиме обтекания ее магнитосферы потоком разреженной плазмы солнечного ветра следует $c_x/c_{0xtr} \approx 2.3076$, где $c_{0xtr} \approx 2.06$ — для неохлаждаемой сферы и $c_{0xtr} \approx 1.7$ — для охлаждаемой сферы.

Коэффициент сопротивления Земли при обтекании ее магнитосферы гиперзвуковым потоком

разреженной плазмы в переходном режиме для неохлаждаемой сферы равен $c_{xtr}^{(B)} = 4.754$, для охлаждаемой сферы — $c_{xtr}^{(B)} = 3.923$. Коэффициент подъемной силы намагниченной сферической Земли при обтекании ее магнитосферы в переходном режиме и $\theta = 78.5^\circ$ определяется из выражения (3): $c_{ytr}^{(B)} \approx 1.77$.

Переход к режиму континуумного обтекания магнитосферы может быть осуществлен с использованием коэффициента k_{tr} . Для неохлаждаемой и охлаждаемой сфер $c_{x_{cont}}^{(B)} \approx k_{tr} c_{xtr}^{(B)} = 2.115$. Если предположить, что соотношение $c_{ytr}^{(B)} (\theta = 78.5^\circ) / c_{xtr}^{(B)} (\theta = 78.5^\circ) = 0.45$ выполняется и при континуумном обтекании магнитосферы, то для коэффициента подъемной силы намагниченной сферы Земля получим $c_{y_{cont}}^{(B)} = 0.952$. Сила сопротивления намагниченной сфере Земля в потоке разреженной плазмы солнечного ветра определится из соотношения: $F_x \approx c_{x_{cont}}^{(B)} \cdot 0.5 \cdot \rho V^2 \pi R_3^2 \approx 4.29 \cdot 10^5$ Н, а подъемная сила — $F_y \approx c_{y_{cont}}^{(B)} \cdot 0.5 \cdot \rho V^2 \pi R_3^2 \approx 1.93 \cdot 10^5$ Н. Аэродинамическое качество намагниченной сферы Земля в потоке плазмы солнечного ветра близко к 0.45.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что МГД-взаимодействие намагниченных тел с потоком разреженной плазмы сопровождается уменьшением конвективного теплового потока и увеличением коэффициента лобового сопротивления осесимметричного тела с увеличением параметра МГД-взаимодействия и отношения магнитного давления к динамическому (скоростному напору). Для проводящего тела эффект Холла на динамическое воздействие (сопротивление) выражен сильнее.

Выявлен эффект возникновения подъемной силы и аэродинамического качества у намагниченной сферы в потоке разреженной плазмы при ненулевом угле между вектором индукции собственного магнитного поля и вектором скорости потока плазмы. Показано, что изменение ориентации (вращение) собственного магнитного поля относительно вектора скорости потока плазмы является эффективным средством управления конвективным теплообменом и аэродинамическим качеством намагниченного диэлектриче-

ского осесимметричного тела. Получены экспериментальные зависимости уменьшения тепловых потоков, изменение коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы намагниченной диэлектрической сферы от отношения магнитного давления к динамическому (скоростному напору).

Результаты исследований практически по всем параметрам подобия соответствуют требованиям физического моделирования МГД-взаимодействия в системе «СА — плазма за ударной волной» (СА OREX на высоте $h = 60$ км — переходный режим обтекания магнитосферы) и частично — взаимодействия в системе «солнечный ветер — Земля».

Определены коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы (сила сопротивления и подъемная сила) намагниченной диэлектрической сферы Земля в потоке плазмы солнечного ветра при континуумном обтекании магнитосферы Земли.

1. Альвен Г., Фельтхаммер К. Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967.—260 с.
2. Аржаников Н. С., Садекова Г. С. Аэродинамика больших скоростей. — М.: Вышш. шк., 1965.—560 с.
3. Баранов В. Б., Краснобаев К. В. Гидродинамическая теория космической плазмы. — М.: Наука, 1977.—431 с.
4. Брагинский С. И. Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы. — М.: Госатомиздат, 1963.—Вып. 1.—С. 183—272.
5. Головачев Ю. П., Курбатов Г. А., Чернышев А. С., Шмидт А. А. Анализ факторов, влияющих на сверхзвуковое обтекание конического тела в условиях магнитогидродинамического взаимодействия // Письма в ЖТФ.—2006.—32, № 14.—С. 52—57.
6. Гуревич А. В., Москаленко Н. М. О торможении тел, движущихся в разреженной плазме // Исследование космического пространства. — М.: Наука, 1965.—С. 241—254.
7. Коваленко В. А. Солнечный ветер. — М.: Наука, 1983.—272 с.
8. Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А. Прикладная динамика разреженного газа. — М.: Машиностроение, 1977.—184 с.
9. Краснов Н. В. Аэродинамика. — М.: Вышш. шк., 1971.—632 с.
10. Краснов Н. Ф. Аэродинамика тел вращения. — М.: Машиностроение, 1964.—436 с.
11. Куликовский А. Г., Любимов Г. А. Магнитная гидродинамика. — М.: Физматгиз, 1962.—246 с.
12. Лох У. Динамика и термодинамика спуска в атмосфере планет. — М.: Мир, 1966.—276 с.
13. Любимов А. Н., Рusanov B. B. Течение газа около

- затупленных тел. — М.: Наука, 1970.—Ч. II.—380 с.
14. Мартин Дж. Вход в атмосферу. Введение в теорию и практику. — М.: Мир, 1969.—320 с.
 15. Масленников М. В., Сигов В. С., Чуркина Г. П. Численные эксперименты по обтеканию тел различной формы разреженной плазмой // Космич. исслед.—1968.—6, № 2.—С. 220—227.
 16. Модель космоса (МК-82) / Под ред. Н. С. Вернова. — М.: МГУ, 1983.—Т. 1.—600 с.
 17. Нечтел Е., Питтс У. Экспериментальное исследование сопротивления движению спутников, обусловленного электрическими силами // Ракетная техника и космонавтика.—1964.—2, № 6.—С. 222—225.
 18. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. — М.: Мир, 1980.—299 с.
 19. Портер Р. У. Численное решение задачи о вязком обтекании затупленного тела гиперзвуковым МГД-потоком// Ракетная техника и космонавтика.—1973.—11, № 3.—С. 154—155.
 20. Сахаров В. А., Менде Н. П., Бобашев С. В. и др. Тепловые измерения на поверхности тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком азота // Письма в ЖТФ.—2006.—32, № 14.—С. 46—51.
 21. Фей Дж., Кемп Н. Теория теплопередачи в точке торможения в частично-ионизованном двухатомном газе // Механика.—1963.—№ 1.—С. 47—70.
 22. Хаджимихалис К., Брандин К. Влияние температуры стенки на сопротивление сферы в гиперзвуковом потоке разреженного газа // Динамика разреженных газов / Под ред. В. П. Шидловского. — М.: Мир, 1976.—С. 274—282.
 23. Шувалов В. А. Влияние собственного магнитного поля на структуру возмущенной зоны около тела в потоке разреженной плазмы // ЖТФ.—1984.—54, № 6.—С. 1107—1114.
 24. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. — Киев: Наук. думка, 1995.—180 с.
 25. Шувалов В. А. Структура плазменных образований у поверхности цилиндра в потоке частично ионизированного газа // ПМТФ.—1984.—№ 4.—С. 3—11.
 26. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Бандель К. А., Приймак А. И. Перенос зарядов на подветренные поверхности КА в полярной ионосфере Земли // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 6.—С. 5—17.
 27. Шувалов В. А., Письменный Н. И., Приймак А. И. и др. Зондовая диагностика высокоскоростных потоков разреженной частично диссоциированной плазмы // Приборы и техника эксперимента.—2007.—№ 3.—С. 92—100.
 28. Шувалов В. А., Тихий В. А., Приймак А. И. и др. Деградация полимерных материалов солнечных батарей КА при длительном воздействии потоков атомарного кислорода // Космічна наука і технологія.—2005.—11, № 5/6.—С. 78—86.
 29. Chen S. Y. Magnetic hypersonic flow near the stagnation point at low Reynolds number // J. Spacecraft and Rockets.—1969.—6, N 8.—P. 872—877.
 30. Ericson W. B., Maciulaitis A. Investigation of magnetohydrodynamic flight control // J. Spacecraft and Rockets.—1964.—1, N 3.—P. 283—289.

31. Fujino T., Funaki J., Sugita H., Mizuno M., Iskikava M. Numerical analyses of flow control around body «OREX» by magnetic fields // AJAA Pap.—2003-3760, June 2003.—10 p.
32. Fujino T., Sugita H., Funaki J., Iskikava M. Influence of electrical conductivity of wall on magnetohydrodynamic control of aerodynamic heating // J. Spacecraft and Rockets.—2006.—43, N 1.—P. 63—70.
33. Maslach G. J., Willis R. D., Tang S., Ko D. Recent experimental and theoretical extensions of nearly molecular flow // Rarefied Gas Dynamics. — New-York: Acad. Press, 1965.—V. 1.—P. 433—443.
34. Nowak R., Kranc S., Porter R. W., et. al. Magnetogasdynamic re-entry phenomena // J. Spacecraft and Rockets.—1967.—4, N 11.—P. 1538—1542.
35. Porter R. W., Cambell A. P. Hall effect in flight magnetogasdynamics // AJAA J.—1967.—5, N 12.—P. 2208—2213.
36. Shang J. S., Kimmel R., Hayes J., Menart J. Hypersonic experimental facility for magnetoaerodynamic interactions // J. Spacecraft and Rockets.—2005.—42, N 5.—P. 780—789.
37. Yoo C. Y., Porter R. W. Numerical analysis of the viscous hypersonic MHD blunt-body problem // AJAA J.—1973.—11, N 3.—P. 383—384.

**EFFECTS OF MAGNETOHYDRODYNAMIC CONTROL
IN HEAT EXCHANGE AND DECELERATION
OF MAGNETIZED BODIES IN THE EARTH'S
ATMOSPHERE AND MAGNETOSPHERE**

*V. A. Shuvalov, A. I. Priymak, K. A. Bandel,
G. S. Kochubey, N. A. Tokmak*

It is shown that the rotation of the proper magnetic field in the plasma is an efficient means for controlling convective heat exchange and aerodynamic efficiency of a dielectric body at axial flow over.

А. А. Жалило, А. А. Желанов, Д. А. Шелковенков, В. М. Шокало

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Оценка точности калибровки положения и вариаций фазовых центров приемных GPS/GNSS-антенн

Надійшла до редакції 13.12.07

Запропоновано простий у реалізації метод верифікації фазових характеристик GPS/GNSS-антен у конкретних умовах експлуатації. Метод допускає використання однієї близько розташованої еталонної базової станції з точними координатами середнього фазового центра (СФЦ) приймальної антени й точних фазових калібрувань. Він дозволяє без використання дорогої спеціалізованого устаткування провести оцінку фазових характеристик антен та їхній вплив на точність визначення. Представлено результати верифікації використовуваних фазових калібрувань антен GPS-600LB, GPS-702 (NovAtel Inc., Канада) для антенного поста станції SURE (ХНУРЕ). Отримано задовільний збіг (на рівні 1–1.5 мм) оцінок зсувів СФЦ зі значеннями, які отримані фірмою Geo++ GmbH (Німеччина) із застосуванням спеціалізованих роботів. Проведена серія експериментальних досліджень із використанням GPS/GNSS-антен геодезичного класу дозволила оцінити якість використовуваних фазових корекцій і їхній вплив на точність планових і вертикальних координат, а також підвищити точність визначення координат антени станції SURE (ХНУРЕ). Викладено методичні рекомендації з установки антенних постів, контролю й верифікації фазових калібрувань прийомних антен GPS/GNSS-станцій для виконання координатних визначень із міліметровою точністю.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения местоположения с использованием сигналов GPS/GNSS на сантиметровом и миллиметровом уровне точности используют точные фазовые наблюдения. Областями применения столь точных технологий являются геодезическая и кадастровая съемка, мониторинг движек грунта, деформаций зданий, плотин, мониторинг оползней и др. Для решения таких задач возникает задача точного учета положения фазового центра и фазовых характеристик приемных антенн [3, 5–18, 20].

Фазовая характеристика — это зависимость фазовой задержки сигнала от углового положения (по азимуту и по углу места) источников навигационных сигналов. Обычно для описания и расчетов используются следующие параметры. В качестве референцной точки антенны используется точка пересечения плоскости нижнего

реза конструкции антенны и вертикальной оси ее вращения. Поскольку GPS/GNSS-антенны предназначены для приема сигналов практически из всей верхней полусфера, то из-за неоднородностей фазовой диаграммы направленности определяют положение так называемого среднего фазового центра (СФЦ) и отклонения фазовой диаграммы (вариации фазового центра, ВФЦ или РСВ) относительно СФЦ. Величина вариаций фазового центра обычно охватывает диапазон от миллиметров до нескольких сантиметров [3, 5–8, 20–24].

Важно также отметить, что для каждой из несущих частот L1, L2 GPS, а также для комбинированной частоты L0 («безионосферная» комбинация фазовых наблюдений на L1 и L2) и значения СФЦ, и значения ВФЦ различаются, хотя для современных антенн эти различия невелики [14, 15, 18]. Вариации положения фазового центра обычно охватывают диапазон

от миллиметров до нескольких сантиметров.

Задача оценки и учета фазовых характеристик GNSS-антенн известна давно, и остается актуальной по сей день, несмотря на непрерывные усовершенствования техники приема и обработки навигационных сигналов и измерительной информации глобальных навигационных спутниковых систем GPS/GNSS.

Разработано достаточно много методов и способов калибровки и верификации (проверки) фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн. О сложности учета и определения фазовых коррекций антенн говорят постоянные поиски новых методов производства антенн с улучшенными фазовыми характеристиками, а также эффективных методов поверки и калибровки, позволяющих наилучшим образом учесть неравномерности фазовых диаграмм антенн. Калибровка антенн с широкой диаграммой направленности, охватывающей почти всю верхнюю полусферу, так же как и задача верификации фазовых коррекций, являются ключевыми задачами на пути получения наивысшей точности координатно-временных определений.

В Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) в лаборатории спутниковых технологий точного позиционирования кафедры OPT развернута и введена в действие базовая GPS/EGNOS-станция SURE геодезического класса. При решении задачи пространственного определения координат станции возникла проблема проверки в условиях эксплуатации станции соответствия положения СФЦ и калибровок фазовой диаграммы приемной антенны заявленным производителем значениям. Это нужно для итоговой «привязки» СФЦ к физической реперной точке (ARP) с точностью не хуже нескольких миллиметров.

Таким образом, актуальна задача оценки (верификации) точности использования априорных фазовых характеристик приемных антенн и их калибровок в конкретных условиях эксплуатации для прецизионного определения положения антенн базовых станций и выполнения координатных определений с наивысшей точностью.

Ниже мы предлагаем простой и практичный вариант верификации фазовых коррекций GPS/GNSS-антенн в конкретных условиях эксплуатации, включающий в себя функции верификации фазовых калибровок.

СУЩНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК GPS/GNSS-АНТЕНН

Методика верификации фазовых калибровок предполагает использование одной близко расположенной базовой станции с точными координатами приемной антенны и известными фазовыми характеристиками. Измерительная база при этом не должна превышать 1—1.5 км, что позволяет при обработке линейных комбинаций фазовых наблюдений обеих несущих частот GPS/ГЛОНАСС практически исключить (или компенсировать с помощью моделей) медленно изменяющиеся эфемеридные, тропосферные и ионосферные погрешности наблюдений. Для станции ХНУРЭ оптимальным является использование станции KHAS (GPS-приемник Trimble 400SSI с эталонированной антенной типа Dorne/Margolin_T CHOKER RING), входящей в состав сети IGS (International GNSS Service). Эта станция расположена на территории ННЦ «Институт метрологии» на расстоянии 1.3 км от GPS-станции ХНУРЭ (SURE).

Рассматриваемая методика использует свойство системы GPS, согласно которому по прошествии суток спутниковая конфигурация GPS практически повторяется со сдвигом на 4 мин. Поэтому можно считать, что каждые новые сутки условия измерений идентичны условиям в предыдущие сутки. Это полезное свойство системы GPS позволяет реализовать дискретное вращение антennы с суточным интервалом наблюдений для фиксированного угла поворота и с повторением спутниковой конфигурации для каждой фиксации. Обработка наблюдений после серии вращений (до полного оборота) тестируемой антennы вокруг своей оси относительно неподвижной эталонной антенн базовой станции позволяет выявить наличие изменения положения СФЦ относительно оси вращения.

Методика предполагает выполнение следующих действий.

1. Тестируемая приемная антenna устанавливается в месте, где будет производиться ее штатная эксплуатация. Антenna изначально должна быть ориентирована в направлении на север (производители антенн геодезического класса указывают ориентир на антенне), поскольку все калибровки фазовых характеристик

антенн привязаны к этому направлению. При таком положении антенны проводятся суточные наблюдения с синхронными наблюдениями на базовой станции с эталонной антенной.

2. Тестируемая антenna на каждом последующем суточном цикле наблюдений перед началом цикла поворачивается вокруг своей оси на фиксированный угол, например $\Delta\varphi = 45^\circ$ или $\Delta\varphi = 90^\circ$. Таким образом проводится полный цикл наблюдений до достижения полного оборота антенны. Важно повторить измерения в положении 360° (исходное положение) для оценки повторяемости результатов.

3. После завершения полного цикла наблюдений и их регистрации осуществляется посуточная совместная обработка наблюдений обоих приемников с использованием специализированных программных пакетов (в нашем случае OCTAVA-РРА (ГАО НАН Украины) и GrafNav/GrafNet (NovAtel/WPC)), которые позволяют определить вектор измерительной базы относительно референцного приемника с миллиметровой точностью. В ходе обработки каждой суточной сессии важно протестировать зависимость координат СФЦ антенны от угла маскирования α (как правило, $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$). Поэтому для каждой суточной сессии можно образовать три набора оценок координат.

4. Наличие и значение эксцентриситета плановых координат СФЦ относительно оси вращения антенны определяются в результате оценки среднего значения координат по суткам (для каждого значения угла маскирования) и оценки отклонений каждой выборки координат от среднего значения, близкого к оси вращения антенны.

Расчеты проводятся по следующим формулам: среднее значение для широты —

$$B_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^k B_i / k,$$

отклонение по широте на i -е сутки —

$$\Delta B_i = B_i - B_{\text{cp}}^{(15)},$$

где $B_{\text{cp}}^{(15)}$ — среднее значение при угле маскирования $\alpha = 15^\circ$, B_i — значение по широте на i -е сутки, k — количество суток наблюдений (в нашем случае $k = 5$, $\Delta\varphi = 90^\circ$). Аналогичным образом производятся расчеты для долготы L_{cp} .

Переход от угловых геодезических координат B и L к метрическим осуществляется путем

умножения отклонений на коэффициенты δB по широте и на δL по долготе. Коэффициенты пересчета угловых отклонений в метрические значения приняты равными:

$$\delta B = 10 \text{ мксд} \Leftrightarrow 0.31 \text{ мм},$$

$$\delta L = 10 \text{ мксд} \Leftrightarrow 0.31 \cdot \cos B \text{ мм}.$$

Для широты $B \approx 50^\circ$ получаем $\delta L \approx 0.2$ мм.

Можно также выполнить пересчет путем перехода из геоцентрической системы координат (X, Y, Z) в местную топоцентрическую систему координат с началом $B_{\text{cp}}, L_{\text{cp}}$.

5. Производится оценка высоты среднего фазового центра. Как известно, изменение высоты СФЦ зависит от точности калибровки вариаций фазового центра [14, 15, 18], и индикатором точности знания ВФЦ является величина изменения оценок высоты при изменении угла маскирования. Сравнивая между собой оценки высоты СФЦ для разных значений угла маскирования, можно оценить точность используемых калибровок ВФЦ. Для антенн геодезического класса допустимый уровень вариаций высоты при указанном выше диапазоне углов маскирования обычно должен составлять 3—5 мм. Возможен другой тест на качество калибровок ВФЦ. Изменяют высоту антенны на точно известное значение (1—5 см и более) и сравнивают это априори известное изменение с оценками изменения высоты по результатам обработки наблюдений. По величине разности также можно судить о качестве калибровки ВФЦ антенны.

6. Производится графическое отображение результатов обработки данных наблюдений для всех принятых сценариев.

7. По полученным результатам выполняется анализ и делается заключение о качестве используемых фазовых калибровок тестируемой антенны для определения горизонтальных (плановых координат) и вертикальных координат СФЦ относительно референцной точки антенны, наличия и величины смещения СФЦ относительно оси антенны, величины вариаций высоты референцной точки антенны.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Оборудование для проведения наблюдений. Как упомянуто выше, в ХНУРЭ сотрудниками



Рис. 1. Антенный пост станции SURE

кафедры Основ радиотехники (OPT) развернута базовая GPS/EGNOS станция геодезического класса. Антенный пост станции установлен на крыше корпуса «И» ХНУРЭ (рис. 1).

В состав аппаратно-программного комплекса лаборатории входят:

- двухчастотный универсальный приемник PROPAK-LB-L1L2 Plus, NovAtel Inc.(Канада) с двухчастотными антеннами GPS-600LB, GPS-702 v.4;
- лицензионное программное обеспечение обработки GPS/GNSS-наблюдений GrafNav/GrafNet, NovAtel/WPC (Канада).

Программное обеспечение GrafNav/GrafNet представляет собой пакет программ под операционной системой Windows. Он предназначен для определения высокоточных взаимных координат разнесенных стационарных и движущихся GPS/GNSS-приемников по фазовым наблюдениям GPS/ГЛОНАСС-приемников с сантиметровой и миллиметровой точностью. При обработке наблюдений ПО GrafNav/GrafNet использует относительные фазовые калибровки антенн, зависящие от угла места.

На базе представленного аппаратно-программного комплекса была проведена экспериментальная отработка предложенной методики оценки точности априорных антенных калибровок и пространственного положения референцной точ-

ки используемых GPS-антенн и уточнения положения их СФЦ по отношению к ARP. Практическая важность методики заключается в возможности оценки зоны неопределенности положения СФЦ относительно ARP при наличии всего одного GPS/GNSS-приемника с антенной с известными фазовыми характеристиками.

Наблюдения 2006 г. В мае 2006 г. была проведена серия наблюдений (5 сут) с использованием тестируемой антенны GPS-600LB и перманентной станции Khar с эталонированной антенной типа Dorne/Margolin_T CHOKE RING (фазовые калибровки для данной антенны представлены на рис. 2), расположенной на крыше одного из зданий ННЦ «Институт метрологии». Станция Khar входит в состав станций сети IGS/EPN. Расстояние от нее до SURE около 1300 м.

Из-за отсутствия в базе данных ПО GrafNav/GrafNet калибровок на antennу GPS-600LB первоначально при обработке наблюдений использовалась калибровка для двухчастотной антенны GPS-600. После запроса производителя были получены относительные фазовые IGS калибровки по углу места и для тестируемой антенны GPS-600LB. На рис. 3 представлены относительные фазовые калибровки antenn GPS-600LB и GPS-600 (на частотах GPS L1 (*a*) и L2 (*b*)).

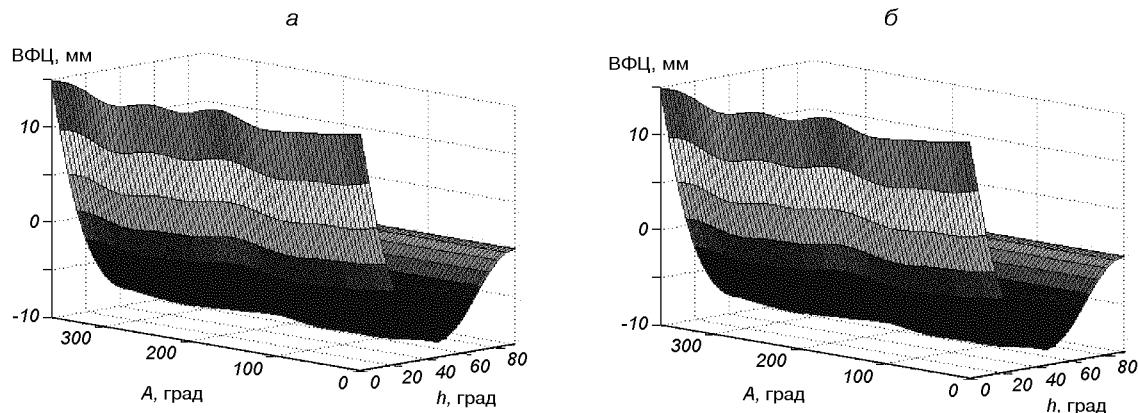


Рис. 2. Абсолютные фазовые калибровки антенны типа Dorne/Margolin_T CHOKE RING для GPS-частот: *а* — L1, *б* — L2

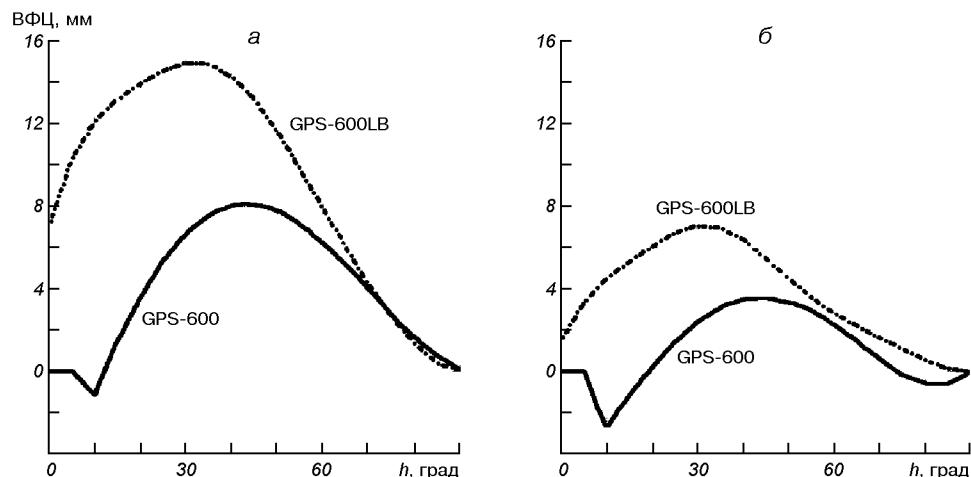


Рис. 3. Относительные фазовые калибровки, зависящие от угла места h антенн типа GPS-600LB и GPS-600 для GPS-частот: *а* — L1, *б* — L2

Согласно данным фирмы Geo++ GmbH, являющейся одним из мировых лидеров в области аттестации и калибровки GPS/GNSS-антенн, известно, что антenna GPS-600LB имеет смещенный фазовый центр. Абсолютные ВФЦ для GPS-600LB по углу места и азимуту представлены на рис. 4. Видно, что данная антenna имеет фазовую диаграмму, зависимую как от угла места (угла возвышения), так и от азимута, и имеет значительные вариации фазовой задержки по сравнению с антеннами такого же класса NovAtel Inc., например по сравнению с антенной GPS-702 (www.novatel.com).

Измерения, их обработка и анализ проводились согласно вышеизложенной методике с дискретностью поворота антенны вокруг оси 90°

(интервал полного оборота антенны вокруг оси — 5 сут).

Обработка проводилась при использовании фазовых калибровок для антенн типа GPS-600 и GPS-600LB. Использование калибровок для двух антенн одной серии позволило оценить влияние точности используемых фазовых коррекций на конечное решение.

При графическом построении результатов обработки, полученных с помощью ПО GrafNav/GrafNet, в качестве относительной «нулевой» точки при графическом построении было взято среднее значение за весь период при значении угла маскирования $\alpha = 15^\circ$. Изменения высоты представлены относительно условной «нулевой» высоты — 183.74 м. На рис. 7, 8 представлены

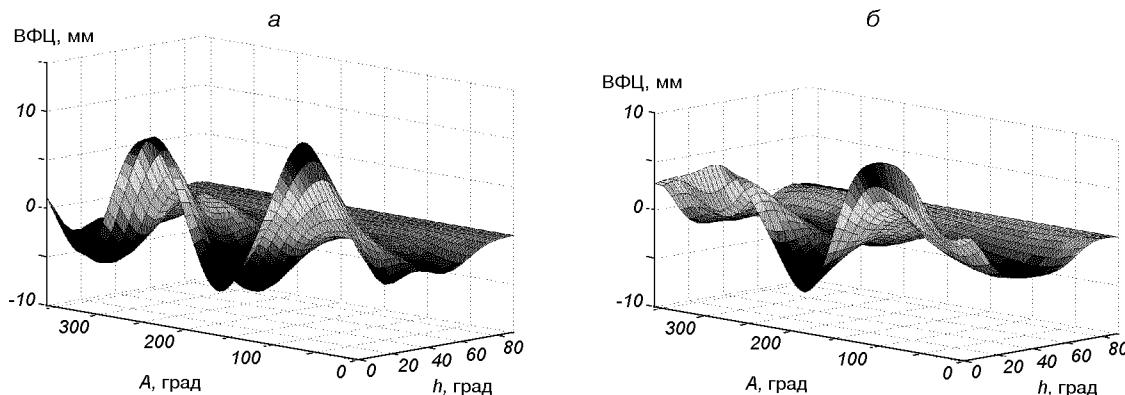


Рис. 4. Абсолютные фазовые калибровки антенны GPS-600LB для GPS-частот: *а* — L1, *б* — L2

JPL D/M+crt	DORNE MARGOLIN T	NGS (0) 97/10/27
0.0	0.0	
0.0 0.0	0.0 0.0	110.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	128.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0

Рис. 5. IGS-файл фазовых калибровок для антенны DORNE MARGOLIN T. Выделены значения положения СФЦ по высоте на частотах L1, L2

ADAD/H_T	NONE	START OF ANTENNA
ROBOT	Geo++ GmbH	TYPE / SERIAL NO
5.0		METH / BY / # / DATE
0.0 90.0 5.0		DAZI
2		ZEN1 / ZEN2 / DZEN
IGS05_1398		# OF FREQUENCIES
G01		SINEX CODE
0.60 -0.46 91.24		START OF FREQUENCY
NOAAZI 0.00 -0.24 -0.92		NORTH / EAST / UP
-8.30 -8.14 -7.46 -6.27		-6.05 -7.19 -7.97
G02		4.79 9.56 14.88
-0.10 -0.62 128.06		START OF FREQUENCY
NOAAZI 0.00 -0.13 -0.52		NORTH / EAST / UP
-5.23 -5.25 -4.83 -3.98		-3.43 -4.21 -4.85

Рис. 6. Файл калибровок Geo++ GmbH для антенны DORNE MARGOLIN. Выделены значения положения СФЦ по высоте относительно ARP на частотах L1, L2

результаты обработки данных при применении калибровок GPS-600, GPS-600LB. Изменения координат СФЦ при применении фазовых калибровок GPS-600 представлены на рис. 7, *а*, *в*, при калибровках для GPS-600LB — на рис. 7, *б*, *г*. Изменения высот при использовании фазовых калибровок антенны GPS-600 представлены на рис. 8, *а*, *в*, при калибровках для GPS-600LB — на рис. 8, *б*, *г*.

Анализ полученных результатов показывает,

что формы кривых (рис. 7), описывающих изменение положения фазового центра (ФЦ) от номера суток, отличаются. Для «безионосферной» комбинации фазовых наблюдений L1/L2 формы кривых значимо не изменились, а для комбинации L1 произошли заметные изменения, особенно для низких углов визирования спутников. В значительной степени это может объясняться различием применяемых фазовых калибровок GPS-600 и GPS-600LB на низких углах (особен-

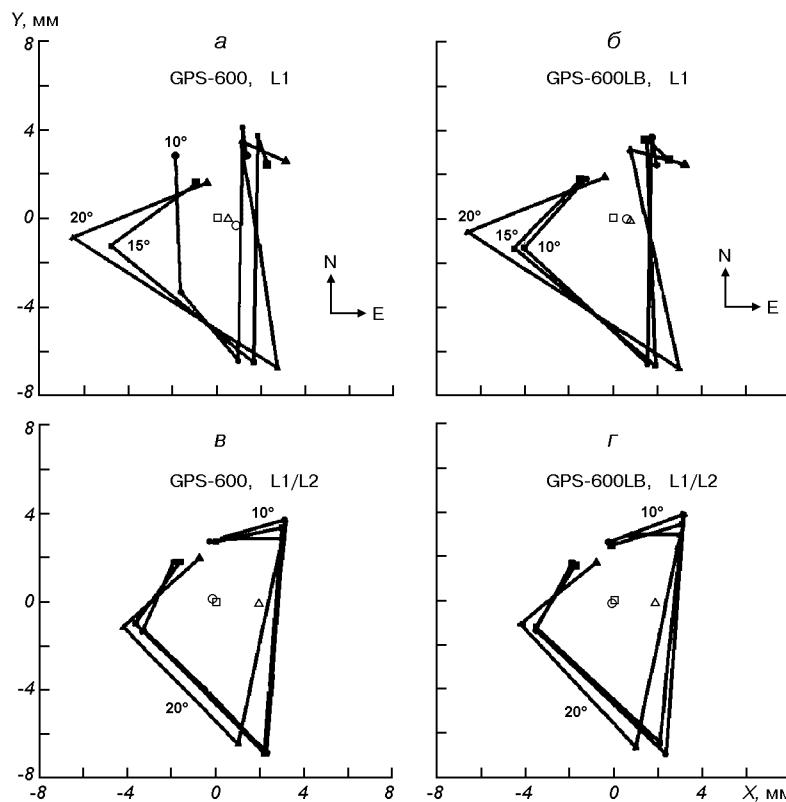


Рис. 7. Изменение положения СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений в мае 2006 г. для антенн типа GPS-600LB и GPS-600 для разных углов маскирования

но при 10° и ниже). На рис. 7, *в*, *г* видно, что при значении угла маскирования $\alpha = 20^\circ$, среднее значение ФЦ смешается относительно значений при углах маскирования $\alpha = 10^\circ$ и 15° .

На рис. 7 видно регулярное изменение положения СФЦ по суткам от среднего значения за весь период наблюдений. Это свидетельствует о наличии эксцентрикитета СФЦ исследуемой антенны. Величина эксцентрикитета составляет примерно 4–7 мм. Смещение СФЦ также может быть объяснено тем, что фазовая диаграмма антенны GPS-600LB имеет ярко выраженный азимутально-зависимый характер (см. рис. 4). Поэтому для более точного определения положения СФЦ желательно использовать в обработке абсолютные фазовые калибровки, зависящие как от угла места, так и от азимута.

Изменения высоты СФЦ при изменении угла места и от суток к суткам (рис. 8) может быть связано с влиянием остаточных тропосферной и ионосферной погрешностей GPS-наблюдений.

Для устранения этих эффектов желательно, чтобы базовая станция располагалась на расстоянии 10–100 м, а перепад высот установки антенн был минимальным.

После проведения обработки наблюдений, при использовании калибровок антенны GPS-600LB (см. рис. 8, *б*, *г*), высота антенны изменилась примерно на 20 мм по сравнению со значениями при использовании калибровки антенны GPS-600, исчезли резкие перепады высоты на низких углах. Исчезновение перепадов связано с тем, что «собственные» калибровки антенны GPS-600LB более точны, чем калибровки другой антенны, хотя в данном случае не использована более точная азимутально-зависимая абсолютная калибровка ВФЦ. Изменение высоты связано с тем, что калибровки антенн, которые имеются в базе ПО GrafNav/ GrafNet, получены IGS в 1997 г. относительно антенны DORNE MARGOLIN T со следующими характеристиками положения фазовых центров (рис. 5). На

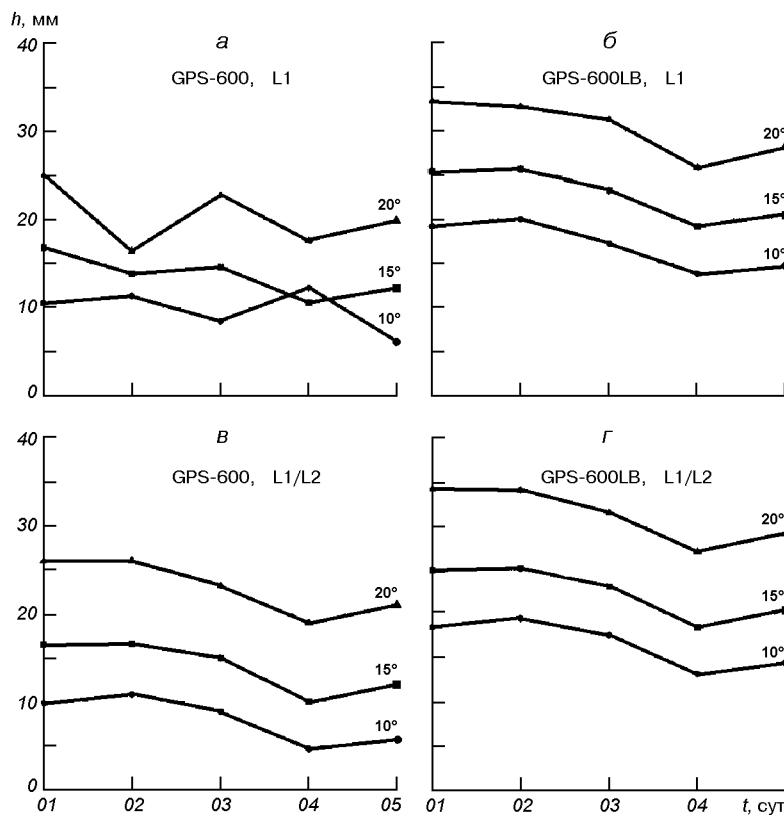


Рис. 8. Изменение высоты СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений в мае 2006 г. для антенн типа GPS-600LB и GPS-600 для разных углов маскирования

рис. 5 выделены значения положения СФЦ относительно референцной точки антенны (ARP) по высоте на частотах L1 (выше) и L2 (ниже).

Калибровки антенны DORNE MARGOLIN Т были уточнены фирмой Geo++ GmbH (рис. 6). Для GPS-600 использовались калибровки IGS, а для GPS-600LB использовались калибровки полученные от Geo++ GmbH, что и привело к изменениям по высоте порядка 20 мм на L1 и L1/L2.

Проведение наблюдений в 2007 г. и анализ их результатов. В 2007 г. были проведены повторные измерения с вращением антенны вокруг своей оси с дискретностью 90°. При этом в ходе эксперимента были использованы две антенны: GPS-600LB и GPS-702.

На рис. 9 приведены абсолютные фазовые характеристики антенны GPS-702. Как видно, изменения вариаций СФЦ антенны типа GPS-702 гораздо меньше, чем для антенны GPS-

600LB: максимальные отклонения не превышают 5 мм.

При обработке наблюдений для тестируемых типов антенн использовались фазовые коррекции, полученные фирмой Geo++ GmbH. При графическом построении результатов обработки в качестве базиса приняты средние координаты за 5 сут на частоте L1 для антенны GPS-702 v.4 при угле маскирования $\alpha = 15^\circ$.

Ниже в табл. 1 и 2 и на рис. 10, 11 представлены результаты обработки наблюдений для антенн типа GPS-600LB и GP-S702.

В результате анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Формы кривых, описывающих изменение положения точки СФЦ от номера суток для антennы типа GPS-600LB, практически не отличаются. Для «безионосферной» комбинации фазовых наблюдений L1/L2 формы кривых на низких углах отличаются, на 10° на двухчастотных

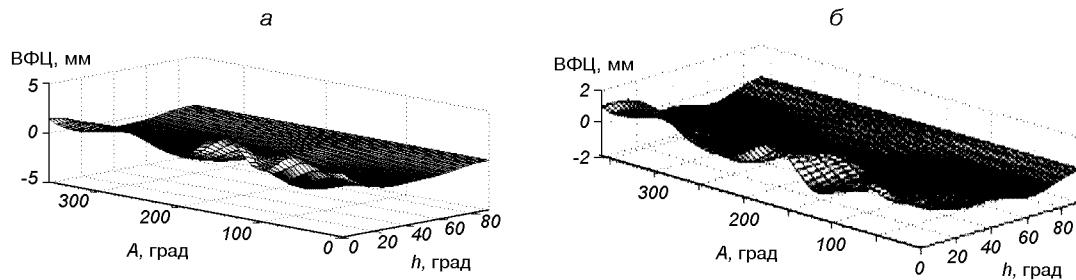
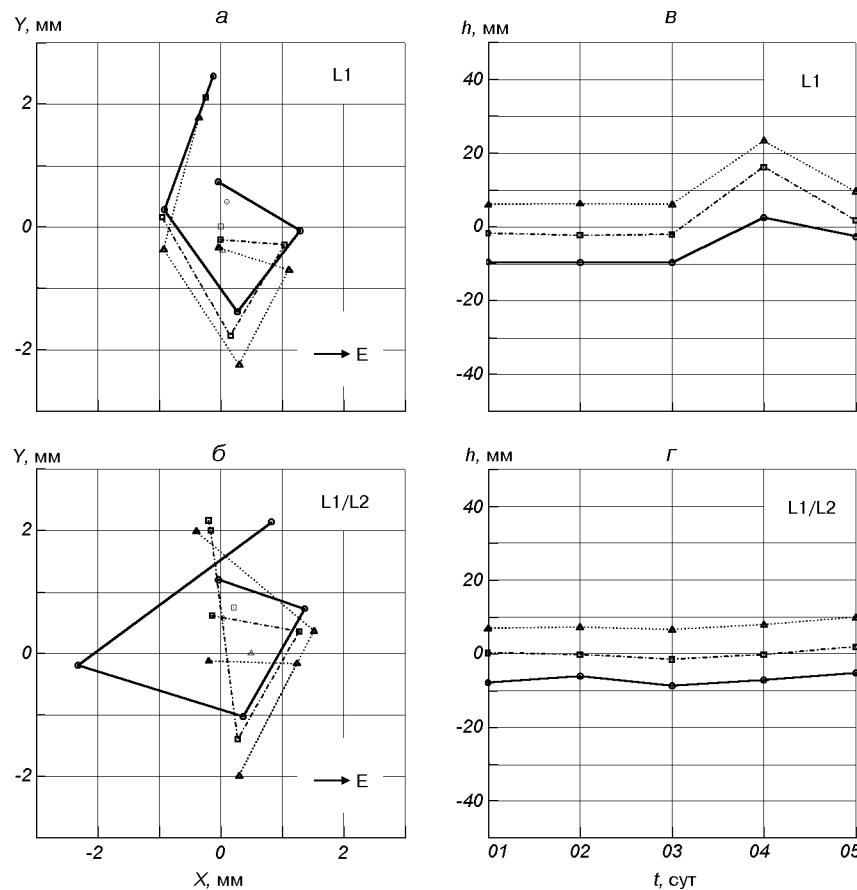
Рис. 9. Абсолютные фазовые калибровки антенны GPS-702: *а* — для частот L1, *б* — для частот L2

Рис. 10. Изменение положения и высоты СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений в январе — феврале 2007 г. для GPS-702 для разных углов маскирования

наблюдениях на четвертые сутки произошел сильный «выброс» точки на 7 мм от среднего значения. Виден сильный разброс значений по суткам от среднего значения за весь период наблюдений. Это свидетельствует о наличии эксцентриситета СФЦ исследуемой антенны ти-

па GPS-600LB. Величина эксцентриситета колеблется в пределах 4—7 мм. Разброс величины смещения СФЦ может быть объяснен ярко выраженным азимутально-зависимым характером фазовой диаграммы данного типа антенны (см. рис. 4).

Таблица 1. Разброс плановых координат (ΔB и ΔL) центров вращения для антенн типа GPS-702 v.4 и GPS-600LB

Тип антенны	Период года	α , град	ΔB , мм	ΔL , мм	ΔB , мм	ΔL , мм
			обработка на L1	обработка на L1/L2	обработка на L1	обработка на L1/L2
GPS-600LB	май 2006 г.	10	1.59	-6.74	2.36	-6.91
		15	1.82	-6.48	1.58	-6.74
		20	1.63	-6.95	1.49	-6.93
	январь — февраль 2007 г.	10	0.25	1.66	0.69	1.99
		15	0.7	0.063	0.24	1.25
		20	0.7	0.14	0.24	1.06
GPS-702 v.4	январь — февраль 2007 г.	10	0.095	0.41	0.035	0.58
		15	0	0	0.21	0.75
		20	0.022	-0.37	0.49	0.018

Таблица 2. Отклонения ΔB , ΔL , Δh , плановых координат и высоты центра вращения по суткам для антенн типа GPS-702 v.4 и GPS-600LB для частоты L1 и комбинации частот L1 и L2

α , град	ΔB , мм	ΔL , мм	Δh , мм	ΔB , мм	ΔL , мм	Δh , мм	ΔB , мм	ΔL , мм	Δh , мм	ΔB , мм	ΔL , мм	Δh , мм	ΔB , мм	ΔL , мм	Δh , мм
	$\Delta\varphi = 0^\circ$	$\Delta\varphi = 90^\circ$	$\Delta\varphi = 180^\circ$	$\Delta\varphi = 270^\circ$	$\Delta\varphi = 360^\circ$										

Январь — февраль 2007 г.

Антenna GPS-702 v.4

10	-0.0463	0.747	-7.8048	1.29	-0.0605	-6.0833	0.265	-1.37	-8.6326	-0.916	0.288	-7.0289	-0.121	2.465	-5.0697
15	0	-0.208	0.1748	1.03	-0.288	-0.28051	0.16	-1.77	-1.511	-0.947	0.163	-0.267	-0.248	2.109	1.885
20	-0.313	-0.333	6.936	1.113	-0.691	7.236	0.302	-2.244	6.581	-0.923	-0.363	8.005	-0.348	1.777	9.8637

L1/L2

10	-0.0415	1.21	-9.368	1.361	0.736	-9.492	0.356	-1.021	-9.453	-2.322	-0.184	2.764	0.82	2.143	-2.45
15	-0.1415	0.621	-1.696	1.27	0.358	-2.128	0.272	-1.398	-2.089	-0.164	2.006	16.32	-0.189	2.171	1.833
20	-0.198	-0.117	6.232	1.245	-0.166	6.273	0.296	-1.99	6.106	1.521	0.373	23.44	-0.391	1.991	9.684

Антenna GPS-600LB

10	-3.389	2.99	-2.768	4.231	7.456	-5.731	3.8	-5.34	-2.96	-1.652	0.0258	-3.937	-1.728	3.169	-2.397
15	-3.091	1.068	5.8907	3.921	7.04	7.5127	3.782	-6.82	6.634	-1.737	0.302	1.312	0.658	-1.273	32.26
20	-2.895	1.173	13.76	4.117	5.849	9.97	3.326	-6.099	13.729	-1.595	0.284	9.94	0.551	-0.492	34.99

L1/L2

10	-3.363	2.383	-5.391	6.207	10.79	11.696	4.01	-5.438	-4.575	-2.0615	-0.199	-5.444	-1.309	2.448	-3.358
15	-3.313	2.469	1.71	4.0292	6.376	1.047	3.581	-5.206	2.93	-1.855	0.179	1.416	-1.221	2.446	3.299
20	-3.348	2.458	1.073	3.913	5.768	9.26	3.428	-5.34	12.049	-1.675	0.1369	9.673	-1.132	2.304	12.682

Май 2006 г.

Антenna GPS-600LB

10	-1.464	-4.334	-10.85	6.814	-2.176	-8.484	4.048	-13.506	-11.64	0.0358	-8.124	-12.5	-1.444	-5.586	-15.02
15	-1.043	-4.448	-2.403	7.413	-2.362	-0.498	3.808	-13.277	-2.961	0.0317	-7.443	-6.678	-1.103	-4.884	-5.692
20	-1.078	-4.459	6.61	6.727	-3.041	6.2	3.477	-14.305	5.469	-0.0424	-7.507	-0.621	-0.961	-5.48	2.24

L1/L2

10	2.265	-5.107	6.371	6.964	-2.143	-9.817	-4.263	-13.345	-12.17	-0.276	-8.505	-14.66	-1.406	-5.482	-15.24
15	-1.269	-4.486	-3.28	6.896	-2.438	-2.91	3.787	-13.87	-3.893	-0.258	-7.609	-8.365	-1.248	-5.288	-6.919
20	-1.1	-4.608	6.214	6.619	-2.955	5.219	3.434	-14.08	5.29	-0.289	-7.542	-1.37	-1.165	-5.432	1.684

Для антенны типа GPS-702 видно, что формы кривых, описывающих изменение положения точки СФЦ от номера суток, отличаются на углах маскирования более 10° . Однако изменения положения точки СФЦ не превышают 3 мм (рис. 10, 11).

При сопоставлении координат положения антеннного поста 2006 г. и 2007 г. видно, что координаты положения антеннного поста 2007 г. смешены на север от координат 2006 г. (период 9 мес) на 7 мм (рис. 12). Возможной причиной данного изменения может быть подвижка здания корпуса. Для более точного изучения необходимо выполнить мониторинг подвижек здания в течение года через определенные промежутки времени (раз в неделю или каждые сутки).

Из данных табл. 2 видно, что при изменении угла маскирования значение высоты изменяется. Это объясняется, во-первых, неточностью ис-

пользуемых фазовых характеристик, во-вторых, на базе 1–2 км проявляется влияние остаточных тропосферных и ионосферных погрешностей. Для более точных измерений высоты необходимо использовать абсолютные фазовые характеристики, а с целью точного определения высоты целесообразно разместить опорный антенный пост на базе не более 100 м от тестируемой антенны.

Отклонения по высоте для GPS-600LB составили для частоты L1 относительно угла маскирования $\alpha = 15^\circ$:

- для угла маскирования 10° — 6 мм;
- для угла маскирования 20° — 8 мм.

Отклонения по высоте для «безионосферной» комбинации частот L1/L2 относительно угла маскирования 15° :

- для угла маскирования 10° — 7 мм;
- для угла маскирования 20° — 9 мм.

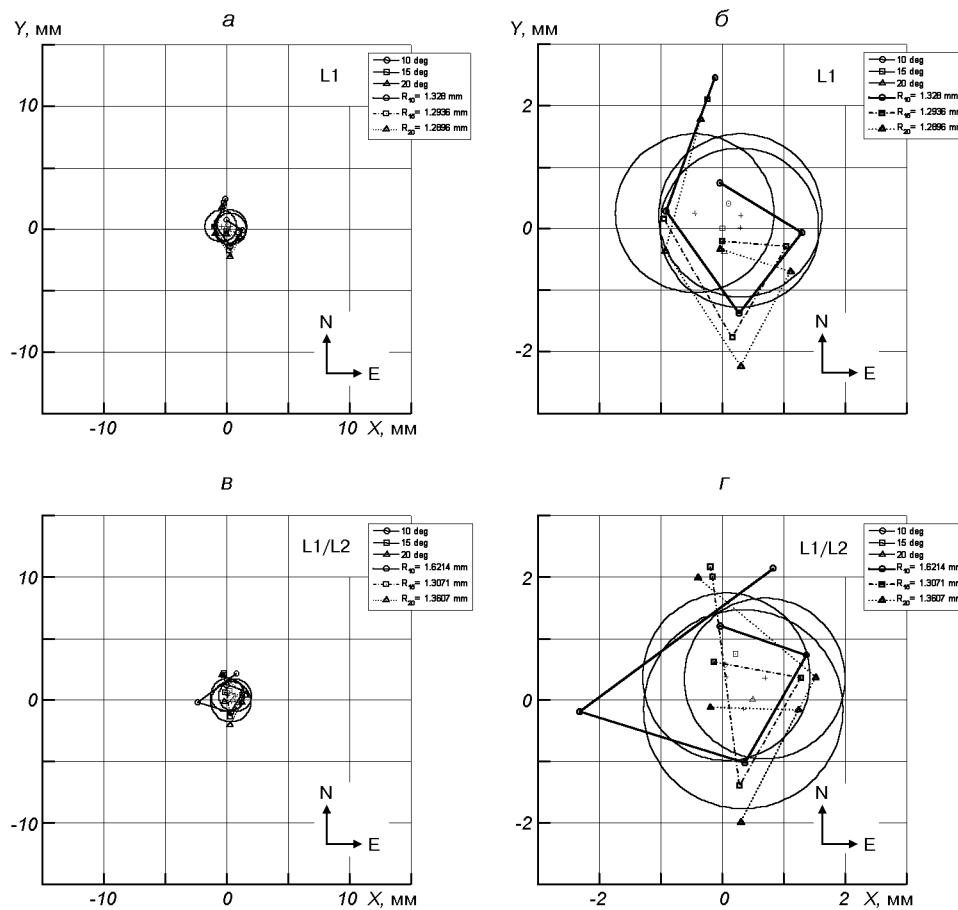


Рис. 11. Изменение положения СФЦ по результатам обработки суточных наблюдений для GPS-702 с построением радиусов

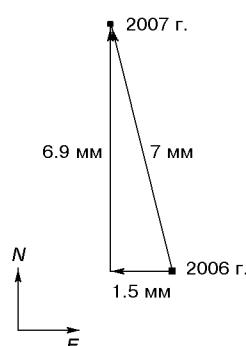


Рис. 12. Изменение координатного положения антеннного поста станции SURE (май 2006 г. — февраль 2007 г.)

Отклонения по высоте для GPS-702 составили на L1 относительно угла маскирования 15° :

- для угла маскирования 10° — 6 мм;
- для угла маскирования 20° — 6 мм.

Отклонения по высоте для «безионосферной» комбинации частот L1/L2 относительно угла маскирования 15° :

- для угла маскирования 10° — 7 мм;
- для угла маскирования 20° — 7 мм.

При анализе результатов обработки измерений видно, что произошли перепады значений высот. Для GPS-600LB на 5-е сутки (на L1 при углах маскирования $\alpha = 15^\circ, 20^\circ$), на 2-е сутки (на «безионосферной» комбинации частот L1/L2 при угле маскирования 10°) и для антенны GPS-702 — 4-е сутки наблюдений. Эти отклонения по высоте связаны с изменением климатических условий. Во время наблюдений с антенной GPS-702 на 4-е сутки выпал снег, который покрыл антенну. При повороте антенны на 5-е сутки покров снега был снят, и значение высоты вернулось на прежний уровень. Это свидетельствует о том, что относительные калибровки не позволяют полностью учесть все изменения фазовой диаграммы антенны. Для детального изучения поведения фазовых диаграмм при изменениях климатических условий необходимо проводить посезонные наблюдения.

Как видно из данных табл. 1, 2, величина эксцентриситета СФЦ для антенны GPS-600LB находится в диапазоне 4.4—5.2 мм. По данным {Geo++ GmbH} величина смещения составляет 4.69 мм на L1. Для антенны GPS-702 диапазон изменений СФЦ составляет 1.2—1.36 мм для частоты L1. Полученные значения совпадают со

значениями смещений, которые приводит Geo++ GmbH. Это также подтверждает работоспособность предложенной относительно простой методики контроля фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что для получения наивысшей точности местоопределения предпочтительнее использовать антенны типа GPS-702.

Полученные результаты обработки подтверждают целесообразность и необходимость проверять точность калибровок антенн непосредственно на месте ее эксплуатации.

В результате проведенных работ координатное положение приемной антенны станции SURE было определено с миллиметровым уровнем точности.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТАНОВКЕ АНТЕННЫ, ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЯ И ВЕРИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА КАЛИБРОВОК GPS/GNSS-АНТЕНН

Исходя из изложенного, можно сформулировать перечень практических рекомендаций, необходимых для верификации используемых калибровок GPS/GNSS-антенн в реальных условиях их установки.

1. Перед установкой антенны на опору с целью обеспечения вращения вокруг своей оси рекомендуется изготовить крепежно-поворотное устройство, такое как изготовлено для антеннного поста ХНУРЭ (рис. 13). Данное устройство позволяет поворачивать антенну на фиксированный угол вокруг своей оси.

2. С целью уменьшения уровня многолучевости рекомендуется вокруг антенной опоры соорудить «колодец», например, как представлено на рис. 1. Возможно также заполнение полости колодца радиопоглощающим материалом. Оценка уровня многолучевости, с использованием программных комплексов OCTAVA_PPA и PEGASUS v.4.11, показала, что подобная конструкция обеспечивает характеристики, близкие к антеннам типа «Choke Ring».

3. Необходимое условие проведения наблюдений: наличие близко расположенной базовой станции с точными координатами приемной антенны. Измерительная база не должна превышать 1—1.5 км. Если это выполняется, можно

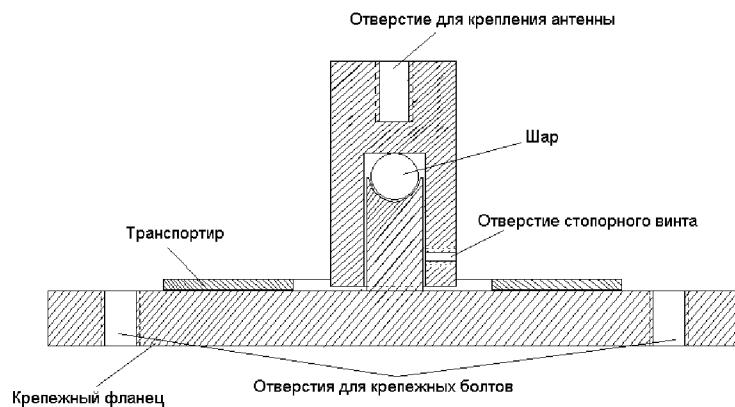


Рис. 13. Эскиз крепежно-поворотного устройства для установки антенны, разработанного в научно-учебном центре кафедры «Основы радиотехники»

производить суточные наблюдения с одновременными синхронными наблюдениями на базовой станции.

Лучше размещать опорный антенный пост (GPS-приемник + антенна) на базе порядка 10—20 м от тестируемой антенны. Это позволит более точно определить высоту СФЦ, так как при этом полностью исключаются остаточные тропосферные и ионосферные погрешности.

4. Для оценки фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн на каждом последующем суточном цикле производится поворот тестируемой антенны на фиксированный угол вокруг своей оси. Таким образом, проводится полный цикл наблюдений для достижения полного обката антенны вокруг оси. Важным является повторное измерение при положении 360° (исходное положение) для оценки повторяемости результатов.

5. После окончания наблюдений и их регистрации производится посуточная обработка фазовых наблюдений тестируемой и базовой станций с использованием специализированных программных пакетов.

При обработке каждой суточной сессии рекомендуется протестировать зависимость координат ФЦ от изменения угла маскирования ($\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$).

По полученным результатам выполняется анализ и делается заключение о качестве используемых фазовых калибровок тестируемой антенны для определения плановых и вертикальных координат СФЦ относительно рефе-

ренцной точки антенны.

Подобные эксперименты рекомендуется проводить посезонно с целью определения влияния сезонного изменения климатических условий на точность определения координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и апробирован с использованием реальных данных метод проведения контроля качества фазовых характеристик GPS/GNSS-антенн. Метод позволяет без дополнительных материальных затрат и дорогостоящего специализированного оборудования провести оценку используемых фазовых калибровок антенн для конкретных условий эксплуатации и уточнить отклонение положения среднего фазового центра антенны относительно референцной точки антенны.

Даны методические рекомендации по установке антенных постов, контролю и верификации фазовых калибровок GPS/GNSS-антенн.

Проведенная серия экспериментальных исследований с использованием GPS/GNSS-антенн геодезического класса позволила оценить качество используемые фазовые коррекций, а также повысить точность определения координат приемной точки антенны. Также результатом проведенной работы является привязка и периодическое уточнение положения АР приемной антенны станции SURE с миллиметровым уровнем точности.

1. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6. Основы применения // Библиотека профессионала. — М.: СОЛОН -Пресс, 2005.—800 с.
2. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7+ Simulink 5/6 в математике и моделировании // Библиотека профессионала. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005.—576 с.
3. Жалило А. А., Желанов А. А., Шелковенков Д. А., Шокало В. М. Разработка методики оценки качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса. Предварительные результаты исследований // Радиотехника.—2007.—148.—С. 186—198.
4. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. — М.: Сов. радио, 1978.—384 с.
5. Желанов А. А., Шелковенков Д. А. Оценка качества фазовых калибровок GPS-антенн геодезического класса // PT-2007: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 2007. — Севастополь: СевНТУ, 2007.—С. 134.
6. Кафтан А. В. Влияние изменений положения фазового центра GPS-антенн на точность измерений // Институт физики Земли им. Г. А. Гамбурцева, РАН, 2002.—<http://www.segis.ru>.
7. Banyai L. Investigation of GPS antenna mean phase centre offsets using a full roving observation strategy // Geodetic and Geophysical Research Institute Hungarian Academy of Sciences. Journal of Geodesy, Springer Berlin/ Heidelberg, 2005.—<http://www.ggki.hu>.
8. Braun. J, Ruud. O., Meertens C. Trimble choke ring antenna mean phase center calibration // University NAVSTAR Consortium, Bourder, CO, August 1996.—<http://www.unavco.org>.
9. Cisak J., Sekowski M., Zanimonskiy Y., Zak L. Badanie roznych typow anten stosowanych w pomiarach jako element atestacji GPS // Instytut Geodezji i Kartografii, 2003.—<http://www.igik.edu.pl>.
10. Cisak J., Zanimonskiy Y. M. Results of the investigations of the GNSS antennae in framework of scargiant project «In-situ GNSS antenna tests and validation of phase center calibration data» // Instytut Geodezji i Kartografii, Warsaw, Poland, Institute of Radio Astronomy National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine. 2003.—<http://www.igik.edu.pl>.
11. Kaniuth K., Huber S. An assessment of radome effects on height estimates in the EUREF Network // Eurefsymposium 2002.—P. 97—102.
12. Kenneth J. Hurst, Yoaz Bar Sever In- situ GPS antenna phase center calibration // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California. 1998.—<http://hdl.handle.net/2014/20513>.
13. Kunysz W. High performance GPS pinwheel antenna // ION NTM 2000, September 2000.—<http://www.navatels.com/Documents/Papers>.
14. Kunysz W. A novel GPS survey antenna // Technical session of ION, Anaheim, CA, January 2000. — <http://www.navatels.com/Documents/Papers>.
15. Mader G., Czopek F. Calibrating antenna phase centers // GPS World.—May 2002.—P. 40—46.
16. Mader G., Spring S. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey.2002.—<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>.
17. Menge F., Seeber G., Volksen C., et al. Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. 1998. — <http://www.geopp.de/download>.
18. Menge F., Seeber G., Volksen C., et al. Developments in Absolute Field Calibration of GPS Antennas and Absolute Site Dependent Multipath. 1998.— <http://www.geopp.de>
19. Menge F., Schmidz M. AOAD/M_T Choke ring GPS antenna. Absolute phase center variations. Result of field calibrations at IFE and Geo++. 2000. http://www.geopp.de/media/docs/AOA_D/M_T.
20. Santerre R., Akrou B. A. Geiger calibrating antenna phase centers // GPS World.—February 2005.—P. 49—53.
21. Schmid R., Mader G., Herring T. From relative to absolute antenna phase center corrections // Institut für austromische und physikalische Geodäsie, tu Munchen, US Department of Commerce, NOAA, Geoscience Research Division Massachusetts Institute of Technology, Draft of February 2, 2004.—<http://igsrb.jpl.nasa.gov>.
22. Wubbena G., Schmitz M., Menge F., Boder V., Seeber G. Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time // ION GPS 2000, Salt Lake Sity, UT, September 2000.—P. 2512—2522.
23. L-band antenna performance improvements // NovAtel Inc. —<http://www.navatels.com>.
24. The Block IIA Satellite Calibrating Antenna Phase Centers // NGS, The Boeing Company, GPS World, May, 2002. —P. 40—46.

THE ACCURACY ESTIMATION OF GPS/GNSS ANTENNAS CALIBRATION OF PHASE CENTRE AND ITS VARIATIONS

*A. A. Жалило, А. А. Желанов, Д. А. Шелковенков,
В. М. Шокало*

A relatively simple method for verification of GPS/GNSS antenna phase characteristics in concrete environment of operation is proposed. The method assumes the use of one closely located reference base station with precision coordinates of antenna mean phase centre (MPC) and accurate phase centre variations (PCV) calibration. The method allows us to carry out a quality estimation of antenna phase characteristics and their influence on the accuracy of positioning without use of the expensive specialized equipment. We present the results of verification of the used phase calibrations of antennas GPS-600LB, GPS-702 (NovAtel Inc., Canada) for the station SURE (KhNURE) antenna site. It is obtained an acceptable fit (at a level of 1 to 1.5 mm) of the estimations of MPC displacement with the values of Geo++ GmbH company (Germany) which were obtained using specialized robots. The series of experimental researches which was carried out with the use of GPS/GNSS antennas of a geodetic grade allowed one to estimate the quality of used phase corrections and their influence on the accuracy of horizontal and vertical coordinates, and also to increase the accuracy of the SURE station antenna position. Some methodical recommendations on installation of antenna sites, the monitoring and verification of phase calibrations of GPS/GNSS station antennas for positioning at millimetre accuracy level are given.

УДК. 528.8.04

О. М. Боднар, З. В. Козлов, О. Д. Федоровський

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Системне моделювання природних процесів на основі космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень

Надійшла до редакції 25.02.08

Виконано системне моделювання техногенного навантаження в Нікопольському гірничо-промисловому вузлі і нафтопродуктивності ділянок території Дніпровсько-Донецької западини на основі даних космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень.

Розглядатимемо природне середовище як складну геосистему, структурні складові якої генетично об'єднані взаємозалежними геологічними, геофізичними і біологічними процесами та ландшафтними особливостями регіону. На основі даних космічного дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і наземних спостережень, статистичних та архівних даних попередніх досліджень отримаємо інформацію про адаптивний баланс взаємного впливу цих процесів у складних природно-техногенних системах (ПТС) — природних і антропогенно змінених ландшафтах. Системне моделювання дає можливість формалізувати причинно-наслідкові зв'язки у ПТС, обґрунтувати найраціональніші методи побудови динамічних моделей для моделювання сценаріїв розвитку процесів, що відбуваються у ПТС, і адаптувати моделі ПТС до поточних спостережень.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Динамічні моделі ПТС є вагомою складовою ДЗЗ- і ГІС-технологій природокористування, створюваних відповідно до принципів системного

аналізу [6]. Останній дозволяє розглянути природне середовище геосистем як єдине ціле, вивчати динаміку екзогенних і антропогенних процесів, що відбуваються у природному середовищі, для оцінки екологічного стану і природних ресурсів досліджуваного регіону [5].

За окремими складовими компонентами геосистеми, що дешифруються на космічних знімках, розкриваються взаємозв'язки між видими і прихованими характеристиками природного середовища [1]. Це дозволяє при створенні динамічних моделей природного середовища використовувати принципи адаптивного балансу впливів. Реалізація цих принципів приводить до системного методу адаптивного балансу впливів (Adaptive Balance Causes, ABC-метод). Методика полягає в розробці концептуальної моделі і формуванні схеми причинно-наслідкових зв'язків між елементами системи, на підставі якої створюється системна діаграма моделі. Причинно-наслідкові зв'язки в моделі зображені за допомогою функцій впливу через відповідні потоки, які забезпечують взаємний вплив компонентів вектора стану системи (модулів X_i) і динамічну рівновагу системи. Формалізація моделі полягає в отриманні математичних рівнянь,

що виражають адаптивний баланс впливів усередині системи. Рівняння ABC-моделі має вигляд [8]

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[1 - 2 \left(x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right) \right], \quad (1)$$

де $x_1, x_2, \dots (i = 1, 2, \dots, n)$ — процеси в досліджуваній системі, a_{ij} — коефіцієнти рівнянь ABC-моделі, що визначають вплив процесу x_j на процес x_i та зберігають постійні значення на вибраному інтервалі часу.

Для визначення коефіцієнтів ABC-моделі a_{ij} використовуються архівні і статистичні дані передніх досліджень. Рівняння отримано з умовою, що кожен процес у досліджуваній системі можна виразити лінійною комбінацією решти процесів [7]:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{is}x_s + \dots + a_{in}x_n - x_i, \quad (2)$$

де x_i — досліджуваний процес; $x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_n$ — взаємозв'язані процеси, які впливають на x_i .

Коефіцієнти a_{ij} знаходяться з умови рівноваги системи рівнянь ABC-моделі, складеної на основі рівняння (2), шляхом прирівнювання до нуля правих частин рівнянь всіх взаємопов'язаних процесів. При цьому кожний з процесів представляється у вигляді суми впливів на нього з боку решти процесів. Рівень впливу процесів визначається з кореляційних зв'язків, які відображають статистичні зв'язки між процесами. Остаточно отримуємо систему однорідних лінійних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів a_{ij} . Після визначення коефіцієнтів впливу a_{ij} на основі системи рівнянь ABC-моделі (1) з'являється можливість виконати моделювання сценаріїв розвитку процесів, що відбуваються в ПТС.

МОДЕЛЬ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ СИСТЕМ

Системне моделювання на основі ABC-методу використали для прогнозування змін геоекологічного стану території Нікопольського гірничопромислового вузла під впливом промислового виробництва. Розвиток геоекологічних про-

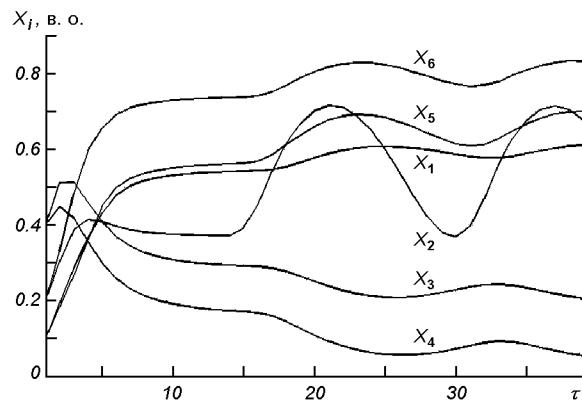


Рис. 1. Значення модельних параметрів при періодичній зміні об'ємів виробництва: X_1 — техногенне навантаження на навколишнє середовище, X_2 — об'єм промислового виробництва, X_3 — площа зайнята природними процесами, X_4 — площа під антропогенно-модифікованими процесами, X_5 — площа під антропогенними процесами, X_6 — площа під техногенно-індустриальними процесами, τ — інтервал часу

цесів розглядався як набір взаємозв'язаних ландшафтно-функціональних процесів, що змінюються в часі та охоплюють всі можливі стани ландшафтів на території Нікопольського гірничопромислового району: природні, антропогенно-модифіковані, антропогенні і техногенно-індустриальні [4].

Концептуальна модель ПТС є схемою цільових установок з основними модулями (підсистемами) системи. На основі концептуальної моделі формуються основні причинно-наслідкові зв'язки між модулями (рівнями) моделі, що відображають характер функціонування ПТС: X_1 — техногенне навантаження на навколишнє середовище, X_2 — об'єм промислового виробництва, X_3 — площа під природними процесами, X_4 — площа під антропогенно-модифікованими процесами, X_5 — площа під антропогенними процесами, X_6 — площа під техногенно-індустриальними процесами (рис. 1).

Для моделювання геоекологічних змін ПТС було вибрано інтервал часу, протягом якого значення функцій впливу можна вважати постійним. Тоді після формалізації динамічної моделі на основі рівняння (1) отримуємо систему рівнянь

$$\begin{aligned}
& \frac{dx_1}{dt} = \\
& = x_1 [1 - 2(x_1 - (-a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + a_{16}x_6))], \\
& \frac{dx_2}{dt} = x_2 [1 - 2(x_2 - (-a_{21}x_1))], \\
& \frac{dx_3}{dt} = \\
& = x_3 [1 - 2(x_3 - (-a_{32}x_2 - a_{34}x_4 - a_{35}x_5 - a_{36}x_6))], \\
& \frac{dx_4}{dt} = \\
& = x_4 [1 - 2(x_4 - (a_{42}x_2 - a_{43}x_3 + a_{45}x_5 + a_{46}x_6))], \\
& \frac{dx_5}{dt} = \\
& = x_5 [1 - 2(x_5 - (a_{52}x_2 - a_{53}x_3 + a_{54}x_4 + a_{56}x_6))], \\
& \frac{dx_6}{dt} = \\
& x_6 [1 - 2(x_6 - (a_{62}x_2 - a_{63}x_3 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5))].
\end{aligned}$$

Для визначення коефіцієнтів впливу a_{ij} в системі рівнянь (3) використовувалася процедура, що була розглянута раніше. Прирівнюючи до нуля праві частини рівнянь системи, сформованої на основі рівняння (2), одержуємо систему однорідних лінійних рівнянь (4) відносно не-відомих коефіцієнтів a_{ij} :

$$\begin{aligned}
& a_{13}X_3 + a_{14}X_4 + a_{15}X_5 + a_{16}X_6 = X_1, \\
& a_{34}X_4 + a_{35}X_5 + a_{36}X_6 = X_3, \\
& a_{43}X_3 + a_{45}X_5 + a_{46}X_6 = X_4, \\
& a_{53}X_3 + a_{54}X_4 + a_{56}X_6 = X_5, \\
& a_{63}X_3 + a_{64}X_4 + a_{65}X_5 = X_6.
\end{aligned} \tag{4}$$

Для визначення коефіцієнтів функцій впливу, які входять у перше рівняння системи (4), в результаті нескладних перетворень була сформована система рівнянь

$$\begin{aligned}
& a_{13}R_{33} + a_{14}R_{43} + a_{15}R_{53} + a_{16}R_{63} = R_{13}, \\
& a_{13}R_{34} + a_{14}R_{44} + a_{15}R_{54} + a_{16}R_{64} = R_{14}, \\
& a_{13}R_{35} + a_{14}R_{45} + a_{15}R_{55} + a_{16}R_{65} = R_{15}, \\
& a_{13}R_{36} + a_{14}R_{46} + a_{15}R_{56} + a_{16}R_{66} = R_{16}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Система рівнянь (5) дозволяє знаходити необхідні коефіцієнти a_{ij} для ідентифікації функцій впливу, що діють на модуль системи X_1 . Аналогічним чином отримуємо системи рівнянь для коефіцієнтів функцій впливу, що належать до решти модулів. Для знаходження коефіцієнтів a_{ij} із системи рівнянь (5) достатньо скористатися формулами Крамера [3]. Взаємний вплив процесів за досліджуваний період визначався з кореляційних зв'язків між техногенним навантаженням на навколошнє середовище X_1 і розмірами площ X_3 , X_4 , X_5 , X_6 ландшафтних комплексів на території Нікопольського гірничопромислового району. При цьому використовувалися матеріали багаторічних наземних спостережень, а також космічна інформація, отримана за останні 15 років із супутників «Ресурс-Ф», «Landsat-TM», «Океан-О», «Метеор-3М» в Нікопольському гірничопромисловому регіоні [4].

Розраховані за архівними і статистичними даними коефіцієнти кореляції R_{ij} досліджуваних процесів наведені в табл. 1.

Для всіх модулів (окрім X_2) коефіцієнти впливу рівнянь ABC-моделі ПТС, що відображають ступінь взаємозв'язку між процесами, визначалися на основі кореляційних зв'язків між цими процесами. У зв'язку з відсутністю архівних

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції R_{is} між геоекологічним станом X_i і геопроцесами в Нікопольському гірничопромисловому вузлі

	X_3	X_4	X_5	X_6	X_1
X_3	1	-0.91	-0.95	-0.82	-0.95
X_4	-0.91	1	0.76	0.54	0.77
X_5	-0.95	0.76	1	0.95	0.96
X_6	-0.82	0.54	0.95	1	0.91
X_1	-0.95	0.77	0.96	0.91	1

Таблиця 2. Коефіцієнти впливу a_{ij}

a_{ij}	X_3	X_4	X_5	X_6	X_1	X_2
X_3	1	-0.18	-0.13	-0.27	0	-0.2
X_4	-0.18	1	0.09	0.19	0	0.2
X_5	-0.13	0.09	1	0.21	0	0.2
X_6	-0.27	0.19	0.21	1	0	0.2
X_1	-0.15	0.17	0.13	0.18	1	0
X_2	0	0	0	0	-0.2	1

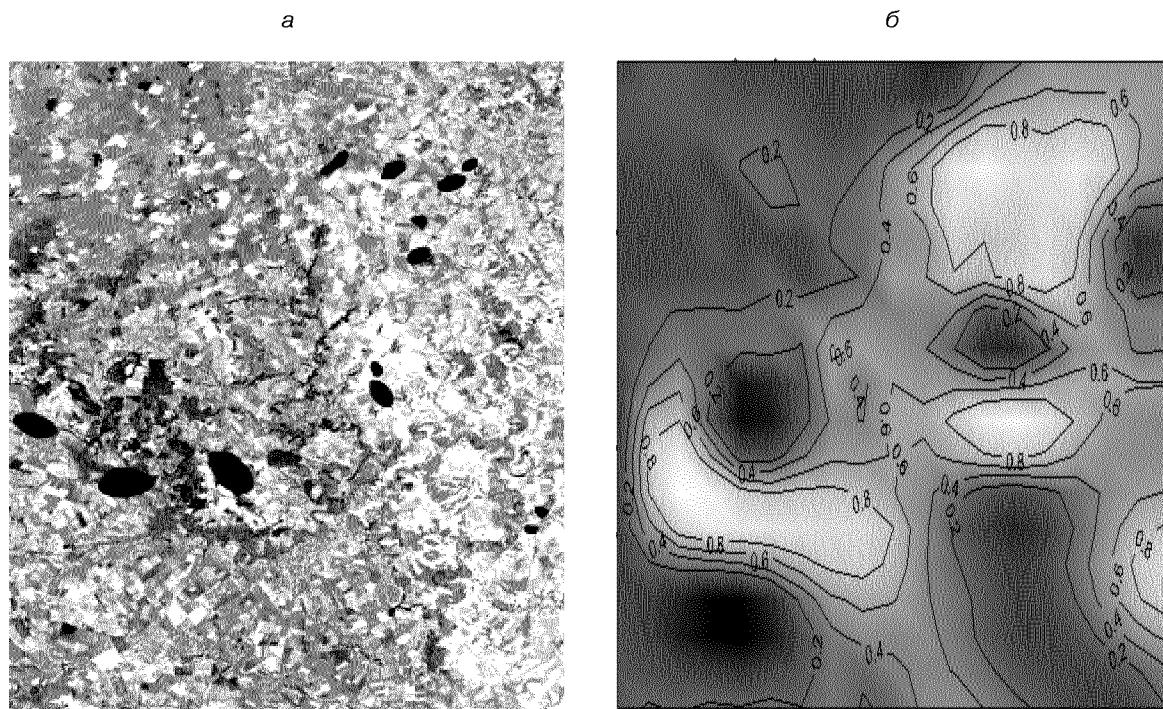


Рис. 2, а — космічний знімок «Landsat-7» ($\lambda = 0.53—0.61$ мкм) експериментальної ділянки території Дніпровсько-Донецької западини (овалами чорного кольору позначені нафтопродуктивні ділянки — еталони), б — результати класифікації досліджуваної території (рівень нафтоперспективності ділянок пропорційний яскравості зображення)

даних про об'єми промислового виробництва (модуль X_2) за пошуковий період відповідні коефіцієнти впливу були визначені на основі експертних оцінок. Коефіцієнти впливу рівнянь ABC-моделі наведені в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На основі сформованої системи рівнянь (3) були проведені числові експерименти. Була поставлена задача отримати сценарії розвитку техногенного навантаження в Нікопольському гірничо-промисловому регіоні при змільному об'єму виробництва продукції. При цьому всі модельовані процеси були представлені у безрозмірному вигляді в одній шкалі вимірів. На рис. 1 приведені результати моделювання розвитку техногенного навантаження в залежності від зміни об'єму виробництва. Видно, що модель адекватно реагує на зміну об'єму виробництва, яке приводить до відповідної зміни техногенного навантаження

та до зміни площ ділянок території, зайнятих природними, антропогенно-модифікованими, антропогенними і техногенно-індустріальними процесами.

ПРОГНОЗУВАННЯ НАФТОПЕРСПЕКТИВНОСТІ

Системне моделювання і прогноз нафтоперспективності ділянок території було виконано на фрагменті території (розміром 60×80 км) Дніпровсько-Донецької западини (рис. 2). Досліджувана площа була розділена на 270 ділянок розміром 4×4 км. Ці ділянки були прокалібровані за інформативними ознаками, які отримані в результаті дослідження відомих нафтопродуктивних ділянок, що були прийняті за еталон. За вихідну інформацію ми взяли параметри Хараліка, отримані при дешифруванні космічного знімка «Landsat-7» спектрального діапазону $\lambda = 0.53—0.61$ мкм з просторовим розрізненням 30 м (рис. 2, а), і геологічні характеристики,

одержані за допомогою тематичних геологічних карт [2].

Для моделювання нафтопродуктивності коефіцієнти впливу для динамічної моделі визначалися на основі інформації, одержаної з еталонних ділянок. Для цього формувались рівняння динамічної моделі еталону, обчислювались кореляційні зв'язки та визначались коефіцієнти рівнянь АВС-моделі. Далі на основі космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень та отриманих на еталонах значеннях коефіцієнтів впливу оцінювалась наявність покладів нафти на досліджуваних ділянках шляхом моделювання процесу пошуку нафти за розв'язками рівнянь динамічної моделі (2).

Результати системного моделювання прогнозу покладів вуглеводнів у Дніпровсько-Донецькій западині (рис. 2, б) на основі АВС-методу підтверджують можливість побудови динамічних моделей природного середовища для прогнозування розвитку техногенного навантаження і оцінки нафтоперспективності окремих ділянок нафтогазоносної території. Метод адаптивного балансу впливів простіший в реалізації, ніж метод системної динаміки, і допускає використання спостережень для уточнення модельних сценаріїв розвитку, а це підвищує якість системного моделювання. Наявність архівних і статистичних даних для обчислення кореляційних зв'язків між процесами, що відбуваються в ПТС, дозволила об'єктивно визначити більшість коефіцієнтів рівнянь АВС-моделі без залучення суб'єктивних оцінок експертів.

Виконано моделювання сценаріїв змін техногенного навантаження в залежності від змін об'ємів промислового виробництва в Нікопольському гірничопромисловому районі і дана оцінка нафтоперспективності ділянок території Дніпровсько-Донецької западини на основі да-

них космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень.

1. Дьяконов К. Н., Касимов Н. С., Тикунов В. С. Современные методы географических исследований. — М.: Просвещение, 1996.—204 с.
2. Козлов З. В., Лукин А. Е., Федоровский А. Д. Прогноз залежей углеводородов в Днепровско-Донецкой впадине на основе комплексной оценки космической информации ДЗЗ и наземных наблюдений // Доповіді Національної академії наук України.—2007.—№ 2.—С. 111—115.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1973.—832 с.
4. Ліщенко Л. П. Особливості вивчення ландшафтів на основі матеріалів дистанційних зйомок на прикладі Нікопольського промислового вузла // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: ЦАКДЗ, 1999.—С. 162—164.
5. Лялько В. І., Маринич О. М., Федоровський О. Д. Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // Укр. географ. журн.—1994.—№ 4.—С. 3—8.
6. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981.—487 с.
7. Тимченко И. Е. Игумнова Е. М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // Мор. гидрофиз. журн.—2004.—№ 5.—С. 53—63.
8. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.—225 с.

SYSTEM MODELLING OF THE NATURAL PROCESSES ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA AND GROUND-BASED OBSERVATIONS

E. N. Bodnar, Z. V. Kozlov, A. D. Fedorovsky

System modelling for the ecological influence in the Nikopol mining region and for the oil productivity of the same parts of Dnieper-Donetsk Petroleum Bearing Province was performed on the basis of remote sensing data and ground-based observations.

УДК 551.510.534

О. М. Євтушевський, А. В. Грицай, Г. П. Мілінєвський

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

Антарктична тропопауза у зимово-весняний період

Надійшла до редакції 25.02.08

Проаналізовано розподіл вмісту озону, температури стратосфери і тропосфери та висоти тропопаузи над антарктичним регіоном. Виявлено переважний вплив охолодження нижньої стратосфери на збільшення висоти тропопаузи. У зимові місяці це охолодження зумовлене зниженням температури в області стратосферного полярного вихору, а у весняні — втратами озону та утворенням озонової діри. Аномальне підняття тропопаузи в районі моря Ведделла до 13—14 км (порівняно з типовими значеннями 9—10 км) супроводжується розширенням переходного шару між тропосферою та стратосферою. Вплив тропосфери проявляється лише у зниженні на 2 км тропопаузи над континентальним плато у східній Антарктиді. Сезонність утворення і регіональність розташування аномалій зумовлюють зміни вертикальної протяжності тропосфери над Антарктикою, процесів тропосферно-стратосферного обміну та поширення планетарних хвиль, які причетні до кліматичних змін у регіоні.

ВСТУП

В останні десятиліття в атмосферних процесах антарктичного регіону спостерігаються дві широковідомі аномалії: у стратосфері — озонова діра у весняний період, а у тропосфері — найвищі на земній кулі темпи потепління в районі Антарктичного півострова. Кожне з цих явищ є наслідком як особливостей атмосферної циркуляції в регіоні, так і глобального антропогенного забруднення атмосфери. Викиди парникових газів (перш за все вуглекислого газу) спричиняють підвищення температури тропосфери, а хлорфторвуглецевих сполук — руйнування молекул стратосферного озону [3, 25]. За систематичними супутниковими спостереженнями, які тривають майже три десятиліття, у 1980—1990 рр. фіксувалось стійке зниження загального вмісту озону (ЗВО) в атмосфері. Згідно з оцінками, представленими у звітах Всесвітньої метеорологічної організації щодо втрат озону, найбільше зниження ЗВО відбувалося над Антарктикою у жовтні — від 340 до 230 одиниць Добсона (ОД), тобто приблизно на

третину [24]. У зв'язку з великою площею озонової діри (до 25 млн кв. км) дефіцит маси озону у весняний період досягає 80 млн тонн. Ці втрати позначаються на глобальному рівні ЗВО, який у середньому для 2002—2005 рр. в межах широт 60° S — 60° N був на 3.5 % нижчим, ніж у 1964—1980 рр., до утворення озонової діри [24, 25]. В останнє десятиліття відбулося по-мітне зменшення від'ємних трендів вмісту озону, що вважається наслідком стабілізації та зменшення вмісту озоноруйнівних газів у стратосфері, досягнутої завдяки прийняттю міжнародних актів про заборону їхніх викидів у атмосферу [25]. Схожого гальмування темпів потепління у західній Антарктиці не відзначається. За вимірюваннями на станції Академік Вернадський (до 1996 р. — Фарадей, Велика Британія), розташованій на Антарктичному півострові, впродовж останніх 50 років середня річна температура збільшилась майже на 3° С [20]. Найбільше потепління зареєстровано у зимовий період.

Останнім часом з'ясовано, що втрати озону антарктичної весни є основною причиною бага-

торічного зменшення температури стратосфери [14]. Проте збільшення концентрації парникових газів у тропосфері також сприяє вихолодженню стратосфери, оскільки зростає поглинання довгохвильового випромінювання в тропосфері і зменшується його проникнення в стратосферу.

Зрозуміло, що два прилеглих шари атмосфери не можуть не взаємодіяти, і одним із шляхів такої взаємодії у випадку тропосфери і стратосфери є обмін речовиною завдяки змішуванню повітряних мас або їхньому односторонньому переносу через тропопаузу. Тропопауза розмежовує турбулентну тропосферу з низькою статичною стійкістю і зменшенням температури з висотою та стійко стратифіковану стратосферу, де температура з висотою збільшується. Висота тропопаузи зазнає впливу теплового режиму кожного з суміжних шарів атмосфери, зокрема, збільшується як при підвищенні температури тропосфери, так і при зменшенні температури нижньої стратосфери [8, 16]. А зміни висоти тропопаузи, у свою чергу, впливають на тропосферно-стратосферний обмін та вертикальний розподіл парниковых газів, відіграючи помітну роль у кліматичних змінах [10, 15, 16].

Крім радіаційного та хімічного, можливий і динамічний взаємовплив тропосфери і стратосфери через поширення планетарних хвиль та атмосферну циркуляцію, а також внаслідок розповсюдження вниз стратосферних збурень та виникнення тропосферного відгуку на них [7, 17, 19].

Тропосферно-стратосферна взаємодія в умовах антарктичного регіону значною мірою залежить від розподілу температури, для якого властиві не лише екстремальні значення, а й аномальні градієнти. У тропосфері різкий температурний контраст спостерігається на межі океан — континент, а в стратосфері — на краю озонової діри. Теплові аномалії кожного з цих шарів атмосфери можуть впливати на розподіл висоти тропопаузи і на процеси взаємодії між шарами. Мета роботи — оцінити зміни в структурі антарктичної тропопаузи у зимово-весняний період. Для цієї половини року характерні зимовий мінімум температури повітря у тропосфері і стратосфері та наступне весняне нагрівання тропосфери, але нагрівання стратосфери відбувається лише за межами озонової діри. Всередині

озонової діри температура продовжує залишатися низькою через інтенсивні весняні втрати озону.

За даними про розподіли ЗВО, температури атмосфери та висоти тропопаузи проводився пошук маловивчених ефектів у поведінці тропопаузи, викликаних змінами теплових режимів антарктичної тропосфери і стратосфери. Основна увага приділялася тій обставині, що антарктичної весни формується значна зональна асиметрія розподілу ЗВО. Вона спричинена планетарною хвилею із зональним числом $m = 1$ [1, 5, 6, 23], яка зміщує озонову діру відносно полюса, і це впливає на горизонтальний розподіл температури нижньої стратосфери.

ДАНІ

Використано дані супутникових спостережень загального вмісту озону спектрометрами TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) за 1979—2005 рр. та OMI (Ozone Monitoring Instrument) за 2006 р. (<http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html>). Проводився аналіз щоденних та усереднених за місяць довготних розподілів ЗВО на окремих широтах південної півкулі.

Для визначення висоти тропопаузи застосовують тепловий та динамічний критерії. В даній роботі досліджується тропопауза, положення якої знайдене за тепловим критерієм. Тепловий критерій базується на означені Всесвітньої метеорологічної організації 1957 р. [26]. Висотою тропопаузи вважається найнижчий рівень, на якому абсолютна величина вертикального градієнта температури зменшується до 2 К/км за умови, що середнє значення вказаної величини між цим рівнем і будь-яким вищим в інтервалі 2 км є меншим від 2 К/км [27]. Висотне положення визначене так тропопаузи одержано за значеннями атмосферного тиску на рівні тропопаузи із Центру діагностики клімату, США (Climate Diagnostics Center — CDC), де створено багаторічний архів даних реаналізу метеорологічних параметрів NCEP-NCAR (National Centers for Environmental Prediction — National Center for Atmospheric Research, <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis>). Цей архів був використаний також як джерело ще двох параметрів атмосфери — геопотенціальних висот та

температури повітря, розподіл яких в антарктичному регіоні зіставляється з розподілами ЗВО і висоти тропопаузи.

ЗОНАЛЬНІ АНОМАЛІЇ ТРОПОПАУЗИ

За даними OMI та інших супутникових спектрометрів у 2006 р. площа озонової діри упродовж весняних місяців (із середини вересня до кінця листопада) виявилася однією з найбільших за період супутникових спостережень із 1979 р. У попередньому 2005 р. площа озонової діри була типовою для останнього десятиліття. Різниця

площ озонової діри у 2005 і 2006 рр. зумовлена різною інтенсивністю стратосферного полярного вихору, який також впливає на квазістационарний зональний розподіл озону. Зміни довготного розташування зональних аномалій розподілу озону (відхилень від середнього зонального рівня на кожній широті) видно з рис. 1, а, б. Контури додатних/від'ємних відхилень нанесені суцільними/пунктирними лініями та позначені символами «В»/«Н», а їх довготне положення — радіальними лініями. В умовах більш інтенсивного стратосферного вихору і, відповідно, сильнішого західного зонального вітру у 2006 р., зональні екстремуми вмісту озону зміщені на

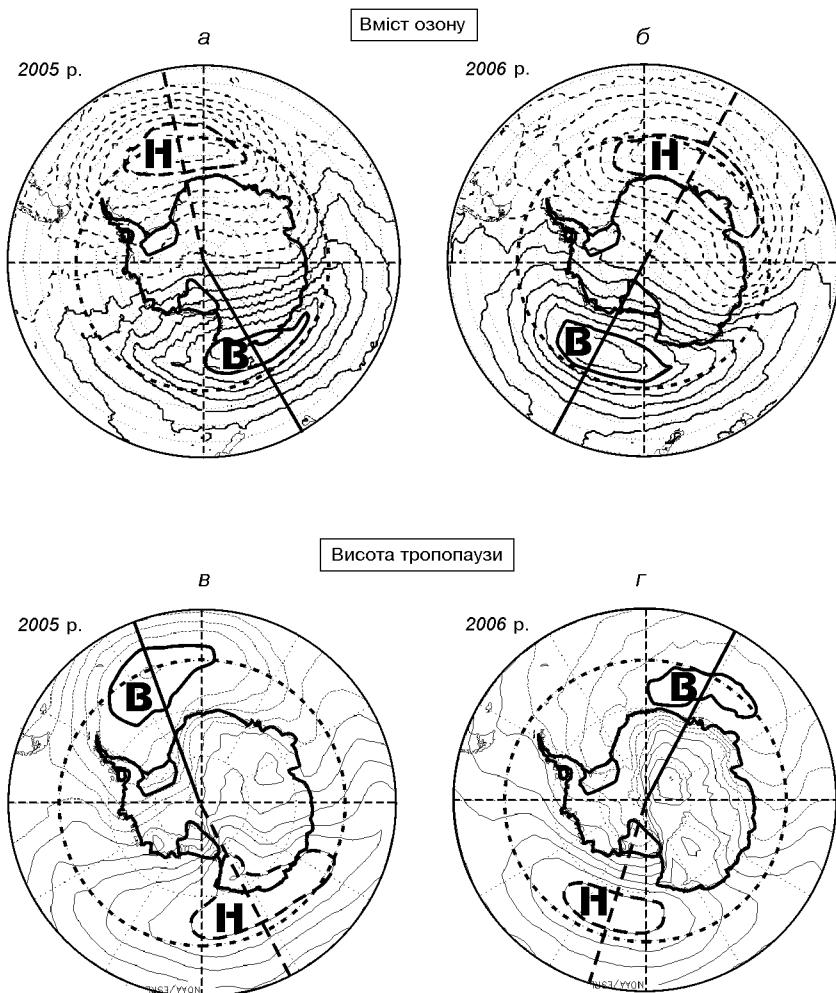


Рис. 1. Відмінність довготного положення зональних екстремумів вмісту озону за супутниковими вимірюваннями (а, б) та висот тропопаузи за даними NCEP-NCAR (в, г) для жовтня 2005 р. (а, в) і 2006 р. (б, г). Пунктирним колом позначено широту 60° S

схід порівняно з 2005 р. приблизно на 50° довготи. Таку залежність розташування осі зональної асиметрії ЗВО від інтенсивності полярного вихору проаналізовано в роботі [6], а нижче розглянуто співвідношення аномалій ЗВО та висоти тропопаузи.

Відмінності довготного положення зональних екстремумів ЗВО між 2005 р. і 2006 р. (рис. 1, а, б) досить добре узгоджуються зі змінами висоти тропопаузи (рис. 1, в, г). При цьому аномаліям вмісту озону відповідають протилежні за знаком аномалії висоти тропопаузи.

Максимальні відхилення від зонального середнього спостерігаються в широтному інтервалі 60° S — 70° S. На рис. 2 для широти 65° S наведено співвідношення довготних розподілів ЗВО (а) та висоти тропопаузи (б) у жовтні 2006 р. Видно високий ступінь їхньої антикореляції, добре відомої з попередніх досліджень [9, 21]. В області зонального мінімуму розподілу ЗВО (160 ОД, рис. 2, а) тропопауза найвища ($H_t = 13.3$ км, рис. 2, б), що є аномально високим значенням для антарктичного регіону. В області максимуму ЗВО це відповідно 350 ОД і 10 км, що є типовою висотою антарктичної тропопаузи [8].

Відомо, що у меридіональному напрямі тропопауза підіймається від характерної для Антарктики висоти 10 км до значень $H_t = 16$ км у тропіках [8, 10, 27]. Найвищому положенню тропічної тропопаузи в її глобальному розподілі сприяють не лише високі тропосферні температури, а й досить низькі температури нижньої стратосфери (блізько 200 К у вересні — листопаді). В Антарктиці навіть у літній сезон тропосфера значно холодніша, ніж у тропіках, і не може спричинити підняття тропопаузи. Як випливає з рис. 1 та рис. 2, а, б, квазістанціонарні аномалії висоти тропопаузи пов'язані зі зниженням вмісту озону. Цей процес супроводжується охолодженням нижньої стратосфери, тобто довготна асиметрія значень H_t має стратосферне походження.

У жовтні 2006 р. монотонна зміна ЗВО між максимумом і мінімумом на 190 ОД (рис. 2, а) супроводжується протилежною за знаком зміною висоти тропопаузи на 3.4 км (рис. 2, б). Отже, збільшенню висоти тропопаузи на 1 км відповідає зменшення вмісту озону на 56 ОД. У середніх широтах північної півкулі зміщення

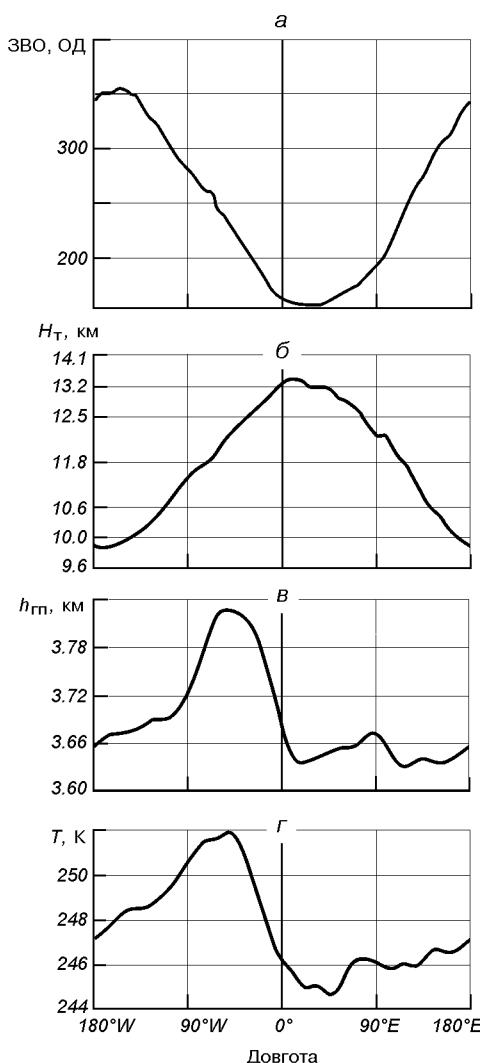


Рис. 2. Середньомісячний довготний розподіл ЗВО (а), висоти тропопаузи H_t (б), геопотенціальної висоти h_{pp} (в) та температури T повітря (г) на рівні тиску 600 гПа на широті максимальної зональної асиметрії у розподілі озону 65° S у жовтні 2006 р.

висоти тропопаузи на 1 км, спричинене переважно циклонічними процесами в тропосфері, викликає варіації ЗВО в межах 8—13 ОД [9, 21]. Це в середньому у п'ять разів менше, ніж співвідношення, одержане для антарктичної весни. Таку відмінність можна пояснити різним внеском тропосферних і стратосферних збурень у варіації висоти тропопаузи.

У випадку тропосферних збурень спостері-

гається вплив процесів у тропопаузі на ЗВО, пов'язаний з варіаціями тропосферного тиску синоптичних масштабів та наступним перерозподілом озону в нижній стратосфері. Наприклад, над циклонами тропопауза знижується, тому збільшується вертикальна протяжність стратосферного максимуму озону і зростає його внесок в ЗВО порівняно з суміжними областями. У випадку стратосферних збурень спостерігається зворотний вплив «ЗВО → тропопауза», зумовлений передусім дефіцитом озону в нижній стратосфері і зниженням її температури. Якщо динамічний вплив тропосфери на тропопаузу можливий як у бік збільшення, так і у бік зменшення її висоти відносно незбуреного рівня (над антициклонами та циклонами відповідно), то тепловий вплив стратосфери в антарктичному регіоні однобічний — підняття тропопаузи відносно її типової висоти (рис. 2, б) через охолодження стратосфери. Як свідчать наведені співвідношення між змінами ЗВО і висоти тропопаузи, саме втрати озону в антарктичній стратосфері навесні призводять до спостережених змін висоти тропопаузи.

Процеси, які зумовлюють квазістационарні довготні варіації геопотенціальної висоти у тропосфері, не чинять впливу на рівень тропопаузи, як це видно з порівняння кривої на рис. 2, в з профілем тропопаузи на рис. 2, б. Згадані збурення тиску від циклонів та антициклонів, рухомих синоптичних утворень з переважною складовою швидкості із заходу на схід, згладжуються при усередненні за місяць і не роблять відчутного внеску у квазістационарний довготній розподіл на рис. 2, в. Довготній хід температури нижньої тропосфери (рис. 2, г), узгоджуючись з геопотенціальними висотами (рис. 2, в), очевидно, також непричентний до збурень на рівні тропопаузи. Це підтверджує висновок, що на відміну від результатів [9, 21] одержане для антарктичної тропопаузи співвідношення ZVO/H_t відображає не тропосферні, а стратосферні збурення.

Весняні втрати стратосферного озону сприяють підтриманню низьких (зимових) температур нижньої стратосфери, тому найхолодніша точка у вертикальному профілі температури розташовується вище, що й викликає збільшення висоти тропопаузи. В цих умовах «чіткість» тропопаузи також зменшується, існує на-

віть можливість «зникнення» тропопаузи [15] через незначну зміну температури з висотою в нижній стратосфері.

Визначальний вплив теплового режиму нижньої стратосфери на виникнення зональних аномалій тропопаузи підтверджує рис. 3. Вертикальні профілі температури в області типової висоти антарктичної тропопаузи (максимум вмісту озону над районом моря Росса, штрихова крива) демонструють зміну від'ємного градієнта на додатний у вузькому інтервалі висот (9—11 км, позначені потовщенням кривої). В області аномально високого положення тропопаузи (мінімум вмісту озону над морем Ведделла, суцільна крива для 30° W) такий перехідний шар втричі більший (висоти 12—18 км). Тому для цієї області характерна не лише висока тропопауза та її нечіткість, а й набагато вищий початок стійкої температурної стратифікації, властивої шарам повітря у стратосфері. Варто додати, що висотний профіль температури для 30° W (рис. 3) є типовим переважно для полярного регіону і лише у зимовий період [15]. Дані ж рис. 3 ілюструють весняний період і широту 65° S.

Хоча вертикальний профіль температури дозволяє формально застосувати тепловий критерій для знаходження положення тропопаузи

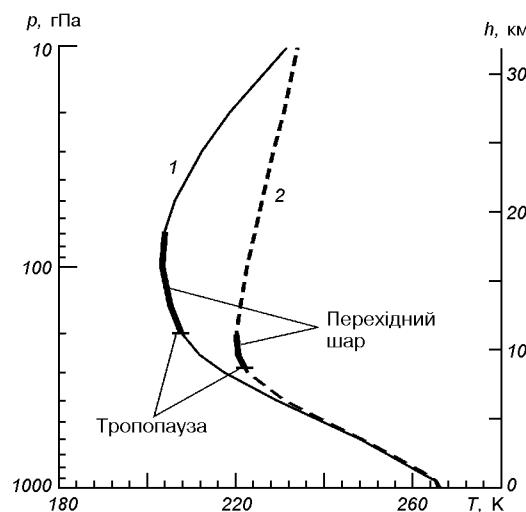


Рис. 3. Зміна температури з висотою навесні 2005 р. в інтервалі 0—32 км в областях зональних аномалій тропопаузи, показаних на рис. 1, в і пов'язаних із мінімумом ЗВО (суцільна крива) та максимумом ЗВО (штрихова крива)

(позначене горизонтальним штрихом на кривій 1 рис. 3), з точки зору тропосферно-стратосферної взаємодії важливішою стає саме значна зміна параметрів перехідного шару — збільшення його висоти та товщини. З одного боку, створюється ефект збільшення вертикальної протяжності тропосфери, а з іншого — охоплюється більша маса повітря, задіяного в тропосферно-стратосферному обміні в обох напрямах [18].

На висотах нижньої та середньої тропосфери суцільна і штрихова криві на рис. 3 мають ідентичний хід від'ємного градієнта температури, тому вертикальна теплова структура тропосфери, як і довготний розподіл тиску і температури в ній (рис. 2, в, г), не можуть пояснити спостережених аномалій тропопаузи. Різниця між кривими на рівні тропопаузи і вище може бути пов'язана лише зі значною відмінністю кількості озону на висотах нижньої стратосфери.

Доречно зробити важливе уточнення. Як відзначено вище, зональні екстремуми ЗВО і H_t розташовані в інтервалі 50° S — 70° S (див. рис. 1), який практично повністю припадає на водну поверхню. Тому результати, наведені для широти 65° S на рис. 2 та 3, також характеризують розподілі атмосферних параметрів (довготний та вертикальний відповідно) над поверхнею антарктичних морів і прилеглих до континенту ділянок океанів. Холодний антарктичний континент і тропосфера над ним, як буде показано нижче, роблять свій внесок у структуру тропопаузи. У зв'язку з цим цікавим є географічне розташування аномально високої і нечіткої весняної тропопаузи над районом моря

Ведделла. На рис. 4 показані багаторічні варіації положень абсолютно максимуму висоти зимової (а) та весняної (б) тропопаузи за період 1979—2006 рр. (зазначимо, що рис. 1 ілюструє відносні параметри — відхилення від середніх зональних значень). Географічні положення H_t в даній області, враховуючи наведені вище міркування, вказують водночас на положення максимально піднятого та розширеного по висоті перехідного шару (див. криву 1 на рис. 3).

З рис. 4 видно, що положення мігрують над морем Ведделла та над шельфовим льодовиком Ронне (показано пунктиром), але практично не потрапляють на континентальне плато. Причини такої поведінки дозволяють пояснити меридіональні профілі тропопаузи, які розглянуто нижче.

МЕРИДІОНАЛЬНА СТРУКТУРА ТРОПОПАУЗИ

Аналіз меридіональної структури тропопаузи проведено на прикладі 2005 р. з типовим для останнього десятиріччя розвитком озонової діри. Побудовано чотири меридіональні профілі тропопаузи «екватор — полюс — екватор», рівномірно розподілені за довготою, як показано на рис. 5.

Особливо цікавими є профілі для жовтня 2005 р. у меридіональних площинах 45° W- 135° E та 180° E — 0° E (рис. 6, а, суцільна крива та довгі штрихи відповідно), розташовані поблизу напряму максимальної зональної асиметрії (рис. 1, а). Найбільша висота антарктичної тропопаузи

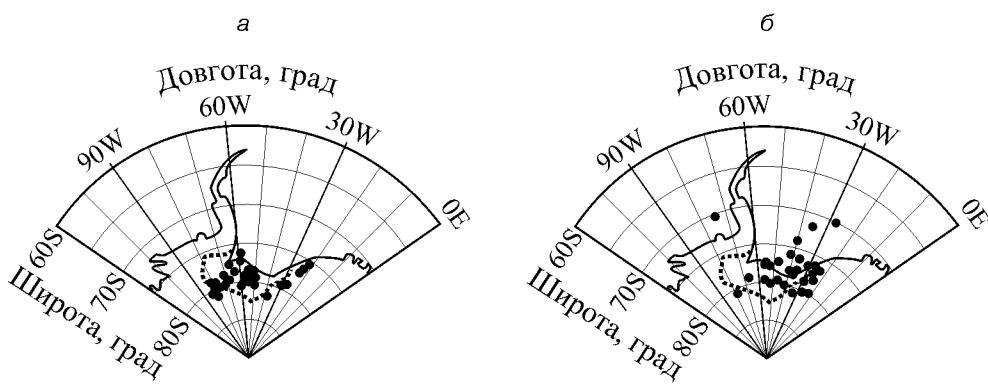


Рис. 4. Область міграцій максимальних значень висоти тропопаузи в 1979—2006 рр.: а — у зимовий сезон (червень—серпень), б — весняний сезон (вересень—листопад). Кожна точка — усереднене за три місяці положення максимального значення висоти тропопаузи

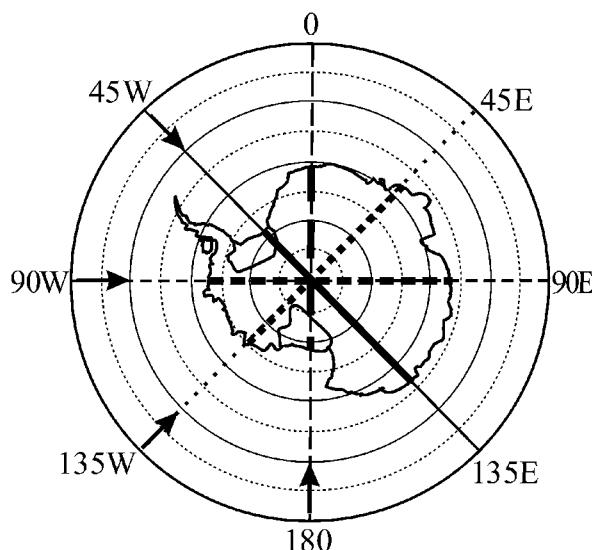


Рис. 5. Напрями чотирьох меридіональних перерізів, вибраних для побудови профілів тропопаузи «екватор — полюс — екватор» над південною півкулею. (Стрілками вказано напрям осі абсцис на рис. 6)

на цих профілях становить 13—14 км на широтах 70° S — 80° S, а мінімальна — 9.5 км (типове для регіону значення) на широті близько 60° S. Як видно, на довготах 0° E та 45° W (атлантичний сектор, область мінімуму ЗВО на рис. 1, a) спостерігається аномальна висота тропопаузи, в середньому на 3—4 км більша, ніж на довготах 135° E та 180° E (австралійський сектор, область нормальних та підвищених рівнів ЗВО).

Зазначимо, що загальне зниження тропопаузи від тропічних до субантарктичних широт становить близько 6 км (рис. 6, a), тобто аномальне підняття тропопаузи в антарктичному регіоні досягає двох третин від усього діапазону меридіональної зміни висоти тропопаузи у південній півкулі. Нагадаємо, що це аномалія не лише висоти, а й чіткості тропопаузи внаслідок збільшення вертикальної протяжності переходного шару між тропосферою і стратосферою (див. рис. 3).

Порівняння середніх сезонних профілів дозволяє оцінити часові межі існування аномальної тропопаузи. Профілі тропопаузи у площині максимальної асиметрії 45° W — 135° E для чотирьох сезонів 2005 р. наведено на рис. 6, b.

Видно, що в атлантичному секторі на широтах 70° S — 80° S тропопауза піднята упродовж зими (пунктирна крива) і весни (суцільна крива) до 14 і 13 км відповідно. Підняття тропопаузи та її зональна асиметрія в зимовий період не можуть пов'язуватися із втратами озону, оскільки вони розпочинаються лише в кінці зими (в серпні). Очевидно, основною причиною підняття зимової тропопаузи є відомий фактор дуже низької температури нижньої стратосфери у зимові місяці. Внаслідок існування сильнішого стратосферного полярного вихору над Антарктикою температури всередині нього на 10° С нижчі, ніж над Арктикою [14]. У весняний період, незважаючи на збільшення висоти Сонця над горизонтом, в області озонової діри температура залишається низькою через хімічні втрати озону, тому аномально висока та асиметрична тропопауза зберігається відповідно до тривалості і положення озонової діри.

І зимовий, і весняний профілі на рис. 6, b (пунктирна і суцільна криві відповідно) свідчать про різке зниження тропопаузи (позначене жирними відрізками на профілях) над континентом, край якого нанесено вертикальними пунктирними лініями. У західній (лівій) частині профілів край континенту розташований поблизу широти 80° S. Звідси в напрямі полюса тропопауза знижується приблизно на 2 км в межах 10-градусного інтервалу. Такий хід профілів вказує на вплив холодного континентального плато і тропосфери над ним на вертикальне положення тропопаузи.

У вступі відзначалося, що на тропопаузу може впливати зміна температури як у стратосфері, так і у тропосфері. Якщо охолодження стратосфери викликає зміщення тропопаузи вгору, то охолодження тропосфери — вниз. У нашому випадку профілі для зими і весни на рис. 6, b демонструють прояви обох таких тенденцій. Загальним є переважний вплив охолодження стратосфери, і тому обидва профілі над антарктичним регіоном підняті порівняно з літнім і осіннім періодами (штрих-пунктирна і точкова криві відповідно). Над льодовиковим плато Антарктиди температури набагато нижчі, ніж над водною поверхнею чи поверхнею шельфових льодовиків. Ці умови призводять до зменшення висоти тропопаузи, тому над континентом проявляється дія двох протилежно спрямованих впливів: на

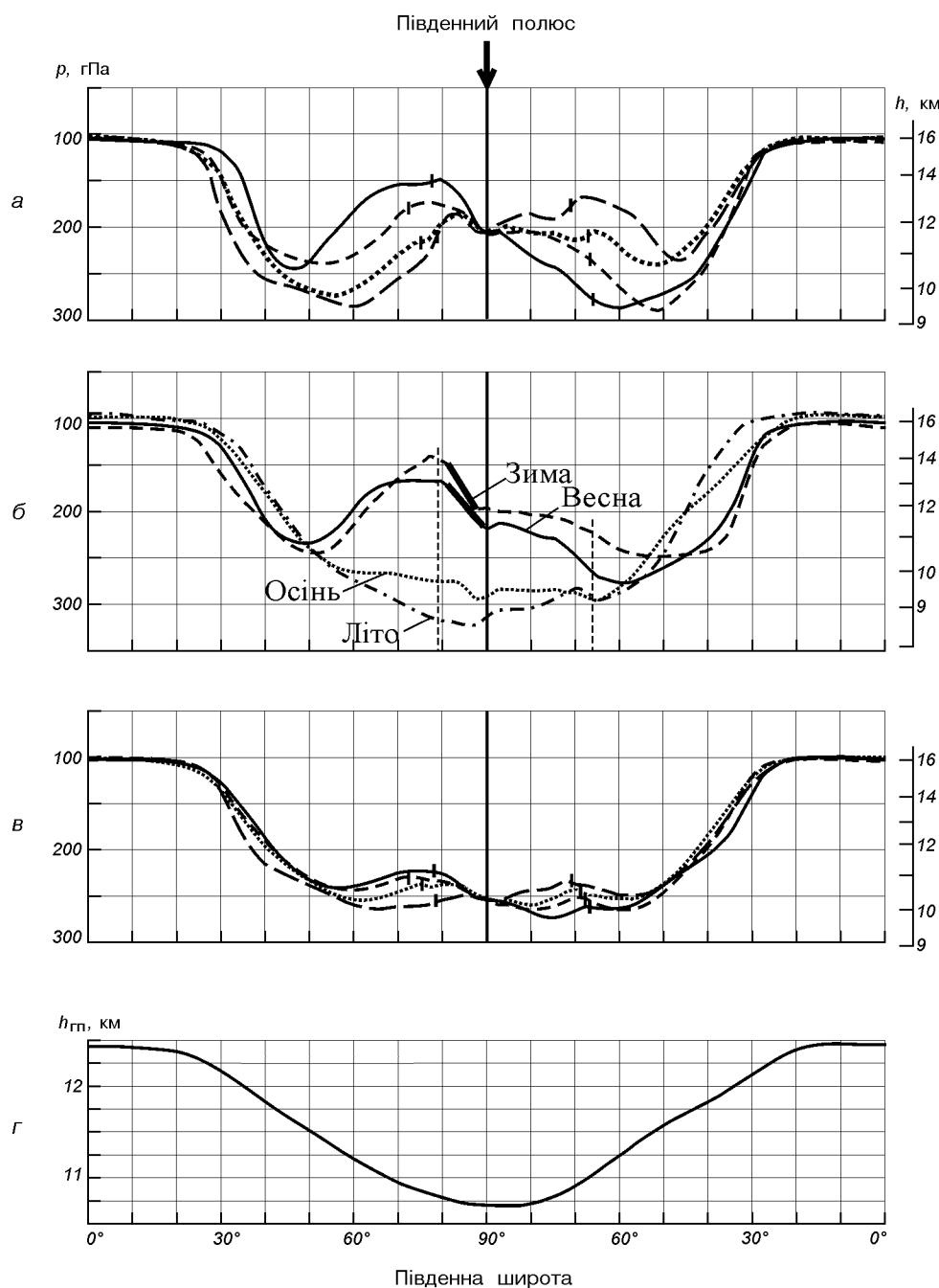


Рис. 6. Меридіональні профілі атмосферного тиску «екватор — полюс — екватор» на рівні тропопаузи для жовтня 2005 р. (a), для чотирьох сезонів 2005 р. у меридіональній площині 45° W — 135° E (b), усереднені профілі за 1979—2005 pp. (c) у тих же площинах, що і на графіках (a) та геопотенціальні висоти на рівні тиску 200 гПа навесні 2005 р. у площині 45° W — 135° E (d). На a — в справа нанесена шкала висот, які відповідають атмосферному тиску, показаному на шкалі зліва. Вертикальними штрихами на кривих позначені положення краю антарктичного континенту

загальне підняття тропопаузи (стратосферний ефект) накладається її помітне зниження над східною Антарктидою (тропосферний ефект). Таке зниження близьке до стрибкоподібного, у зв'язку з чим область міграцій аномально високої тропопаузи на рис. 4 обмежується краєм континенту. З цього випливає, що поява максимуму тропопаузи над континентом неможлива.

З рис. 6, б видно також, що зниження тропопаузи, спричинене холодною континентальною тропосферою, не може компенсувати її підняття внаслідок охолодження стратосфери. У східній частині профілів (права частина рис. 6, б) для зими і весни тропопауза залишається піднятою над рівнями, властивими літньо-осінній половині року. У літній (грудень — лютій) та осінній (березень — травень) сезони, згідно з рис. 6, б, спостерігається майже монотонне зниження висоти тропопаузи між широтою 30° S та полюсом в середньому від 16 до 9 км. Очевидно, ці криві ілюструють типовий незбурений стан антарктичної тропопаузи з переважанням тропосферного впливу на її меридіональну структуру (охолодження тропосфери у бік полюса). Варто наголосити, що за представленими на рис. 6, б даними для 2005 р. міжсезонні зміни висоти тропопаузи в районі моря Ведделла (45° W) перевищували 5 км — зимово-весняна тропопауза тут у півтора раза вища, ніж літньо-осіння. З урахуванням розширення переходіногого шару це створює ефект помітного збільшення вертикальної протяжності тропосфери у даному регіоні упродовж другої половини року (з червня до листопада). Такі регіональні зміни параметрів турбулентного шару атмосфери та умов тропосферно-стратосферного обміну можуть мати певний відгук у процесах формування клімату в західній Антарктиці.

Усереднені за 1979—2005 рр. профілі тропопаузи на рис. 6, в також свідчать про досить однорідний розподіл її висоти над континентом з варіаціями в межах 1 км поблизу середнього рівня 10.5 км. Значної зональної асиметрії не спостерігається, можливо, внаслідок згладжування при багаторічному усередненні, оскільки екстремумам властиві міжрічні довготні міграції (рис. 1). Проявляється інша стійка особливість профілів — локальні відхилення висоти припадають на край континенту, широтне положення якого на рис. 6, в позначене вертикальними

штрихами. Як і широтне положення аномальної тропопаузи на рис. 4 та різкий градієнт її висоти на рис. 6, б, цей ефект в усереднених даних (рис. 6, в) може бути пов'язаний зі значним температурним контрастом материк — океан та радіаційним впливом антарктичного континенту [4].

Загалом на фоні усереднених даних (рис. 6, в) зимово-весняні аномалії тропопаузи (рис. 6, а, б) стають ще більш виразними. Додатковим свідченням відсутності впливу квазістанціонарних тропосферних систем тиску на їхнє утворення є рис. 6, г, де показано меридіональний профіль геопотенціальної висоти для весни 2005 р. в напрямі максимальної асиметрії тропопаузи. Вибрано рівень тиску 200 гПа, тобто приблизно середній рівень тиску на висотах аномального ходу тропопаузи над Антарктикою у зимово-весняний період (рис. 6, а, б).

Порівняння з відповідним профілем тропопаузи на рис. 6, б (суцільна крива) свідчить, що квазістанціонарний розподіл геопотенціальної висоти для 200 гПа, який характеризує середній тепловий режим розташованого нижче шару атмосфери, не робить внеску в аномальне підняття тропопаузи. Втім, профіль геопотенціальної висоти близький до незбуреного профілю тропопаузи у літньо-осінній період (рис. 6, б, штрих-пунктирна та точкова криві). Це свідчить про те, що мінімум антарктичної тропопаузи в цей період пов'язаний з мінімумом у розподілі тропосферної температури між екватором і полюсом. Тобто, навіть в теплий період року антарктична тропосфера обумовлює зниження тропопаузи. Це порівняння підтверджує висновок, що у формуванні аномального підняття тропопаузи над Антарктикою у зимово-весняний період немає тропосферного впливу.

Зазначимо, що крім згаданих вище робіт про співвідношення між ЗВО і висотою тропопаузи [9, 21], у попередніх дослідженнях відзначалася антикореляція між змінами вмісту озону та геопотенціальної висоти для північної півкулі [11, 13], а також для синоптичних подій в обох півкулях [12, 22]. Результати, представлені на рис. 2 і 6, свідчать, що квазістанціонарна структура тропопаузи упродовж антарктичної зими і весни не пов'язана з розподілом геопотенціальних висот у тропосфері (рис. 2, в) та на рівні тропопаузи (рис. 6, г) і перебуває під переваж-

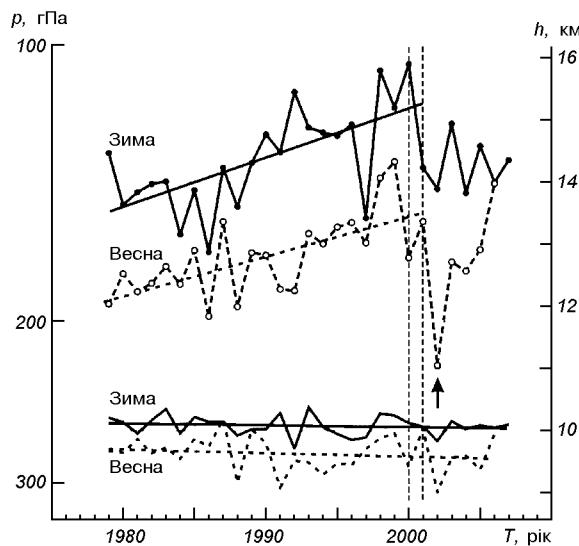


Рис. 7. Асиметрія багаторічного тренду висоти тропопаузи в областях зональних екстремумів загального вмісту озону: мінімуму ЗВО в атлантичному довготному секторі (две криві вгорі) та максимуму ЗВО в австралійському секторі (две криві внизу).

ним впливом температури нижньої стратосфери. Відмінність між одержаними у цій роботі та цитованими результатами, очевидно, є наслідком особливостей атмосфери в антарктичному регіоні. Щодо сезонних змін теплового режиму, в жодному іншому регіоні планети не спостерігається такого діапазону змін температури стратосфери, як над антарктичним континентом, що і проявляється у переважанні стратосферного впливу на варіації висоти тропопаузи.

Багаторічне зниження рівня ЗВО в Антарктиці та відповідне охолодження стратосфери [14] суттєво впливають на довготривалі зміни аномальної висоти тропопаузи. Для 1979—2006 рр. на рис. 7 показано варіації середньої за зимовий та весняний сезони висоти максимуму тропопаузи, географічні міграції якого представлени на рис. 4. Висхідний тренд спостерігається майже до кінця 1990-х років, що узгоджується з від'ємним трендом вмісту озону, а з другої половини 1990-х років помітна стабілізація значень ЗВО [25]. Різке збільшення рівня ЗВО навесні 2002 р. внаслідок сильного стратосферного потепління [2] супроводжувалося відповідним зменшенням висоти тропопаузи (на рис. 7 показано стрілкою).

Тропосферний вплив внаслідок потепління клімату в західній Антарктиці також міг би привести до деякого підняття тропопаузи. Проте якщо максимальне потепління в районі Антарктичного півострова становило 3 К за останні півстоліття [20], то охолодження нижньої стратосфери в регіоні досягло 6—10 К, починаючи з 1985 р. [14]. Слід зауважити також, що потепління у тропосфері поширюється на захід від Антарктичного півострова, тоді як максимальний тренд висоти тропопаузи спостерігається на схід від півострова. Враховуючи відзначенні вище ефекти впливу нижньої стратосфери та відсутність свідчень про вплив антарктичної тропосфери на підняття тропопаузи, складно оцінити внесок потепління клімату в районі Антарктичного півострова у збільшення висоти тропопаузи над районом моря Бедделла.

СЕЗОННІ ЗМІНИ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ АНОМАЛІЙ НА ТРОПОПАУЗУ

Вище було показано, що у зимово-весняний період на загальне підняття тропопаузи, викликане охолодженням стратосфери, накладається зменшення її висоти над холодним континентальним плато Антарктиди. Для оцінки співвідношення між цими впливами проведено зіставлення як середньомісячних полів температури у нижній тропосфері (рівень тиску 700 гПа, або висота 3 км), так і вмісту озону та температури в нижній стратосфері (100 гПа, або 16 км) з розподілом висоти тропопаузи на широтах 50° S — 90° S.

На рис. 8 наведені середньомісячні відхилення від середніх зональних значень цих трьох параметрів для п'яти місяців 2005 р. (два зимових, липень — серпень, та три весняних, вересень — листопад). Отже, при такому підході постійна складова вилучена і зіставляються лише значення зональних аномалій.

З рис. 8, *г* видно, що зональна асиметрія тропосферної температури є східно-західною відповідно до асиметрії самого континенту. Над східною частиною Антарктиди при середній висоті льодовикового купола порядка 3 км тропосфера завжди найхолодніша. З липня до листопада температурний контраст зменшується, що помітно зі значень, вказаних на виділених кон-

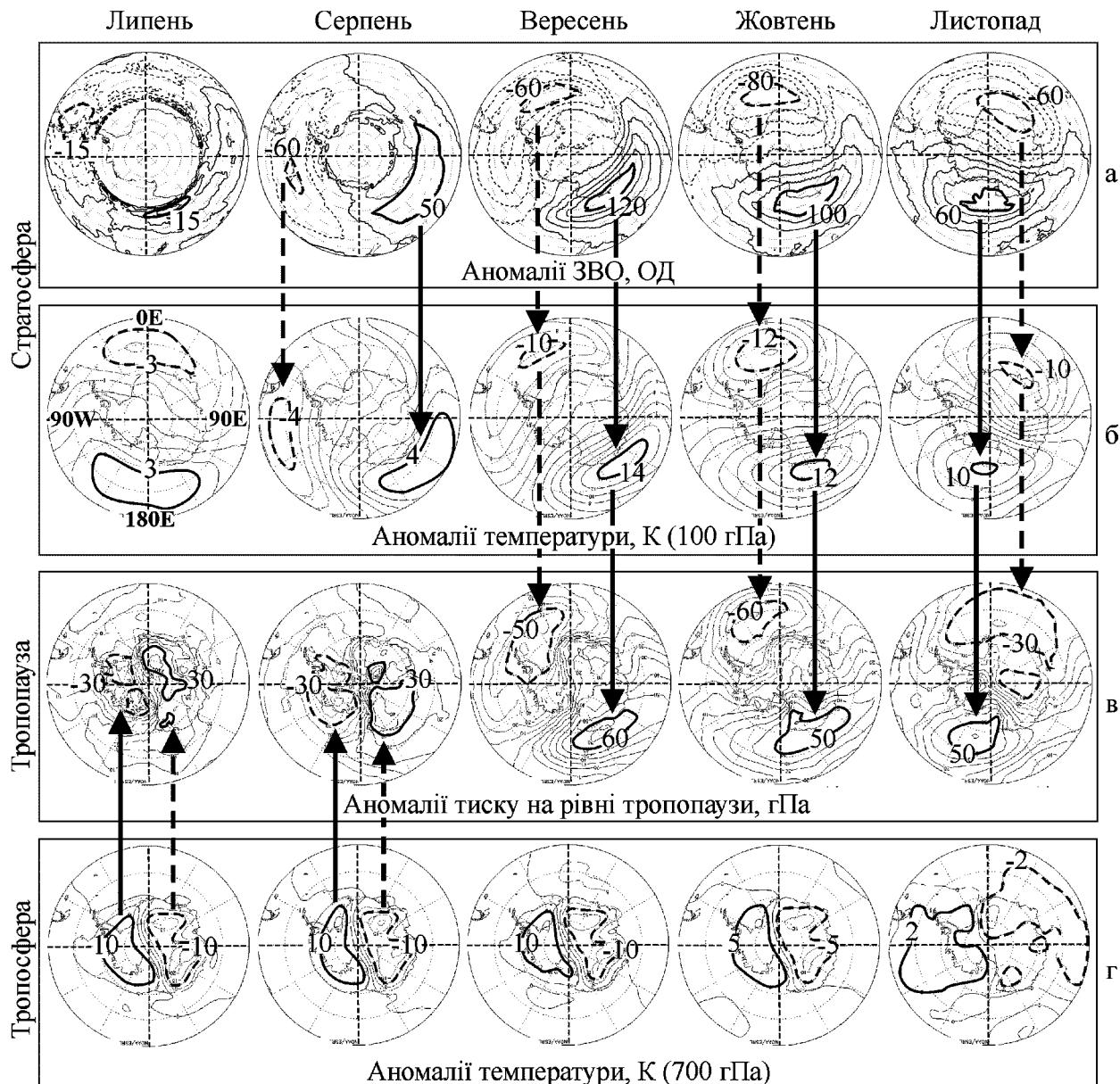


Рис. 8. Розподіл зональних аномалій ЗВО (а), температури нижньої стратосфери (б) та тропосфери (г) у порівнянні з аномаліями висоти тропопаузи (в) для липня — листопада 2005 р. Показано інтервал широт 50° S — 90° S (довготи позначені зліва на рисунку б)

турах. Проте лише в зимові місяці (липень і серпень), коли східно-західна асиметрія не нижча ± 10 К (рис. 8, *г*), вона відтворюється в структурі аномалій висоти тропопаузи (рис. 8, *в*, показано стрілками знизу вгору). У нижній стратосфері в цей час спостерігається асиметрія температури на рівні $\pm(3—4)$ К (рис. 8, *б*), починаючи з серпня помітна її відповідність асиметрії ЗВО (рис. 8, *а*), а стратосферних ефектів у зимові місяці, як показує порівняння з рис. 8, *а, б*, на рівні тропопаузи немас.

Перехід від тропосферного до стратосферного впливу на структуру асиметрії тропопаузи відбувається у вересні, коли у нижній стратосфері зональний температурний контраст збільшується більш ніж утрічі (рис. 8, *б*) і починає перевищувати тропосферний. Узгодженість у розташуванні зональних аномалій у стратосфері (рис. 8, *а, б*) і на рівні тропопаузи (рис. 8, *в*) спостерігається упродовж усіх весняних місяців (показано стрілками, спрямованими вниз).

Отже, це зіставлення демонструє, що при переході від зими до весни відбувається зміна у структурі антарктичної тропопаузи, пов'язана з протилежними змінами теплової асиметрії у прилеглих шарах атмосфери. Взимку зональна асиметрія температури у кілька разів вища у тропосфері внаслідок сильного вихолодження повітря над східним сектором (континентальне плато). При цьому області екстремумів тропопаузи розташовані південніше широти 70° S.

У весняний період, навпаки, температурна асиметрія вища в стратосфері через значні втрати озону в озоновій дірі, розташованій асиметрично відносно полюса. Тому і широтне розташування екстремумів визначається розподілом ЗВО і у середньому припадає на широти 50° S — 70° S. За середніми даними для літа та осені помітних зональних аномалій немас ні у тропосфері, ні у стратосфері, тому зонально симетричною виглядає і тропопауза (див. відповідні криві на рис. 6, *б*). Додамо, що хоча упродовж зими і весни змінюється географічне розташування екстремумів, у їхній структурі постійно зберігається смуга різкого градієнта над краєм континенту. На його наявність вказують меридіональні профілі на рис. 6, *б*, але детальний аналіз впливу антарктичного континенту на структуру тропопаузи доцільно зробити в окремій роботі.

Загалом структура зональної асиметрії атмосферних параметрів є важливим показником, і виявлені у розподілі висоти тропопаузи асиметрія та інші ефекти можуть бути корисними при подальшому розгляді атмосферної циркуляції, тропосферно-стратосферної взаємодії та змін клімату в антарктичному регіоні.

ВИСНОВКИ

Підсумовуючи одержані результати, відзначимо, що в антарктичному регіоні у зимово-весняний сезон спостерігається аномально висока (13—14 км) і нечітка тропопауза з протяжним по висоті перехідним шаром. Переважне розташування цієї аномалії — західний сектор довгот 0° — 90° W, південніше широти 50° S. Упродовж 1980—1990-х рр. відбулося збільшення висоти тропопаузи в цьому секторі на 1.5 км (рис. 7). Збільшення висоти тропопаузи супроводжується розширенням перехідного шару між тропосферою та стратосферою до 6 км (замість звичайної ширини 2 км). На нашу думку, такі зміни у характері розмежування тропосфери і стратосфери є наслідком багаторічних втрат стратосферного озону та охолодження стратосфери над Антарктикою. І в зимовий, і у весняний сезони підняття тропопаузи пов'язане з охолодженням нижньої стратосфери, проте зональна асиметрія тропопаузи у кожен із сезонів має різне походження.

Виявлено ефект переважаючого впливу тропосфери на утворення асиметрії тропопаузи у зимові місяці, спричинений високим східно-західним контрастом температури на поверхні у полярній області (вище 70° S). Натомість у весняні місяці переважає стратосферний вплив на асиметрію тропопаузи з розташуванням екстремумів на нижчих широтах 50° S — 70° S. При таких сезонних змінах спостерігається стійка особливість у розподілі висоти тропопаузи в області її максимуму — зниження на 2 км над холодним континентальним плато.

Особливості рельєфу, географічне розташування екстремумів висоти тропопаузи та її нечіткість в області максимального значення (рис. 1, 4, 6 та 8) створюють значні відмінності у вертикальній протяжності тропосфери в антарктичному регіоні. У літньо-осінній період висота

тропопаузи найменша над полярною областю — 9 км. При середній висоті антарктичного плато 3 км це вказує на найтонший в регіоні шар тропосфери — близько 6 км. У весняний період в області озонового мінімуму (переважно атлантичний сектор довгот — райони Антарктичного півострова та моря Ведделла) висота тропопаузи найбільша — 13—14 км, що при середній висоті в протилежному секторі 10 км зумовлює максимальний рівень зональної асиметрії у вертикальній протяжності тропосфери над поверхнею океану.

Найважливішою особливістю є весняна аномалія висоти тропопаузи, яка поєднується із підняттям та розширенням переходного шару між тропосферою і стратосферою. Сезонний і регіональний характер аномалії створює ряд ефектів у змінах вертикальної протяжності тропосфери, у тропосферно-стратосферному обміні малими складовими атмосфери, у поширенні планетарних хвиль, тобто у процесах, причетних до кліматичних змін у антарктичному регіоні.

Відомо, що в районі Антарктичного півострова спостерігаються найвищі темпи потепління клімату [20]. Це обумовлено цілою низкою послідовних процесів, які зараз інтенсивно вивчаються. Наприклад, у роботі [26] ефекти зменшення вмісту антарктичного озону пов'язуються із кліматичними змінами у тропосфері через механізми тропосферно-стратосферних зв'язків (втрати озону — зниження температури нижньої стратосфери — зростання меридіонального градієнта температури — посилення стратосферного полярного вихору — зменшення проникнення планетарних хвиль у нижню стратосферу — зміни меридіональної циркуляції та приповерхневого вітру). В цей ланцюг процесів може робити внесок і виявлене в даній роботі збільшення висоти тропосфери через підняття тропопаузи, також пов'язане з багаторічними втратами озону у нижній стратосфері. Зокрема, тепло, підведене з поверхні океану, більше акумулюватиметься у товщому шарі тропосфери. Це різко контрастує з тепловим режимом над континентальним плато, де низькі поверхневі температури, тонкий шар тропосфери та нечітка тропопауза можуть створювати умови для вихолодження тропосфери, яке спостерігається у Східній Антарктиці [20].

Робота частково підтримана Київським національним університетом імені Тараса Шевченка (проект 06BF051-12) та Міністерством освіти і науки України (проект М/86-2006). Дослідження здійснювалися за участі в програмах ORACLE-O3 та SCAR ICESTAR в рамках проведення Міжнародного полярного року 2007/2008.

1. Агапітов О. В., Грицай А. В., Євтушевський О. М., Мілінєвський Г. П. Зональна асиметрія загального вмісту озону в Антарктиці у весняний період // Доп. НАН України.—2006.—№ 6.—С. 60—67.
2. Allen D. R., Bevilacqua R. M., Nedoluha G. E., et al. Unusual stratospheric transport and mixing during the 2002 Antarctic winter // Geophys. Res. Lett.—2003.—30, N 12.—1599, doi:10.1029/2003GL017117.
3. Fergusson A. Ozone depletion and climate change: understanding the linkages. — Environment Canada. Meteorological Service of Canada, 2001.—39 р.
4. Francis G. N., Salby M. L. Radiative influence of Antarctica on the polar-night vortex // J. Atmos. Sci.—2001.—58, N 10.—P. 1300—1309.
5. Grytsai A. V., Evtushevsky O. M., Agapitov O. V., et al. Structure and long-term change in the zonal asymmetry in Antarctic total ozone during spring // Ann. Geophys.—2007.—25, N 2.—P. 361—374.
6. Grytsai A. V., Evtushevsky O. M., Milinevsky G. P. Anomalous quasi-stationary planetary waves over the Antarctic region in 1988 and 2002 // Ann. Geophys.—2008.—26, N 5.—P. 1101—1108.
7. Hartley D. E., Villarin J. T., Black R. X., Davis C. A. A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere // Nature.—1998.—391, 29 January.—P. 471—474.
8. Hoinka K. P. Statistics of the global tropopause pressure // Mon. Wea. Rev.—1998.—128, N 12.—P. 3309—3325.
9. Hoinka K. P., Claude H., Kohler U. On the correlation between tropopause pressure and ozone above Central Europe // Geophys. Res. Lett.—1996.—23, N 14.—P. 1753—1756.
10. Holton J. R., Haynes P. H., McIntyre M. E., et al. Stratosphere-troposphere exchange // Rev. Geophys.—1995.—33, N 4.—P. 403—440.
11. Hood L. L., Zaff D. A. Lower stratospheric stationary waves and the longitude dependence of ozone trends in winter // J. Geophys. Res.—1995.—100.—P. 25 791—25 800.
12. James P. M., Peters D., Waugh D. W. Very low ozone episodes due to polar vortex displacement // Tellus.—2000.—52B.—P. 1123—1137.
13. Petzoldt K. The role of dynamics in total ozone deviations from their long-term mean over the Northern Hemisphere // Ann. Geophys.—1999.—17, N 2.—P. 231—241.
14. Randel W. J., Wu F. Cooling of the Arctic and Antarctic polar stratospheres due to ozone depletion // J. Climate.—1999.—12, N 5.—P. 1467—1479.
15. Roscoe H. K. Possible descent across the «tropopause» in Antarctic winter // Adv. Space Res.—2004.—33, N 7.—

- P. 1048—1052.
16. Son S.-W., Lee S., Feldstein S. B. Intraseasonal variability of the zonal-mean extratropical tropopause height // *J. Atm. Sci.*—2007.—**64**, N 2.—P. 608—620.
 17. Song Y., Robinson W. A. Dynamical mechanisms for stratospheric influences on the troposphere // *J. Atm. Sci.*—2004.—**61**, N 14.—P. 1711—1725.
 18. Stohl A., Wernli H., James P., et al. A new perspective of stratosphere-troposphere exchange // *Bull. Am. Met. Soc.*—2003.—**84**, N 11.—P. 1565—1573.
 19. Thompson D. W. J., Baldwin M. P., Solomon S. Stratosphere-troposphere coupling in the Southern Hemisphere // *J. Atm. Sci.*—2005.—**62**, N 3.—P. 708—715.
 20. Turner J., Lachlan-Cope T. A., Colwell S., et al. Significant warming of the Antarctic winter troposphere // *Science*.—2006.—**311**, N 5769.—P. 1914—1917.
 21. Varotsos C., Cartalis C., Vlamakis A., et al. The long-term coupling between column ozone and tropopause properties // *J. Climate*.—2004.—**17**, N 19.—P. 3843—3854.
 22. Vigliarolo P. K., Vera C. S., Diaz S. B. Synoptic-scale variability and its relationship with total ozone and Antarctic vortex displacements // *Mon. Weath. Rev.*—2005.—**133**, N 8.—P. 2374—2386.
 23. Wirth V. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature // *J. Geophys. Res.*—1993.—**98**, N D5.—P. 8873—8882.
 24. Scientific assessment of ozone depletion: 2002.—Geneva: World Meteorological Organization, 2003.—Report N 47.
 25. Scientific assessment of ozone depletion: 2006.—Geneva: World Meteorological Organization, 2007.—Report N 50.
 26. Yang X-Y., Huang R. X., Wang D. X. Decadal changes of wind stress over the Southern Ocean associated with Antarctic ozone depletion // *J. Climate*.—2007.—**20**, N 14.—P. 3395—3410.
 27. Zangl G., Hoinka K. P. The tropopause in the polar regions // *J. Climate*.—2001.—**14**, N 14.—P. 3117—3139.

ANTARCTIC TROPOPAUSE IN WINTER AND SPRING

O. M. Evtushevsky, A. V. Grytsai, G. P. Milinevsky

The distribution of total ozone, troposphere and stratosphere temperature as well as of tropopause height over Antarctic region is analyzed. Dominant influence of lower stratosphere cooling on the tropopause height increase is revealed. The cooling is caused by the temperature decrease within the stratospheric polar vortex in the winter months and by the ozone losses and ozone hole formation in the spring months. In the Weddell Sea region an anomalous tropopause elevation to 13–14 km (as compared with typical values of 9–10 km) is accompanied by widening the transition layer between the troposphere and stratosphere. Troposphere influence is seen only in the tropopause lowering by 2 km over the continental plateau in the East Antarctica. The seasonal formation and regional location of the anomaly cause the changes in the troposphere vertical extension over Antarctic region, in the processes of the troposphere-stratosphere exchange and in the planetary wave propagation involved in the climate change in the region.

УДК 533.951

А. В. Агапитов^{1,2}, О. К. Черемных²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Київ

Генерація сонечним ветром собственных УНЧ-мод магнитосфери Землі

Надійшла до редакції 27.11.07

Досліжується проникнення в магнітосферу Землі МГД-збурень, що виникають при взаємодії ударної хвилі в сонячному вітрі з магнітопаузою. На основі вимірювань параметрів плазми сонячного вітру (KA Wind, ACE, Cluster), магнітного поля магнітосфери (KA Polar, Goes10, Geotail) і магнітного поля на поверхні Землі (база даних Intermagnet) встановлено, що такі збурення поширяються у вигляді швидких магнітозвукових хвиль. Їхне поширення супроводжується генерацією власних магнітосферних мод з частотами, що відповідають частотам геомагнітних пульсацій Рс3-Рс5. Останні спостерігаються у магнітоспряженіх точках на поверхні Землі. За супутниковими даними оцінено просторовий масштаб силової трубки, в якій коливання генеруються з однією і тією ж частотою. Встановлено, що в екваторіальній області внутрішньої магнітосфери просторовий масштаб «силової трубки» складає 2000—4000 км. Виявлено, що залежно від напрямку поширення швидкої магнітозвукової хвилі можуть збуджуватися або торoidalні альвенівські моди, або полоїdalні моди, які є гібридом альвенівських і повільних магнітозвукових мод. Проведене дослідження свідчить про те, що енергетична дія зовнішнього широкосмугового джерела, яким є ударна хвиля в сонячному вітрі, фактично зводиться до перекачування енергії сонячного вітру в енергію власних коливань магнітосфери. Такі події можуть розглядатися як можливий механізм генерації власних УНЧ-мод магнітосфери Землі.

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические исследования [2, 7, 10, 11, 15, 17, 25 и др.] указывают на возможность возникновения в магнитосфере Земли собственных торOIDальных альвеновских и полоидальных волн, представляющих собой гибрид полоидальных альвеновских мод и медленных магнитозвуковых мод. Частоты этих колебаний лежат в диапазоне от единиц миллигерц до гирочастоты ионов (во внешних областях магнитосферы порядка 1 Гц). То, что наблюдаемые колебания являются собственными модами магнитосферы, подтверждается наличием экспериментально наблюдавших выделенных частот магнитосферных осцилляций — 1.2—1.4, 2.0—2.2, 2.5—2.8, 3.2—3.6 мГц (CMS-частот) [2, 25, 26]. Теоретические исследования предсказывают зависимость

частоты собственных колебаний от магнитной широты при наземных наблюдениях. Экспериментальные же наблюдения свидетельствуют о независимости частоты колебаний от геомагнитной широты [4, 6]. Такие свойства волновой активности обычно объясняют наличием внешнего квазимонохроматического источника генерации возмущений. В то же время имеет место зависимость периодов колебаний от магнитной широты, что проявляется на больших временных отрезках измерений. Например, в условиях умеренной геомагнитной активности на широтах порядка 70° преобладающий период пульсаций Рс5 составляет 2 мГц, а на широтах 60° — около 3 мГц.

Общепризнанным механизмом генерации собственных колебательных мод магнитосферы является неустойчивость Кельвина — Гельмгольца

ца, развивающаяся на магнитопаузе [10, 15, 23, 25]. В соответствии с этим механизмом волна с поверхности магнитопаузы проникает внутрь магнитосферы. Если частота поверхностной волны совпадает с собственной частотой магнитосферных волн, то имеет место увеличение амплитуды возмущений [4]. О справедливости этого механизма свидетельствует также то обстоятельство, что направление вращения вектора поляризации волн различно на широтах выше и ниже амплитудного максимума [4, 25].

В качестве возможного механизма генерации магнитосферных волн также рассматриваются квазипериодические изменения динамического давления солнечного ветра [14, 22]. При колебаниях параметров солнечного ветра с частотами, близкими к собственным частотам магнитосферного резонатора, в ряде случаев наблюдается корреляция с возмущениями магнитного поля в магнитосфере. В частности, в работе [14] при сравнении измерений спектральных плотностей колебаний магнитного поля на борту космических аппаратов «Wind», «Goes-8» и находящегося в зоне каспа «Polar» была установлена прямая связь по крайней мере некоторых из этих событий с периодическими изменениями динамического давления солнечного ветра. В работе [26] отмечалось совпадение вида периодического сигнала на станциях Ла-Аквила (исправленная магнитная широта 36.2°), Терра Нова Бэй (Terra Nova Bay, Антарктида, м. ш. -80.0°) и «Goes-9» 11 января 1997 г. с видом возмущений в солнечном ветре.

Отмеченные выше механизмы хорошо объясняют наблюдаемую на Земле независимость частоты колебаний от магнитной широты. При этом они не отвечают на вопрос: возможно ли одновременное возбуждение собственных колебаний с отличающимися частотами на разных геомагнитных оболочках, и какие колебания при этом реализуются? Этот вопрос становится особенно актуальным с точки зрения происхождения пульсаций Рс5, поскольку до сих пор вопрос о механизмах их генерации остается открытым. Если предположить, что эти пульсации являются собственными колебаниями магнитосферы, то их генерация может происходить под воздействием внешнего источника с достаточно широким спектром частот. В качестве такого источника могут выступать быстрые из-

менения динамического давления солнечного ветра, связанные с распространением быстрых ударных волн [16, 18, 19, 21]. Ниже мы проанализируем этот механизм подробнее на материалах синхронных измерений космических аппаратов в солнечном ветре и в магнитосфере Земли.

ВОЛНОВАЯ РЕАКЦИЯ МАГНИТОСФЕРЫ НА ВОЗМУЩЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Динамическое давление солнечного ветра — параметр, определяющий активность магнитосферы и ее размеры. Известно, что увеличение этого давления приводит к увеличению токов на магнитопаузе, что, в свою очередь, приводит к увеличению магнитного поля в магнитосфере при уменьшении ее размеров и приближении подсолнечной точки к Земле. При этом магнитопауза является источником генерации нескольких типов УНЧ-волн [15, 23]. Сжатие (или расширение) плазмы, начавшееся на магнитопаузе, распространяется через магнитосферу со скоростью быстрой магнитозвуковой волны [5, 8, 23]. Поскольку на дневной стороне магнитосферы гидростатическое давление плазмы мало, скорость распространения быстрой магнитозвуковой волны практически совпадает с альвеновской скоростью в магнитосфере (от 400 до 10000 км/с). Поэтому магнитозвуковой фронт в магнитосфере может опережать ударную волну в солнечном ветре, скорость которой обычно составляет 400—800 км/с. В частности, время распространения возмущения от магнитопаузы до земной поверхности составляет примерно 1—3 мин, что согласуется со средней альвеновской скоростью 600—1000 км/с. Именно такое время регистрируется наземными станциями при импульсных возмущениях на магнитопаузе [5, 19].

В теоретической модели неоднородной магнитосферы с прямыми силовыми линиями магнитного поля и двумя идеально проводящими ионосферами, в которой анализируется распространение быстрой магнитозвуковой волны по перек магнитного поля, дисперсионное уравнение содержит сингулярность, возникающую при совпадении периода волны с периодом собственной альвеновской моды, распространяющейся

вдоль силовой линии [23]. Эта сингулярность является ответственной за генерацию альвеновской волны на резонансной силовой линии.

Для того чтобы на магнитопаузе сформировался резкий магнитозвуковой импульс с достаточно широким спектром частот, характерный временной масштаб изменений параметров солнечного ветра должен быть меньше времени распространения МГД-возмущения в границах магнитосферы (порядка 10 мин) [19, 23]. 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.

В данной работе на примере трех событий, которые произошли 10 и 13 января и 13 апреля 2001 г., проанализировано взаимодействие магнитосферы с быстрыми ударными волнами в солнечном ветре. Временное поведение динамического давления солнечного ветра по измерениям космического аппарата «Wind» представлено на рис. 1, на котором виден скачок динамического давления, обусловленный увеличением плотности плазмы и скорости потока. Скачок

динамического давления одновременно характеризовался увеличением магнитного поля, что свидетельствует о быстрой ударной волне. Время регистрации ударной волны в солнечном ветре и магнитозвукового импульса в магнитосфере и соответствующие положения космических аппаратов приведены в таблице. С помощью тайминг-методики [24] и метода минимума вариаций магнитного поля [24] были определены такие параметры ударных волн, как скорость распространения, наклон нормали к оси X_{GSE} и радиусы кривизны поверхностей на орбите Земли. Ниже приведены характеристики магнитозвукового фронта (скорость, амплитуда, направление распространения) и особенности генерации собственных магнитосферных колебательных мод (локализация, частота и поляризация) в зависимости от наклона ударной волны при взаимодействии с поверхностью магнитопаузы.

На рис. 2 показаны положения космических аппаратов 13 апреля 2001 г. в 7:30 UT и последовательные положения фронта ударной волны в солнечном ветре и магнитозвукового импульса в магнитосфере. Видно, что космические аппараты ACE, «Wind» и «Cluster» [9]

Время регистрации прохождения ударной волны КА, значения составляющих радиуса-вектора R КА в системе GSE (в радиусах Земли) и составляющих нормали n к поверхности фронта ударной волны, определенные методом минимума вариаций магнитного поля

КА	UT	R_x/R_E	R_y/R_E	R_z/R_E	n_x/R_E	n_y/R_E	n_z/R_E
13 апреля 2001 г.							
ACE	07:13:18	221.7	-6.6	-20.4	-0.73	0.44	0.51
«Wind»	07:23:15	4.2	-263.5	-1.13	-0.56	0.64	0.53
«Polar»	07:33:09	7.5	-2.65	1.38	0.09	0.98	-0.19
«Cluster»	07:33:39	14.67	-12.93	1.54	-0.51	0.50	0.7
«Goes-10»	07:33:39	-6.32	-1.16	1.6	-0.44	0.86	0.25
10 января 2001 г.							
ACE	15:19:28	241.03	10.13	18.59	-0.84	-0.43	0.34
«Wind»	16:09:05	0.33	247.1	-17.5	-0.95	-0.1	0.29
«Polar»	16:19:40	1.41	8.81	1.98	-0.26	0.55	0.79
«Cluster»	16:17:26	13.08	14.53	0.78	-0.93	-0.21	-0.30
«Goes-10»	16:19:20	1.36	6.45	-0.55	-0.88	-0.47	-0.09
«Geotail»	16:21:17	-6.73	-27.44	3.69	-0.87	0.48	0.06
13 января 2001 г.							
ACE	01:42:05	221.7	-6.6	-20.4	-0.96	-0.22	0.16
«Wind»	02:25:45	4.2	-263.5	-1.13	-0.98	-0.02	0.29
«Polar»	02:19:36	7.5	-2.65	1.38	-0.04	-0.09	-0.99
«Goes-10»	02:18:32	-6.32	-1.16	1.6	-0.83	-0.12	-0.54
SOHO	01:50:13	194.62	-54.12	13.81	—	—	—

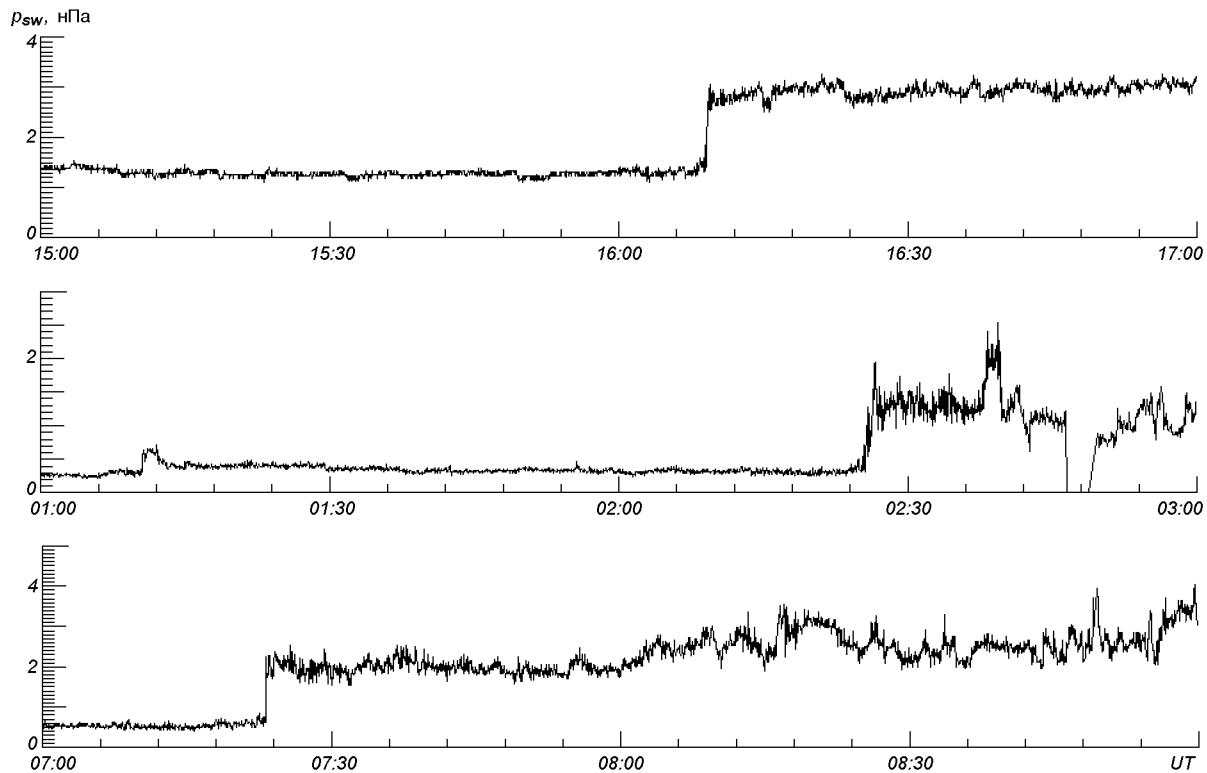


Рис. 1. Динамическое давление солнечного ветра 10.01.2001, 13.01.2001 и 13.04.2001 соответственно. Наблюдается прохождение быстрой ударной волны со скачком скорости, магнитного поля и плотности плазмы

проводили измерения в солнечном ветре, а «Polar» и «Goes-10» — в магнитосфере Земли в дневном и ночном секторах соответственно. По сравнению с размерами магнитосферы поверхность фронта ударной волны можно считать плоской, поскольку ее радиус кривизны составляет 450—500 радиусов Земли. Ориентация фронта ударной волны в 8:24 UT показана пунктиром, а в 9:20 UT штрих-пунктиром, по измерениям космического аппарата ACE.

Событие 13 апреля 2001 г. характеризовалось сильной изменчивостью параметров солнечного ветра. Ударная волна подошла к магнитопаузе с нормалью $[-0.73, 0.44, 0.51]$ по данным ACE и с нормалью $[-0.56, 0.64, 0.53]$ по данным «Wind», что соответствует углу падения на магнитосферу порядка 50° . Здесь и ниже все наблюдаемые величины приведены в системе координат GSE. В результате возмущения магнитопаузы была сгенерирована проникающая в магнито-

сферу быстрая магнитозвуковая волна. Характерными наблюдательными особенностями этой волны являются одновременное увеличение гидростатического давления плазмы и давления магнитного поля, а также поляризация волны — квазипоперечное распространение относительно магнитного поля. Космический аппарат «Polar» зарегистрировал прохождение быстрого магнитозвукового возмущения в 7:33 UT. Направление распространения фронта магнитозвуковой волны практически совпадало с осью Y_{GSE} : компоненты нормали к фронту $[0.09, 0.98, -0.19]$. Ударная волна привела к генерации на утреннем фланге магнитопаузы вторичного источника магнитозвуковой волны. Поскольку в магнитосфере магнитозвуковая волна распространялась быстрее, чем фронт ударной волны в солнечном ветре, то магнитозвуковая волна от точки первого взаимодействия магнитопаузы с фронтом ударной волны пришла во внутренние области магнито-

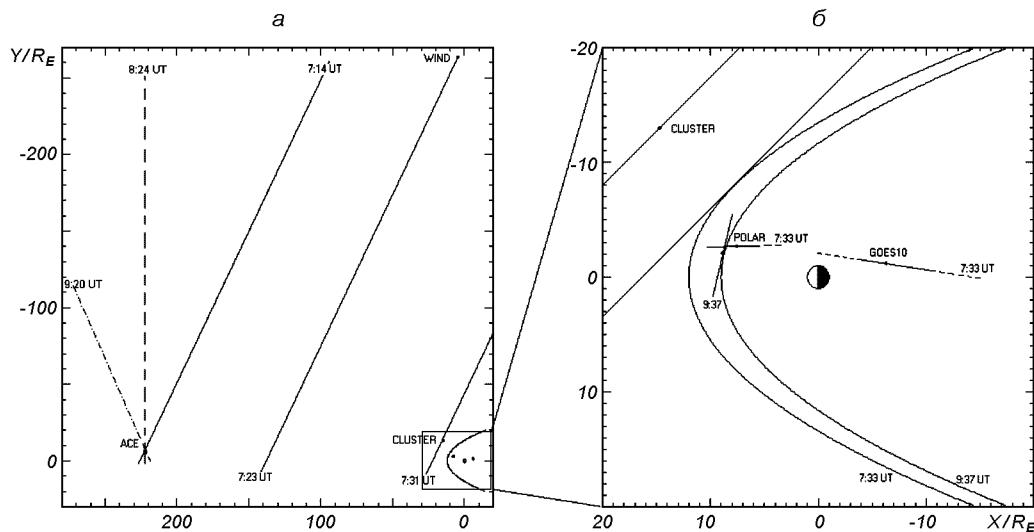


Рис. 2. Положения КА ACE, «Wind», «Cluster», «Polar», «Goes-10» в моменты регистрации SI 13.04.2001 г. Указаны моменты прохождения ударной волны. Фронт ударной волны в различные моменты времени восстановлен на основе тайминг-методики [24]

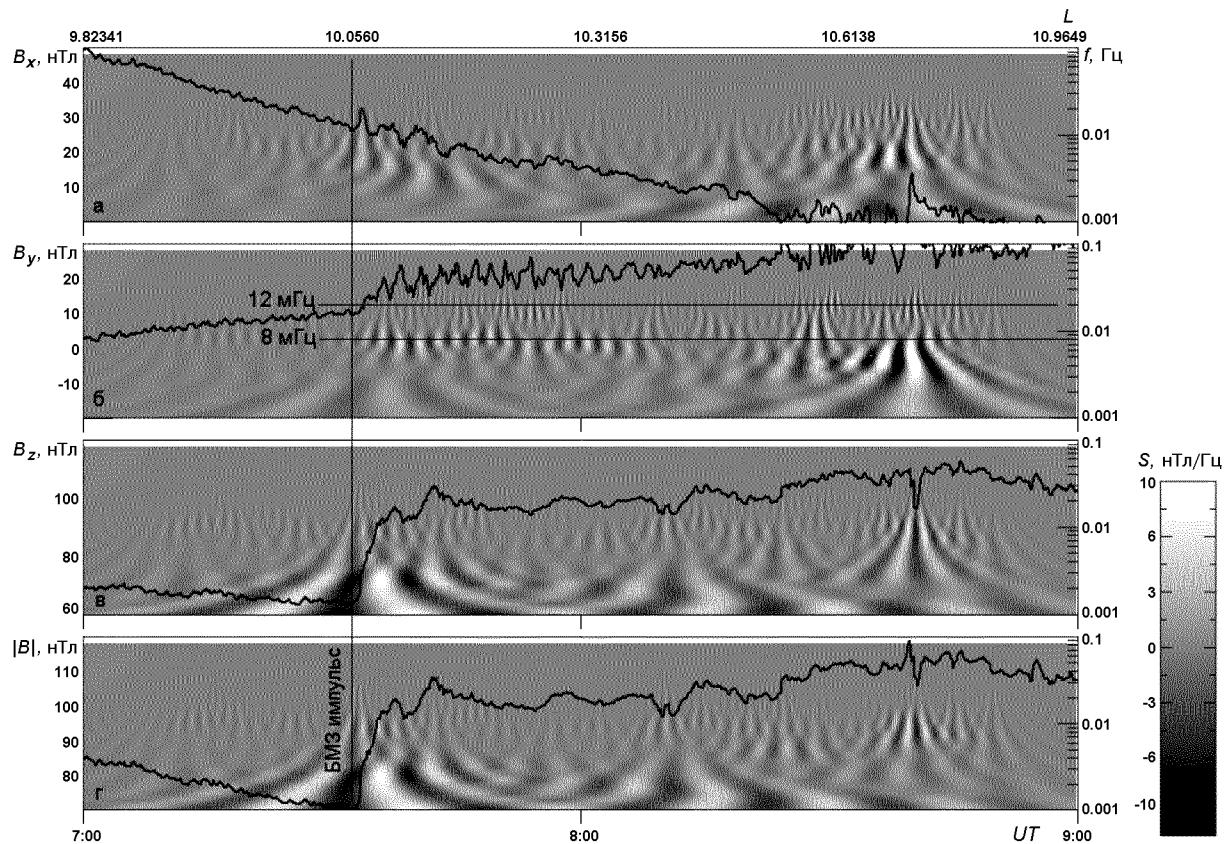


Рис. 3. Вейвлет-спектры составляющих магнитного поля и модуля поля в системе GSE. Сплошные линии — измерения «Polar» 13.04.2001 г. На верхней шкале приведен параметр Мак-Илвайна L

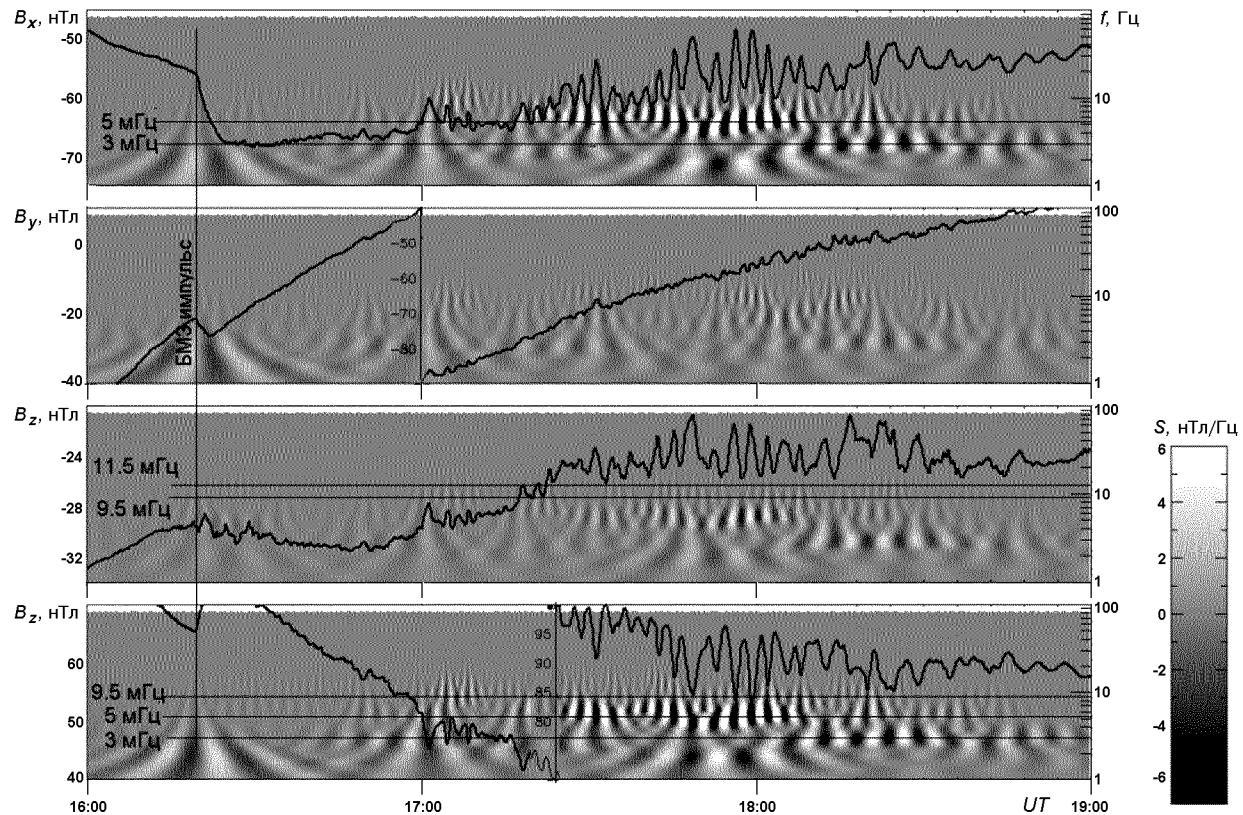


Рис. 4. Вейвлет-спектры GSE компонентов магнитного поля по измерениям «Polar» 10.01.2001 г., на фоне показаны частотно-временные контурные диаграммы их вейвлет-спектров

сферы быстрее, чем от подсолнечной точки магнитосферы. В результате фронт магнитозвуковой волны поменял направление распространения по сравнению с направлением распространения ударной волны, а угол между нормалью и осью X_{GSE} увеличился. Изменение направления распространения подтверждается измерениями космического аппарата «Goes-10», который находился в ночном секторе (таблица). Сразу же после прохождения быстрого магнитозвукового возмущения в магнитометрических измерениях космического аппарата «Polar» наблюдался волновой процесс с частотами порядка 8 и 11–12 мГц в течение 35–40 мин.

На рис. 3 представлены вейвлет-спектры, рассчитанные методом неортогонального вейвлет-преобразования Морле для дискретных рядов [3]. Видно, что в 7:33 UT 13.04.2001 г. регистрировалось импульсное возмущение магнитного

поля во всех компонентах. Момент прохождения магнитозвукового импульса показан вертикальной линией. После прохождения быстрого магнитозвукового возмущения в Y_{GSE} -компоненте магнитного поля (рис. 3, б) наблюдалось квазипериодическое возмущение, представляющее собой сумму линейно поляризованных колебаний с двумя периодами 80 и 125 с. Соответствующие частоты показаны на рис. 3 горизонтальными линиями. Амплитуды возмущений были 1.5–2 и 5–6 нТл соответственно. Для магнитной оболочки с параметром Мак-Ильвайна $L = 10$, на которой наблюдались возмущения, период основной альвеновской моды ($n = 1$) лежал в интервале 250–300 с. Поэтому наблюдаемые колебания с периодами 80 и 125 с можно интерпретировать как вторую и третью гармоники альвеновской моды. Вектор возмущения магнитного поля имел направление [0.15537, 0.95650,

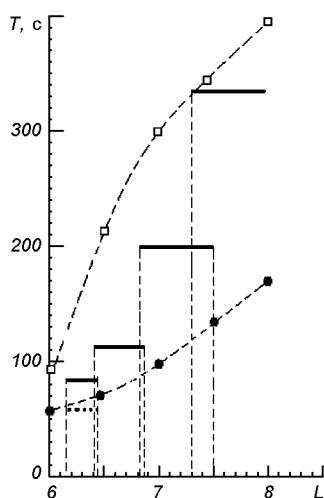


Рис. 5. Зависимость периода наблюдаемых на КА «Polar» 13 января 2001 г. колебаний от геомагнитной оболочки. Квадратики — полоидальные моды, точки — тороидальные моды

–0.24690]. Возмущенная составляющая магнитного поля была направлена вдоль вектора скорости распространения быстрой магнитозвуковой волны с компонентами [0.15523, 0.96347, –0.21824] с точностью до 5° . Угол между вектором возмущения магнитного поля и вектором невозмущенного геомагнитного поля составлял $90 \pm 10^\circ$, что также свидетельствует о том, рассматриваемое возмущение является возмущением альвеновского типа. Поскольку возмущение было перпендикулярно как к магнитному полю, так и радиусу-вектору положения космического аппарата, то наблюдаемое возмущение можно классифицировать как тороидальную альвеновскую моду.

Событие 10 апреля 2001 г. характеризовалось существенно меньшим изменением параметров солнечного ветра, чем рассмотренное выше. В 16:19:40 UT 10.01.2001 г. регистрировалось импульсное возмущение всех трех компонентов магнитного поля. На рис. 4 этот момент времени отмечен вертикальной линией. После прохождения быстрого магнитозвукового возмущения космический аппарат «Polar» в течение трех часов регистрировал периодические процессы на различных магнитных оболочках. В компонентах X_{GSE} и Z_{GSE} магнитного поля наблюдались ква-

зипериодические возмущения, на последовательно изменяющихся частотах 11.5, 9.5, 5 и 3 мГц с амплитудами 1, 1.5–2, 4–5 и 3–4 нТл соответственно. С помощью метода минимума вариаций магнитного поля возмущения в волне было показано, что поляризация колебаний линейная. Частоты колебаний приведены на рис. 4 и обозначены горизонтальными линиями. Зависимость наблюдаемых частот от параметра Мак-Илвайна приведена на рис. 5. Сплошными линиями представлены частоты полоидальных мод, а штриховыми — частота тороидальной альвеновской моды. Необходимо отметить, что полоидальные моды представляют собой гибрид первых полоидальных альвеновских мод и медленных магнитозвуковых мод. То, что в полоидальных модах есть медленный магнитный звук, подтверждается поведением возмущенного гидростатического давления и возмущенного давления магнитного поля, которые находятся в противофазе, что характерно для медленного магнитного звука [1, 27, 28]. Космический аппарат «Polar» последовательно проходил от магнитной оболочки с параметром Мак-Илвайна $L = 6$ до оболочки с $L = 8$. При этом наблюдалось дискретное изменение частоты колебаний. С учетом линейной поляризации возмущений приведенная на рис. 5 зависимость находится в хорошем соответствии с полученной ранее в работах [2, 7, 12, 13, 17] зависимостью периодов собственных колебаний от геомагнитной широты и расчетанным периодом альвеновской волны.

Собственные магнитосферные колебания наблюдались и 13 января 2001 г. при взаимодействии магнитосферы с быстрой ударной волной в солнечном ветре. Космические аппараты «Polar» и «Goes-10» в это время находились в утреннем секторе магнитосферы (таблица). На обоих космических аппаратах после прохождения быстрого магнитозвукового возмущения наблюдались периодические возмущения.

Космический аппарат «Polar» зафиксировал линейно поляризованные колебания с частотой 10 мГц и амплитудой 1–1.5 нТл. Направление вектора возмущения магнитного поля [0.04312, 0.17563, 0.98351] совпадало с направлением распространения быстрого магнитозвукового возмущения с точностью до 7° . Угол между фоновым магнитным полем и возмущенным составлял $94 \pm 7^\circ$. Поскольку модуль магнитного поля не

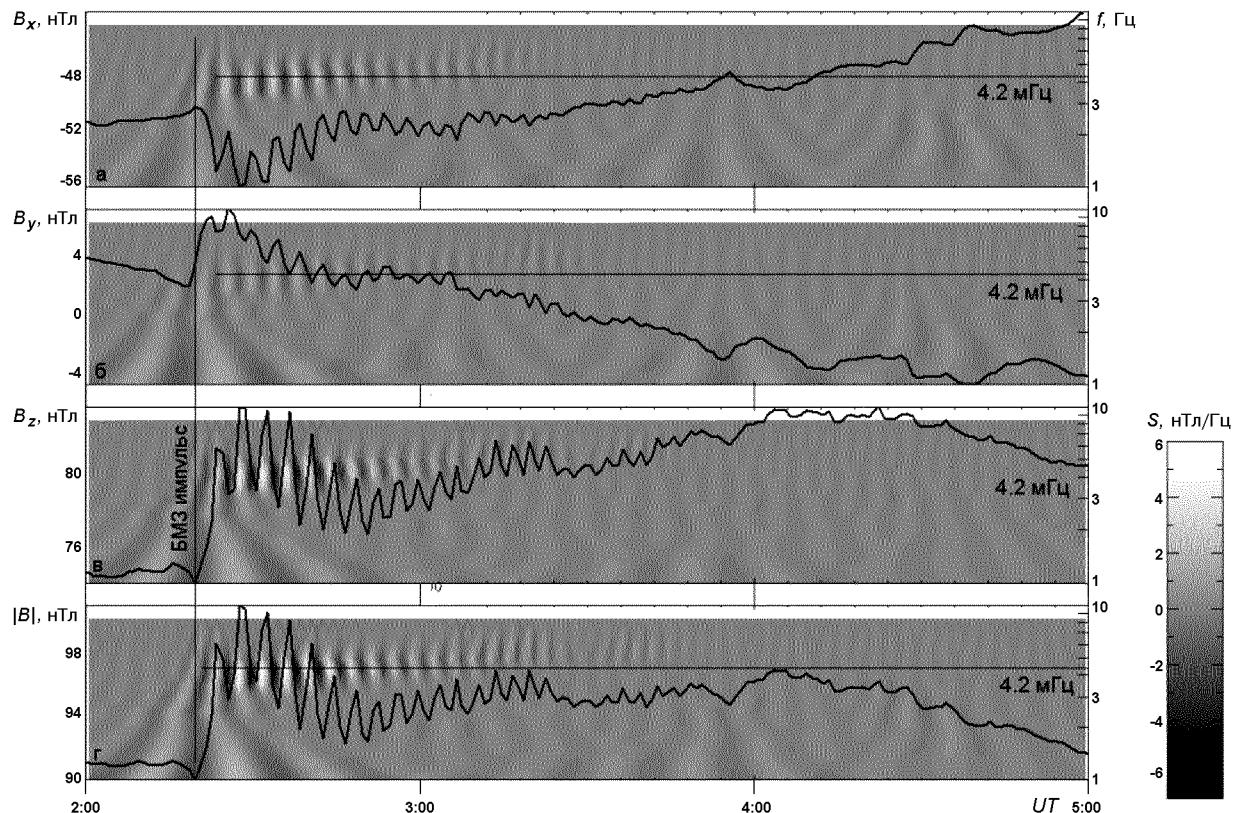


Рис. 6. Компоненты магнитного поля по измерениям «Goes-10» 13.01.2001 г. в системе GSE, а также контурные диаграммы их вейвлет-спектров. В 16:19:40 UT регистрируется возмущение магнитного поля во всех компонентах. После этого в составляющей Z_{GSE} наблюдаются колебания с периодом 90—100 с. Амплитуда возмущений 5 нТл

возмущался, поэтому наблюдаемое возмущение может быть интерпретировано как возмущение альвеновского типа. Одновременно в магнитометрических измерениях «Goes-10» регистрировались линейно поляризованные колебания с частотой 5—6 мГц, амплитудой 4—5 нТл. Вектор возмущения имел направление $[-0.62943, -0.09562, 0.77115]$. Угол между векторами возмущенного и фонового магнитного поля равен $6 \pm 5^\circ$. Таким образом, наблюдалась волна сжатия с возмущением магнитного давления и давления плазмы. Поскольку увеличение магнитного давления сопровождалось уменьшением давления плазмы, то возмущение можно интерпретировать как медленный магнитный звук. Колебания с тем же периодом (рис. 6) были зафиксированы на поверхности Земли магнитометрической станцией Минук (Meapook), которая на-

ходится вблизи точки, магнитосопряженной с положением «Goes-10». Наблюдения колебаний с одинаковым периодом и волновой формой одновременно в магнитосопряженных точках позволяет сделать вывод, что наблюдаемые возмущения являются собственными магнитосферными модами.

Выводы

Проведенное исследование показало, что воздействие быстрых ударных волн в солнечном ветре на магнитопаузу приводит к генерации быстрых магнитозвуковых возмущений, распространяющихся внутрь магнитосферы с альвеновской скоростью.

Быстрые магнитозвуковые возмущения при

распространении генерируют собственные колебательные моды магнитосферы УНЧ-диапазона.

В зависимости от угла падения фронта быстрого магнитозвукового возмущения на магнитную силовую линию, генерируются либо альвеновские тороидальные колебания, либо колебания, представляющие собой гибрид полоидальной альвеновской волны и медленной магнитозвуковой волны. Частоты последних лежат ниже 10 Гц. Периодические возмущения магнитного поля регистрируются в магнитосопряженных точках на поверхности Земли, что является свидетельством того, что эти возмущения являются собственными модами магнитосферы.

Таким образом, взаимодействие быстрых ударных волн солнечного ветра с магнитосферой может рассматриваться как один из возможных каналов переноса энергии из солнечного ветра в ионосферу.

We thank the CSDSweb and NASA SSC services for providing the WIND, ACE, GEOTAIL, GOES10 and POLAR data. We highly appreciate the CLUSTER Active Archive for the opportunity to use the spacecraft data and INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) archive for ground based magnetometric data. This research was partially supported by CRDF №UKP2-2644-KV-05 grant.

1. Агапитов А. В. Распространение Ps 6 волновых пакетов в хвосте магнитосферы Земли после магнитной суббури // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 117—121.
2. 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.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск, 2001.—464 с.
4. Клейменова Н. Г. Геомагнитные пульсации // Модель космоса. — М.: «Университет. Книжный дом», 2007.—Т. 1.—872 с.
5. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. — М.: Мир, 1980.—299 с.
6. Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. — Л.: ЛГУ, 1976.—271 с.
7. Agapitov A. V., Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Ballooning perturbations in the inner magnetosphere of the Earth: spectrum, stability and eigenmode analysis // Adv. Space Sci.—2008.—41, N 10.—P. 1682—1687.

8. Andreeva K., Prech L. Propagation of interplanetary shocks into the Earth's magnetosphere // Adv. Space Res.—2007.—40, N 12.—P. 1871—1880.
9. Balogh A., Carr C. M., Acuca M-H., et al. The Cluster magnetic field investigation: Overview of in-flight performance and initial results // Ann. geophys.—2001.—19.—P. 1207—1217.
10. Chen L., Hasegawa A. A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Stady state exitation of field line resonanct // J. Geophys. Res.—1974.—79.—P. 1024—1032.
11. Cheng C. Z., et al. Magnetohydrodynamic Theory of Field Line Resonances in the Magnetosphere // J. Geophys. Res.—1993.—98, N A7.—P. 11339—11347.
12. Denton R. E., Gallagher D. L., Determining the mass density along magnetic field lines from toroidal eigenfrequencies // J. Geophys. Res.—2000.—105.—P. 27717—27725..
13. Denton R. E., Lessard M. R., Anderson R., et al. Determining the mass density along magnetic field lines from toroidal eigenfrequencies: Polynomial expansion applied to CRESS data // J. Geophys. Res.—2001.—106.—P. 29915.—29924.
14. Kepko, L., Spence H. E. Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind density variations // J. Geophys. Res.—2003.—108, N A6.—P. 1257—1271.
15. Kivelson M. G. ULF waves from ionosphere to the outer planets // AGU Monograph. N 169 / Eds K. Takahashi, P.-J. Chi. — IGPP Publ., 2006.—N 6264.—P. 11—30.
16. Korotova G. I., Sibeck D. G., Singer H. J., Rosenberg T. J. Multipoint observations of transient event motion through the ionosphere and magnetosphere
17. Leonovich A. S. Mazur V. A. A theory of transverse small-scale standing Alven waves in an axially symmetric magnetosphere // Planet. Space Sci.—1993.—41, N 9.—P. 697—717.
18. Hudson M. K., Denton R. E., Lessard M. R., et al. A study of Pc-5 ULF oscillations // Ann. geophys.—2004.—22.—P. 289—302.
19. Petrinec S. M., Yumoto K., Lühr H., et al. The CME event of February 21, 1994: Response of the magnetic field at the Earth's surface // J. Geomagn. and Geoelec.—1996.—48.—P. 1341—1379.
20. Pilipenko V. A. ULF waves on the ground and in space // J. Atmos. Terr. Phys.—1990.—52, N 12.—P. 1193—1209.
21. Saito T., Matsushita S. Geomagnetic pulsations associated with sudden commencements and sudden impulses // Planet. Space Sci.—1967.—15.—P. 573—587.
22. Sibeck D. G. Pressure pulses and cavity mode resonances in multiscale processes in the Earth's magnetosphere: from Interball to CLUSTER // NATO Sci. Ser.—2003.—P. 95—110.
23. Southwood D. J., Kivelson M. G. The Magnetohydrodynamic response of the magnetospheric cavity to changes in solar wind pressure // J. Geophys. Res.—1990.—95, N A3.—P. 2301—2309.
24. Sonnerup B. U. O., Scheible M. Minimum and maximum variance analysis. in analysis methods for multi-spacecraft data / Eds G. Paschmann, P. W. Daly. — Noordwijk, Netherlands: ESA Publ. Div., 1998.—1850 p.
25. Takahashi K. ULF waves: 1997 IAGA division 3 reporter review // Ann. geophys.—1998.—16.—P. 787—803.

26. Villante U., Francia P., Lepidi S. Pc5 geomagnetic field fluctuations at discrete frequencies at a low latitude station // Ann. geophys.—2001.—19.—P. 321—325.
27. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves in the Outer Magnetosphere. 1. Statistical Study // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A1.—P. 19451—19467.
28. Zhu X., Kivelson M. Compressional ULF Waves. 2. Case Study // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A1.—P. 241—252.

**THE GENERATION OF INHERENT ULF MODES
IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE BY SOLAR WIND**

A. V. Agapitov, O. K. Cheremnykh

A study of Pc-5 magnetic pulsations using some data from the ACE, Wind, Polar Cluster, Geotail and Goes-10 spacecraffts and ground-based magnetic field measurements from the Intermagnet

archive was carried out. Solar wind in the Earth's orbit is a quasi-stationary formation with tangential discontinuous, fast and slow shock waves. We accentuate our study on geomagnetic pulsations associated with sudden storm commencements (SSC) and sudden impulses (SI). The disturbances of magnetopause surface produce the fast MHD wave front which penetrates into the magnetosphere. Pulsations associated with fast waves were detected on spacecraffts and on the Earth's surface with the same frequency. Pulsations excitation can be considered as one of energy transport mechanisms from solar wind to the ionosphere. Frequencies of detected pulsations depend on geomagnetic latitude and approximately correspond to the toroidal alfvénic mode. Pulsations with different frequencies were observed simultaneously on different magnetic latitudes. The existence of spectral maxima after wideband fast MHD waves propagation testify the magnetosphere property to select particular spectral peaks and to produce Pc3-5 pulsations with expressed periodicities. The Earth's magnetosphere is assumed to be the resonance system for hydromagnetic waves excited due to the shocks outside the magnetosphere.

УДК 550.388:551.510

В. П. Бурмака¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Волновые возмущения в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г.

Надійшла до редакції 13.12.07

Вимірювання на харківському радарі некогерентного розсіяння виконані в період, близький до весняного рівнодення — з 27 березня до 6 квітня 2006 р. Представлені результати аналізу хвилевих збурень в іоносфері за цей час, включаючи періоди затемнення Сонця 29 березня та магнітної бури 4—6 квітня.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) представляет собой открытую динамическую нелинейную систему [6—10]. Последняя подвержена воздействию энерго- и массопотоков как «снизу», так и «сверху». Возмущения, возникающие в ней, часто имеют волновой характер.

Волновые возмущения (ВВ) изучаются уже не один десяток лет, но исследования еще далеки до завершения. Актуальность проблемы обусловлена тем, что ВВ реагируют на любые возмущения в системе ЗАИМ. ВВ могут быть индикатором космической погоды, высокоэнергетических процессов на поверхности Земли, под ее поверхностью, а также антропогенных воздействий на подсистемы. ВВ заметно влияют на точностные характеристики радиоэлектронных систем различного назначения, на качество функционирования телекоммуникационных систем и т. д. Большой интерес представляет изучение особенностей ВВ, вызванных различными источниками энерговыделения.

Целью работы является изложение результатов исследования ВВ в ионосфере в период весеннего равноденствия 2006 г., во время зат-

мения Солнца 29 марта 2006 г., а также в течение умеренной магнитной бури 4—6 апреля 2006 г.

СРЕДСТВА И МЕТОДИКИ

Измерения проводились на харьковском радаре некогерентного рассеяния (НР) ($49^{\circ}36' N$, $36^{\circ}18' E$) в период с 27 марта по 6 апреля в диапазоне высот 100—1000 км. Радар имеет следующие параметры: рабочая частота — 158 МГц, диаметр крупнейшей в мире параболической антенны — 100 м, ее коэффициент усиления — 10^4 , импульсная мощность радиопредающего устройства — 3.6 МВт [5]. Радар работал в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 660 и 130 мкс. Результаты, полученные в процессе измерений на радаре НР, записываются на магнитный носитель в виде статистически усредненных массивов данных смеси «НР сигнал + шум» и шума, представляют собой базовые оценки мощностей сигнала P_s и шума P_n на интервале времени $\Delta T_0 = 1$ мин.

Результаты измерений были обработаны по методике [1—3]. Она заключалась в том, что

после удаления тренда \bar{P}_s во временных рядах мощности сигнала P_s , вычисляемого на интервале времени 180 мин с шагом скольжения ΔT_0 , находились временные ряды значений $\delta P_s = P_s - \bar{P}_s$. Для возможности сравнения амплитуд ВВ на разных высотах учитывалась зависимость $P_s \propto z^{-2}$ (или зависимость отношения сигнал/шум $q \propto z^{-2}$). При этом также исключалась и зависимость P_s от выражения $(1 + T_e/T_i)$, где T_e и T_i — температуры электронов и ионов.

К рядам δP_s применялось сглаживание на интервале времени 15 мин с шагом скольжения ΔT_0 . Полученные таким образом сглаженные значения $\delta \bar{P}_s$ пропорциональны абсолютным значениям вариаций ΔN электронной концентрации N на данной высоте. При этом относительные амплитуды $\delta_N = \Delta N/N \approx \delta \bar{P}_s/\bar{P}_s$. Далее по временным рядам $\delta \bar{P}_s$ вычислялись ряды $\delta q = (\delta \bar{P}_s/\bar{P}_n)k$, где \bar{P}_n — средний уровень шума за сутки,

$$k = \frac{P_{\max}}{P} \frac{\tau_{\max}}{\tau} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\max}} \frac{T_{\text{системы}}}{T_{\text{системы max}}},$$

где параметры с индексом «*max*» обозначают максимальные значения из всех измерительных кампаний, без индекса — текущие значения для каждой отдельной измерительной кампании, P — импульсная мощность радиопередающего устройства, $P_{\max} = 2.2$ МВт, τ — длительность импульса, $\tau_{\max} = 800$ мкс, Δf — полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства, $\Delta f_{\max} = 9.5$ кГц, $T_{\text{системы}}$ — эффективная шумовая температура системы, приведенная ко входу радиоприемного устройства, $T_{\text{системы max}} = 1300 \dots 1800$ К в зависимости от времени суток. Введение коэффициента k позволит сравнивать δq , полученные в разных измерительных кампаниях.

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Период времени с 27 марта по 3 апреля можно считать спокойным. Концентрация частиц солнечного ветра (СВ) $n_{sw} \approx (2.5 \dots 7.5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, температура частиц СВ $T \approx 1.7 \cdot 10^5$ К. Их скорость $v_{sw} \leq 450$ км/с изменялась медленно (не более чем на 50 км/с в сутки) (рис. 1). Давление СВ не превышало 2.5 нПа. Плотности

потоков протонов и электронов составляли соответственно $10^3 \dots 10^4$ и $10^4 \dots 10^6 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Компоненты межпланетного магнитного поля B_t и B_z находились в пределах от 4 до 5 нТл и от 2 до 6 нТл соответственно. Рассчитанные значения функции Акасофу не превышали 3 ГДж/с. Компонент H_p геомагнитного поля варьировал в пределах 50—120 нТл с периодом 24 ч. Индекс авроральной активности не превышал 750 нТл, индекс D_{st} находился в пределах от -10 до -50 нТл, индекс K_p редко превышал 2.

С 4 апреля наблюдались заметные вариации параметров состояния космической погоды — началась магнитная буря. Около 06:00 (здесь и далее время UT) B_z -компонент межпланетного магнитного поля резко повернулся к югу и достиг значения -11 нТл и оставался отрицательным до 18:00 5 апреля (рис. 2). С 09:00 до 21:00 скорость СВ увеличилась от 310 до 450 км/с. Примерно за это же время наблюдалось увеличение температуры частиц СВ (от 10000 до 200000 К) и давления СВ (от 1.2 до 4 нПа), значения функции Акасофу достигали 19 ГДж/с. В результате возникла магнитная буря со значениями индексов K_p и D_{st} , приближившимися к 5 и -100 нТл соответственно. Внезапное начало бури наступило 4 апреля около 07:00, основная фаза длилась примерно до 12:00 5 апреля (значения индекса K_p увеличились от 1 до 5, а значения индекса D_{st} уменьшились от -10 до -100 нТл). Фаза восстановления длилась до конца измерений (6 апреля).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Волновая активность в период с 30 по 2 апреля, а также 4 и 5 апреля была несколько выше, чем 27—29 марта и 3 апреля. Рассмотрим это подробнее.

Амплитуды ВВ концентрации электронов N 28 марта 2006 г. в ночное время (рис. 3) на всех высотах не превышали 0.1 о. е. (1 о. е. соответствовала изменению ΔN на $1.7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$). С восходом Солнца и до 12:00 значения δq увеличивались до 1—1.5 о. е. при $z \approx 200 \dots 350$ км, а на высотах 150—200 км и 350—500 км $\delta q \leq 0.5$ о. е. Значения квазипериода T изменились в пределах 40—180 мин. До захода Солнца

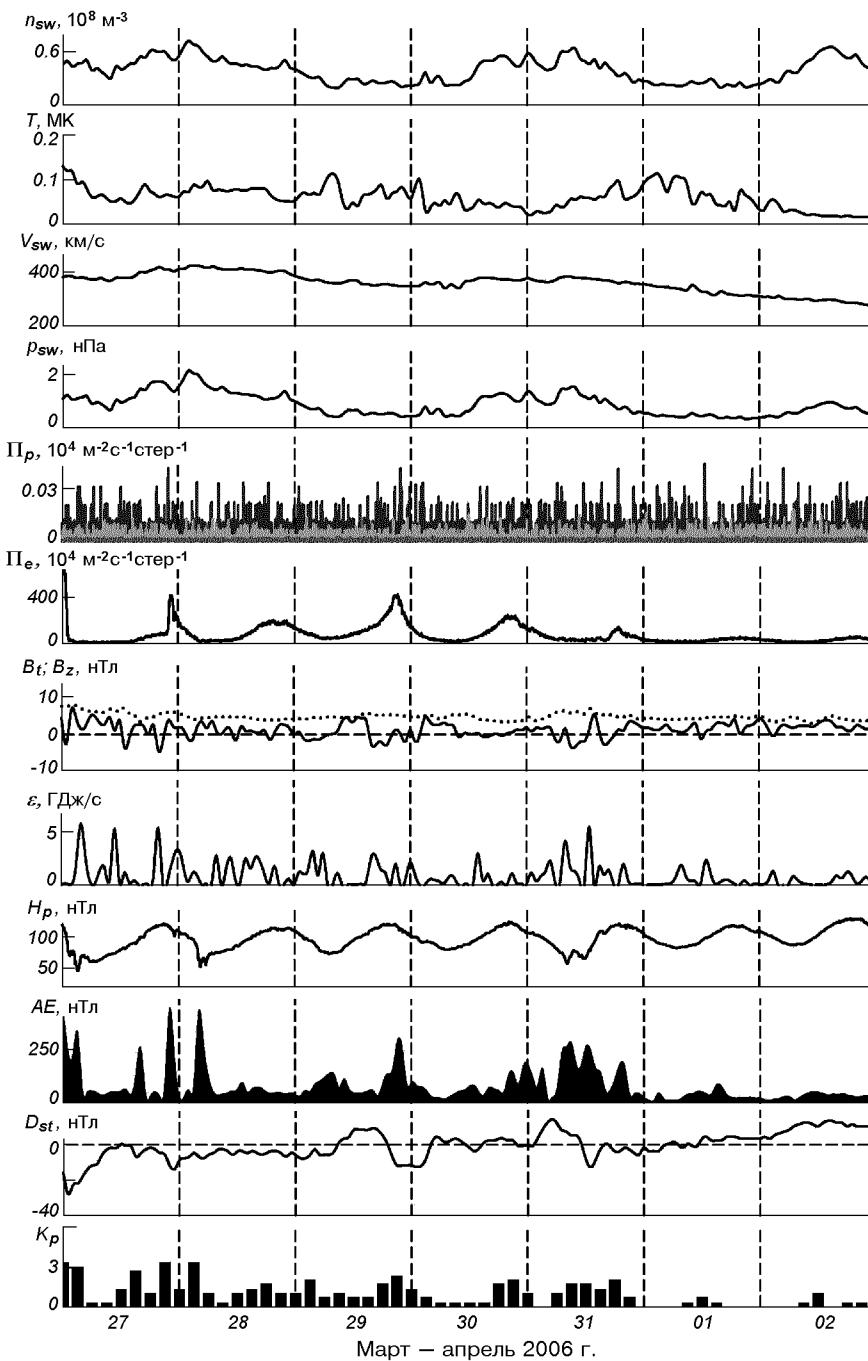


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра в период с 27 марта по 2 апреля 2006 г.: концентрации частиц n_{sw} , температуры T , радиальной скорости V_{sw} (ACE Satellite—Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и динамического давления p_{sw} (расчет); потоки протонов Π_p (GOES-8(W75)) и электронов Π_e (GOES-12), компоненты B_z, B_t — межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer); ϵ — функция Акасофу (расчет); H_p — компоненты геомагнитного поля (GOES-12); AE-индекса авроральной активности (WDC Kyoto); D_{st} — индекса (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University); K_p -индекса (Air Force Weather Agency)

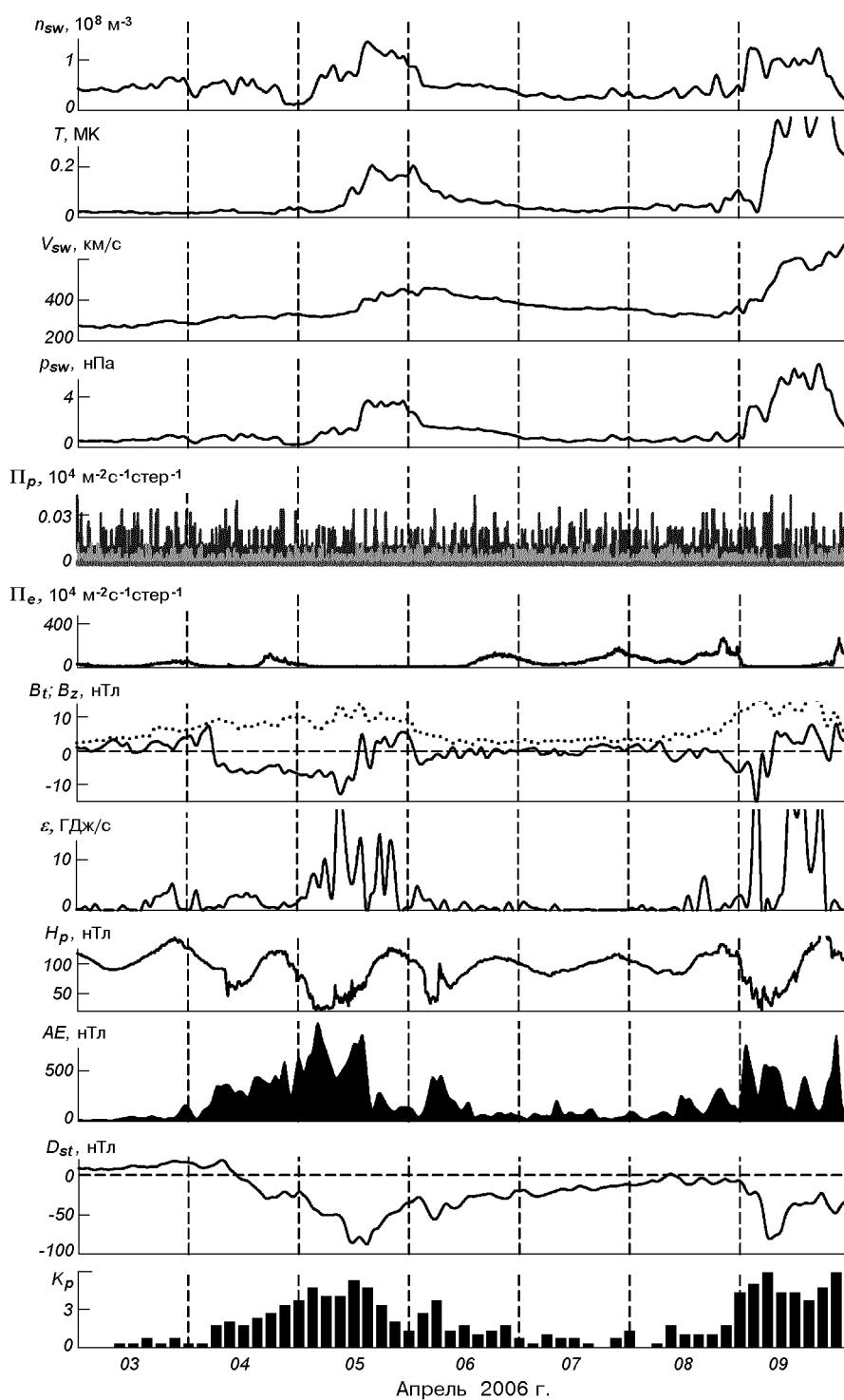


Рис. 2. То же в период с 3 апреля по 9 апреля 2006 г.

на уровне поверхности Земли (16:00) на всех высотах значения амплитуд находилось в пределах 0.1—0.3 о. е. Во время захода Солнца на высотах 200—350 км наблюдался процесс, состоящий из примерно 1.5 колебаний с амплитудой 1.8—1.9 о. е. и периодом около 120 мин. С увеличением высоты его структура изменялась, а длительность уменьшалась, и уже на высоте 270 км возмущение представляло собой полуволну длительностью около 120 мин и амплитудой около 1.7 о. е. (см. рис. 3).

Периоды относительных амплитуд ВВ концентрации электронов δ_N имели похожую структуру. Значения δ_N в этот день на всех высотах днем и ночью не превышали 20 %. В переходное время суток заметно изменялся характер сигнала: варьировали амплитуды и периоды колебаний.

29 марта 2006 г. восходу Солнца сопутствовали изменения характера сигнала на всех высотах (рис. 4). После восхода в течение 6 часов на высотах около 250 км наблюдался волновой процесс с $T \approx 120$ мин. С 10:02 до 12:21 имело место частное (77.4 %) затмение Солнца. Максимальное покрытие диска Солнца имело место в 11:12. Затмение сопровождалось генерацией квазипериодического процесса с $T \approx 180$ мин и амплитудой до 2 о. е. на высотах 200—270 км. После прохождения вечернего терминатора этот процесс разрушился, но появился другой с периодом около 60 мин и амплитудой 0.3 о. е.

Вариации относительных амплитуд ВВ во время утреннего терминатора были похожими на вариации δq . С 4:00 до 10:00 при $z < 500$ км значения относительных амплитуд $\delta_N = 5—15\%$.

Вскоре после затмения Солнца на высотах 200—270 км наблюдался квазипериодический процесс с относительной амплитудой, достигавшей 30 %. После прохождения вечернего терминатора появился другой волновой процесс с $\delta_N \approx 10\%$. После 21:00 относительная амплитуда приближалась к 30 %.

Большие значения δ_N на высотах ниже 150 км в ночное время в этот и другие дни обусловлены уменьшением N и ослаблением роли рекомбинационных процессов.

Практически с начала суток 30 марта на высоте около 200 км наблюдался волновой процесс с периодом около 100 мин. После восхода

Солнца имело место увеличение амплитуды ВВ от 0.5 до 1.3 о. е., потом установилась амплитуда $\delta q \approx 0.5$ о. е. (см. рис. 3). В 7:00 амплитуда резко увеличилась до 3 о. е. Далее она уменьшилась до 1 о. е., а период уменьшился до 60 мин. До 14:00 амплитуда увеличилась до 1.4 о. е., а период увеличился до 120 мин. После 14:00 в течение трех часов характер сигнала изменялся незначительно. Заход Солнца на высотах около 200 км сопровождался внезапным всплеском δq , достигавшим 1.8 о. е. и длившимся 4 ч. Возмущение представляло собой волновой процесс с двумя полными периодами длительностью около 140 мин. Далее до конца суток вариации ΔN были незначительными. С увеличением высоты амплитуды описанных вариаций уменьшались, и на высоте $z \geq 400$ км они были на уровне фоновых. Ниже 200 км днем наблюдались такие же процессы со значительно меньшими ($\delta q \leq 1$ о. е.) амплитудами.

Относительные амплитуды ВВ электронной концентрации во время восхода Солнца достигали 20—25 % на всех высотах. В высотном диапазоне 200—350 км в 7:00 отмечался сильный всплеск δ_N , достигавший 35 %, после последовал процесс с постепенно увеличивающимися от 60 до 120 мин периодом и амплитудой от 5 до 10 %. Далее с 14:00 и до захода Солнца вариации δ_N были незначительными. С 16:00 до 20:00 относительные амплитуды достигали 15 %. На высотах около 200 км возмущение имело волновой характер с периодом около 140. После 20:00 квазипериодический процесс продолжался, но с амплитудой, в два раза меньшей. На других высотах δ_N изменялась незначительно.

В последующие три дня (31 марта, 1 и 2 апреля 2006 г.) вариации δq и δ_N во многом были похожими (рис. 3, 4). Восход Солнца сопровождался одиночным колебанием с периодом, достигающим 5 ч, амплитудами $\delta q \approx 0.5—1.5$ о. е. и $\delta_N \approx 10—30\%$, причем выше 220 км первая полуволна была положительной, а ниже 220 км — отрицательной. Максимальные амплитуды наблюдались на высоте 320 км и составляли 1.5 о. е. и 20 % соответственно. С 6:00 до 11:00 (31 марта до 12:00), а 1 апреля с 8:00 до 11:00 в высотном диапазоне 150—400 км (2 апреля — 150—300 км) наблюдалось заметное увеличение значений δq . Максимальные значения были на высотах 200—250 км и достигали 2.5 о. е., с

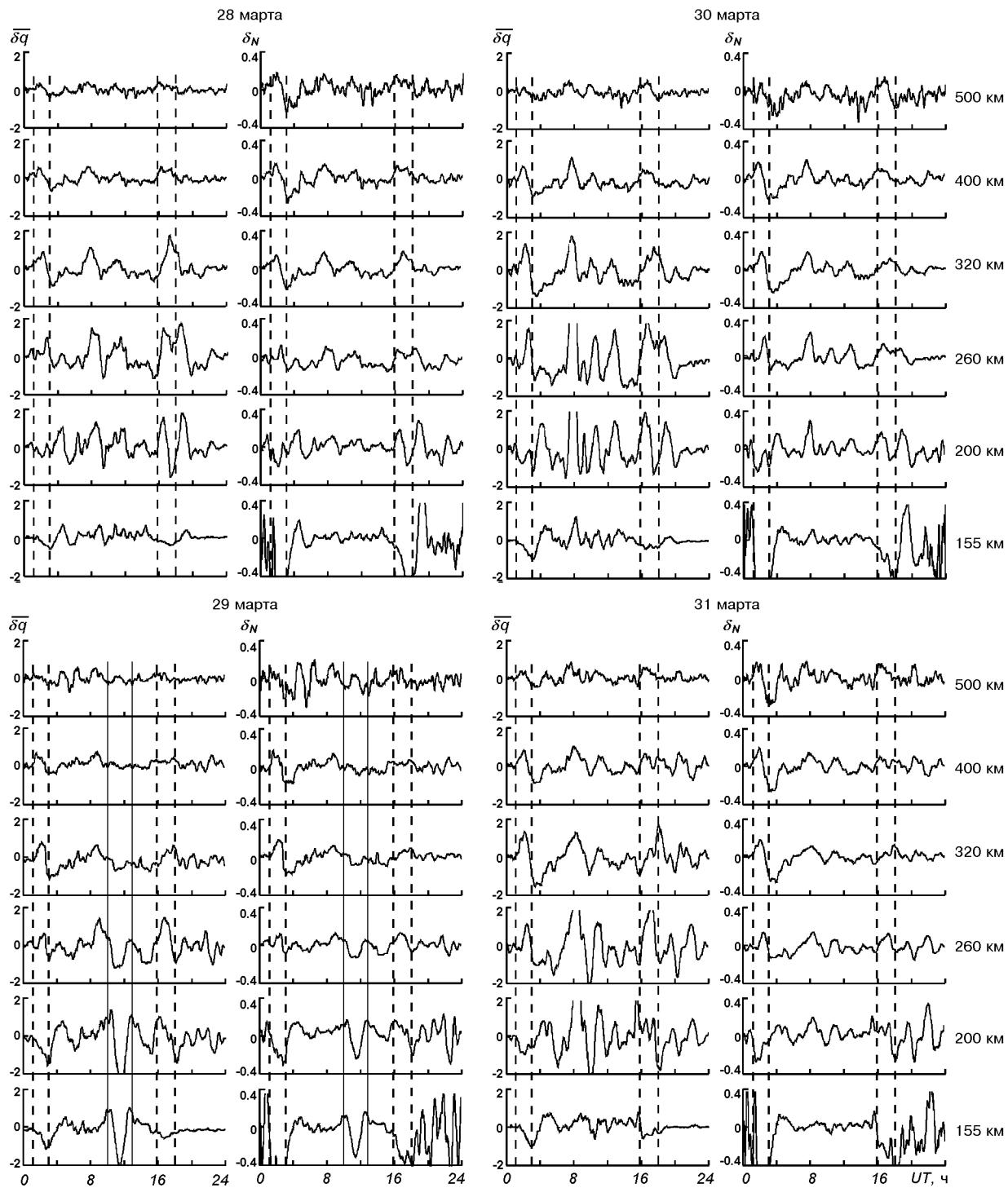


Рис. 3. Временные вариации амплитуд $\overline{\delta q}$ и относительных амплитуд δ_N ВВ электронной концентрации в период близкий к весеннему равноденствию 28—31 марта 2006 г. Вертикальными пунктирными линиями отмечены моменты восхода и захода Солнца на высоте 450 км и на уровне Земли. Вертикальными сплошными линиями отмечены временные интервалы затмения Солнца 29 марта (здесь и далее в обсерватории вблизи г. Харьков)

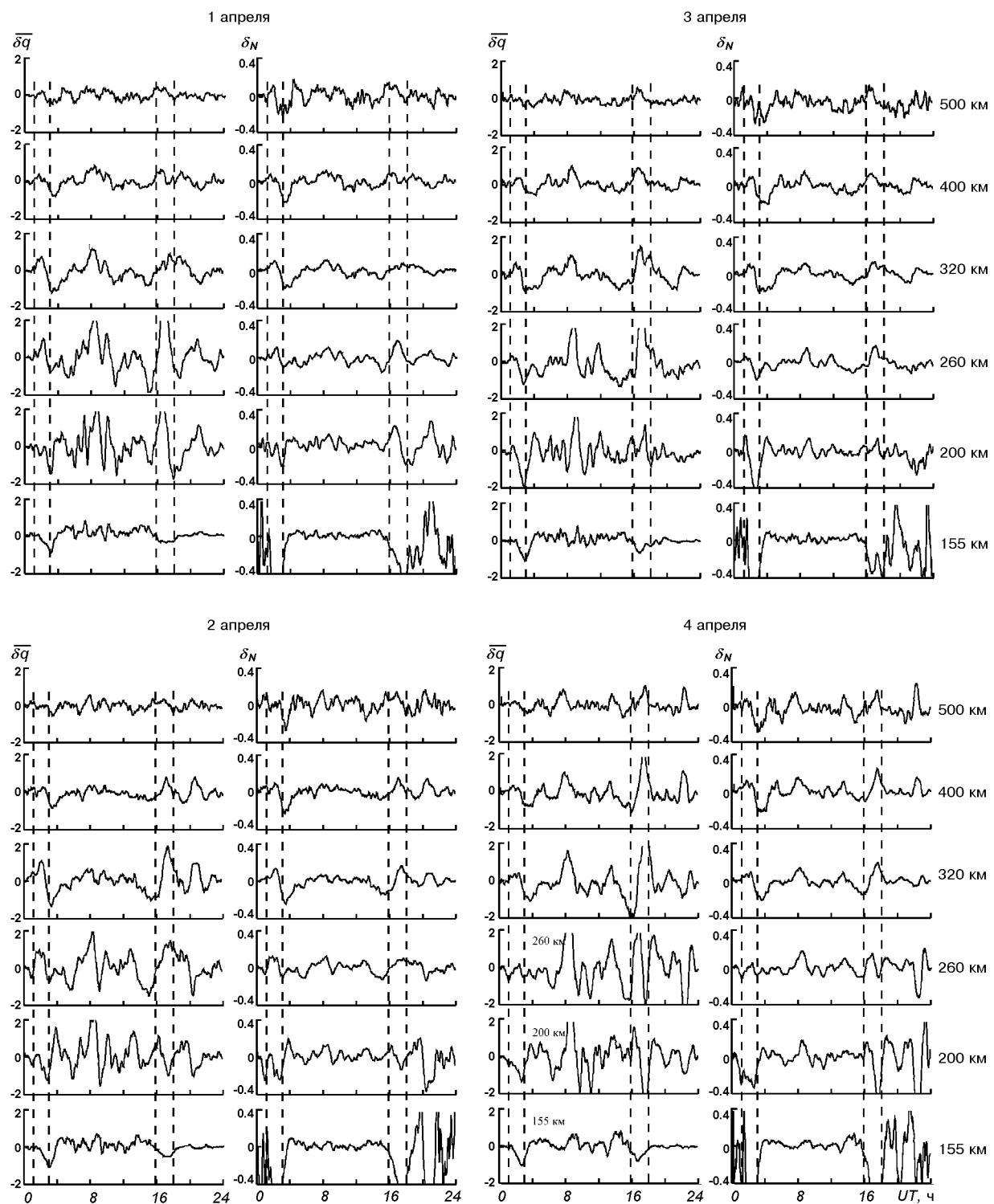


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для 1—4 апреля 2006 г.

увеличением высоты амплитуда уменьшалась. В этом временном интервале укладывалось примерно по 1.5 колебания с периодами 3.5, 2 и 1.5 ч соответственно 31 марта, 1 и 2 апреля. Изменения относительных амплитуд электронной концентрации были менее значительными. Обычно δ_N превышала 10—15 %. Заход Солнца сопровождался сильным увеличением амплитуды колебаний, которые были наиболее четко выражены на высоте около 250 км. При этом $\delta q \approx 2$ о. е. и $\delta_N \approx 20$ %. Ночные амплитуды в высотном диапазоне 200—400 км были сравнительно большими: 1—1.5 о. е. и 20—30 %. Ночью 31 марта они имели волновой характер с квазипериодом 120—160 мин.

3 апреля 2006 г. прохождение утреннего терминатора сопровождалось отрицательной полуволной с максимумом амплитуд на высоте 200 км. Последние составляли 2 о. е. и 40 %, с высотой амплитуда колебаний уменьшалась (рис. 4). До 8:00 на высотах около 200 км наблюдался слабый волновой процесс с периодом около 60 мин и амплитудами 0.5 о. е. и 5 %. В 8:00 произошло сильное увеличение амплитуды на высотах 150—450 км, после чего до 13:00 в диапазоне высот 200—300 км наблюдался волновой процесс с периодом 80 мин и амплитудой 1 о. е. и $\delta_N \approx 5$ %. До 16:00 значения δq и δ_N изменялись незначительно. В 16:00 начался заход Солнца на уровне Земли, который сопровождался существенным увеличением значений δq (при $z = 260$ км δq достигали 2.5 о. е.) и менее заметным увеличением δ_N (не более 20 %). После 20:00 вариации δq и δ_N были незначительными.

Амплитуды ВВ 4 апреля 2006 г. были похожими на амплитуды ВВ днем раньше, но 4 апреля они были значительно больше и продолжались до конца суток (рис. 4). Сильное увеличение δq , начавшееся в 8:00, наблюдалось на всех высотах вплоть до 500 км, а его величина и длительность были больше, чем 3 апреля: 2.5 о. е. и 130 мин соответственно. Амплитуда волнового процесса, последовавшего за ним, была больше в два раза. Заход Солнца сопровождался увеличением амплитуд до 2 о. е. На высотах около 250 км наблюдался квазипериодический процесс с периодом около 130 мин и амплитудой 2 о. е. Ночные значения δq на высотах 200—400 км достигали 2 о. е.

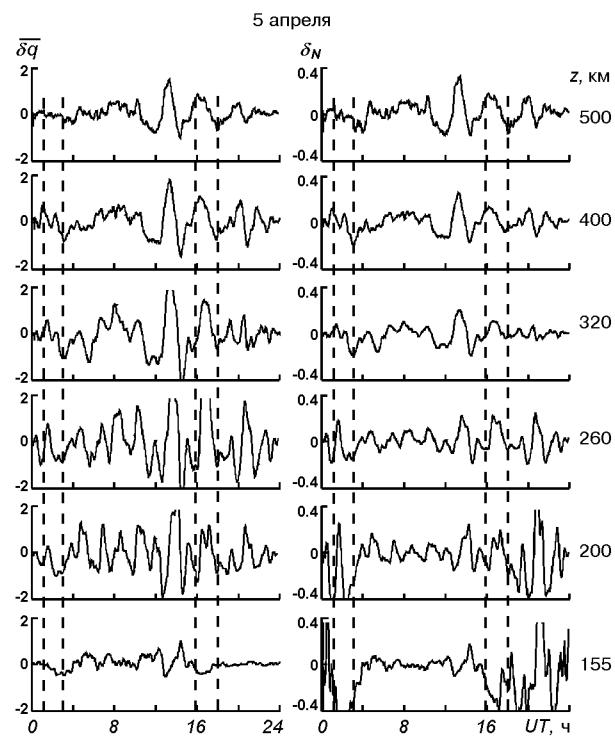


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для 5 апреля 2006 г.

Относительные амплитуды ВВ 4 апреля отличались тем, что ночные значения δ_N заметно увеличились и достигали 40 % на высотах около 200 км.

5 апреля 2006 г. (рис. 5) на протяжении всего дня (с 4:00 до 18:00) наблюдался квазипериодический процесс с периодом около 100 мин и амплитудой 1 о. е. С увеличением высоты он становился менее выразительным и выше 300 км стал практически незаметным. С 13:00 до 15:00 имело место значительное усиление нескольких колебаний, наблюдавшееся до высоты 500 км. После захода Солнца на высоте 450 км амплитуда вариаций δq на высотах около 250 км оставалась не меньше дневных значений.

Во время восхода Солнца на высоте $z \approx 200$ км амплитуды δ_N достигали 40 %. В светлое время суток наблюдалось колебание с амплитудой около 10 %. Значительное усиление колебаний произошло в период с 13:00 до 15:00. С высотой амплитуда увеличивалась, достигая значений 40 % при $z = 500$ км. После захода Солнца на высоте 450 км наблюдался сильный

квазипериодический процесс в диапазоне высот 200—250 км, его период был около 90 мин.

ОБСУЖДЕНИЕ

Спокойные условия. Рассмотрим период с 30 марта 2006 г. по 3 апреля 2006 г. Характерным для этого периода в зависимостях δq и δ_N является наличие максимальных значений амплитуд вблизи местного полудня. После полудня в диапазоне высот 200—300 км наблюдалось несколько колебаний общей продолжительностью 4—6 ч.

Солнечное затмение 29 марта 2006 г. Особенностью затмения было то, что на высотах выше 300 км эффекты были практически незаметны. Ниже 160 км наблюдалась только отрицательная полуволна. Ее наличие, скорее всего, связано с особенностями методики обработки и вызвано уменьшением концентрации электронов во время затмения. В диапазоне высот 160—300 км после окончания затмения в течение 7 ч наблюдался волновой процесс с периодом около 180 мин и амплитудами 1 о. е. и 20 % для δq и δ_N соответственно. Этот процесс закончился после захода Солнца в ионосфере. Скорее всего, он был связан с затмением.

Во время двух других затмений [1—3] также наблюдалась отрицательная полуволна и квазипериодический процесс, последовавший за ней. Для ЗС, описанных в [1—3], ВВ имели место в большем высотном диапазоне, чем при затмении 2006 г.

Добавим, что в фоновые дни (30 марта — 3 апреля) параметры ВВ существенно отличались от параметров ВВ в день ЗС: максимальные значения амплитуд наблюдались вблизи местного полудня, а заход Солнца во все дни измерений сопровождался или усиливанием уже существовавшего процесса или возникновением новых колебаний.

Магнитная буря 4—6 апреля 2006 г. Как уже отмечалось, внезапное начало магнитной бури имело место в 7:00 4 апреля 2006 г. Уже через 1 ч 30 мин на высотах $z = 200—250$ км наблюдалось значительное увеличение околополуденных значений амплитуд вариаций δq и δ_N ($\delta q \geq 2.5$, $\delta_N \geq 20\%$). Важно, что на больших высотах этот процесс начался раньше (в 7:30).

Так, на высотах 200 и 500 км разница между началами составляла один час. После начала МБ в дневное и ночное время суток при $z = 160—400$ км амплитуды ВВ были примерно в два раза больше, чем в фоновые дни.

В зависимостях δ_N начало магнитной бури было выражено менее ярко. Величина δ_N в околополуденное время незначительно превышала значения в фоновые дни. Появление наибольшей положительной полуволны было зарегистрировано раньше на больших высотах (при $z \approx 200$ км в 8:30, а при $z \approx 500$ км — в 7:30). Относительные амплитуды ВВ ночью достигали 40 %.

Во время основной фазы бури — 5 апреля 2006 г. — ВВ наблюдались в течение всего дня на высотах 200—300 км. Их амплитуда днем и ночью была примерно одинаковой (около 1—1.5 о. е.), причем максимум амплитуд δq приходился на время, близкое к 14:00, и проявлялся до высот 700 км. Значения относительных амплитуд ВВ отличались от фоновых значений только тем, что околополуденный максимум амплитуд δ_N приходился на 14:00, а его величина увеличивалась с увеличением высоты до $z = 550$ км, где $\delta_N \approx 25\%$. Ночью на высотах около 200 км значения δ_N достигали 40 %.

Другие магнитные бури также сопровождались увеличением амплитуд ВВ, но обладали своими особенностями [1—3].

Эффекты солнечного терминатора. Восход Солнца во все дни измерительной кампании с 27 марта по 6 апреля сопровождался отрицательной полуволной с амплитудами, достигавшими 1 о. е. и 20 %, длительностью до 2 ч на высотах ниже 250 км и положительной полуволной выше 250 км. Заходу Солнца сопутствовала генерация положительной полуволны с амплитудами до 2 о. е. и 20 % или волны с несколькими периодами общей длительностью 2—4 ч.

Во время других измерительных кампаний, описанных в [1—3], большинство вечерних терминаторов сопровождались возникновением положительной полуволны. В целом эффекты утренних терминаторов отличались большим разнообразием.

Данные наблюдений эффектов терминатора хорошо согласуются с результатами наших работ [1—3] и результатами других исследователей [4].

ВЫВОДЫ

1. Подтверждено, что характерным для весеннего периода 2006 г. являлось наличие в суточном ходе максимума амплитуд вариаций $\bar{\delta}q$ и δ_N . В магнитоспокойные дни он имел место в околополуденное время.

Днем с 04:00 до 16:00 амплитуды $\bar{\delta}q$ увеличивались с высотой до 250 км, при $z > 250$ км они уменьшались с высотой.

Ночью обычно $\bar{\delta}q \approx 0.1$. На высоте около 250 км $\bar{\delta}q$ достигали максимальных значений 1–2 о. е.

2. Восходы и заходы Солнца сопровождались заметным изменением характера сигнала: восход — отрицательной полуволной с амплитудой 1 о. е. и $\delta_N \approx 20\%$, длительностью около 2 ч при $z < 250$ км и положительной полуволной при $z > 250$ км. Заходу Солнца сопутствовала генерация положительной полуволны, амплитуда которой иногда превышала 2 о. е. и 20 %, или генерация волны с несколькими периодами общей длительностью 2–4 ч.

3. Установлено, что затмение Солнца 29 марта 2006 г. сопровождалось волновым процессом в диапазоне высот 160–300 км длительностью не менее семи часов с периодом около 180 мин и амплитудами 1 о. е. и 20 % для $\bar{\delta}q$ и δ_N соответственно.

4. Выявлено, что магнитная буря 4–6 апреля 2006 г. привела к увеличению амплитуд вариаций $\bar{\delta}q$ в два раза в диапазоне высот 160–400 км. В начале МБ (4 апреля) на высотах 200–300 км относительные амплитуды увеличились по сравнению с фоновым днем в 1.5 раза днем и в два раза ночью. В период основной фазы МБ, 5 апреля, амплитуды вариаций $\bar{\delta}q$ и δ_N увеличились примерно в два раза; в 14:00 были зарегистрированы их максимальные значения. Они оставались большими ($\delta q_{max} \approx 2$ о. е. и $\delta N_{max} \approx 0.3$ –0.4) до высоты 700 км. В фоновые дни δq_{max} и δN_{max} обычно наблюдались в 8:00.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, В. Н. Лысенко, И. Б. Склярову и Ю. В. Черняку за организацию и проведения измерений на радаре НР.

1. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005. № 3.—С. 4—35.
2. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2006.—46, № 2.—С. 193—208.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование // Геомагнетизм и аэрономия.—2006.—46, № 2.—С. 209—218.
4. Иванов В. П., Карвецкий В. Л., Коренькова Н. А. Структура и динамика перемещающихся волнобразных возмущений по данным доплеровского зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1994.—34, № 1.—С. 109—114.
5. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
6. Черногор Л. Ф. Земля—атмосфера—геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
7. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
8. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 16—36.
9. Черногор Л. Ф. «Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
10. Черногор Л. Ф. «Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 198—231.

THE WAVE-LIKE DISTURBANCES IN THE IONOSPHERE DURING VERNAL EQUINOX IN 2006

V. P. Burmaka, L. F. Chernogor

Measurements at a period close to the vernal equinox, from 27 March to 6 April 2006, were carried out with the Kharkiv incoherent scatter radar. We present the results of the analysis of wave-like disturbances in the ionosphere during this period which spans the solar eclipse of 29 March and the magnetic storm of 4 to 6 April.

УДК 550.385.37: 550.388

Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР

Надійшла до редакції 18.02.08

Проаналізовано результати спостережень варіацій геомагнітного поля в діапазоні періодів 1—1000 с, які супроводжували старти 33 ракет з китайських космодромів Цеюянь, Січан і Тайюань в 2002—2007 рр. Вимірювання виконано поблизу м. Харкова (віддалення від космодромів $R \approx 5000$ —6000 км). Виявлено три групи збурень, що мали запізнення 39—53, 100—129 і 140—180 хв. Їхні тривалості складали 30—50, 37—45 і 38—57 хв відповідно. У геомагнітних пульсacіях переважали періоди 9—12 хв. Амплітуди цих пульсacій досягали 3—5 нТл.

ВВЕДЕНИЕ

Старты и полеты космических аппаратов (КА) оказывают значительное влияние на все подсистемы системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ), порождая целый спектр явлений [20—22]. Старты ракет (СР) сопровождаются тепловым, динамическим, химическим, акустическим и электромагнитным воздействиями на среду [1, 2, 8, 14, 17, 20, 22].

Локальное высокоенергетическое воздействие должно сказать на ионосферной токовой системе из-за изменения проводимости в результате инъекции в среду большого количества (сотен тонн) отработанного топлива, представляющего собой высокотемпературный (3000 K) ионизированный газ. Возможен и другой механизм воздействия на подсистемы системы ЗАИМ. Известно, что при движении ракеты со сверхзвуковой скоростью генерируется ударная волна, которая модулирует плотность атмосферы, электронную концентрацию и электрическое поле ионосферы. На больших расстояниях от места воздействия ударная волна трансформируется в акусто-гравитационную волну (АГВ), которая вовлекает в движение ионизиро-

ванный компонент. В результате этого в месте регистрации должны возникать геомагнитные пульсации, в частности с теми же периодами, что и у АГВ [11]. Таким образом, ионосферный и магнитный эффекты СР оказываются связанными между собой.

Более чем за три десятилетия регистрации, изучения и моделирования эффектов СР проведен анализ большого объема экспериментальных данных, полученных радиофизическими методами [14, 15, 17, 23, 25, 27]. Исследования в основном проводились на близких расстояниях (вдоль траектории полета КА) [1, 16, 17], но особый интерес представляла возможность регистрации эффектов на больших удалениях [2—11, 14—18, 26]. Наблюдению эффектов СР магнитометрическим методом посвящены только отдельные работы [11, 18, 23].

В работах [11] и [23] изложены результаты исследования реакции геомагнитного поля в окрестности г. Харькова на 43 запуска ракет с космодрома Байконур и 16 запусков ракет с космодрома Плесецк. Выявлены три группы квазипериодических возмущений со скоростями 5—9 км/с, 800—1100 м/с и 300—400 м/с соответственно. Амплитуды колебаний варьировались в

зависимости от уровня геомагнитной активности и составляли в среднем 3—6 нТл.

Большой интерес представляет изучение возможности обнаружения эффектов СР на расстояниях, значительно превосходящих расстояния до космодромов Плесецк и Байконур (удаления 1500 км и 2100 км соответственно). Для этого удобными являются китайские космодромы, удаления до которых от места регистрации составляют $R \approx 5000—6000$ км.

Целью настоящей работы является изложение результатов наблюдений вариаций уровня и спектральных составляющих геомагнитного поля вблизи г. Харькова, которые сопровождали старты 33 ракет различных типов с китайских космодромов Цзюянь, Сичан и Тайюань.

Возможности программно-аппаратного измерительного комплекса, использовавшегося для наблюдений, изложены в работе [10].

Методики измерений и анализа аналогичны описанным авторами в работе [11].

Сведения о ракетах и космодромах. В работе изучалась реакция геомагнитного поля на старты 33 ракет «Long March» следующих модификаций: 2C (7 запусков), 2D (4 запуска), 2F (4 запуска), 3A (9 запусков), 3B (1 запуск), 4B (8 запусков). Характеристики и основные параметры ракет приведены в табл. 1. Видно, что ракеты модификаций 2F и 3B относятся к классу тяжелых ракет, а ракеты 2C, 2D, 3A и 4B — к ракетам средней тяжести [15].

Краткие сведения о космодромах КНР приведены в табл. 2. Видно, что количество запусков ракет с разных космодромов примерно одинаковы, а удаления до космодромов составляют $R \approx 5000—6000$ км.

Уровень магнитной возмущенности. Уровень магнитной возмущенности контролировался при помощи A_p - и K_p -индексов, которые представлены в Интернет (табл. 3). Приведены значения индексов в день СР, а также за сутки и двое суток до него. Как видно, старты имели место как в магнитоспокойные, так и в магнитовозмущенные дни.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Примеры регистраций. На рис. 1, а приведены вариации $H(t)$ и $D(t)$, сопутствовавшие старту ракеты 3A 14 ноября 2003 г. с космодрома Сичан, который имел место в 16:01 (здесь и далее UT). Примерно в 15:25 наблюдался заход Солнца на высоте 200 км вблизи г. Харькова. Вероятнее всего, эффекты, связанные с вечерним солнечным терминатором, к моменту СР закончились. Первое изменение характера колебательного процесса наблюдалось в интервале времени 16:40—16:35 и длилось около 33—40 мин для обеих компонентов. В D -компоненте регистрировалось увеличение амплитуды от 2 до 4 нТл, а в H -компоненте — подавление волно-

Таблица 1. Краткие сведения о китайских ракетах

Тип ракеты	Количество ступеней	Длина, м	Максимальный диаметр, м	Масса, т	Начальная тяга, МН	Масса низкоорбитальной нагрузки, т
2C	2	35.15	3.35	192	2.786	2.4
2D	2	33.67	3.35	232	2.962	3.1
2F	2	58.34	7.85	480	5.923	8.4
3A	3	52.36	3.35	241	2.962	8.5
3B	3	54.84	7.85	425.5	5.924	12.0
4B	3	44.1	3.35	254	2.971	4.2

Таблица 2. Краткие сведения о космодромах КНР

Название	Координаты		Расстояние от космодрома до обсерватории, км	Количество запусков
	широта	долгота		
Цзюянь	41.1° с. ш.	100.3° в. д.	4780	10
Тайюань	38.8° с. ш.	111.5° в. д	5920	12
Сичан	28.1° с. ш.	102.3° в. д	5600	11

Таблица 3. Уровень магнитной возмущенности накануне и в день запуска ракет

Дата	Время, UT	Космодром	Тип ракеты	2 сут до СР		1 сут до СР		СР	
				A_p	K_p	A_p	K_p	A_p	K_p
25 марта 2002 г.	14:15	Цеоянь	2F	8	17	9	15	47	37
15 мая 2002 г.	1:50	Тайюань	4B	12	22	32	35	16	25
26 октября 2002 г.	3:17	Тайюань	4B	47	40	40	37	27	32
29 декабря 2002 г.	16:40	Цеоянь	2F	37	35	19	28	13	23
24 мая 2003 г.	16:34	Сичан	3A	25	30	21	27	22	30
15 октября 2003 г.	1:00	Цеоянь	2F	13	22	48	40	42	36
21 октября 2003 г.	3:16	Тайюань	4B	32	34	30	34	39	38
3 ноября 2003 г.	19:20	Цеоянь	2D	21	28	18	27	10	21
14 ноября 2003 г.	16:01	Сичан	3A	26	32	42	37	37	35
29 декабря 2003 г.	19:06	Сичан	2C	12	24	12	22	6	14
18 апреля 2004 г.	15:59	Сичан	2C	12	22	9	18	11	18
25 июля 2004 г.	7:31	Тайюань	2C	47	38	27	33	122	54
29 августа 2004 г.	7:50	Цеоянь	2C	8	17	12	23	8	17
8 сентября 2004 г.	23:14	Тайюань	4B	14	23	16	25	9	20
27 сентября 2004 г.	8:00	Цеоянь	2D	5	12	4	12	5	11
19 октября 2004 г.	1:20	Сичан	3A	3	6	4	8	4	8
06 ноября 2004 г.	8:10	Тайюань	4B	7	14	4	7	3	4
18 ноября 2004 г.	10:45	Сичан	2C	8	15	6	11	3	5
5 июля 2005 г.	22:40	Цеоянь	2D	11	21	7	15	5	10
12 октября 2005 г.	1:00	Цеоянь	2F	10	17	6	10	1	1
26 апреля 2006 г.	22:48	Тайюань	4B	7	14	5	10	5	11
9 сентября 2006 г.	7:00	Цеоянь	2C	8	11	4	8	2	3
12 сентября 2006 г.	16:02	Тайюань	3A	6	11	8	15	4	8
24 октября 2006 г.	11:34	Тайюань	4B	13	21	3	6	4	8
8 декабря 2006 г.	0:53	Тайюань	3A	28	31	25	31	25	28
2 февраля 2007 г.	16:28	Сичан	3A	16	24	8	17	2	6
11 апреля 2007 г.	3:27	Тайюань	2C	9	14	7	13	4	5
13 апреля 2007 г.	20:11	Сичан	3A	4	5	8	16	2	3
14 мая 2007 г.	16:01	Сичан	3B	3	3	3	7	3	5
25 мая 2007 г.	7:12	Цеоянь	2D	42	36	28	32	16	25
31 мая 2007 г.	16:08	Сичан	3A	4	8	4	8	4	7
19 сентября 2007 г.	3:26	Тайюань	4B	2	3	2	5	3	8
24 октября 2007 г.	10:05	Сичан	3A	5	11	7	13	3	6

вого процесса. Периоды составляли 10—14 мин. Следующее возмущение, заметное в обоих компонентах, имело место в интервале времени с 18:25 до 19:10 и сопровождалось незначительным увеличением амплитуды и появлением высокочастотной составляющей. Отчетливо фиксируемое увеличение амплитуды до 7 нТл произошло приблизительно в 19:30. Для H - и D -компонентов оно продолжалось 57 и 52 мин соответственно. Кроме того, периоды вариаций H -компонента геомагнитного поля увеличились до 14—15 мин.

Запуск китайской ракеты модификации 3A с космодрома Сичан произошел 24 октября 2007 г.

в 10:05. На рис. 1, б показаны временные зависимости H - и D -компонентов геомагнитного поля. Первое отчетливо регистрируемое (явное подавление высокочастотной составляющей в вариациях $H(t)$) изменение характера колебаний имело запаздывание 23—25 мин, продолжительность составляла 58—63 мин. Периоды колебаний варьировали в пределах 10—11 мин для обоих компонентов. Следующее возмущение наблюдалось примерно через 128—130 мин после момента СР и длилось 42—46 мин. Периоды преобладающих колебаний для H - и D -составляющих равнялись 7 и 12 мин соответственно. Третье возмущение, длительностью 52 мин про-

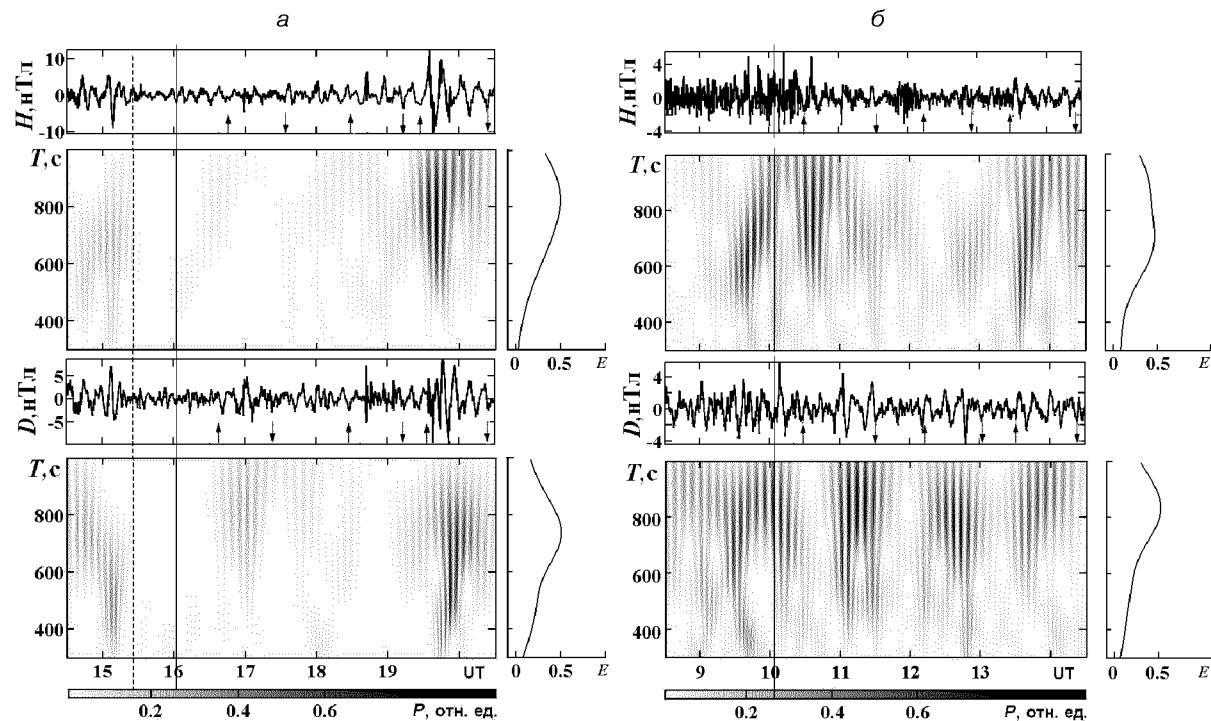


Рис. 1. Временные вариации Н- и D-компонентов геомагнитного поля, соответствующие им вейвлет-спектры и распределения средней энергии E колебаний по периодам в диапазоне периодов 300—1000 с, сопровождавшие старта китайских ракет модификации 3А с космодрома Сичан. Сплошной вертикальной линией показан момент старта ракеты (a — 16:01 UT 14 ноября 2003 г., b — 10:05 UT 24 октября 2007 г.). Штриховой линией показан момент захода Солнца на высоте 200 км поблизости г. Харькова

явились через 180—200 мин. Оно сопровождалось значительным увеличением периода (от 7 до 14 мин) и амплитуды (от 1 до 3.5 нТл) в H -компоненте. Для D -компонента эффекты были выражены слабее. Все три процесса сопровождались существенным увеличением периода волнового процесса, который достигал 12—14 мин.

Результаты статистического анализа. Гистограммы времен запаздывания, продолжительностей и периодов преобладающих колебаний для 33 СР приведены на рис. 2—4. Там же приводятся соответствующие гистограммы для фоновых дней (за день до и на следующий день после СР; выделение подобных эффектов для них проводилось относительно времен реальных стартов). Видно, что непосредственно после СР имели место три группы возмущений с запаздываниями: $\Delta t_1 \approx 39$ —53 мин, $\Delta t_2 \approx 100$ —129 мин и $\Delta t_3 \approx 140$ —180 мин. Продолжительности воз-

Таблица 4. Значения основных параметров возмущений, сопутствовавших СР (Δt — времена запаздывания возмущений, ΔT и T — их продолжительности и периоды)

Параметр	Значение
Δt_1 , мин	46.0 ± 7.1
Δt_2 , мин	116.8 ± 11.9
Δt_3 , мин	166.0 ± 37.1
ΔT_1 , мин	51.6 ± 6.8
ΔT_2 , мин	56.9 ± 15.5
ΔT_3 , мин	53.2 ± 8.03
T_1 , мин	10.4 ± 0.2
T_2 , мин	10.3 ± 0.3
T_3 , мин	11.6 ± 0.3

мущений: $\Delta T_1 \approx 30$ —50 мин, $\Delta T_2 \approx 37$ —45 мин и $\Delta T_3 \approx 38$ —57 мин; периоды колебаний составляли 9—12 мин. Средние значения запаздываний, продолжительностей и периодов колебаний для всех СР и оценки их средних квадратичных

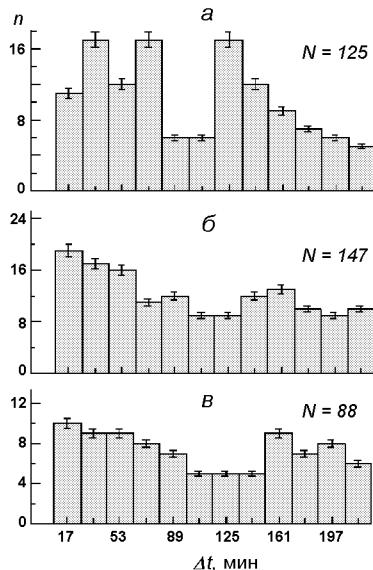


Рис. 2. Гистограммы времен запаздывания Δt для дневного, вечернего и ночного времени суток: *а* — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР, *б* — за день до СР, *в* — на следующий день после СР

отклонений приведены в табл. 4.

Из рис. 2—4 также видно, что для фоновых дней распределения времен запаздываний волновых возмущений близки к равномерным, что свидетельствует о случайной природе возмущений в фоновые дни.

Результаты спектрального анализа. Вейвлет-спектры также свидетельствуют о наличии трех групп запаздываний (см. рис. 1, *а*). Особен- но четко в обеих спектrogramмах проявляются возмущения, имеющие запаздывания около 200—230 мин.

24 октября 2007 г. после СР также наблюдались три группы возмущений (см. рис. 1, *б*). Амплитуда колебаний была больше для *D*-компоненты сигнала.

ОБСУЖДЕНИЕ

Практически всем из рассмотренных стартов ракет сопутствовали заметные или значительные изменения спектрального состава волновых процессов. В большинстве случаев наблюдалось увеличение амплитуды, но в ряде случаев отмечалось подавление сигнала, свидетельствующее

о противофазном сложении волновых процессов. Почти всегда вариации характера сигнала сопровождались изменением периодов квазипериодических процессов.

Возмущения, следовавшие за СР, принципиально ничем не отличались от естественных возмущений. Поэтому анализ вариаций геомагнитного поля после отдельных стартов не может дать полной уверенности о связи наблюденных возмущений со СР. Такой уверенности прибавляют результаты статистического анализа. Как показывает последний, чаще всего регистрировались три группы возмущений с $\Delta t_1 \approx 39—53$ мин, $\Delta t_2 \approx 100—129$ мин и $\Delta t_3 \approx 140—180$ мин. Возмущения представляли собой цуги колебаний продолжительностями около 30—50 мин и периодами 9—12 мин.

Знание запаздываний сигналов Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 позволяет вычислить скорости соответствующих волновых процессов.

Возмущения магнитного поля, скорее всего, генерируются на высотах максимума токовой струи ($z \approx 100—150$ км). Время Δt_0 достижения ракетой этих высот зависит от типа ракеты и составляет около 3 мин. При этом скорректированные времена распространения возмущений, наблюденных вблизи г. Харькова, $\Delta t' = \Delta t - \Delta t_0$. Исходя из средних значений Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 , получим, что $\Delta t'_1 \approx 37—49$ мин, $\Delta t'_2 \approx 102—124$ мин и $\Delta t'_3 \approx 149—199$ мин. При $R \approx 5000—6000$ км им соответствуют скорости $v'_1 \approx 2.0—3.7$ км/с, $v'_2 \approx 670—980$ м/с и $v'_3 \approx 420—670$ м/с. Наибольшую скорость имеют медленные МГД-волны, которые детально изучены в [19]. Такие скорости волн, следующих за СР, наблюдались нами неоднократно [2—7, 15]. Скорость распространения возмущений второй группы близки к скоростям, полученным нами в работах [11, 23]: $v'_2 \approx 800—1100$ м/с и $880—910$ м/с соответственно. Эти волны ассоциируются со скоростью ударных волн, которые по мере удаления от космодрома постепенно превращаются в АГВ (будем условно называть их ударно-волновыми АГВ). Скорость $v'_3 \approx 420—670$ м/с имеют внутренние гравитационные волны (ВГВ) в F-области ионосферы [13].

Возникает естественный вопрос, могут ли волны указанных типов преодолевать расстояния в 5000—6000 км и сохранять при этом регистри-

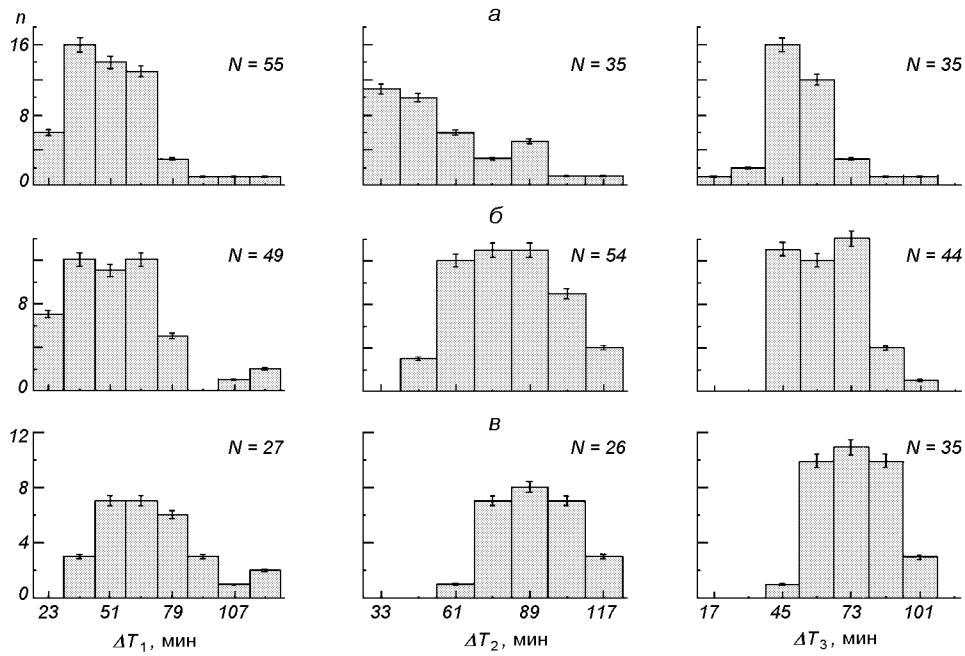


Рис. 3. Гистограммы продолжительностей ΔT_1 , ΔT_2 и ΔT_3 : α — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР, β — за день до СР, γ — на следующий день после СР

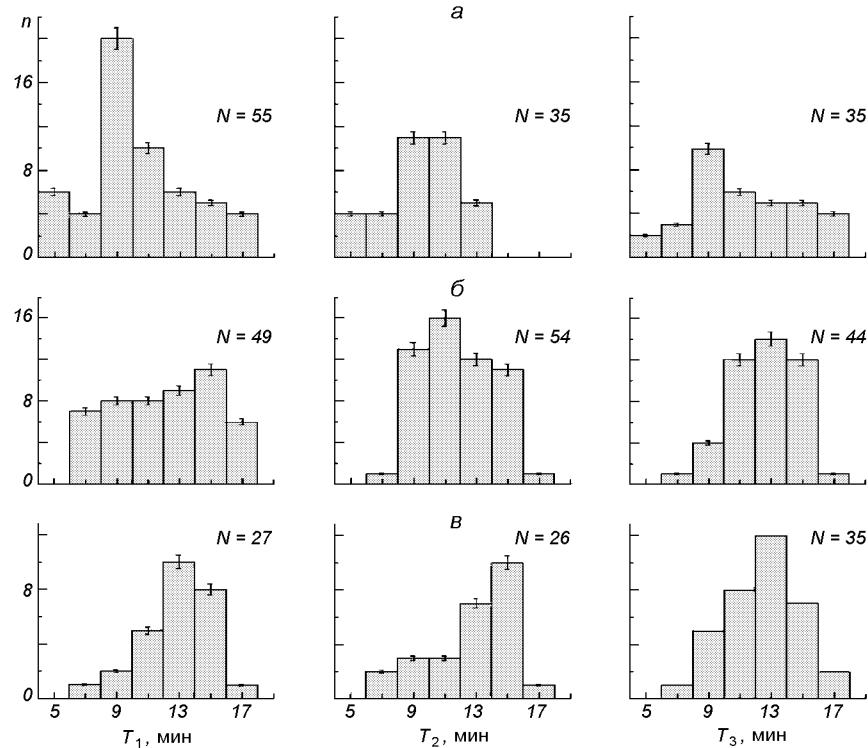


Рис. 4. Гистограммы периодов T_1 , T_2 и T_3 : α — для возмущений геомагнитного поля, сопутствовавших СР, β — за день до СР, γ — на следующий день после СР

руемую амплитуду? Что касается гравитационных волн (АГВ и ВГВ), то они могут распространяться на указанные расстояния [12]. Этому способствуют два обстоятельства. Во-первых, волны этих типов распространяются в волноводе, из-за чего их энергия убывает как R^{-1} , а амплитуда возмущения давления и плотности частиц — как $R^{-1/2}$. Поэтому в отсутствие затухания волн их амплитуда для одинаковых типов ракет при СР с китайских космодромов была бы всего в 1.5—1.7 раза меньше, чем при СР с космодрома Байконур. Что касается декремента затухания, то, как показывают наши оценки, он не больше, чем $3 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$.

Сложнее дело обстоит с ослаблением медленных МГД-волн. Этот вопрос, насколько нам известно, пока не обсуждался. Можно только надеяться, что их ослабление не сильно отличается от затухания АГВ и ВГВ. Основанием для этого служат результаты наблюдений волн с такими скоростями [2—7, 11, 14, 15].

ВЫВОДЫ

1. Изучены вариации геомагнитного поля, следовавшие за 33 стартами ракет с китайских космодромов Сичан, Цеюнь и Тайюань. Установлено, что практически во всех случаях после СР наблюдались заметные или значительные изменения характера колебаний.

2. В результате статистического анализа выявлены три группы возмущений, имевших запаздывания 39—53, 100—129 и 150—180 мин. Им соответствовали продолжительности процессов 30—50, 37—45 и 38—57 мин; периоды этих процессов составляли 9—12 мин.

3. В предположении, что возмущения вызваны СР, определены скорости распространения трех групп возмущений: $v'_1 \approx 2—2.6 \text{ км/с}$, $v'_2 \approx 800—970 \text{ м/с}$ и $v'_3 \approx 500—600 \text{ м/с}$. Такие скорости имеют медленные МГД-волны, ударно-волновые АГВ и ВГВ соответственно.

4. Непротиворечивость полученных параметров возмущений результатам наших более ранних исследований и результатам исследований других авторов позволяет нам с определенной степенью уверенности утверждать, что описанные возмущения могут быть связаны со СР с китайских космодромов.

Авторы благодарны К. П. Гармашу и С. Г. Лесуза за проведение систематических магнитометрических измерений.

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П., Плотников А. В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэрономия.—2002.—42, № 6.—С. 790—797.
2. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 143—162.
3. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия.—2006.—46, № 6.—С. 783—800.
4. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших старты и полеты ракет // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 57—61.
5. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия.—2004—44, № 4.—С. 518—534.
6. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия.—2004.—9, № 1.—С. 5—28.
7. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет «Союз» и «Протон» // Радиофизика и радиоастрономия.—2005.—10, № 3.—С. 254—272.
8. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно-возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вестник Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1999.—№ 427, вып. 1.—С. 3—22.
9. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия.—1999.—39, № 1.—С. 72—78.
10. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163—180.
11. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 6.—С.

- 87—98.
12. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974.—256 с.
 13. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.—532 с.
 14. Засов Г. Ф., Карлов В. Д., Романчук Т. Е. и др. Наблюдение возмущений в нижней ионосфере во время экспериментов по программе Союз—Аполлон // Геомагнетизм и аэрономия.—1977.—17, № 2.—С. 346—348.
 15. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия.—1999.—4, № 3.—С. 227—246.
 16. Нагорский П. М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // Геомагнетизм и аэрономия.—1998.—38, № 2.—С. 100—106.
 17. Нагорский П. М., Таращук Ю. Е. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводящих на орбиту космические аппараты // Изв. вузов. Физика.—1993.—№ 10.—С. 94—106.
 18. Соколова О. И., Краснов В. М., Николаевский Н. Ф. Изменения геомагнитного поля под влиянием запусков ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—46, № 4.—С. 561—565.
 19. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоиздат, 1982.—134 с.
 20. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
 21. Черногор Л. Ф. Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
 22. Черногор Л. Ф. Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 55—97.
 23. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк // Космічна наука і технологія.—2008.—14, № 3.—С. 29—38.
 25. Arendt P. R. Ionospheric undulations following Apollo 14 Launching // Nature.—1971.—231.—Р. 438—439.
 26. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U. S. powerful space vehicle launching // Radio Physics and Radio Astronomy.—1998.—3, N 2—Р. 181—190.
 27. Foster J. C., Holt J. M., Lanzerotti L. J. Mid-latitude ionospheric perturbation associated with Spacelab-2 plasma depletion experiment at Millstone Hill // Ann. Geophys.—2000.—18.—Р. 111—120.

GEOMAGNETIC PULSATIONS ASSOCIATED WITH ROCKET LAUNCHES FROM THE CHINA COSMODROMES

L. F. Chernogor, M. A. Shamota

We analysed geomagnetic field variations in 1—1000 s period range that accompanied 33 rocket launches in 2002—2007. The measurements were made near Kharkiv city at a distance of about 5000—6000 km from the China cosmodromes. Our analysis revealed three groups of disturbances with time delays of 39—53, 100—129 and 140—180 min and with durations of 30—50, 37—45 and 38—57 min, respectively. The 9—12 min geomagnetic micropulsation periods became dominant, and their amplitudes attained a value of 3—5 nT.

НАШІ АВТОРИ

АГАПІТОВ Олексій Володимирович — асистент кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — плазмові процеси у магнітосфері Землі.

АЛЕКСЄЄВ Юрій Гавrilович — начальник відділу експертизи ПЗ і ПТК Сертифікаційного центру АСУ Держцентрякості (Харків).

БАНДЕЛЬ Ксенія Анатоліївна — інженер Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

БОДНАР Олена Миколаївна — аспірантка Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту Геологічних наук НАН України

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

БУРМАКА Віктор Петрович — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, лауреат премії Президента України для молодих вчених.

Напрям науки — некогерентне розсіяння радіовіль, хвильові процеси в іоносфері.

ГЛЕМБА Володимир Йосипович — провідний інженер Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — геофізичне приладобудування.

ГРИЦАЙ Асен Васильович — Інженер I категорії кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізика атмосфери.

ЄВТУШЕВСЬКИЙ Олександр Михайлович — науковий співробітник кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізика атмосфери та навколоzemного космосу.

ЖАЛІЛО Олексій Олександрович — докторант кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Напрям науки — супутникові технології точного позиціонування, обробка ГНСС-спостережень.

ЖЕЛАНОВ Олексій Олександрович — аспірант кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Напрям науки — високоточна ГНСС-навігація і геодезія, ГНСС-технології визначення параметрів руху повір'яних суден.

ЗАСУХА Сергій Олексійович — начальник управління Національного космічного агентства України.

КОЗЛОВ Захар Володимирович — науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

КОНОРЄВ Борис Михайлович — професор кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського (ХАІ) (Харків), головний науковий співробітник Сертифікаційного центру АСУ Держцентрякості (Харків), доктор технічних наук.

Напрям науки — програмне забезпечення автоматизованих систем.

КОРЕПАНОВ Валерій Євгенович — заступник директора, завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, заслужений діяч науки й техніки України. Керівник напряму «Новітні технології» Державної програми дослідження в Антарктиці. Член редакційної колегії журналу «Космічна наука і технологія» та «Українського антарктичного журналу».

Напрям науки — дослідження електромагнітних полів у провідних середовищах.

КОЧУБЕЙ Галина Сергіївна — науковий співробітник відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

КРЮЧКОВ Євген Іванович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — інформатика.

ЛІЗУНОВ Георгій В'ячеславович — завідувач лабораторії Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — колективні процеси у геокосмічному середовищі, тропосферно-іоносферна взаємодія, супутникові експерименти.

ЛУКЕНЮК Адольф Антонович — заступник директора, завідувач відділу Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — бортові системи збирання та обробки інформації.

МІЛІНЕВСЬКИЙ Геннадій Петрович — завідувач відділу кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрям науки — фізика атмосфери та навколоzemного космосу.

ПРИЙМАК Анатолій Іванович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

СЕМЕНОВ Лев Петрович — начальник відділу Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — космічні технології, космічне матеріалознавство.

СКОРОХОД Тетяна Владиславівна — аспірант Інституту космічних досліджень Національної академії наук.

Напрям науки — інформатика.

ТОКМАК Микола Анатолійович — науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — механіка рідини, газу та плазми.

ФЕДОРОВ Олег Павлович — начальник управління космічних програм наукових досліджень Національного космічного агентства України, директор Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, завідувач лабораторії Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — матеріалознавство, космічні дослідження.

ФЕДОРОВСЬКИЙ Олександр Дмитрович — завідувач відділу системного аналізу Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

ХАРЧЕНКО В'ячеслав Сергійович — завідувач кафедри комп’ютерних систем і мереж Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського, Харків, заслужений винахідник України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — комп’ютерні системи і мережі.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — заступник директора з наукової роботи Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — космічна фізика, фізика плазми, теоретична фізика.

ЧЕРТКОВ Георгій Миколайович — директор Сертифікаційного центру АСУ Держцентрякості (Харків), заслужений машинобудівник України.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки.

Напрям науки — космічна фізика, космічна радіофізика, космічна екологія і космічна погода.

ШАМОТА Марія Олександрівна — випускниця радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, бакалавр прикладної фізики, магістр з радіофізики і електроніки, лауреат премії «Найкращий молодий науковець Харківщини».

Напрям науки — геофізика, дослідження геокосмосу, варіації геомагнітного поля.

ШЕЛКОВЕНКОВ Дмитро Олександрович — аспірант кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Напрям науки — високоточна мережева ГНСС-навігація і геодезія, попередня обробка ГНСС-спостережень.

ШОКАЛО Володимир Михайлович — завідувач кафедри основ радіотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Напрям науки — електродинаміка поширення радіохвиль, радіотехнічні системи передачі інформації.

ШУВАЛОВ Валентин Олексійович — завідувач відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, лауреат премії Національної академії наук України ім. М. К. Янгеля.

Напрям науки — механіка рідин, газу та плазми, фізика плазми, космічна фізика.