

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 13, № 4, 2007

KYIV

ЗМІСТ

Корепанов В. Є., Івченко В. М., Лізунов Г. В., Федоров О. П., Дудкін Ф. Л., Попель А. М. «Варіант» — перший міжнародний науковий експеримент на борту українського супутника

Корепанов В. Є., Крючков Є. І., Лізунов Г. В., Федоренко А. К., Дудкін Ф. Л. Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — перші результати

Крючков Є. І., Лізунов Г. В., Усенко П. О., Глемба В. Й. Систематизація та первинна обробка даних експерименту «Варіант» на супутнику «Січ-1М»

Станкевич С. А., Козлова А. О. Методика оцінювання біорізноманіття території за багатоспектральними космічними зображеннями середньої просторової розрізненості

CONTENTS

3 Korepanov V. Ye., Ivchenko V. M., Lizunov G. V., Fedorov O. P., Dudkin F. L., Popel' A. M. The first international scientific experiment onboard a Ukrainian satellite, Variant

10 Korepanov V. Ye., Kriuchkov Ye. I., Lizunov G. V., Fedorenko A. K., Dudkin F. L. The first results of the Variant experiment onboard the Sich-1M satellite

18 Kriuchkov Ye. I., Lizunov G. V., Usenko P. O., Hlemba V. Yo. Systematization and preliminary processing of data from the experiment Variant onboard the Sich-1M satellite

25 Stankevich S. A., Kozlova A. O. Biodiversity estimation technique using medium spatial resolution hyperspectral imagery

<i>Kortunov V., Dybska I., Proskura G., Trachsel T.</i> Accuracy Analysis of Strapdown Inertial Navigation Systems	40	<i>Кортунов В. І., Дибська І. Ю., Проскура Г. А., Трацсел Т.</i> Аналіз точності безплатформних інерціальних навігаційних систем
<i>Макаров А. Л., Овсяников В. В., Ольшевский А. Л., Попель В. М.</i> Исследование безэховости компактноантенного полигона в диапазоне сверхвысоких частот	49	<i>Makarov O. L., Ovsyanikov V. V., Ol'shevskiy O. L., Popel' V. M.</i> Research of the echoless of compactantenna range in the super highfrequency band
<i>Маслов В. П.</i> Перспективні матеріали і технології виготовлення полегшених дзеркал телескопів	54	<i>Maslov V. P.</i> Perspective materials and technologies for constructing light-weight telescope mirrors
<i>Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф.</i> Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений	62	<i>Grigorenko Ye. I., Emelyanov L.Ya., Pazura S. A., Chernogor L. F.</i> Ionospheric processes during the 7—10 November 2004 extreme geospace storm. 1. Observation results
<i>Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф.</i> Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение	77	<i>Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Chernogor L. F.</i> Ionospheric processes during the 7—10 November 2004 extreme geospace storm. 2. Simulation results and discussion
НАШІ АВТОРИ	91	OUR AUTHORS
НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ	94	NEWS FROM SPACE AGENCIES

УДК 550.38

**В. Є. Корепанов¹, В. М. Івченко², Г. В. Лізунов²,
О. П. Федоров³, Ф. Л. Дудкін¹, А. М. Попель⁴**

¹Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України
та Національного космічного агентства України

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

³Національне космічне агентство України, Київ

⁴Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

«Варіант» — перший міжнародний науковий експеримент на борту українського супутника

Надійшла до редакції 12.02.07

Космічний експеримент «Варіант», спрямований на дослідження електромагнітних та струмових збурень іоносферної плазми, було реалізовано на борту супутника дистанційного зондування Землі «Січ-1М», запущеного 24 грудня 2004 р. Це перший міжнародний науковий проект у галузі фундаментальних космічних досліджень, здійснений на платформі українського супутника та під егідою Національного космічного агентства України. Подано перелік запланованих наукових завдань проекту «Варіант», описано склад комплексу наукової апаратури, який працював на орбіті, та проілюстровано попередні результати вимірювань, здійснених на борту супутника.

ВСТУП

Рішенням Національного космічного агентства України від 18 вересня 1997 р. міжнародний науковий експеримент «Варіант» було введено в корисне навантаження супутника дистанційного зондування Землі «Січ-1М». До складу учасників міжнародного консорціуму, який розробив наукові завдання експерименту та підготував відповідний комплекс наукової апаратури (КНА), увійшли представники України, Великобританії, Польщі, Росії та Франції [3, 5]. Склад учасників та їхній внесок у реалізацію проекту описано в табл. 1.

Під час підготовки до запуску супутника «Січ-1М» склад КНА «Варіант» вдосконалювався та розширювався. На додаток до основного комплексу, описаного в роботі [5], в КНА було введено магнітометр постійного поля FZM. Та-

кож було проведено модернізацію радіолінії передачі телеметричних даних на Землю, що дозволило значно збільшити їхній обсяг на основі потужної системи збирання наукової інформації (СЗНІ). В результаті експеримент «Варіант» став серйозним науковим проектом, який через оригінальну постановку задачі та високі діагностичні можливості вимірювальної апаратури привернув увагу вітчизняних та закордонних спеціалістів.

НАУКОВІ ЗАВДАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ПРОЕКТУ «ВАРІАНТ»

Головною метою проекту «Варіант» було визначено систематичне спостереження динамічного відгуку іоносфери на впливи згори (сонячну та геомагнітну активність) і низу (метеорологічні,

Таблиця 1. Учасники проекту «Варіант»

Країна	Організація	Внесок у проект
Україна	Львівський центр інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ (ЛЦІКД) Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ ДКБ «Південне»	Прилади: хвильові зонди WZ, електричні зонди EZ, магнітометр FZM. Блок СЗНІ: VLF-2 Наземний сегмент збирання й архівування інформації Інсталяція КНА «Варіант» на борт «Січ-1М», приймання телеметричної інформації. Хвильові зонди WZ, циліндри Фарадея FC
Росія	Інститут космічних досліджень Російської академії наук (ИКИ РАН)	
Польща	Центр космічних досліджень Польської академії наук (CBK PAN)	Блок СЗНІ: VLF-1
Франція	Лабораторія фізики та хімії оточення (LPCE/CNRS)	Пояс Роговського ZF
Великобританія	Шеффільдський університет	Циліндри Фарадея FC

сейсмічні та техногенні процеси). Для її досягнення у програму експерименту введені такі конкретні завдання:

1) реєстрація глобального розподілу поздовжніх електричних струмів у полярній іоносфері, структури великомасштабних електричних полів та конвективних рухів іоносферної плазми, альвенівських хвильових структур у ділянках авроральних електроджетів, інших квазістаціонарних польових та струмових систем верхньої іоносфери;

2) зіставлення супутникових спостережень з даними зондування іоносфери радаром системи SuperDARN;

3) виявлення іоносферних явищ, зумовлених приземними джерелами енерговиділення, дослідження техногенного впливу на іоносферу;

4) дослідження електромагнітного відгуку іоносфери на коливання та хвилі нейтральної атмосфери. Комбіновані експерименти з наземними стендами акустичного та електромагнітного впливу на іоносферу.

Крім того, було запропоновано ряд методичних і технологічних експериментів:

5) відпрацювання методики прямого вимірювання густини просторового струму в космічній плазмі. Порівняння робочих характеристик різних типів давачів електричного струму;

6) розробка методики встановлення спектрального складу плазових хвиль в однопозиційних супутникових вимірюваннях;

7) моніторинг електричного потенціалу космічного апарата (КА);

8) активні експерименти з модифікацією параметрів іоносферної плазми потужним радіо-

випромінюванням радара дистанційного зондування Землі, встановленого на борту «Січ-1М».

Детальне обґрунтування наукових завдань проекту «Варіант» дано в роботі [5]. З урахуванням запланованих параметрів орбіти «Січ-1М» (висота 650 ± 30 км, нахил 82.5°), можливостей СЗНІ та радіолінії передачі даних на Землю були розроблені циклограми проведення спостережень [3].

В основу проекту «Варіант» було покладено цілий ряд нових ідей. Перш за все основними інформативними характеристиками іоносферного відгуку на впливи «згори» та «знизу» було обрано збурення електродинамічних параметрів іоносферної плазми. Це варіації електричного та магнітного полів, а також густини електричного струму, які є надійною ознакою не тільки плазових збурень, але й рухів нейтральної атмосфери на висотах динамо-шару [8]. У полярних широтах МГД-варіації є ознакою електродинамічного «каплінгу» з магнітосферою, зокрема проектування на іоносферу поля великомасштабної магнітосферної конвекції, збудження струмових систем Біркеланда (відповідальних за полярні сьйва) та ін.

Ще одна нова ідея проекту «Варіант» — розділення просторових і часових варіацій електромагнітних збурень за даними одноточкових вимірювань. Ідея полягає в тому, що згідно з рівнянням Максвелла спектральні параметри збурення ω , k певним чином пов'язані з амплітудами полів і струмів у плазмі (E_ω , B_ω , j_ω), причому в деяких випадках цей зв'язок досить простий. Отже, якщо електричне поле E , магнітне поле B та струм j реєструються на супут-

Таблиця 2. Комплекс наукової апаратури проекту «Варіант»

Прилад	Вимірювана величина	Діапазон частот	Чутливість на частоті 1 кГц	Маса, кг	Енергоспоживання, Вт
Електричні зонди EZ	електричний потенціал	0—200 кГц	10^{-5} В	0.16	0.1
Хвильові зонди WZ	магнітне поле	0.1 Гц — 40 кГц	10^{-5} нТл·Гц $^{-1/2}$	0.25	0.25
	густина просторового струму	0.1 Гц — 40 кГц	10^{-12} А·см $^{-2}$ Гц $^{-1/2}$		
	електричний потенціал	0.1 Гц — 40 кГц	10^{-5} В·Гц $^{-1/2}$		
Пояс Роговського ZF	густина просторового струму	0.1 Гц — 400 Гц	10^{-10} А·см $^{-2}$ Гц $^{-1/2}$ (на 100 Гц)	1.16	0.1
Циліндри Фарадея FC	густина просторового струму	0.1—1000 Гц	10^{-9} А·см $^{-2}$ Гц $^{-1/2}$	0.42	0.55
Магнітометр FZM	вектор геомагнітного поля	0—0.5 Гц	0.1 нТл	1.4	1.5

нику одночасно, то за їхніми значеннями можна розрахувати спектральний склад плазмових хвиль $k = k(\omega)$ [1, 2, 6, 12].

Тоді як методологію вимірювання електромагнітних полів у космічній плазмі добре відпрацьовано [7], пряма реєстрація густини електричного струму зустрічається зі значними труднощами. Фактично є тільки один апробований тип давача, який з деякими обмеженнями може бути зарахований до давачів струму — циліндр Фарадея, який використовувався в космічних експериментах раніше. Спеціальним завданням проекту «Варіант» стала розробка нових методів вимірювання електричного струму. Для його виконання до складу КНА було введено одразу три незалежні типи давачів: щільний зонд Ленгмюра (прилад WZ), пояс Роговського (ZF) та циліндр Фарадея (FC). Детальніше ці пристрої описано в роботі [9]. Якщо FC є широко відомим приладом, то прилади типу ZF, хоча й були випробувані раніше на борту ракет та КА, але надійних результатів вимірювання не дали [12]. А хвильовий зонд WZ взагалі є новою розробкою. Цей прилад створено у результаті тісної співпраці фахівців зі Львівського центру ІКД НАНУ-НКАУ та Інституту космічних досліджень Російської академії наук (ІКД РАН, Москва). Він дозволяє одночасно й незалежно вимірювати флуктуації густини струму у плазмі, магнітного поля та електричного потенціалу [10].

Для реєстрації вектора електричного поля на КА «Січ-1М» були встановлені чотири давачі електричного потенціалу EZ, які раніше були успішно використані в низці космічних експериментів [7]. Для реєстрації варіацій квазіпостій-

ного магнітного поля Землі створено ферозондовий магнітометр FZM [4], прототип якого успішно працював на борту КА «Інтербол-1». Сму-га частот FZM та індукційного магнітометра у складі WZ вибрана таким чином, щоб ці два прилади перекрили весь діапазон частот, починаючи від квазістаціонарного магнітного поля, і забезпечили високу чутливість у ділянці низьких частот. Увесь склад фізичних давачів КНА «Варіант» з їхніми основними параметрами наведено у табл. 2.

Перелічені давачі під'єднувались до системи збору та накопичення інформації VLF-2. Розташування всіх приладів на борту КА «Січ-1М» показано на рис. 1.

Під час підготовки проекту в кооперації з Інститутом технічної механіки НАНУ-НКАУ (м. Дніпропетровськ) на плазмодинамічному стенді інституту виконувалось фізичне моделювання умов роботи приладів «Варіант» в іоносфері. Досліджено параметри давачів густини просторового струму (WZ, RC, FC) та електричних зондів (EZ) і експериментально визначено їхні передавальні функції.

КОСМІЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

У 2004 р. льотний комплект КНА «Варіант» був переданий у ДКБ «Південне» (м. Дніпропетровськ) і встановлений на борту ка «Січ-1М», запуск якого відбувся 24 грудня 2004 р. з космодрому Плесецьк (Росія).

Через нештатне функціонування двигунів третього ступеня ракети-носія «Циклон» виведення КА «Січ-1М» на заплановану кругову

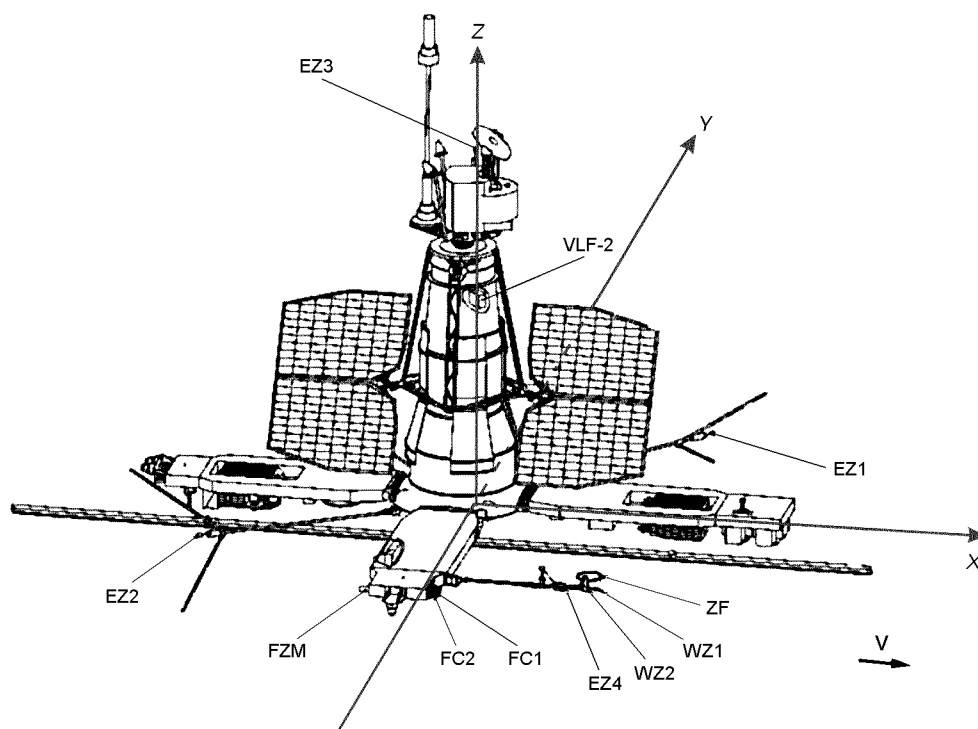


Рис. 1. Система координат супутника «Січ-1М» та розташування приладів проекту «Варіант»

орбіту висотою 650 км не відбулося. Замість цього супутник вийшов на еліптичну орбіту з апогеєм 650 км, перигеєм 283 км, нахилом 83° . Така орбіта могла б тільки додати науковій вартості експерименту «Варіант», оскільки жоден з функціонуючих нині наукових супутників не заходить так низько в іоносферу. А саме на висотах 200—300 км динаміка плазових збурень характеризується найбільшою енергетикою, і відгук на процеси, які відбуваються в нижній атмосфері та на поверхні Землі, найпомітніший. Спостереження з використанням потужних можливостей КНА «Варіант» могли б надати важливу, навіть унікальну інформацію про явища, дослідження яких було свого часу задеклароване в проекті «Попередження» [11].

На жаль, низькоперигейна орбіта «Січ-1М» утруднила стабілізацію КА за допомогою гравітаційної штанги. Найбільше від цього страждала робота сонячних батарей. У травні 2005 р. система бортового живлення КА «Січ-1М» вийшла з ладу, і супутник припинив активне функціонування.

Через нештатну орбіту та відсутність стабілізації супутника проект «Варіант» виявився фактично єдиним з запланованих на борту «Січ-1М» експериментів, проведення якого не втратило сенсу. Більше того, в аварійній ситуації, яка склалася на борту, деякий час працювали тільки давачі апаратури «Варіант», завдяки чому зберігалась надзвичайно висока електромагнітна чистота супутника.

В умовах жорсткого обмеження роботи бортових систем за період політичних випробувань «Січ-1М» проведено тільки 11 увімкнень КНА «Варіант», під час яких працювали лише декілька з передбачених циклограмою режимів вимірювань. Тривалість окремих увімкнень складала приблизно від двох до двадцяти хвилин. Через випадковість моментів вмикань, їхню невелику кількість та малу тривалість сеансів вимірювань основні завдання проекту «Варіант», пов'язані з моніторингом іоносферних параметрів, не могли бути здійснені. Але та частина завдань, які не вимагали неперервних та систематичних рядів спостережень, наприклад ви-

Таблиця 3. Пункти прийому та номери витків «скидання» інформації за проектом «Варіант»

№ витка	Дунайці (Україна)	Отрадное (Росія)	Обнінськ (Росія)
597	+		
1056	+		
1057	+		
1071		+	
1087			+
1109	+		+
1133	+	+	
1278	+		
1363		+	+
1385			+
1394	+		+

мірювання густини просторового струму, продовжувала виконуватись.

Низка подальших проблем виникла в процесі збору й розпакування переданих на Землю даних. Як показано в табл. 3, приймання даних від КНА «Варіант» інколи відбувалося на українських і на російських пунктах прийому інформації одночасно. При розшифровці даних виявилось, що через відсутність стабілізації положення КА файли супутникових спостережень містять багато збоїв, причому порушені заголовки та структура блоків даних. Це унеможливило використання стандартного програмного забезпечення для виділення показів вимірювальних каналів апаратури «Варіант» з телеметричних кадрів «Січ-1М». Треба було провести корекцію збійних бітів, після цього дані спостережень необхідно було певним чином систематизувати, додавши інформацію про поточний час, місце знаходження, орієнтацію супутника «Січ-1М» та ін. Оскільки супутник неконтрольовано обертався навколо своїх осей, його орієнтацію потрібно було додатково розрахувати за даними бортового магнітометра та давача Сонця.

В результаті кропіткої роботи, проведеної в Інституті космічних досліджень НАНУ-НКАУ та Львівському центрі ІКД НАНУ-НКАУ у 2005 і 2006 рр., з уривків пошкоджених файлів удалося виділити інформативні частини даних КНА «Варіант», здійснити їхню первинну обробку та верифікацію з використанням калібрувальних сигналів. При цьому дублювання приймання деяких телеметричних сеансів на двох пунктах (табл. 3) сприяло зменшенню збійних ділянок

даних. На сьогодні у форматі, придатному для проведення подальшого наукового аналізу, створено каталог даних проекту «Варіант», який знаходиться в ІКД НАНУ-НКАУ.

Як приклад розглянемо результати вимірювань складової B_x магнітного поля давачем WZ1 на витку 1057 (рис. 2). В цей час КА «Січ-1М» знаходився на висоті близько 360 км над Тихим океаном поблизу екватора. На цій ділянці фоновий рівень сигналів досить низький, що дало можливість оцінити роботу давачів у нижній частині їхніх динамічних діапазонів. Спектри на рис. 2, б є яскравою ілюстрацією динамічного відгуку іоносфери на вплив джерел різної природи. Вузька горизонтальна спектральна лінія на частоті 9 кГц має техногенне походження, це сигнал навігаційного ДНЧ-передавача. Три майже вертикальні дуги на проміжку часу 0.6—1 с — електронні свисти, які виникають під час розряду блискавки на тропосферних висотах і проникають в іоносферу знизу. Горизонтальна дифузійна смуга в ділянці частоти 5 кГц — нижньогібридний шум від локальних іоносферних джерел. Нарешті, вертикальні смуги в нижній частині спектру — плазмосферні ННЧ-шипіння, що надходять згори. Все це — характерні радіоemisії іоносфери. Їх можна розглядати як свого роду калібрувальні чи «еталонні» сигнали, реєстрація яких з борту супутника підтверджує правильність роботи КНА «Варіант».

ВИСНОВКИ

Протягом декількох років міжнародним колективом вчених Великобританії, Польщі, Франції, Росії та України, вперше під науковим керівництвом України, створено унікальний бортовий комплекс наукової апаратури «Варіант», обґрунтовано оригінальну постановку наукових завдань та розроблено відповідне програмне забезпечення. Весь цикл заводських та передстартових випробувань бортового комплексу пройдено практично без зауважень. За період політних випробувань супутника «Січ-1М» здійснено серію вмикань КНА «Варіант», під час яких отримано та передано на Землю близько 200 Мбайт наукової інформації.

Незважаючи на часткову невдачу при запуску КА «Січ-1М», попередні результати обробки да-

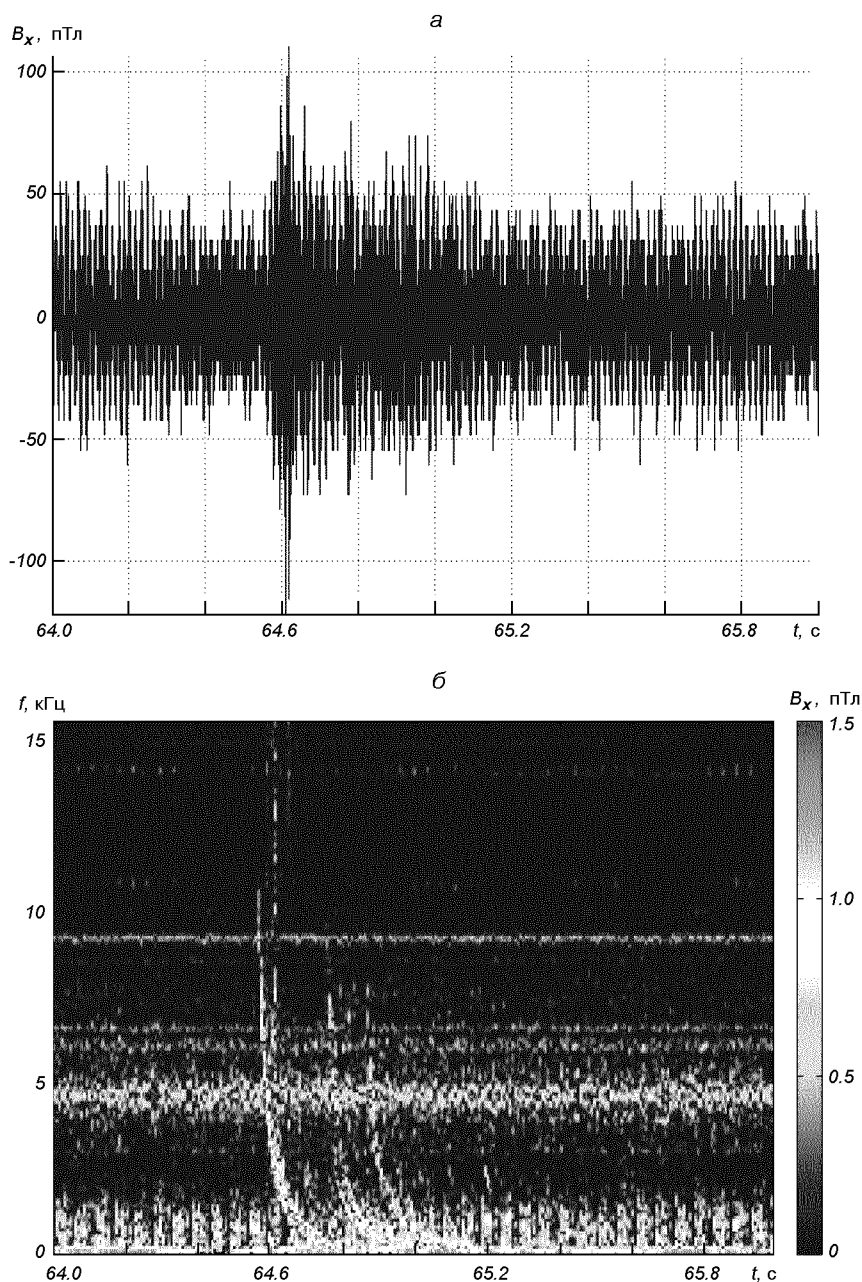


Рис. 2. Складова B_x магнітного поля на витку 1057: a — вихідний відрізок даних, b — динамічний спектр Фур'є для того ж відрізка даних

них проекту «Варіант» показують, що деякі з них мають пріоритетний характер. Так, вперше у світовій практиці космічних досліджень використано на борту супутника новий комбінований давач електромагнітних параметрів плазми —

хвильовий зонд — і експериментально підтверджено ефективність його роботи. Не викликає сумніву, що отримані дані мають також і велику наукову цінність, особливо результати порівняльних вимірювань густини просторового стру-

му за трьома методиками, проведених також уперше в світі. На наш погляд, проект «Варіант» може бути завершено саме в цій частині, яка не потребує аналізу довгих рядів систематичних спостережень іоносфери.

Підтвердження успішного функціонування датчиків КНА «Варіант» у космосі має велике значення для планування й реалізації наступних космічних експериментів за національною програмою («Іоносат») та в міжнародних проектах («Обстановка», «Спектр-Р», «Фобос-Грунт» та ін).

Робота була підтримана контрактами з НКАУ № 1-02/03 та 1-05/03.

1. Вайсберг О. Л. К вопросу об определении пространственного масштаба в движущейся плазме // Космич. исслед.—1985.—23, № 6.—С. 947—949.
2. Вайсберг О. Л., Климов С. И., Корепанов В. Е. Изменение плотности тока на ударной волне щелевым зондом Ленгмюра // Космич. исслед.—1989.—27, № 3.—С. 461—465.
3. Корепанов В. Е., Негода А. А., Ивченко В. Н. и др. Космический научный эксперимент «Вариант» на борту ИСЗ «Січ-1М» // Сб. тр. Первой украин. конф. по перспективным космическим исследованиям (Киев, 8—10 октября 2001 г.). — Киев, 2001.—С. 51—58.
4. Корепанов В., Михайлова С., Ноздрачев М. Температурный режим на борту КА «Интербол-1» // Космична наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 112—116.
5. Корепанов В., Негода О., Лізунов Г. та ін. Проект «Варіант»: вимірювання електромагнітних полів та електричних струмів іоносферної плазми на супутнику «Січ-1М» // Космична наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 3—8.
6. Романов С. А., Климов С. И., Мироненко П. А. Пространственные параметры и дисперсионные соотношения для УНЧ волн в околоземной ударной волне по результатам измерений на борту спутника «Прогноз-10» // Космич. исслед. 1991.—28, № 6.—С. 903—918.
7. Сопрунук П. М., Климов С. И., Корепанов В. Е.

Электрические поля в космической плазме. — Киев: Наук. думка, 1994.—190 с.

8. 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.
9. Korepanov V., Dudkin F. Comparative analysis of current density meters operating in space plasma // Adv. Space Res.—1999.—23, N 8.—P. 1541—1544.
10. Korepanov V., Dudkin F., Klimov S. Wave activity investigations with new wave probe // Abstracts of the 31st Scientific Assembly of COSPAR. — Birmingham, England, 1996.—P. 216.
11. Korepanov V., Negoda A., Fedorov O. Warning mission — present state and development // Atmospheric and Ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. — Tokyo, Terra Sci. Publ. Co., 1999.—P. 711—716.
12. Krasnosel'skikh V., Natanzon A., Reznikov A. et al. Current measurements in space plasmas and the problem of separating between spatial and temporal variations in the field of a plane electromagnetic wave // Adv. Space Res.—1991.—11, N 9.—P. 37—40.

THE FIRST INTERNATIONAL SCIENTIFIC EXPERIMENT ONBOARD A UKRAINIAN SATELLITE, VARIANT

*V. Ye. Korepanov, V. M. Ivchenko, G. V. Lizunov,
O. P. Fedorov, F. L. Dudkin, A. M. Popel'*

The space experiment VARIANT was realized onboard the Ukrainian remote sensing satellite SICH-1M launched on 24 December 2004. The main scientific task of the experiment was to study electromagnetic and current disturbances in the ionospheric plasma. The space experiment VARIANT is the first international project in the area of fundamental space researches realized onboard a Ukrainian satellite and supported by the National Space Agency of Ukraine. The main results obtained in the experiment VARIANT are discussed. The composition of scientific payload operated in space is described and some preliminary processing results of the onboard measurements are illustrated.

УДК 550.38

В. Є. Корепанов¹, Є. І. Крючков², Г. В. Лізунов²,
А. К. Федоренко², Ф. Л. Дудкін¹

¹Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України

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

Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — перші результати

Надійшла до редакції 12.02.07

Експеримент «Варіант» на борту супутника «Січ-1М» — це міжнародний науковий проект з метою дослідження тонкої структури електричних струмів і електромагнітних полів в іоносферній плазмі. В комплект наукової апаратури «Варіант» входять три типи інструментів для реєстрації густини електричного струму — щілинний зонд Ленгмюра, пояс Роговського та циліндр Фарадея, а також давачі електричного та магнітного полів, які містять електричні зонди, індукційні та ферозондовий магнітометри. Супутник «Січ-1М» було запущено 24 грудня 2004 р. на полярну орбіту з нахилом 83°, апогеєм 650 км, перигеєм 283 км. Під час політних випробувань (перша половина 2005р.) відбулася серія ввімкнень комплексу наукової апаратури «Варіант». Подано перші результати експериментів.

ВСТУП

Експеримент «Варіант» на борту супутника «Січ-1М» є оригінальним і в деяких аспектах унікальним. Детальний опис комплексу наукової апаратури (КНА) і його вимірювальних каналів наведений у роботах [4, 6] та в статтях даного випуску журналу [5, 7]. Інтерес до проекту «Варіант» викликаний низкою причин, у тому числі і таких, що не були передбачені при підготовці проекту:

- Супутник «Січ-1М» було виведено на орбіту з низьким перигеєм — близько 280 км. Експериментальних даних для таких висот існує мало, оскільки запуск більшості наукових супутників здійснювався на значно вищій орбіті (для порівняння: висота орбіти супутника DEMETER, наукові завдання та можливість КНА якого подібні до задекларованих в проекті «Варіант», складає 710 км).

- У зв'язку з аварійною ситуацією, що склалася на «Січ-1М», впродовж деякого часу на борту були ввімкнені лише давачі КНА «Варіант», в результаті чого було збережено несподівано високу електромагнітну чистоту оточення супутника.

Ще одна причина інтересу до експерименту «Варіант» пов'язана з багатокomпонентністю проведених електромагнітних вимірювань. Синхронно реєструвались: три складові електричного поля, дві складові змінного магнітного поля, три складові квазіпостійного магнітного поля та дві складові густини електричного струму. Такий набір давачів створив можливість для вимірювання спектрального складу плазмових збурень за даними тільки цих спостережень, без додаткових теоретичних припущень.

Специфіка супутникових експериментів полягає в тому, що вимірювана частота сигналу зміщена внаслідок ефекту Доплера: $\omega' = \omega -$

$k_x V_s$, де ω — частота в нерухомій системі відліку, k_x — складова хвильового вектора вздовж траєкторії супутника, $V_s \approx 8$ км/с — орбітальна швидкість супутника. Оскільки k_x невідоме, то в одноточкових супутникових спостереженнях без додаткових припущень, взагалі кажучи, неможливо встановити ні частоту хвилі в нерухомій системі відліку, ні хвильовий вектор. Ця проблема відома як проблема відокремлення часових та просторових варіацій електромагнітних полів. О. Л. Вайсберг вперше звернув увагу на те, що спектральні параметри збурення $\{\omega, k\}$ в нерухомій системі відліку можна обчислити при умові одночасного вимірювання електромагнітного поля і густини просторового струму тільки на одному космічному апараті (КА) [2, 3, 11, 12]. Спеціальним завданням проекту «Варіант» було детальне дослідження такої можливості. Це одна з причин, чому вимірювання густини просторового струму в проекті «Варіант» реалізоване при паралельній роботі трьох незалежно працюючих давачів — щільного зонда Ленгмюра (WZ), пояса Роговського (ZF) та циліндра Фарадея (FC).

У роботі подані перші наукові результати проекту. Основну увагу зосереджено на аналізі сигналів наднизьких частот (ННЧ, 0.03—3 кГц) та дуже низьких частот (ДНЧ, 3—30 кГц).

СПОСТЕРЕЖУВАНІ СПЕКТРИ ІОНОСФЕРНИХ ЕМІСІЙ ННЧ- ТА ДНЧ-ДІАПАЗОНУ

Виток 1363. Параметри ділянки орбіти супутника, де проводились вимірювання, наведені в табл. 1. Під час вимірювань магнітна широта змінювалась від 6.12° до 8.69° , магнітна довгота — від 122.1° до 122.8° . Частота опитування всіх давачів складала 31250 Гц. Як видно з рис. 1, у вимірювальних каналах $B_{x\sim}$, $E_{3\sim}$, J_{yz} спостерігаються ті самі сигнали: 1) електронний свист (спадаюча дуга в проміжку часу $t = 2.2...3.2$ с), який обрізається знизу поблизу протонної гірчастоти 500 Гц; 2) ДНЧ-шипіння — дифузійна смуга в ділянці нижньогібридної частоти 5 кГц; 3) шумова смуга невідомої природи зі змінною в часі частотою в цій же ділянці спектру; 4) сигнали від ДНЧ-передавачів — вузька спектральна лінія на 9 кГц та штрихова лінія на частоті 3 кГц.

Детальніше структуру свистового сигналу подано на рис. 1, 2. Virізнюються вузькосмугові свисти спадаючої частоти: прямий свист з малою дисперсією (в інтервалі 2.2—2.5 с), який прийшов на висоти спостереження знизу, і каналізований свист (в інтервалі 2.3—3.5 с), який повернувся згори після відбиття у плазмосфері. Відповідно каналізований свист характеризується більшою дисперсією, ніж прямий. Видно також, що каналізований свист, на відміну від прямого, обрізається знизу приблизно на протонній гірчастоті.

Три з чотирьох описаних типів сигналів — свисти, шипіння та сигнали ДНЧ-передавачів — є характерними радіоemisіями, які спостерігаються в іоносфері [1, 8]. Їхня реєстрація є підтвердженням коректності роботи КНА «Варіант».

На рис. 2 подано дані каналу $E_{3\sim}$ для іншого інтервалу часу. Виділяються ДНЧ-шипіння (між 4 і 5 кГц), шумова смуга зі зростаючою частотою і сигнал ДНЧ-передавача (штрихова лінія на 3 кГц). Протягом 6 с послідовно реєструються декілька електронних свистів, причому їхні спектри характеризуються певною тонкою структурою. Першими в точку спостереження приходять короткі прямі свисти, потім відбиті у верхній іоносфері довгі свисти.

Таблиця 1. Місцезнаходження супутника «Січ-1М» під час вимірювань на витках 1278 і 1363

Виток	Дата, березень 2005 р.	UT	h , км	φ	λ
1278	17	$10^h 52^m 49^s$			
		10 52 56	566.6	-42.05	54.29
		10 53 16	569.0	-43.27	54.51
		10 53 36	571.4	-44.49	54.73
		10 53 56	573.7	-45.71	54.97
		10 54 16	575.9	-46.92	55.22
		10 54 36	578.1	-48.14	55.49
		10 54 56	580.2	-49.35	55.77
		10 55 16	582.2	-50.56	56.08
		10 55 36	584.2	-51.77	56.40
		10 55 56	586.1	-52.97	56.74
		10 56 16	587.9	-54.17	57.11
		10 56 36	589.7	-55.37	57.51
		10 56 56	591.4	-56.57	57.93
		10 57 16	593.0	-57.77	58.39
1363	22	02 13 06			
		02 13 15	343.8	11.77	48.01
		02 13 35	340.8	13.09	48.11
		02 13 55	337.9	14.40	48.20
		02 14 02			

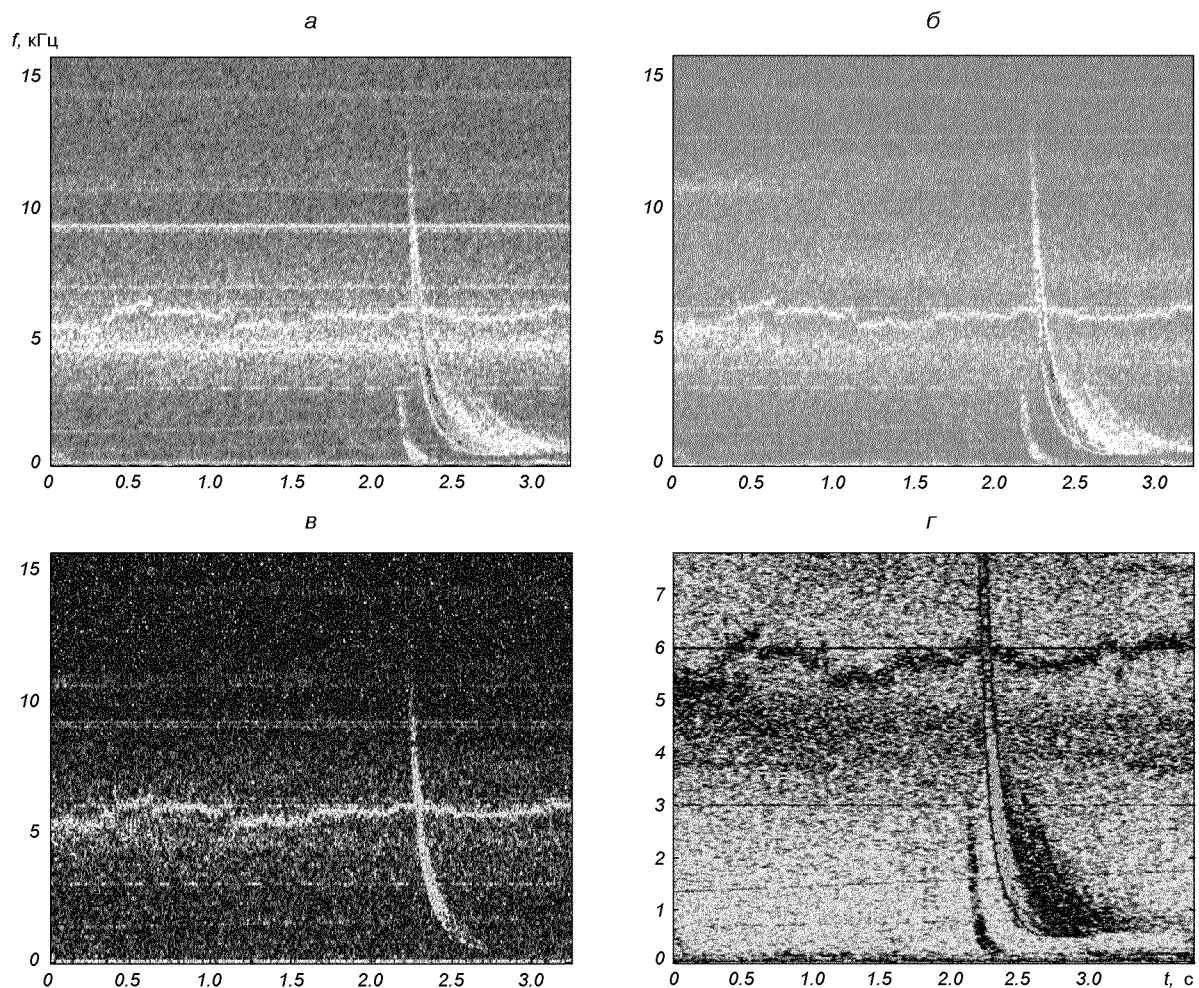


Рис. 1. Динамічні спектри Фур'є на витку 1363 (відліки 980000—1080000): *а* — складова магнітного поля B_x , *б* — складова електричного поля E_z , *в* — складова електричного струму J_z , *г* — складова електричного поля E_z після усереднення по двох точках

Виток 1278. Параметри орбіти супутника наведені в табл. 1. Значення магнітної широти і магнітної довготи становили -47.87° , 117.8° на початку вимірювань і -63.72° , 114.8° наприкінці вимірювань. Частота опитування давачів складала 5000 Гц. На рис. 3 показано ННЧ-шипіння, зареєстроване в каналі E_{3-} . Як і на спектрах довгих свистів (рис. 1 і 2), смуга ННЧ-шипіння обрізається знизу поблизу 500 Гц. Впродовж 240 с вимірювань характер шипіння плавно змінюється: нижній край стає більш дифузним і опускається по осі частот. При цьому збільшувалась висота орбіти і географічна широта супутника. Лінії, що утворюють трикутники у

верхній частині спектрів, є проявом ефекту накладання спектрів при виході частоти сигналу за межі частоти Найквіста.

АНАЛІЗ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРОННОГО СВИСТУ

Свистовий сигнал добре підходить для апробації методики визначення спектрального складу хвиль $\{\omega, k\}$, про яку йшлося вище. Фазова швидкість свисту набагато більша від швидкості супутника, тому ефектом Доплера в даному випадку можна знехтувати, і частота сигналу

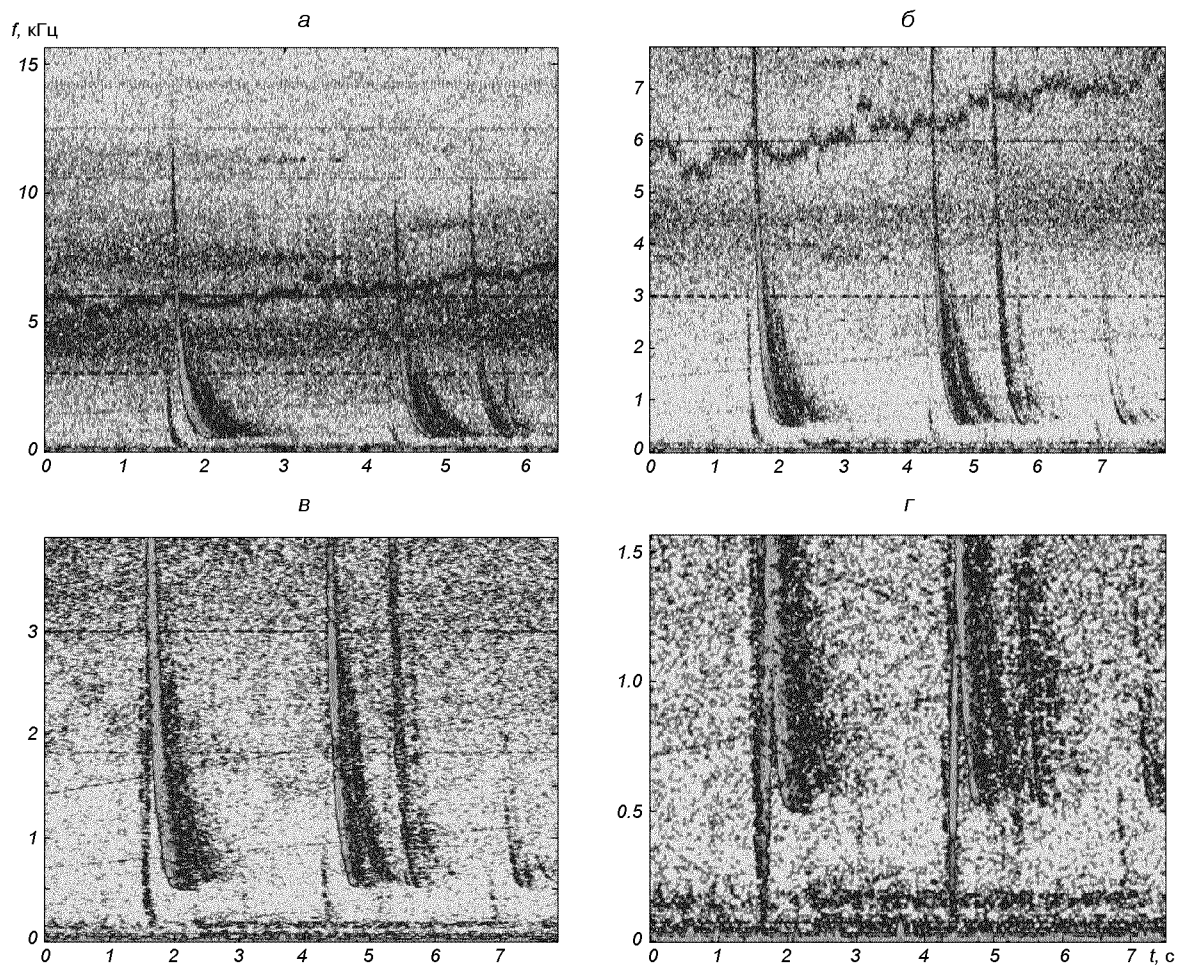


Рис. 2. Динамічні спектри E_z на витку 1363 (відліки 1000000—1200000): *a* — без усереднення, *б* — після усереднення по двох точках, *в* — після усереднення по чотирьох точках, *г* — після усереднення по десяти точках

$\omega' \approx \omega$ буде приблизно такою ж, як і в нерухомій системі координат. Використовуючи дисперсійне співвідношення для свистових хвиль, можна розрахувати хвильове число k , що відповідає даній частоті ω . Необхідні для цього параметри плазми можна визначити за моделлю іоносфери.

З іншого боку, спектральні параметри $\{\omega, k\}$ за допомогою рівнянь Максвелла можуть бути виведені через амплітуди полів і струмів $\{E_\omega, B_\omega, j_\omega\}$, причому для свистової хвилі цей зв'язок є досить простим. На основі цих міркувань було досліджено сигнал, що спостерігався на витку 1363 одночасно у вимірювальних каналах елек-

тричного поля $E_{3\omega}$, магнітного поля $B_{x\omega}$ та ортогональної складової струму J_{yz} (рис. 4). Цей сигнал також реєструвався давачем ZF (пояс Роговського), але оскільки верхня частота зрізу останнього приладу становила 400 Гц, відновити повну амплітуду струму, який вимірювався приладом ZF, було неможливо. Динамічні спектри сигналів, зареєстрованих вказаними приладами, подані на рис. 4 зліва. Для визначення амплітуди свисту була застосована смугова фільтрація з шириною смуги пропускання 100 Гц. Ми проаналізували декілька точок на осі частот; розглянемо результати, отримані при $f = 4$ кГц. Вигляд відфільтрованого в інтервалі

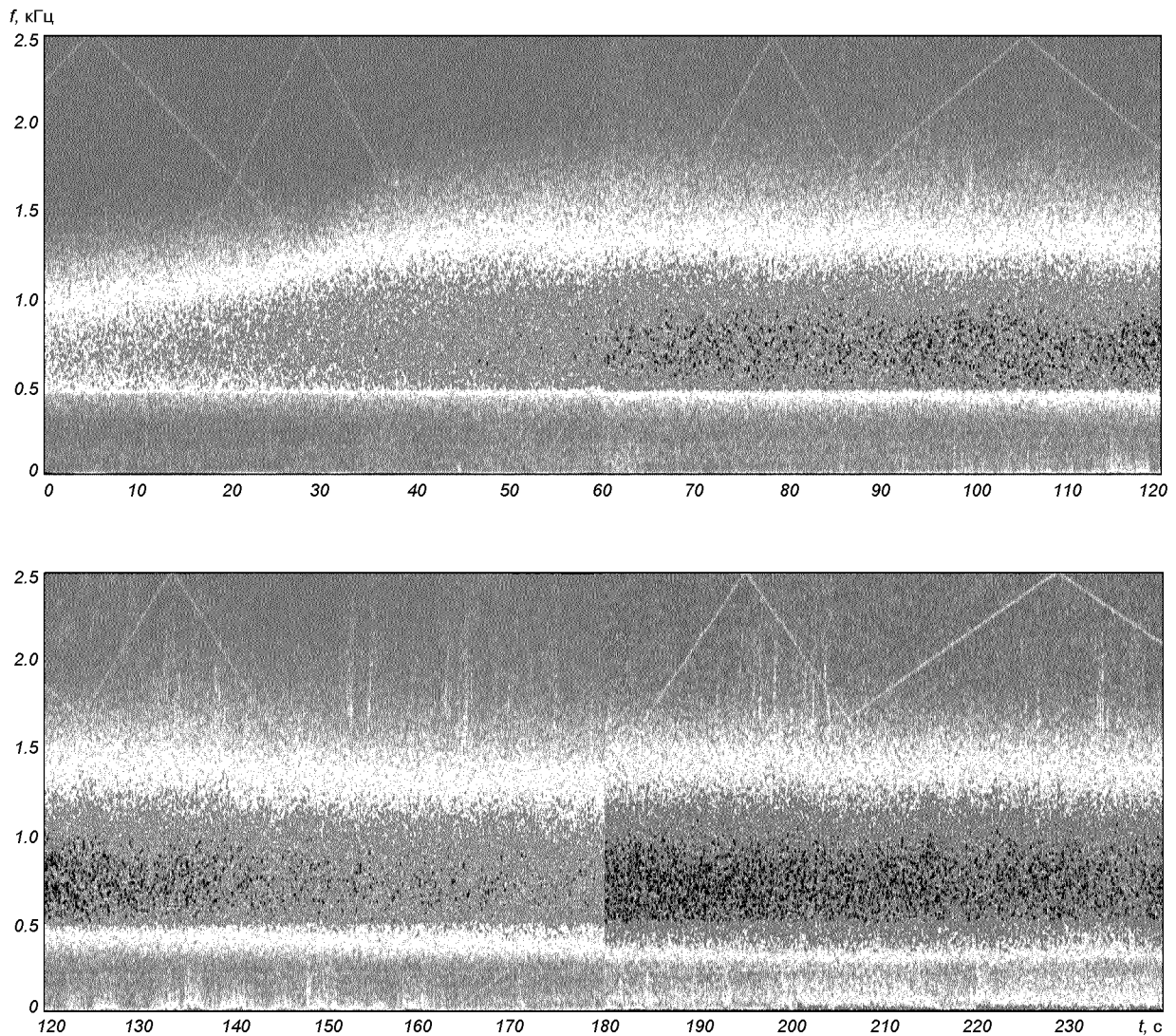


Рис. 3. Зміна частоти обрізання смуги ННЧ-шипіння на витку 1278 протягом 240-с сеансу вимірювань

4 ± 0.1 кГц сигналу показано на рис. 4 справа. Виміряні значення амплітуди електричної, магнітної і струмової складових свисту подані в табл. 2.

Таблиця 2. Амплітуди свистового сигналу в різних вимірюваних складових

f	E_z	B_x	j_{yz}
4000 Гц	0.4 мВ/м	0.1 нТл	0.4 мкА/м ²

Перейдемо до обчислення хвильового числа. Виходячи з характеру спектру спостережуваного свисту, можна припустити, що хвиля є квазі-поздовжньою: $\cos\theta \sim 1$, де θ — кут між хвильовим вектором і напрямом магнітного поля. Дисперсійне рівняння в цьому випадку має вигляд [1]

$$\omega = \frac{\omega_c}{\omega\omega_p^2} c^2 k^2 \cos\theta \approx \frac{\omega_c}{\omega\omega_p^2} c^2 k^2, \quad (1)$$

де ω_p — ленгмюрівська, ω_c — електронна циклотронна частоти. Знаходячи ці величини з

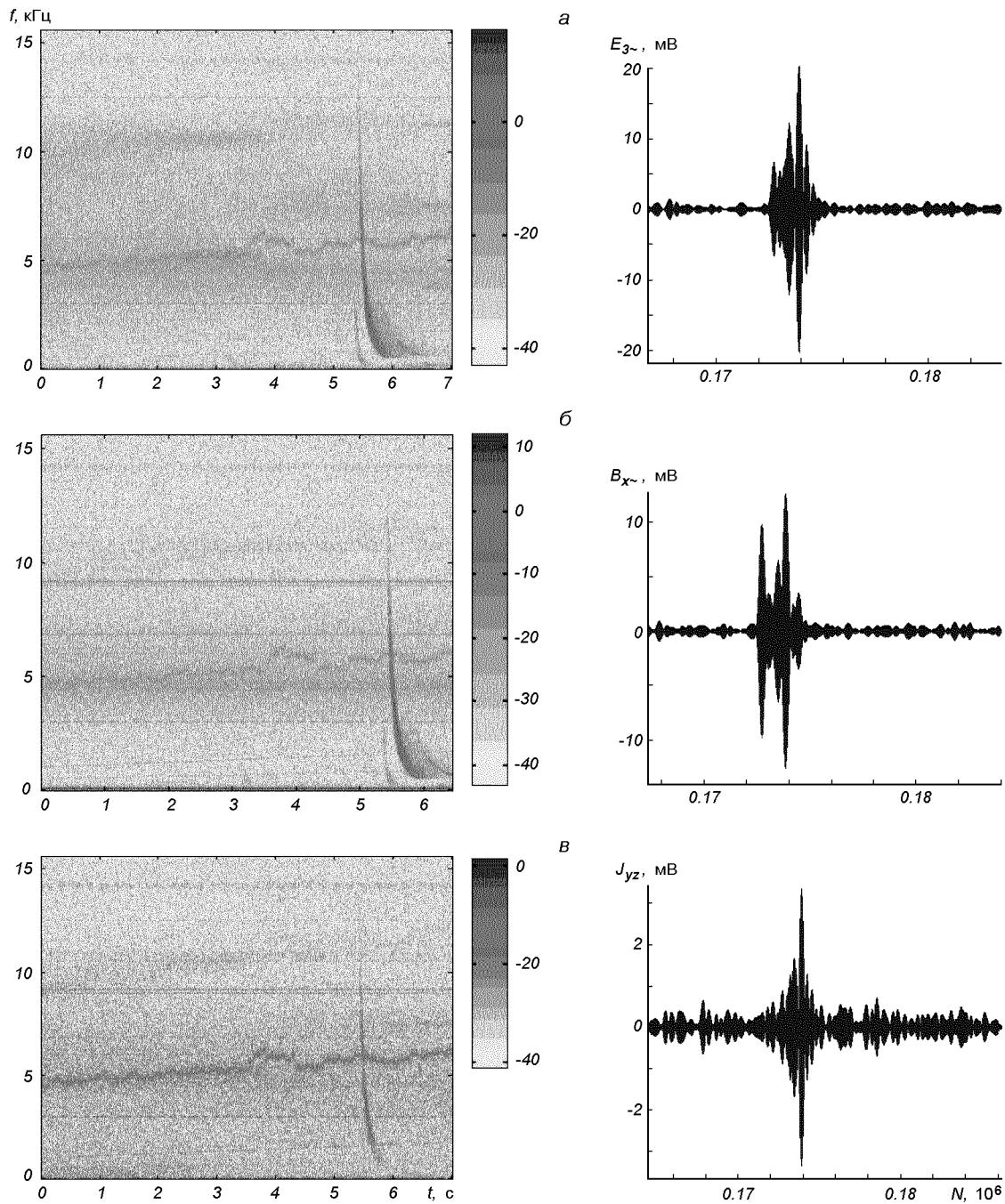


Рис. 4. Динамічні спектри $E_{3\sim}$, $B_{x\sim}$ та J_{yz} (зліва) та відфільтровані на частоті 4 кГц вихідні сигнали у інструментальних одиницях (справа)

моделі іоносфери MSIS-90 для даного положення супутника ($\omega_p \approx 3 \cdot 10^7$ рад/с, $\omega_c \approx 5 \cdot 10^6$ рад/с), за формулою (1) обчислюємо показник заломлення і довжину свистої хвилі на частоті $f = 4$ кГц:

$$n = ck/\omega \approx 100.6, \quad \lambda = 745 \text{ м.} \quad (2)$$

З іншого боку, ці ж дисперсійні характеристики можуть бути обчислені за вимірними амплітудами сигналу. З рівнянь Максвелла одержуємо

$$\mathbf{B}_\omega = \frac{1}{c} \mathbf{n} \times \mathbf{E}_\omega, \quad (3)$$

$$\mathbf{j}_\omega = i\epsilon_0 \omega n^2 \mathbf{E}_\omega. \quad (4)$$

Підставляючи у вираз (3) значення з табл. 2, знаходимо

$$n = cB/E = 75, \quad \lambda = 1000 \text{ м,} \quad (5)$$

що дуже наближається до теоретичної оцінки (2). Більше того, розраховане за виразом (4) значення струму

$$j = 0.5 \text{ мкА/м}^2 \quad (6)$$

добре узгоджується зі значенням 0.4 мкА/м^2 , зареєстрованим безпосередньо щілинним зондом Ленгмюра, що входить до складу приладу WZ (див. табл. 2).

ВИСНОВКИ

Для апробації методики встановлення спектрального складу хвиль в одноточкових супутникових вимірюваннях було проаналізовано спостереження електронних свистів на витку 1363. На основі реєстрації складових електричного поля, магнітної індукції та густини електричного струму було встановлено хвильове число свистої хвилі.

Те саме хвильове число було обчислено теоретично за дисперсійним співвідношенням свистових хвиль з використанням моделі іоносфери. Теоретична і експериментальна оцінки добре узгоджуються між собою, що є прямим підтвердженням можливості обчислення спектральних параметрів збурень за величинами полів і густини струмів у плазмі. Ці результати також вказують на коректність роботи давачів КНА «Варіант» — приладів EZ та WZ. Тим самим ми

підтверджуємо працездатність щілинного зонду Ленгмюра, який входить до WZ; підкреслимо, що WZ — принципово новий тип давача, створений учасниками експерименту «Варіант» [10], не апробований раніше в космосі.

В експерименті «Варіант» спостерігались електромагнітні випромінювання різних діапазонів частот. Частина з них є характерними емісіями іоносфери; їхня реєстрація є ще одним підтвердженням правильності роботи КНА. Деякі спектральні структури є оригінальними і потребують подальшої теоретичної інтерпретації. На наш погляд, найбільш цікавими є: вузькосмугове ДНЧ-випромінювання зі зростаючою в часі частотою (рис. 1, з та рис. 2, а, б), різкий край (обрізання) довгих свистів по частоті знизу (рис. 1, 2) та різке обрізання ННЧ-шипіння на частоті близько 500 Гц (рис. 3).

Підкреслимо, що безпосередня реєстрація густини електричного струму в космічній плазмі є складним науково-технічним завданням [10]. Ще в 1970-х рр. Ф. Мозер запропонував прилад для вимірювання цієї величини — щілинний зонд Ленгмюра [9]. Дотепер його застосування на борту ракет та супутників або зовсім не дало вірогідних результатів [9], або дозволило зробити тільки якісні висновки [3]. Тому розробка методики, яка дозволила не тільки виявляти наявність струму на якісному рівні, а й вимірювати його величину з необхідною точністю, є вагомим результатом проекту «Варіант», отриманим уперше в практиці експериментальних космічних досліджень.

Робота була підтримана контрактами з НКАУ № 1-02/03 та 1-05/03.

1. Альперт Я. Л. Волны и искусственные тела в приземной плазме. — М.: Наука, 1974.—214 с.
2. Вайсберг О. Л. К определению пространственного масштаба в подвижной системе координат // Космич. исслед.—1985.—22, № 6.—С. 947—949.
3. Вайсберг О. Л., Климов С. И., Корепанов В. Е. Измерение плотности тока на ударной волне щелевым зондом Ленгмюра // Космич. исслед.—1989.—27, № 3.—С. 461—464.
4. Корепанов В. Е., Негода А. А., Ивченко В. Н. и др. Космический научный эксперимент «Вариант» на борту ИСЗ «Січ-1М» // Сб. тр. Первой украин. конф. по перспективным космическим исследованиям (Киев, 8—10 октября 2001 г.). — Киев, 2001.—С. 51—58.
5. Корепанов В. Є., Івченко В. М., Лізунов Г. В. та ін. «Варіант» — перший міжнародний науковий експери-

- мент на борту українського супутника // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 3—9.
6. Корепанов В., Негода О., Лізунов Г. та ін. Проект «Варіант»: вимірювання електромагнітних полів та електричних струмів іоносферної плазми на супутнику «Січ-1М» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 3—8.
 7. Крючков Є. І., Лізунов Г. В., Усенко П. О., Глемба В. Й. Систематизація та первинна обробка даних експерименту «Варіант» на супутнику «Січ-1М» // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 18—24.
 8. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. — М.: Наука, 1985.—224 с.
 9. Bering E. A., Kelley M. C., Mozer F. C., Fahleson U. V. Theory and operation of the Split Langmuir Probe // Planet. Space Sci.—1973.—21, N 11.—P. 1983.
 10. Korepanov V., Dudkin F. Comparative analysis of current density meters operating in space plasma // Adv. Space Res.—1999.—23, N 8.—P. 1541—1544.
 11. Krasnosel'skikh V., Natanzon A., Reznikov A., et al. Current Measurements in Space Plasmas and the Problem of Separating between Spatial and Temporal Variations in the Field of a Plane Electromagnetic Wave // Adv. Space Res.—1991.—11, N 9.—P. 37—40.
 12. Santolik O., Parrot M. Propagation analysis of electro-

magnetic waves between helium and proton gyrofrequencies in the low-altitude auroral zone // J. Geophys. Res.—1998.—103, N A9.—P. 20469—20480.

THE FIRST RESULTS OF THE VARIANT EXPERIMENT ONBOARD THE SICH-1M SATELLITE

*V. Ye. Korepanov, Ye. I. Kriuchkov, G. V. Lizunov,
A. K. Fedorenko, F. L. Dudkin*

The Variant experiment onboard the Sich-1M satellite is an international scientific project for studying the fine structure of electric currents and electromagnetic fields in the ionospheric plasma. The Variant scientific payload includes three types of instruments for the detection of spatial electric current density, namely, split Langmuir probe, Rogovsky coil and Faraday cup as well as sensors for measurements of electric and magnetic fields, namely, electric probes, induction coil and flux-gate magnetometers. The Sich-1M satellite was launched on 24 December 2004 into the polar orbit with an inclination of 83°, an apogee of 650 km, and a perigee of 283 km. During flight tests (the first half of 2005) a set of measurement seances with the Variant payload was realized. The first results of the performed experiments are presented.

УДК 550.38

Є. І. Крючков¹, Г. В. Лізунов¹, П. О. Усенко¹, В. Й. Глемба²

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

²Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України

Систематизація та первинна обробка даних експерименту «Варіант» на супутнику «Січ-1М»

Надійшла до редакції 12.02.07

Описано вимірювальні канали апаратури «Варіант» на супутнику «Січ-1М», призначені для реєстрації трьох складових електричного поля, двох складових змінного магнітного поля, трьох складових квазіпостійного магнітного поля та двох складових густини електричного струму в іоносфері. Під час політних випробувань «Січ-1М» (перша половина 2005 р.) було одержано та передано на Землю близько 230 мегабайт даних експерименту «Варіант». Подаються результати їхньої попередньої обробки, систематизації та верифікації за допомогою калібрувальних сигналів.

ВСТУП

Проект «Варіант» на борту українського супутника «Січ-1М», запущеного 24 грудня 2004 р., було реалізовано у першому півріччі 2005 р. Через нештатну орбіту та відсутність стабілізації супутника проект «Варіант» виявився фактично єдиним із запланованих експериментів, здійснення якого не втратило сенсу. За період політних випробувань «Січ-1М» було проведено серію вмикань комплексу наукової апаратури (КНА) «Варіант», який працював лише в кількох з передбачених для цієї апаратури режимів вимірювань. Тривалість окремих сеансів вимірювань складала від 1 до 21 хв. Всі ці обмеження викликані утрудненням обміну даними з супутником, який неконтрольовано обертався.

Передача даних від КНА «Варіант» на Землю здійснювалась бортовою радіолінією БИС-С у діапазоні частот 8.2 ГГц. Наукова інформація була отримана цим каналом зв'язку у кількох пунктах України й Росії, в результаті чого дані проекту «Варіант» виявилися розпорошеними серед ряду організацій та установ: ЦПОСІ та КНП (м. Дунаївці), Державне конструкторське бюро «Південне» (м. Дніпропетровськ), Інститут

космічних досліджень Російської академії наук (м. Москва), пункти приймання у м. Обнінськ та м. Отрадне в Росії. Крім того, частина даних, записаних з невеликою частотою опитування давачів 1 Гц, передавалась через низькочастотну службову радіолінію 137 МГц до пунктів приймання НЦУВКЗ (м. Євпаторія) та ЦПОСІ і КНП (м. Дунаївці).

Отже, передусім необхідно було здійснити аналіз та систематизацію наукової інформації, переданої високочастотною радіолінією. Основна частина даних була прийнята у м. Дунаївці, причому зі значними спотвореннями, які унеможливили обробку даних з використанням заздалегідь розробленого програмного забезпечення. Для відновлення результатів вимірювань довелося провести певну корекцію прийнятої інформації, для цього були створені спеціальні алгоритми та комп'ютерні програми.

Наукова інтерпретація результатів експерименту «Варіант» потребувала також супроводжувальної інформації про поточний час, географічні координати, орієнтацію КА «Січ-1М» та ін. У певних випадках цю інформацію також довелося відновлювати, а орієнтацію супутника спеціально розраховувати за даними бортових

магнітометрів та давача Сонця.

Нижче будуть описані вимірювальні канали, які входили до КНА «Варіант», організація передачі даних на Землю, верифікація результатів з використанням калібрувальних сигналів.

ВИМІРЮВАЛЬНІ КАНАЛИ КОМПЛЕКСУ «ВАРІАНТ»

Наукові завдання проекту «Варіант» та створений для їхньої реалізації інструментальний комплекс описані в роботах [1, 2, 4]. Сигнали вимірювань формувались давачами електромагнітних полів та струмів.

Електричні зонди EZ1, EZ2, EZ3, EZ4. З вихідних сигналів E_{Z1} , E_{Z2} , E_{Z3} , E_{Z4} цих чотирьох давачів при відповідній комутації і фільтрації утворюються вимірювальні канали складових електричного поля $E_{1\sim}$, $E_{2\sim}$, $E_{3\sim}$, $E_{1=}$, $E_{2=}$, $E_{3=}$ (тут і надалі позначення « $\sim$ » означає використання в каналі фільтра високих частот, позначення « $=$ » — використання фільтра низьких частот зі збереженням постійної складової). З метою пристосування амплітудно-частотних характеристик давачів до форми очікуваних сигналів для коефіцієнтів передачі $K_{\text{пр}} = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}$ були вибрані значення $K_{\text{пр}} \approx 10$ для частот $f > 1$ Гц та $K_{\text{пр}} \approx 1$ при $f < 0.1$ Гц.

Для отримання трьох складових вектора напруженості електричного поля потенціали E_{Z1} , E_{Z2} , E_{Z3} , E_{Z4} подавалися через комутатор на входи диференційних підсилювачів. Базовими давачами вибиралися EZ1 і EZ3. При виборі базовим давачем EZ1 формувалися сигнали: $E_1 = E_{Z1} - E_{Z4}$, $E_2 = E_{Z1} - E_{Z2}$, $E_3 = E_{Z1} - E_{Z3}$. У випадку вибору базовим давачем E_{Z3} — сигнали $E_1 = E_{Z3} - E_{Z1}$, $E_2 = E_{Z3} - E_{Z2}$, $E_3 = E_{Z3} - E_{Z4}$. При діленні величин E_1 , E_2 , E_3 на відстані між відповідними давачами отримувалися значення складових електричного поля в системі координат, яка відрізнялася від ортогональної (рис. 1). Це вимагало перерахунку даних до прямокутної зв'язаної системи координат супутника $\{X, Y, Z\}$, у якій вимірювалися всі інші величини. Слід відзначити, що при запланованій орієнтації КА «Січ-1М» вісь OX скерована вздовж вектора швидкості супутника, вісь OY — перпендикулярно до площини орбіти, вісь OZ — в зеніт, за напрямом штанги гравітаційного стабілізатора.

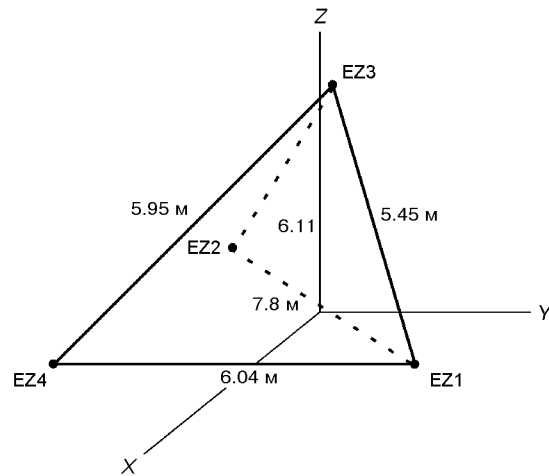


Рис. 1. Конфігурація давачів електричного поля на супутнику «Січ-1М»

Хвильовий зонд WZ1 вимірює складову змінного магнітного поля $B_{x\sim}$ та складову густини змінного електричного струму $J_{yz\sim}$. Вісь давача WZ1 розташована паралельно осі OX . Нормаль до щілини зонда, що визначає робочу площину інструмента, нахилена під кутом 45° відносно осей OY і OZ , у зв'язку з чим вимірюється відповідна складова вектора струму J_{yz} . В каналі магнітного поля коефіцієнт перетворення складає $K_{\text{пр}} = U_{\text{вих}}/B_x \approx 100$ мВ/нТ при $f > 300$ Гц. В каналі струму коефіцієнт перетворення $K_{\text{пр}} = U_{\text{вих}}/J_{yz} \approx 0.077$ В·см²/нА при $f > 1$ Гц.

Хвильовий зонд WZ2 вимірює складову змінного магнітного поля $B_{y\sim}$ і складову густини змінного електричного струму $J_{xz\sim}$. Вісь давача WZ2 розташована паралельно осі OY . Нормаль до щілини зонда нахилена під кутом 45° відносно осей OX і OZ , тому вимірюється складова струму J_{xz} . Коефіцієнти перетворення каналів магнітного поля та струму зонда WZ2 такі самі, як і для WZ1.

Циліндри Фарадея FC1, FC2 вимірюють z -складову густини струму. Два циліндри Фарадея утворюють вимірювальні канали сигналів $FC_{1\sim}$, $FC_{2\sim}$, $FC_{1=}$, $FC_{2=}$. Обидва давачі розташовані вздовж осі OZ , а їхні вікна чутливості скеровані у протилежні боки. В каналі « $=$ » коефіцієнт перетворення давачів $K_{\text{пр}} \approx 470$ мВ·см²/мкА, в каналі « $\sim$ » $K_{\text{пр}} \approx 4780$ мВ·см²/мкА.

Пояс Роговського вимірює z -складову густини струму J_{Fz} . В діапазоні частот 30—400 Гц коефіцієнт перетворення $K_{pr} \approx 0.085 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{нА}$.

Трикомпонентний ферозондовий магнітометр FZM утворює канали вимірювання квазі-постійного магнітного поля B_x , B_y , B_z . Він також дозволяє стежити за температурами давача магнітометра і блока електроніки. Магнітометр має АЦП і власний формат вихідних даних. Виміри магнітного поля подані відразу в нанотесла, а температурних давачів — у градусах Цельсія.

Циклограми роботи КНА «Варіант» передбачали режим калібрування, організований таким чином, що на вимірюваний давачем зовнішній сигнал накладався сигнал калібрування досить великої амплітуди. Наявність калібрувального сигналу в вимірювальних каналах дає змогу робити висновки про працездатність каналу та коректність процедури обробки даних. Використовувались такі форми калібрувань:

- канали E_{1z} , E_{2z} , E_{3z} , B_{xz} , B_{yz} , J_{yz} , J_{xz} калібрувалися синусоїдальним сигналом з частотою 1 кГц;
- J_{Fz} — синусоїдальним сигналом з частотою 30 Гц;
- FC_{1z} , FC_{2z} — прямокутним однополярним сигналом з частотою 10 Гц;
- FC_{1x} , FC_{2x} — прямокутним різнополярним сигналом з частотою 10 Гц.

ПРИЙМАННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Як уже згадувалось, основний масив даних експерименту «Варіант» було передано на Землю через високочастотну радіолінію БИС-С КА «Січ-1М». Приймання здійснювалося в трьох пунктах — одному в Україні і двох у Росії (табл. 1); частина даних була одночасно прийнята у двох пунктах. У 10 сеансах зв'язку було передано 230 мегабайт даних у вигляді бінарних файлів. Наявність даних та час проведення вимірювань у кожному каналі подані в табл. 2.

Було реалізовано таку схему збору і передачі даних експерименту «Варіант». На борту супутника дані вимірювань компонувались у 800-байтні блоки, структура і наповнення яких визначались розробниками системи збирання наукової інформації (СЗНІ) проекту «Варіант» у

Таблиця 1. Пункти приймання та номери витків скидання даних проекту «Варіант»

№ витка	Пункти прийому		
	Дунайці	Отрадне (Росія)	Обнінськ (Росія)
597	+		
1056	+		
1057	+		
1071		+	
1087			+
1109	+		+
1139	+	+	
1278	+		
1363		+	+
1385			+
1394	+		+

Львівському центрі Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України. Для передачі на Землю ці блоки подавались в систему збирання інформації «Січ-1М», де вони поєднувались в телеметричні кадри разом з даними інших бортових приладів (апаратури ДЗЗ та ін.). На приймальних пунктах проводилась зворотна процедура виділення даних експерименту «Варіант» з телеметричних кадрів, так зване розпакування. Після цього розпаковані дані передавались учасникам проекту у центр обробки наукової інформації (ЦОНІ) Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ. Алгоритми кодування і формати телеметричних кадрів, протокол обміну даних між СЗНІ комплексу «Варіант» та супутника визначались розробниками інформаційної системи БИС-С КА «Січ-1М».

Подальша обробка експериментальних даних полягала у виділенні груп 800-байтних блоків, створених СЗНІ комплексу «Варіант», з масиву переданої з супутника інформації і формуванні рядів неперервних вимірювань по окремих каналах. З цією метою у 800-байтних блоках даних містились спеціальні 26-байтні заголовки, що включали в себе псевдовипадкову послідовність з 8 байт (ПВП), поточний час, характеристики сеансу вимірювань і деяку іншу інформацію, номер вимірювального каналу комплексу «Варіант» в 10-му байті та порядковий номер блоку в 19-му та 20-му байтах.

Розпаковані у приймальному пункті м. Дунайці файли даних виявилися сильно спотвореними. Вони містили велику кількість збоїв, се-

Таблиця 2. Наявність даних у вимірювальних каналах комплексу наукової апаратури «Варіант»

Витки скидання, режими, пункт приймання	Момент вимірювання, UT	Канал																	
		FZM			JF~	FC1		FC2		WZ1		WZ2		E1		E2		E3	
		B_x	B_y	B_z		~	=	~	=	$J_{yz\sim}$	$B_{x\sim}$	$J_{xz\sim}$	$B_{y\sim}$	~	=	~	=	~	=
0597 МНР2 Дунаївці	01.02.2005: 05:22:59—05:43:29	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+		+		+		+
1056 МНР1, калібр. Дунаївці	02.03.2005: 14:23:10—14:27:37	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
1057 ТХР2 Дунаївці	03.03.2005: 02:42:57—02:44:37									+	+	+	+						
1071 МНР1, калібр. Отрадне	03.03.2005: 13:48:14—13:52:41					+	+	+		+	+	+		+		+		+	,
1109 МНР1, калібр. Дунаївці	06.03.2005: 08:03:13—08:07:40					+	+	+	+		+	+				+		+	,
1139 МНР1, калібр. Дунаївці	07.03.2005: 22:53:05—22:57:32	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
1139, Отрадне	07.03.2005: 22:53:05—22:57:32	+	+	+								+	+						+
1278 МНР2 Дунаївці	17.03.2005: 10:52:49—10:57:16			+						+		+		+		+		+	,
1363 МКР1 Отрадне	22.03.2005: 22:13:06—22:14:02					+	+	+	+		+	+						+	,
1394 МКР2 Дунаївці	24.03.2005: 22:32:47—22:33:43					+	+			+	+	+	+	+		+		+	

ред яких зайві розряди між сусідніми байтами та величезна кількість однобітових збоїв у випадкових місцях. Це унеможливило виділення даних вимірювань з використанням програмного забезпечення, заздалегідь створеного у Львівському центрі Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України. В деяких розпакованих файлах взагалі не вдалося виділити жодного вимірювального каналу (або не знайшлося достатньої кількості відповістей у ПВП, або довжина файлів не була кратною 800 байт та ін.). Виникла необхідність розробки додаткового програмного забезпечення, яке й створили спеціалісти Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства

України. З його допомогою вдалося в основному відновити дані каналів КНА «Варіант», хоча в деяких сеансах не всі канали вдалося ідентифікувати, а в ряді випадків залишились пропуски даних. Це програмне забезпечення було успішно апробоване на даних калібрувальних вимірювань КНА «Варіант».

У відновлених таким чином даних, однак, залишились випадкові збої у двобайтних словах, якими кодуються величини вимірювань. Якщо ці випадкові збої відбуваються у старших розрядах, то величина сигналу хаотично змінюється в інтервалі від -5 до $+5$ В. На рис. 2 подано приклад дуже збійного файлу вимірювань у каналі магнітного поля $B_{y\sim}$ (виток 597) з частотом викидів та пропусків даних. Очевидно, що в таких випадках шукати фізичний сигнал

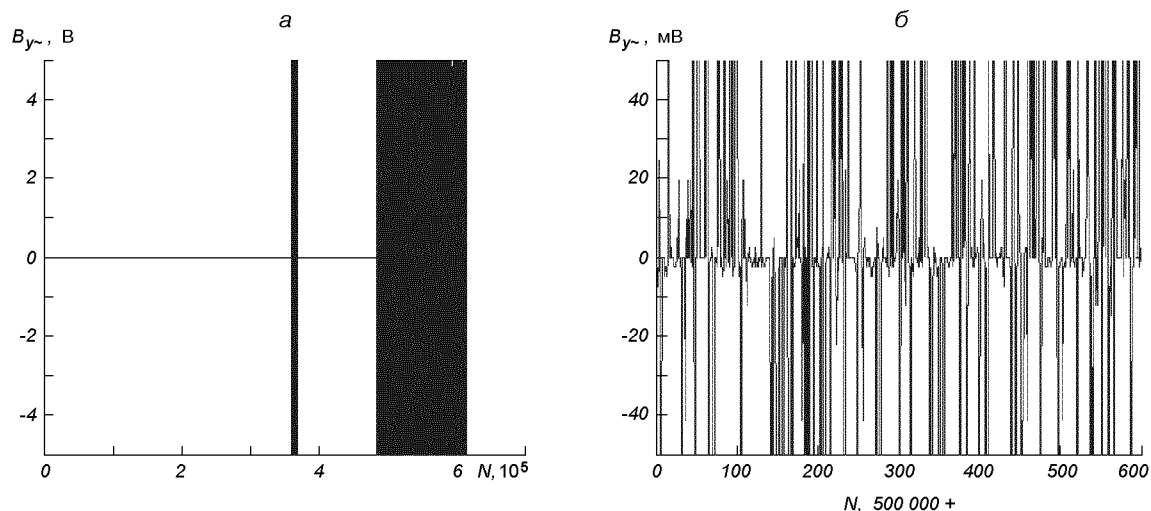


Рис. 2. Збійні дані в каналі магнітного поля (сигнал $B_{y\sim}$, вольти) на витку скидання 597 для номера відліку N : a — вихідний ряд, b — збільшений фрагмент цього ряду

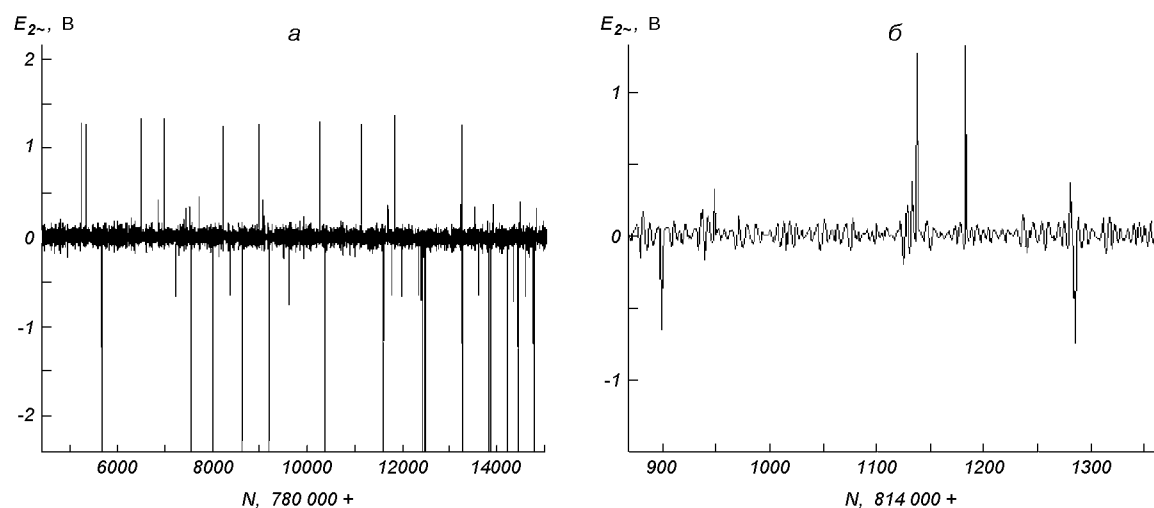


Рис. 3. Запис ряду даних в каналі електричного поля $E_{2\sim}$ на витку скидання 1278. Поодинокі викиди сигналу на окремих відліках є результатом випадкових однобітових збоїв у старших розрядах байтів, які кодують виміри

не має сенсу. В інших випадках нефізичні викиди порівняно нечисленні (рис. 3), при необхідності їх неважко виключити за тим чи іншим алгоритмом.

В результаті проведеної роботи було створено каталог ємністю 1.3 гігабайт відновлених даних проекту «Варіант», придатних для подальшого наукового аналізу. Цей каталог містить також необхідну супровідну інформацію про місцезнаходження, висоту, розраховану орієнтацію КА «Січ-1М», час та ін.

ВЕРИФІКАЦІЯ ДАНИХ ЗА КАЛІБРУВАЛЬНИМИ СИГНАЛАМИ

Коректність процедури відновлення експериментальних даних та правильність роботи окремих вимірювальних каналів перевірялась за допомогою калібрувальних сигналів КНА «Варіант». Як приклад розглянемо канали $E_{2\sim}$ і $J_{F\sim}$ у калібрувальному режимі вимірювань для витка скидання 1056. При ввімкненому генераторі калібрування на вхід диференційного підсилювача

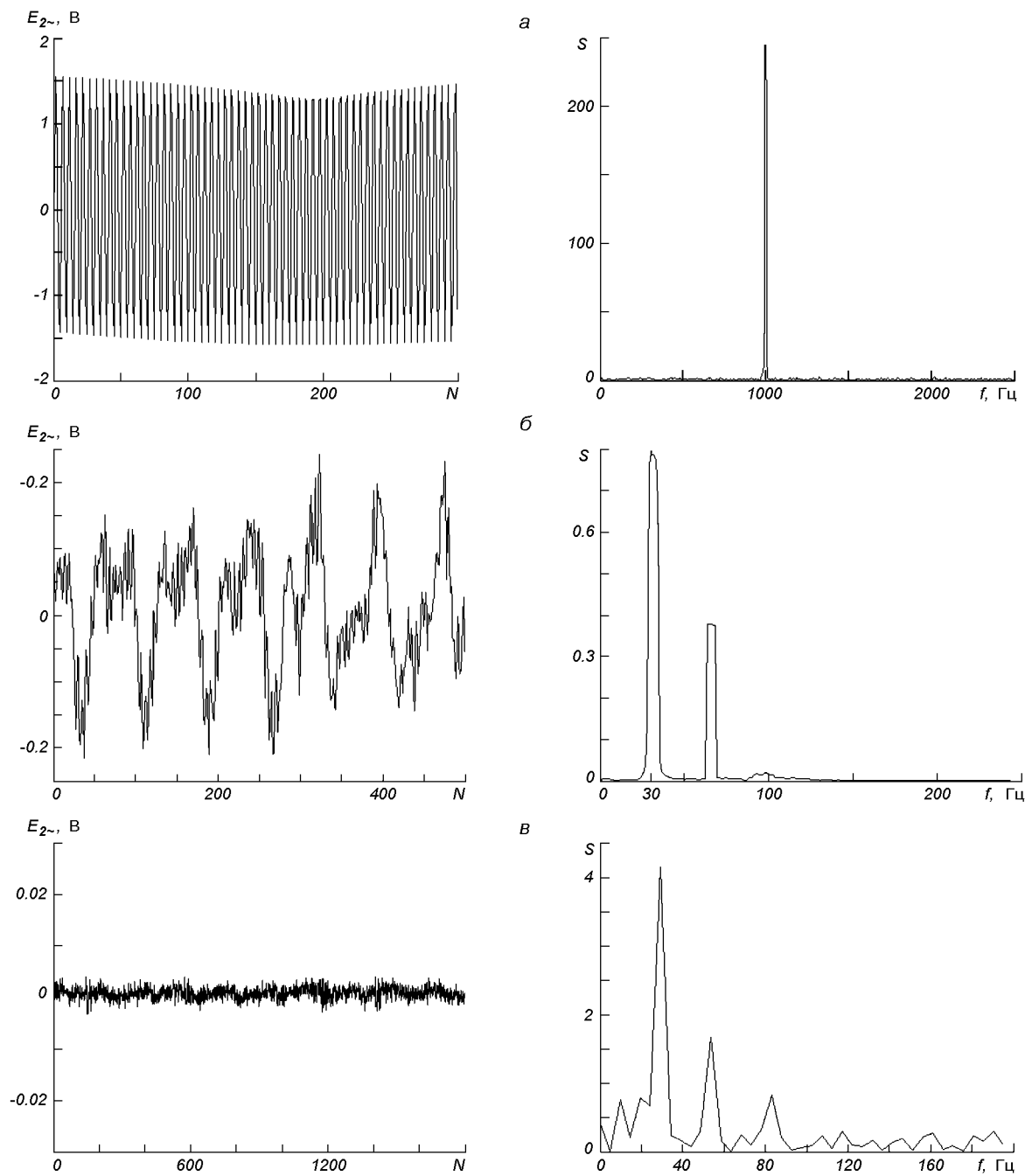


Рис. 4. Фрагменти рядів даних та фур'є-спектри: *a* — сигналу $E_{2\sim}$ на витку 1056; *б* — те ж після режекції калібрувальної частоти; *в* — сигналу $J_{P\sim}$ на витку 1056

каналу $E_{2\sim}$ подається синусоїдальна напруга з частотою 1 кГц, а на рамкову котушку пояса Роговського — синусоїдальна напруга з частотою 30 ± 5 Гц. Фрагмент калібрувального сигналу $E_{2\sim}$ показаний на рис. 4, на фур'є-спектрі чітко виділяється частота 1 кГц. Фрагмент калібрувального сигналу каналу $J_{F\sim}$ та його спектр показані на рис. 4, в. Тут виділяється як калібрувальна частота 30 Гц, так і її друга гармоніка 60 Гц.

Як уже згадувалося, в калібрувальному режимі сигнал на виході кожного приладу є сумою двох складових: власне сигналу калібрування, який подається безпосередньо на підсилювач, та фізичного сигналу, який реєструється давачем у навколишньому середовищі. Це дало можливість не втрачати дані вимірювань у режимі калібрування, що можна продемонструвати на прикладі розглянутого каналу $E_{2\sim}$. До даних, показаних на рис. 4, а, була застосована вузькосмугова фільтрація — режекція калібрувального сигналу (гармоніки 1 кГц). Після усунення збоїв був отриманий сигнал, показаний на рис. 4, б. Підтвердженням того, що він дійсно містить дані вимірювання, є наявність в його фур'є-спектрі гармоніки з частотою 30 Гц, якою калібрувався пояс Роговського, розташований на штанзі біля зонда EZ4, котрий формував покази каналу $E_{2\sim}$. Таким чином, електричні зонди сприймали змінне електромагнітне поле, випромінюване котушкою пояса Роговського в режимі калібрування.

ВИСНОВКИ

В результаті роботи КНА «Варіант» на борту супутника «Січ-1М» отримано значний обсяг наукової інформації. Для виправлення збоїв у даних було розроблено програмне забезпечення та створено каталог одержаних експериментальних результатів. Цей каталог міститься в Інституті космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України. Разом з даними вимірювань він містить допоміжну інформацію, необхідну для наукової інтерпретації експериментальних результатів: про моменти вимірювань, частоти опитування давачів, розраховані параметри

орієнтації, місцезнаходження супутника та ін. Програмне забезпечення вдосконалюється й далі; продовжуються роботи над створенням другої версії каталогу, до якої увійдуть додатково відновлені дані експерименту «Варіант».

Попередня інтерпретація отриманих даних виявила правильність роботи КНА «Варіант» у режимі калібрування, а також дозволила зібрати результати вимірювань усіх каналів КНА «Варіант», які відповідають реальним фізичним процесам в іоносфері [2, 3, 5].

1. Корепанов В. Е., Негода А. А., Ивченко В. Н. и др. Космический научный эксперимент «Вариант» на борту ИСЗ «Січ-1М» // Сб. тр. Первой украин. конф. по перспективным космическим исследованиям (Киев, 8—10 октября 2001 г.). — Киев, 2001.—С. 51—58.
2. Корепанов В. Е., Ивченко В. М., Лізунов Г. В. та ін. «Варіант» — перший міжнародний науковий експеримент на борту українського супутника // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 3—9.
3. Корепанов В. Е., Крючков Є. І., Лізунов Г. В. та ін. Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — перші результати // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 10—17.
4. Корепанов В., Негода О., Лізунов Г. та ін. Проект «Варіант»: вимірювання електромагнітних полів та електричних струмів іоносферної плазми на супутнику «Січ-1М» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 3—8.
5. Korepanov V., Krasnosselskikh V., Lizunov G., et al. Experiment Variant onboard Ukrainian satellite Sich-1M — first results // COSPAR 2006: Abstracts of the 36th COSPAR Scientific Assembly (July 16—23, 2006, Beijing, China). — Beijing, 2006.—d3.2-0014-06.

SYSTEMATIZATION AND PRELIMINARY PROCESSING OF DATA FROM THE EXPERIMENT VARIANT ONBOARD THE SICH-1M SATELLITE

Ye. I. Kriuchkov, G. V. Lizunov, P. O. Usenko,
V. Yo. Hlemba

The measurement channels of the VARIANT scientific payload onboard the Sich-1M satellite are described. The channels allow one to detect three components of electric field, three components of dc magnetic field and two components of alternative magnetic field and of spatial current density in the ionosphere. During the flight test phase of the Sich-1M satellite (the first half of 2005), about 230 MB of the VARIANT experiment information was obtained and telemetered to ground-based stations. The paper gives some results of systematization and preliminary processing of these data and of their verification using calibration operation mode.

УДК 574.472:528.854.4

С. А. Станкевич, А. О. Козлова

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

Методика оцінювання біорізноманіття території за багатоспектральними космічними зображеннями середньої просторової розрізненості

Надійшла до редакції 20.02.07

Пропонується методика оцінювання біорізноманіття територій за багатоспектральними космічними знімками середньої просторової розрізненості, яка дозволяє врахувати вплив екологічних факторів на кількісний розподіл біологічного різноманіття. Наводяться результати оцінювання біорізноманіття південно-західної частини Кримського півострова за розробленою методикою.

ВСТУП

На сьогоднішній день до основних параметрів, що характеризують стан надорганізмівих біосистем, відносять біологічне різноманіття. У зв'язку з цим методи вивчення біорізноманіття, зокрема його кількісного оцінювання, набули особливого значення.

Традиційно дослідження біологічного різноманіття територій проводилось методом *in-situ* [4], але сьогодні перспективи дослідження біорізноманіття пов'язують з використанням аерокосмічної інформації та геоінформаційних (ГІС) технологій [32].

В напрямку дослідження біологічного і ландшафтного різноманіття вітчизняними спеціалістами була проведена значна за своїм обсягом та науковим значенням робота [3, 19], але питання залучення наведених технологій для автоматизації процесу оцінювання біорізноманіття досі залишається відкритим.

За кордоном успішно реалізуються проекти з інвентаризації, кількісного оцінювання та моні-

торингу біорізноманіття, до яких активно залучається інформація, отримана методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [<http://europa.eu.int/comm/agriculture/publi/landscape/index.htm>, <http://abmp.arc.ab.ca>, http://www.ulrmc.org.ua/services/binu/index_ua.html]. Об'єктами досліджень цих проектів є різні компоненти біорізноманіття: ландшафти, лісові рослини, угруповання, ссавці, асоційовані з агроландшафтами, тощо.

Методика кількісного оцінювання біорізноманіття територій за багатоспектральними космічними знімками, яка б дозволила врахувати взаємозв'язки як між окремими компонентами біорізноманіття, так і з навколишнім середовищем, досі не реалізована. Необхідність її створення стає все більш актуальною.

ЗАДАЧА

Біорізноманіття часто асоціюється з кількістю видів як окремого угруповання, так і ландшафту

в цілому. У дослідженнях видового різноманіття, зокрема при його оцінці, широко використовується ентропійний індекс Шеннона B [14]

$$B = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i,$$

де N — кількість видів, P_i — значущість виду i .

Здатність індексу враховувати не лише багатство видів, а й рівномірність розподілу цих видів за будь-якою своєю ознакою, обумовлює трудомісткість його розрахунку. Залучення даних дистанційного зондування та сучасних цифрових технологій обробки аерокосмічних зображень, на нашу думку, може додати ряд переваг у процес розрахунку індексу видового різноманіття за Шенноном: значно розширити територію дослідження, відображати реальну інформацію про просторовий розподіл рослинних угруповань та надавати можливість її постійного оновлення, а представлення даних у цифровому вигляді забезпечує їхню ефективну обробку.

Очевидно, що повне врахування всіх компонентів біорізноманіття на детальному рівні на скільки-небудь значній території поки що неможливе. Тому для оцінювання біорізноманіття найбільш адекватним, на нашу думку, є екосистемний підхід, при якому оцінка біорізноманіття може спиратися на будь-які інтегративні характеристики, які забезпечують представництво усіх компонентів [9].

Мета роботи — створення методики оцінювання біологічного різноманіття території за багатоспектральними космічними знімками середньої просторової розрізненості, яка б надала можливість визначити просторовий розподіл кількості видового різноманіття певної території з урахуванням факторів, що обумовлюють процеси диференціації біот.

ФАКТОРИ ВПЛИВУ

На питання про те, які фактори обумовлюють біорізноманіття, сьогодні важко знайти однозначну відповідь. Численні дослідження, спрямовані на пояснення причин закономірної локальної та широтної зміни різноманіття, спричинили чималу кількість гіпотез і теорій, кожна з яких справедлива у своєму випадку [12].

Видове багатство угруповань пов'язують із факторами, які прямо чи опосередковано визначають умови існування організмів. У першу чергу це так звані «географічні» фактори — широта і висота над рівнем моря, але вони скоріше відображають одночасні зміни низки факторів, які безпосередньо впливають на диференціацію біот. На регіональному рівні такими факторами можуть бути: надходження світла, прогрівання земної поверхні, вологість ґрунту, його тип та потужність. До факторів, що діють через фізичне середовище, також відносять еволюційний та екологічний час, мінливість та передбачуваність клімату, просторову гетерогенність, ізолюваність середовища [4, 12]. Крім того, видове різноманіття — наслідок не стільки безпосередньої дії факторів, скільки їхньої кількості, що призводить до зміни у пристосовуваності видів [5].

Не меншу роль відводять факторам, дія яких відбувається через біотичне середовище і визначається зовнішніми для угруповання впливами, а саме продуктивності, інтенсивності конкуренції і хижацтва, структурі угруповання.

Механізми впливу наведених факторів на темпи, форми і спрямованість диференціації біот широко висвітлені у роботах [4, 12, 18] та ін.

Для реалізації даної методики виникла необхідність встановлення факторів, вплив яких на диференціацію видів може бути кількісно визначений за матеріалами космічної зйомки. Серед факторів фізичного середовища до таких можна віднести надходження світла, температура поверхні та вологість ґрунту. Фактори ж біотичного середовища за даних умов враховуються лише опосередковано, оскільки їхнє кількісне визначення є складним навіть при залученні наземних методів дослідження. До того ж оптико-фізичні властивості приладів зйомки обмежують можливість ідентифікації елементів біорізноманіття до розрізнення типів рослинності. Достовірне визначення видового складу тваринних і рослинних угруповань (тут не йдеться про визначення породного складу рослинного покриву за декількома видами-едифікаторами) за матеріалами зйомки сенсора середньої просторової розрізнювальної здатності неможливе. Тому ми використовували фактори, які характеризують рослинний покрив, зокрема його кількість та структуру.

Таблиця 1. Фактори, що впливають на біорізноманіття територій

Фактор	Показник	Діапазон значень
Світло	середньодобова опроміненість сонячним випромінюванням	0...300 Вт/м ²
Тепло	середньодобова температура ґрунту	-30...+50 °C
Вологість	нормалізований водний індекс NWI	-1...+1
Кількість рослинного покриву	вегетацийні індекси <i>NDVI</i> або <i>SAVI</i>	-1...+1
Структура рослинного покриву	листяний індекс <i>LAI</i>	0—6

У табл. 1 наведено показники, за якими слід враховувати зазначені фактори при оцінюванні біорізноманіття за багатоспектральними космічними зображеннями середньої просторової розрізненості.

Кількісні значення представлених показників можуть бути одержані як безпосередньо за космічними знімками (вегетацийні індекси *NDVI* та *SAVI*), так і з залученням відповідних алгоритмів обробки.

ДИСТАНЦІЙНІ ДАНІ

Фактори, наведені в табл. 1, можуть бути отримані за результатами оброблення каліброваних багатоспектральних космічних зображень середньої та високої просторової розрізненості. Для ряду розповсюджених багатоспектральних сенсорів розроблено пули стандартних алгоритмів обробки, атмосферної і геометричної корекції та калібрування, деякі з котрих до того ж відкриті й вільно розповсюджуються. Наприклад, для багатоспектральних супутникових сенсорів середньої просторової розрізняючої здатності ETM+ (платформа Landsat), HRG (SPOT), LISS (IRS), ASTER (EOS) такі алгоритми налагоджено, верифіковано та імплементовано до стандартного програмного забезпечення обробки космічних знімків [20, 21]. Основні характеристики багатоспектральних супутникових сенсорів середньої просторової розрізняючої здатності

Таблиця 2. Характеристики багатоспектральних супутникових сенсорів середньої просторової розрізняючої здатності

Платформа	Сенсор	Кількість спектральних каналів*	Просторова розрізняюча здатність, м	Розмір сцени, км
Landsat	ETM+	5 (<i>VNIR</i>) 1 (<i>SWIR</i>) 1 (<i>TIR</i>)	30 30 60	183×185
SPOT	HRG	3 (<i>VNIR</i>) 1 (<i>SWIR</i>)	10 10	170×120
IRS	LISS	3 (<i>VNIR</i>) 1 (<i>SWIR</i>)	23.5 70.5	127×141
EOS	ASTER	3 (<i>VNIR</i>) 6 (<i>SWIR</i>) 5 (<i>TIR</i>)	15 30 90	60×60
Ресурс-О	МСУ-Э	3 (<i>VNIR</i>)	45	76×2240
Монитор-Э	РДСА	3 (<i>VNIR</i>)	20	160×890

* — Спектральні діапазони: *VNIR* — видимий та ближній інфрачервоний (0.4...0.9 мкм), *SWIR* — середній інфрачервоний (1.5...2.5 мкм), *TIR* — дальній інфрачервоний (8...12.5 мкм)

містяться в табл. 2.

Порівняльний аналіз характеристик табл. 2 свідчить, що найбільш придатними для оцінювання біорізноманіття територій є багатоспектральні супутникові сенсори ETM+ та ASTER, оскільки тільки їх обладнано спектральними каналами дальнього інфрачервоного діапазону. Між тим зображення саме дальнього інфрачервоного спектрального діапазону потрібні для визначення температури поверхні і листяних індексів території [22]. На жаль, супутникову платформу Landsat виведено з експлуатації в 2002 р., тому з цього моменту доступні тільки архівні знімки ETM+. Крім того, багатоспектральні зображення Landsat/ETM+ та EOS/ASTER найдоступніші за вартістю. Сенсори HRG і LISS одержують зображення в середньому інфрачервоному діапазоні, який використовується при обчисленнях водних і листяних індексів. Придатність багатоспектральних супутникових сенсорів МСУ-Э та РДСА до оцінювання біорізноманіття території дуже обмежена.

Вологість ґрунту та вологовміст рослинності зазвичай дистанційно оцінюються за зображеннями мікрохвильового або радіолокаційного діа-

пазонів [34]. Проте сучасні супутникові мікрохвильові радіометри дають вкрай низьку просторову розрізнєнність (одиниці — десятки км), а радіолокаційні знімки — занадто високу варіативність. Поряд з тим за результатами деяких досліджень вологість ґрунту добре корелюється з нормалізованими водними індексами, зокрема з *NWI* та *NDII* [15].

Додатково для оцінювання сонячної опроміненості та проведення ландшафтно-екосистемного районування території дослідження обов'язково потрібна відповідна карта рельєфу. Її можна отримати вже готовою (наприклад, у вільному доступі знаходяться опрацьовані глобальні дані SRTM3v2.0 [30]) або одержати за результатами обробки стереопар знімків узгодженої просторової розрізнєнності (такі, наприклад, формують космічні системи EOS/ASTER та SPOT/HRV).

Характерні періоди динаміки біорізноманіття локальних територій складають роки, тому дистанційні дані при оцінюванні біорізноманіття мають інтегруватися протягом вегетаційного періоду, коли можна зробити точну класифікацію рослинного покриву. Інтегрування дистанційних даних не тільки дозволяє позбавитися несприятливих умов спостереження, але й підвищити точність визначення кількісних показників за рахунок усунення незначущих флуктуацій вимірів.

АЛГОРИТМИ ОБРОБКИ

Більшість допоміжних алгоритмів, що використовуються при оцінюванні біорізноманіття території, відомі, залишається лише скористатися ними в необхідній послідовності.

Розподіл середньодобової сонячної опроміненості M в даній точці території визначається географічною широтою φ , а також рельєфом місцевості, тобто ухилом α елемента поверхні в даній точці та азимутом A цього ухилу [24]:

$$M(\varphi, \alpha, A) = \frac{\sin(h_0 - \alpha \cos A)}{\sin h_0} M(\varphi) = \frac{\sin(h_0 - \alpha \cos A)}{\sin h_0} M_0 \exp(-k_0 \rho^2). \quad (1)$$

Тут функція

$$M(\varphi) = M_0 \exp(-k_0 \rho^2)$$

приблизно описує широтну залежність середньодобового допливу сонячної радіації на горизонтальну поверхню у північній півкулі протягом року [31], $M_0 = 270 \text{ Вт/м}^2$ за добу, $k_0 = 0.1293 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-2}$, $h_0 = 90^\circ - \varphi + \delta_0$ — місцева висота Сонця над горизонтом у меридіані для літнього сонцестояння, $\delta_0 = 23.45^\circ$ — кут нахилу площини екліптики до площини небесного екватора.

Співвідношення (1) справедливе в діапазоні ухилів $-90^\circ \dots 90^\circ$ (вниз — позитивний) і азимутів $0 \dots 180^\circ$ (позитивні та негативні відхилення від напрямку $A = 180^\circ$ для розрахунків сонячної опроміненості еквівалентні) при $h_0 - \alpha \cos A > 0$ (інакше $M(\varphi, \alpha, A) \equiv 0$).

Абсолютну температуру земної поверхні T_0 можна оцінити безпосередньо за цифровими зображеннями дальнього інфрачервоного діапазону згідно із законом теплового випромінювання Планка:

$$T_0 = \frac{C_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon_0 C_1}{L_{TIR} \lambda^5} + 1 \right)}, \quad (2)$$

де L_{TIR} ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$) — спектральна густина енергетичної світності, λ (мкм) — довжина хвилі, ε_0 — коефіцієнт теплового випромінювання поверхні, $C_1 = 3.74151 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4 \cdot \text{м}^{-2}$ та $C_2 = 14387.9 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ — фізичні константи [10]. Для каліброваних зображень сенсора ETM+ величина L_{TIR} знаходиться простим лінійним перетворенням

$$L_{TIR} = \frac{L_{TIRmax} - L_{TIRmin}}{E_{TIRmax} - E_{TIRmin}} (E_{TIR} - E_{TIRmin}) + L_{TIRmin},$$

де $L_{TIRmin} = 0$, $L_{TIRmax} = 17.04 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}^{-1}$ — для низького підсилення (канал 6-1) або $L_{TIRmin} = 3.2$, $L_{TIRmax} = 12.65 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}^{-1}$ — для високого підсилення (канал 6-2), E_{TIR} — цифровий код сигналу в дальньому інфрачервоному спектральному діапазоні. Для ETM+ $E_{TIRmin} = 1$, $E_{TIRmax} = 255$, і співвідношення (2) спрощується:

$$T_0 = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{TIR}} + 1 \right)}, \quad (3)$$

де $K_1 = 666.09 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}^{-1}$ і $K_2 = 1282.71 \text{ К}$ — апаратно залежні константи сенсора ETM+ [10].

Для оцінки вологості ґрунту в межах території дослідження можна використовувати нормалізований водний індекс

$$NWI = \frac{E_{SWIR} - E_G}{E_{SWIR} + E_G}, \quad (4)$$

де E_{SWIR} , E_G — інтенсивності оптичного сигналу в середньому інфрачервоному та зеленому спектральних діапазонах відповідно (для Landsat/ETM+ це п'ятий та другий спектральні канали), оскільки регресійна залежність між ними близька до лінійної [29, 30].

Рослинний покрив класично описується нормалізованим вегетаційним індексом

$$NDVI = \frac{E_{VNIR} - E_R}{E_{VNIR} + E_R}, \quad (5)$$

де E_{VNIR} , E_R — інтенсивності оптичного сигналу у ближньому інфрачервоному та червоному спектральних діапазонах (для Landsat/ETM+ це четвертий та третій спектральні канали). Для рідкого рослинного покриву потрібна корекція значень $NDVI$ за сигнал від ґрунту, який домішується до сигналу рослинності. В цьому разі доцільніше використовувати удосконалений вегетаційний індекс EVI [25] або ґрунтовий вегетаційний індекс $SAVI$ [26]:

$$EVI = \frac{(E_{VNIR} - E_R)(1 + u)}{E_{VNIR} + z(E_R - E_B) + u}, \quad (6)$$

$$SAVI = \frac{(E_{VNIR} - E_R)(1 + w)}{E_{VNIR} + E_R + w}, \quad (7)$$

$$w = 1 - \frac{2E_{VNIR} + 1 - \sqrt{(2E_{VNIR} + 1)^2 - 8(E_{VNIR} - E_R)}}{2},$$

де u , z та w — емпіричні коефіцієнти.

Продуктивність рослинності характеризується долею $FPAR$ фотосинтетично активного сонячного випромінювання ($\lambda\lambda = 0.4...0.7 \text{ мкм}$), яка поглинається листям рослин, або безпосередньо пов'язаним з цим показником листяним індексом рослинності LAI — середньою кількістю шарів проекції листви на земну поверхню. Вели-

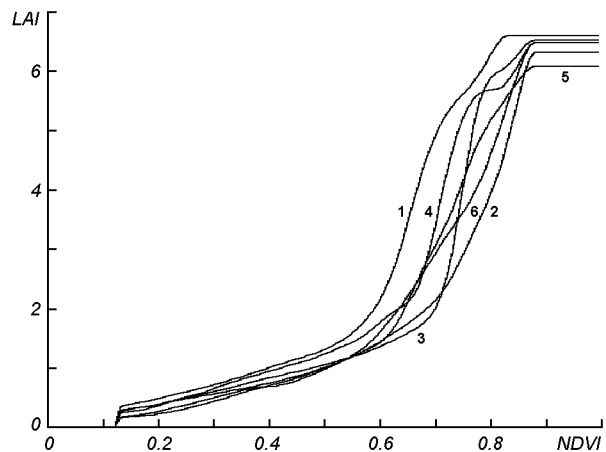


Рис. 1. Регресійні залежності $LAI(NDVI)$ для типових рослинних біомів: 1 — луки/злаки, 2 — чагарники, 3 — широколистяні насадження, 4 — степи/лісостепи, 5 — широколистяні ліси, 6 — вузьколистяні ліси

чину LAI може бути визначено прямими наземними вимірюваннями або опосередковано — за значенням $NDVI$ у конкретному пікселі зображення [33]. При цьому слід враховувати той факт, що характер нелінійної залежності $LAI(NDVI)$ різний для різних рослинних біомів (рис. 1) [27].

Класифікація покриву ландшафту території оцінювання проводиться за їхніми спектральними характеристиками одним з відомих способів за допомогою статистичних алгоритмів [16]. Але, як свідчить досвід, багатоспектральні аерокосмічні зображення середньої просторової розрізненості не забезпечують точної класифікації видового складу рослинності [17]. Тому саме для таких зображень доцільніше обмежитися рівнем класифікації до типів рослинних формацій, наявних на даній території. При цьому для підвищення точності класифікації потрібно залучати додаткові дистанційні та довідкові дані — про географічне розташування, рельєф місцевості, температуру і вологість ґрунту, кліматичні характеристики тощо. Процедура класифікації стає двоетапною: на першому етапі класифікуються типи рослинних формацій та абіотичних покривів ландшафту, на другому проводиться субкласифікація біомів на відповідні типи рослинних формацій, що приписані до них.

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ

Кількісне визначення впливу зовнішніх факторів на величини, що характеризують біорізноманіття, передбачає встановлення між ними або детермінованих, або статистичних зв'язків. У першому випадку мають будуватися причинно-наслідкові кількісні моделі, які описуватимуть феномен біорізноманіття та його взаємодію з факторами навколишнього середовища. Надзвичайна складність самого об'єкта моделювання, невизначеність поняття і методологічної бази біологічного різноманіття може негативно відбиватися на точності створюваних моделей. У другому випадку мають будуватися регресії, причому бажано для всього різноманіття природно-кліматичних комплексів регіону дослідження. Цей процес вимагає значної кількості наземних завіркових даних, що призводить до надмірного зростання обсягу польових досліджень. Обидва підходи мають позитивні та негативні сторони. Компромісним варіантом між ними може стати нечітко-логічний підхід. Нечіткі моделі дозволяють описувати класичні детерміновані взаємозв'язки з невизначеними або погано визначеними параметрами, визначати статистичні залежності з невідомими законами розподілу, а також формалізувати експертні уявлення про характер взаємодії об'єкту дослідження з чинниками, що на нього впливають. Ще одним аргументом на користь вибору нечітко-логічної моделі є слабка залежність результатів нечітких операцій від вигляду суб'єктивно апроксимованих функцій належності в широкому діапазоні значень нечітких величин. Нечітко-логічні моделі успішно застосовуються у складних системах керування та прийняття рішень, і на наш погляд, цілком придатні для оцінювання біорізноманіття [11].

Нечітко-логічну модель для оцінювання біорізноманіття території можна побудувати при відомих значеннях F всіх факторів, що на нього впливають. Спочатку для кожного класу земної поверхні визначається потенційно можливе біорізноманіття B_0 . Цим поняттям, в разі використання індексу Шеннона, називається кількість характерних видів окремої території N_0 , які мають однакову значущість. За таких умов біорізноманіття матиме найбільше з можливих значень і складатиме

$$B_0 = \log_2 N_0. \quad (8)$$

Зрозуміло, що подібна рівномірність розподілу у природі не спостерігається. Це пояснюють різним ступенем пристосованості видів до факторів середовища, під дією яких власне і відбувається просторова диференціація рослинних і тваринних угруповань [5]. Тому для кожного фактора, що зумовлює просторовий розподіл біорізноманіття, визначається вигляд функції $\mu(F)$ належності впливу для всього діапазону можливих значень F . Коли всі функції належності визначено, можна обчислити спільну функцію належності μ_0 вектора факторів. В основу таких розрахунків покладено концепцію, відому як закон мінімуму Лібіха. Робиться припущення, що біорізноманіття також обумовлюється одним або кількома зовнішніми факторами, доступна кількість яких найближча до необхідного мінімуму [12].

Природною операцією визначення спільної функції належності буде нечітка кон'юнкція:

$$\mu_0 = \&\mu(F). \quad (9)$$

Після визначення лімітної функції належності (9) та показника потенційного біорізноманіття (8) розраховується оцінка дійсного біорізноманіття B :

$$B = \mu_0 B_0. \quad (10)$$

Операції (11)—(13) здійснюються для всіх елементів розрізнення космічних зображень, що містять значення F .

Порядок оцінювання біорізноманіття в рамках нечітко-логічної моделі з використанням аерокосмічних зображень середньої просторової розрізненості багатоспектральних сенсорів, перелічених в табл. 2, описується схемою рис. 2.

В моделі на основі багатоспектральних аерокосмічних зображень, даних про цифровий рельєф території, наземних завіркових даних та додаткової інформації про особливості диференціації рослинних угруповань виконується двоетапне класифікування типів земної поверхні, спеціально адаптоване до розв'язання задачі оцінювання біорізноманіття, та розраховуються кількісні значення факторів впливу, наведених в табл. 1. Дійсне біорізноманіття (10) оцінюється на основі величини потенційного біорізноманіття (8) та врахування обмежень лімітного

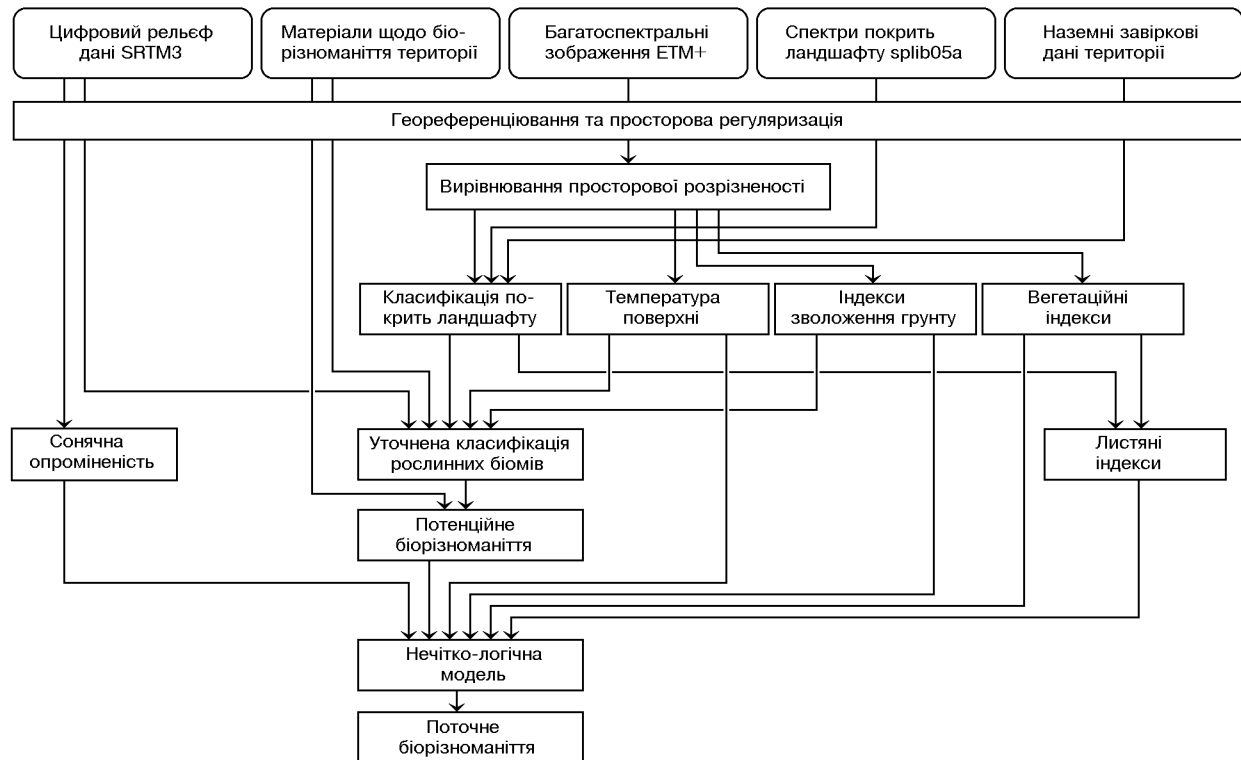


Рис. 2. Схема оцінювання біорізноманіття території

фактора (9). Всі просторові дані мають бути попередньо регуляризовані та геореференційовані. Оскільки в багатьох сучасних багатоспектральних аерокосмічних сенсорах середньої просторової розрізняювальної здатності наявні спектральні канали різної розрізняювальної здатності (наприклад, EOS/ASTER, Landsat/ETM+ та IRS/LISS табл. 1), для підвищення якості класифікації доцільно застосовувати спеціальну процедуру вирівнювання просторової розрізненості [13].

РЕЗУЛЬТАТИ

Для демонстрації можливостей описаної моделі проведено оцінювання біорізноманіття південно-західної частини Кримського півострова за космічним знімком Landsat/ETM+ (рис. 3, а).

Такий вибір території дослідження обумовлений рядом причин. По-перше, місцевість біо-

логічно багата через високе різноманіття екологічних умов і широкий діапазон їхнього прояву (від мінімальних до максимальних значень). По-друге, за оцінками спеціалістів [1], більша частина вибраної території має великий потенціал збереження біорізноманіття, і його кількісне оцінювання становитиме науково-практичний інтерес. Не останню роль зіграли також гарна вивченість регіону і доступність детальних описів природних угруповань та їхнього розподілу під дією зовнішніх факторів.

Кількісні значення факторів, наведених у табл. 1, розраховано на основі вказаного знімка із залученням сучасних методів обробки космічних зображень. Урахування рельєфу місцевості проводилося із використанням геореференційованих даних SRTM3 v2.0 на територію дослідження (рис. 3, в).

На основі карти висот місцевості за виразом (1) було розраховано середньодобові значення сонячного опромінення території (рис. 3, г).

Рис. 3. Багатоспектральне аерокосмічне зображення фрагменту Кримського півострова та отримані розподіли деяких параметрів: *a* — вихідний знімок (Landsat/ETM+, 10 травня 2000 р., просторова розрізненість 30 м), *б* — розподіл вегетаційних та водного індексів, *в* — карта висот рельєфу, *г* — розподіл середньодобової сонячної опроміненості

Рис. 3 (закінчення): ∂ — розподіл температури поверхні, e — розподіл листяного індексу, ϵ — класифікація рослинних екотопів, $ж$ — карта індексу біорізноманіття

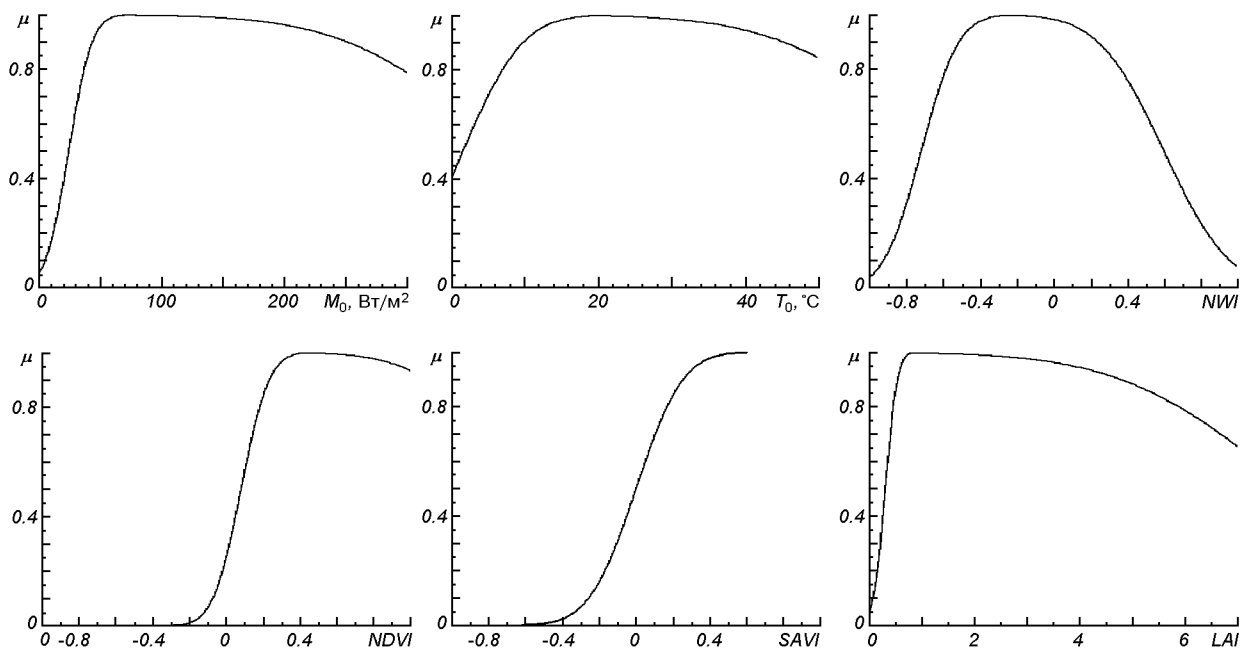


Рис. 4. Функції належності для сонячної опроміненості M_0 , температури T_0 поверхні, водного індексу NWI , вегетаційних індексів $NDVI$ та $SAVI$, листяного індексу LAI

Оскільки просторова розрізняльна здатність сенсора ETM+ в дальньому інфрачервоному діапазоні вдвічі гірша, ніж в інших діапазонах, саме до спектрального каналу 6 було застосовано процедуру підвищення просторової розрізненості за рахунок додаткової інформації, що міститься у спектральних характеристиках покриттів ландшафту. Останні залучалися із спектральної бібліотеки splib05a американської геологічної служби (USGS) [23]. Для підвищення просторової розрізненості було відібрано 12 типових зразків лабораторних спектрів штучних покриттів, рослинності, ґрунтів та водних об'єктів у діапазоні довжин електромагнітних хвиль $\lambda\lambda = 0.3...14$ мкм (рис. 5).

На основі інфрачервоного зображення підвищеної просторової розрізненості спектрального каналу 6 сенсора ETM+ за виразом (3) обчислювалося поле температур поверхні (рис. 3, д). На основі зображень спектральних каналів 1, 3, 4 за виразами (5)–(7) отримано вегетаційні, а на основі зображень спектральних каналів 2 і 5 за виразом (4) — нормалізований водний індекс поверхні (рис. 3, б).

За типовими спектральними характеристиками проведено попереднє класифікування основних біомів території дослідження. Всього виділено п'ять класів — луки та зернові культури, широколистяні ліси, вузьколистяні ліси, чагарники та рідколісся. Крім того, було докладено певних зусиль, щоб розроблена класифікація не лише якнайкраще відображала особливості розподілу основних типів рослинних і тваринних угруповань території дослідження за фізіономічними ознаками, але й мала можливість узгодження з іншими загальновідомими та широкоживаними системами класифікації типів земної поверхні, зокрема системою класифікації Міжнародного проекту Геосфера-Біосфера (IGPB Land Cover Units), яка також використовується у продуктах MODIS [http://eospsa.gsfc.nasa.gov/ftp_ATBD/REVIEW/MODIS/ATBD-MOD-12/atbd-mod-12.pdf].

Додатковими класами «відкриті ґрунти і мінерали» та «водні об'єкти» представлені ділянки земної поверхні, для яких біорізноманіття вважається відсутнім або через надзвичайно малу його кількість, або через необхідність застосу-

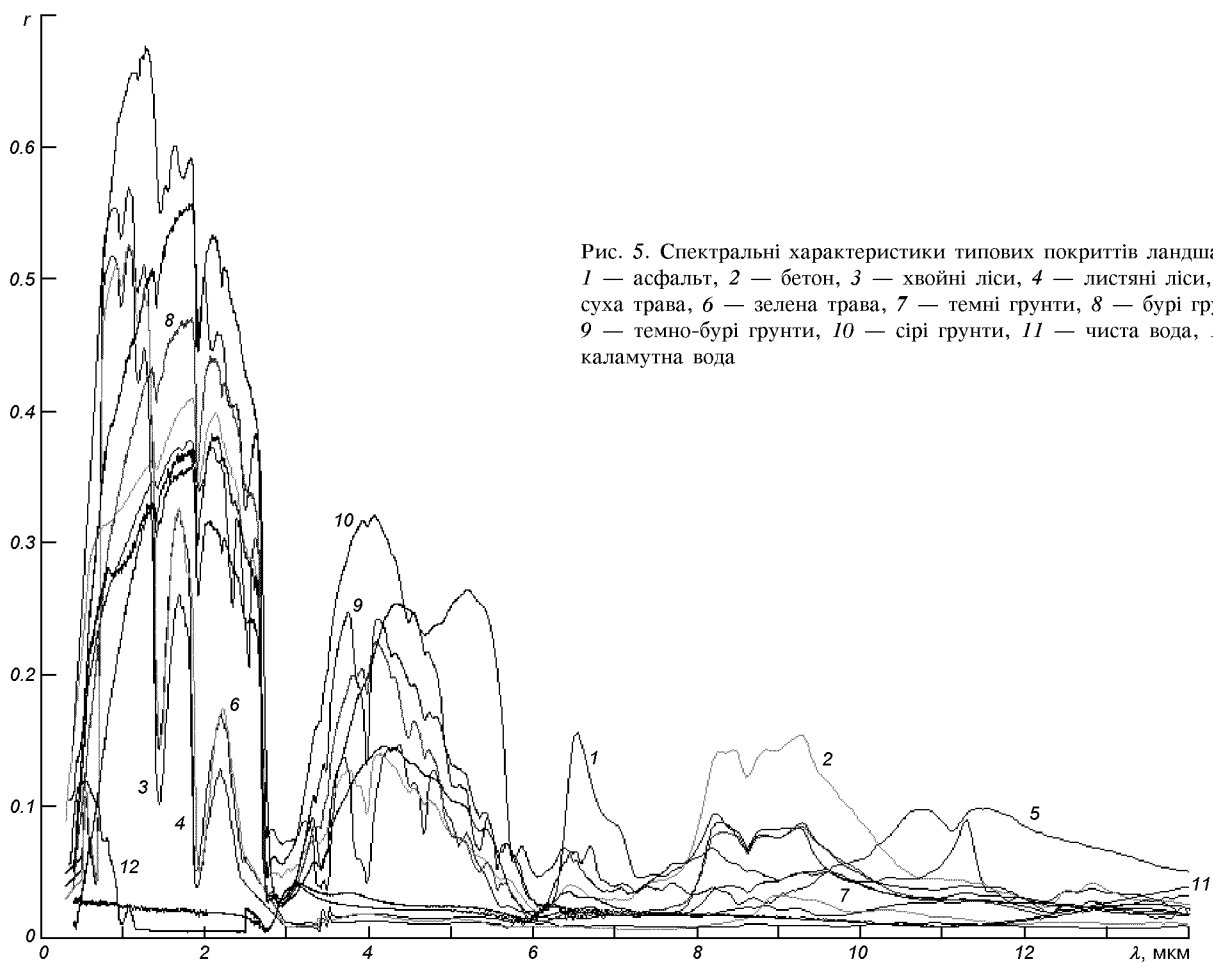


Рис. 5. Спектральні характеристики типових покриттів ландшафту: 1 — асфальт, 2 — бетон, 3 — хвойні ліси, 4 — листяні ліси, 5 — суха трава, 6 — зелена трава, 7 — темні ґрунти, 8 — бурі ґрунти, 9 — темно-бурі ґрунти, 10 — сірі ґрунти, 11 — чиста вода, 12 — каламутна вода

вання інших методів і підходів. В даному випадку мала кількість біорізноманіття необов'язково пов'язана з низьким біологічним потенціалом території, а скоріше з відсутністю видів, які беруться до уваги при оцінюванні біорізноманіття даної території.

Результат класифікування біомів території дослідження покладено в основу розрахунку значень листяного індексу за регресійними залежностями рис. 1. Розподіл листяного індексу території дослідження показано на рис. 3, *е*.

З використанням карти висот, наземних завіркових та допоміжних довідкових даних виконано другий етап класифікування — розділення класів біомів на підкласи.

Як і будь-яка класифікація, подібний поділ є суб'єктивним, обумовленим конкретною задачею: необхідністю деталізації виділених тери-

торій в контексті градієнтів середовища, що визначають загальний характер розподілу видів рослин і тварин. Оскільки для гірської місцевості, а вона становить більшу частину території дослідження, таким градієнтом є збільшення висоти над рівнем моря, в основу створеної класифікації покладено висотну поясність рослинності Гірського Криму, описану в роботах [5—7]. Типи рослинних формацій виділялися на основі домінантних видів або форм зростання рослин. Через особливості розташування Кримських гір та кліматичні умови, які внаслідок цього сформувалися, склад і кількість видів рослинних формацій нижніх і середніх поясів значно варіюють залежно від орієнтації макросхилів відносно півдня та півночі. Дана ситуація також знайшла відображення у розробленій системі класифікації. Всього таким чином було

Таблиця 3. Класифікація рослинного покриву території дослідження та її видове багатство (складено на основі робіт Я. П. Дідуха (1992, 1985, 1988), Ю. Р. Шеляг-Сосонка (1985, 1988), А. І. Дулицького (2001, 1999))

Біом	N	Підклас	Висота над рівнем моря	Загальна кількість видів
Широколистяні ліси	1	Пухнастодубові ліси північного макросхилу	0—450	102
	2	Скельнодубові ліси північного макросхилу (із включеннями грабових и ясеневих лісів)	450—800	107
	3	Букові ліси (включення грабових, ясеневих, кленових лісів)	800—1400	101
	4	Скельнодубові ліси південного макросхилу	500—800	113
	5	Пухнастодубові ліси південного макросхилу	0—500	165
Луки та зернові культури	6	Сільгоспугіддя	0—400	50
	7	Справжні степи	400—600	105
	8	Лучні степи північного макросхилу	600—800	99
	9	Саваноїди	0—450	83
	10	Лучні степи південного макросхилу	450—800	112
	11	Лучні степи, томіяри, луки яйл	800—1545	123
Вузьколистяні ліси	12	Соснові ліси нижнього поясу північного макросхилу	0—400	79
	13	Соснові ліси середнього поясу північного макросхилу	400—1200	103
	14	Ліси з домінуванням сосни Коха	900—1400	104
	15	Соснові ліси середнього поясу південного макросхилу	400—900	144
	16	Соснові ліси нижнього поясу південного макросхилу	0—400	131
Чагарники	17	Шибляковоподібні зарості в комплексі з чагарниковими заростями типу шибляк	0—450	72
	18	Деревно-чагарникові зарості середнього поясу північного макросхилу	450—800	75
	19	Деревно-чагарникові зарості високогір'я	800—1400	88
	20	Шибляк з деревно-чагарниковими заростями	300—800	91
	21	Шибляк з вічнозеленим підліском	0—300	87
Рідколісся	22	Дубові рідколісся в комплексі зі степовою рослинністю	0—400	89
	23	Рідколісся середнього поясу північного макросхилу	400—800	86
	24	Високогірні (кленово-ясеневі) рідколісся	800—1300	90
	25	Дубові рідколісся середнього поясу південного макросхилу	450—800	87
	26	Рідколісся приморського поясу південного макросхилу	0—450	94

виділено 26 типів рослинних формацій-класів, і для кожного з них підраховано кількість видів рослин і тварин.

До підрахунку видового багатства вибраної території було включено 343 види вищих судинних рослин, 44 види ссавців і 33 види птахів,

середовища існування яких описані в літературі [5—8]. При аналізі флористичного різноманіття виділених класів враховувалися лише типові види з високим ступенем постійності зростання, які утворюють флористичне ядро формації певного типу. При розгляді фауністичного різно-

маніття робилося уточнення, що розподіл більшості видів тварин значно ширший за виділені рослинні формації, і його межі краще визначаються структурою рослинності, аніж видами рослин. Для кожного класу розраховано загальну кількість видів рослин і тварин (табл. 3).

Остаточна класифікація типів земної поверхні території дослідження, для якої визначалося потенційне біорізноманіття, показана на рис. 3, *є*.

Основою нечітко-логічної моделі оцінювання біорізноманіття є функції належності впливу відповідних факторів. Для врахування дії факторів табл. 1 ми використовували функції належності, запропоновані на основі попередніх досліджень біорізноманіття Криму [2, 5–8] та зіставлення їх з одержаними просторовими розподілами відповідних факторів. Слід зауважити, що вплив рослинного покриву, на відміну від інших факторів, було враховано ґрунтовим вегетаційним індексом *SAVI* та нормалізованим вегетаційним індексом *NDVI*. За першим визначався вплив даного фактору на біорізноманіття рідколісся, степових та лучних угруповань, за другим — на біорізноманіття решти біомів.

Вхідні дистанційні та допоміжні дані згідно із схемою рис. 2 перераховувалися до величин факторів, що впливають на біорізноманіття, далі за уточненою класифікацією типів рослинних формацій згідно з табл. 3 оцінювалося потенційне біорізноманіття (8), і на нього накладалися обмеження нечітко-логічної моделі (9), (10).

За результатами оцінювання біорізноманіття південно-західної частини Кримського півострову створено тематичну карту, яка кількісно відображає розподіл біологічного різноманіття на даній території (рис. 3, *ж*).

ОБГОВОРЕННЯ

З модельований розподіл біорізноманіття на території дослідження певною мірою відбиває співвідношення кількості видів різних класів, представлених у табл. 1. Надзвичайно високе біорізноманіття, як і передбачалося, спостерігається на території пухнастодубових лісів південного макросхилу. У межах класу простежується розподіл кількості біорізноманіття, який обумовлюється дією зовнішніх факторів і відповідає обмеженням, накладеним функціями

належності для показників цих факторів. Очікуване високе біорізноманіття соснових лісів південного макросхилу можна відмітити лише на деяких ділянках, імовірно тих, що мають добре сформований підлісок. Кількість біорізноманіття решти територій класу значно обмежується функцією належності для показника структури рослинного покриву — індексу листяної поверхні (*LAI*). Подібна ситуація спостерігається на ділянках лучних степів і луків яйл, але в даному випадку обмеження відбувається за функцією належності показника рослинного покриву ґрунтового вегетаційного індексу (*SAVI*). При аналізі результатів дослідження необхідно зважати і на те, що оцінювання провадилося за одним знімком, який відображає діапазон значень факторів лише на момент зйомки. Тому для більш достовірного відображення просторового розподілу біорізноманіття значення факторів варто усереднювати за вегетаційний період.

Встановлення достовірності одержаних результатів, а отже і самої моделі, як того вимагають правила моделювання, поки що не видається можливим. Головним чином це обумовлено відсутністю картографованого кількісного розподілу біорізноманіття дослідженої території необхідного масштабу, які можна було б використати для порівняння з результатами моделювання. Не доводиться говорити й про безпосереднє завірювання з об'єктом дослідження, оскільки воно вимагає значних фінансово-часових затрат і залучення чималого кола спеціалістів. Тому будь-які висновки щодо точності результатів дослідження не можна вважати повністю об'єктивними.

Візуальне зіставлення створеної тематичної карти з матеріалами, за якими можна судити про біорізноманіття досліджуваної території, дає підставу визнати результати моделювання прийнятними.

ВИСНОВКИ

Таким чином, дистанційні дані середньої просторової розрізненості є досить зручним та ефективним інструментом оцінювання біологічного різноманіття з урахуванням зовнішніх факторів, що обумовлюють його просторовий роз-

поділ.

Спільне використання стандартних інформаційних продуктів ДЗЗ та наземних завіркових даних може стати основою інформаційного сервісу не тільки оцінювання біорізноманіття, а й його моніторингу протягом років чи навіть сезонів.

Звичайно, запропонована нечітко-логічна модель є дуже примітивною, не враховує ряд сучасних досягнень у моделюванні гео- та екосистем і потребує суттєвих уточнень. Але, як свідчить досвід оброблення та інтерпретування даних ДЗЗ, дуже часто недосконалість застосованих моделей компенсується значним обсягом та якістю вихідних даних, зокрема точним знанням їхнього просторового розподілу. Особливо це стосується таких надскладних та слабкопридатних до моделювання систем, як екологічні. Тому запропонований підхід до оцінювання різноманіття з використанням дистанційних даних є актуальним і має широкі перспективи теоретичного розвитку та практичного застосування.

1. Атлас. Автономна республіка Крим: Електронна версія 4.1. — 2004. — (Розробники: Інститут географії НАН України, Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, ЗАТ «Інститут передових технологій»).
2. Биологическое и ландшафтное разнообразие Крыма: проблемы и перспективы // Вопросы развития Крыма: Научно-практический и дискуссионно-аналитический сборник. — Симферополь: СОНАТ, 1999. — Вып. 11. — 180 с.
3. Выработка приоритетов: новый подход к сохранению биоразнообразия в Крыму // Результаты программы «Оценка необходимости сохранения биоразнообразия в Крыму», осуществленной при содействии Программы поддержки биоразнообразия BSP. — Вашингтон, 1999. — 257 с.
4. География и мониторинг биоразнообразия. — М.: Изд-во Науч. и учебно-метод. центра, 2002. — 432 с.
5. Дидух Я. П. Растительный покров горного Крыма (структура, динамика, эволюция и охрана). — Киев: Наук. думка, 1992. — 253 с.
6. Дидух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Государственный заповедник «Мыс Мартыан». — Киев, 1985.
7. Дидух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Ялтинский горно-лесной государственный заповедник. — Киев, 1980.
8. Дулицкий А. И. Биоразнообразие Крыма. Млекопитающие. История, состояние, охрана, перспективы. — Симферополь: СОНАТ, 2001. — 208 с.
9. Киселев А. Н. Оценка и картографирование биологического разнообразия (на примере Приморья) // Геоботаническое картографирование. — 2000. — 3. — С. 3—15.
10. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — М.: Сов. радио, 1978. — 400 с.
11. Круглов В. В., Длин М. И. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. — М.: Физматлит, 2002. — 254 с.
12. Пианка Э. Эволюционная экология: Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. М. С. Гилярова. — М.: Мир, 1981. — 400 с.
13. Попов М. О., Станкевич С. А., Козлова А. О. Удосконалена процедура класифікування багатоспектральних аерокосмічних зображень при оцінюванні біорізноманіття Північно-Причорноморського регіону України // Тез. докл. междунар. науч. конф. «Фундаментальные исследования важнейших проблем естественных наук на основе интеграционных процессов в образовании и науке». — Севастополь: НПП ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. — С. 82—83.
14. Протасов А. А. Биоразнообразие и его оценка: Концептуальная диверсикология. — Киев: Ин-т гидробиологии, 2002. — 107 с.
15. Сахацький О. І. Застосування супутникових даних для вирішення задач водообміну у геосистемах // Доп. НАН України. — 2006. — № 4. — С. 118—126.
16. Станкевич С. А. Статистичні моделі розділення класів об'єктів аерокосмічного моніторингу за цифровими зображеннями // Зб. матер. науково-практичної конф. «Актуальні проблеми військової екології». — Київ: ННДЦ ОТ і ВБ України, 2004. — С. 76—81.
17. Станкевич С. А., Козлова А. О. Особливості розрахунку індексу видового різноманіття за результатами статистичної класифікації аерокосмічних знімків // Уч. зап. Таврического нац. ун-та. — 2006. — 19 (58). — С. 144—150.
18. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы: Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1980. — 328 с.
19. Шеляг-Сосонко Ю. Р., Дубина Д. В., Вакаренко Л. П. та ін. Збереження і невиснажливе використання біорізноманіття України: стан та перспективи / Відп. ред. Ю. Р. Шеляг-Сосонко. — Київ: Хімджест, 2003. — 246 с.
20. ASTER Higher-Level Product User Guide. — Pasadena: California Institute of Technology, 2001. — 80 p.
21. Bhogal A. S., Goodenough D. G., Chen H., et al. Automated Methods for Atmospheric Correction and Fusion of Multispectral Satellite Data for National Monitoring // Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symp. IGARSS02. — Toronto: IEEE, 2002. — P. 1316—1319.
22. Bouman B. A. M. Accuracy of Estimating the Leaf Area Index from Vegetation Indices Derived from Crop Reflectance Characteristics // Int. J. Remote Sens. — 1992. — 16. — P. 3069—3084.
23. Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., et al. USGS Digital Spectral Library splib05a. — USGS Open File Report 03-395, 2003. — 1340 p.
24. Dubayah R., Loechel S. Modeling Topographic Solar Radiation Using GOES Data // J. Appl. Meteorol. — 1997. — 36, N 2. — P. 141—154.
25. Huete A., Kim H.-J., Miura T. Scaling Dependencies and Uncertainties in Vegetation Index — Biophysical Retrievals in Heterogeneous Environments // Proceedings of the IGARSS'05 Symposium. — Seoul: IEEE, 2005. — P. 105—114.
26. Huete A. R., Liu H., van Leeuwen W. J. D. The Use of

- Vegetation Indices in Forested Regions: Issues of Linearity and Saturation // Proceedings of the IGARSS'97 Symposium. — Singapore: IEEE, 1997.—P. 1—3.
27. Lee K.-S., Cohen W. B., Kennedy R. E., et al. Hyperspectral versus Multispectral Data for Estimating Leaf Area Index in Four Different Biomes // Remote Sens. Environ.—2004.—91.—P. 508—520.
28. Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. — Hoboken: John Wiley, 2004.—784 p.
29. Limaye A. S., Crosson W. L., Laymon C. A. Estimating Accuracy in Optimal Deconvolution of Synthetic AMSR-E Observations // Remote Sens. Environ.—2006.—100.—P. 133—142.
30. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., et al. An Assessment of the SRTM Topographic Products / Jet Propulsion Laboratory Technical Report D-31639. — Pasadena: JPL, 2005.—144 p.
31. Tovar-Pescador J., Pozo-Vazquez D., Ruiz-Arias J. A., et al. On the Use of the Digital Elevation Model to Estimate the Solar Radiation in Areas of Complex Topography // Meteorol. Appl.—2006.—13, N 3.—P. 279—287.
32. Turner W. Remote sensing for biodiversity and conservation // Trends Ecol. and Evol.—2003.—18, N 6.—P. 306—314.
33. Wang Q., Adiku S., Tenhunen J., Granier A. On the Relationship of NDVI with Leaf Area Index in a Deciduous Forest Site // Remote Sens. Environ.—2005.—94.—P. 244—255.
34. Wang X., Zhang Z. A Review: Theories, Methods and Development of Soil Moisture Monitoring by Remote Sensing // Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'05 Proceedings. — Seoul: IEEE International, 2005.—Vol. 6.—P. 4505—4507.

BIODIVERSITY ESTIMATION TECHNIQUE USING MEDIUM SPATIAL RESOLUTION HYPERSPECTRAL IMAGERY

S. A. Stankevich, A. O. Kozlova

We propose a technique for terrain biodiversity estimation which is based on medium spatial resolution hyperspectral satellite imagery. The technique makes allowances for ecological factor influence on biodiversity spatial distribution. Our results of biodiversity estimation for the Crimean peninsula south-west part by fuzzy-logic model is presented.

UDC 629.056.6

V. Kortunov¹, I. Dybska¹, G. Proskura¹, T. Trachsel²

¹National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

²Swiss Federal Institute of Technology, Zurich

Accuracy Analysis of Strapdown Inertial Navigation Systems

Received January 26, 2006

This paper discusses correction methods of INS/GPS systems. Different schemes are considered: open loop correction scheme, scheme with estimated instrumental errors feedback, scheme with state space feedback and scheme with navigation parameter errors feedback. INS correction is considered as the process of control on the base of combined method. Nonlinear equations of INS angular errors in quaternion form are obtained. Nonlinear and linear equations of navigation and orientation parameters errors are presented. Observability and detectability of linear equations of INS errors at different component combination of error vector are evaluated. Precision analysis of instrumental errors compensation is carried out. The results of testing INS/GPS systems on laboratory bench and car are presented.

1. INTRODUCTION

Integrated INS/GPS systems with microelectromechanical sensors (MEMS) are widely used for different moving plants because these inertial systems are small-sized and low-cost.

The development of integrated INS/GPS systems with MEMS gyros and accelerometers includes solving the problems to provide the required accuracy of navigation parameter calculation.

Correction of INS errors is realized using both internal loops without external information and adaptive optimal filtering in close loop compensation scheme. In monograph [8], the informational equivalence of open loop and closed loop correction schemes under a certain ratio of coefficients in observation feedback was proved. The problem of correction becomes of great importance especially at development of INS, which is corrected using GPS receiver data, with low-cost miniature solid-state sensors, for example, MEMS — gyro and accelerometer sensors [10]. Development of low-

cost integrated systems with this type of sensors, in our opinion, requires solving the following tasks.

1. Because of low precision of inertial sensors, accelerometers and gyros, which are determined by stability of scalar factor, stability of “zero” (bias) and parameters of random component of sensor error (noise), navigation parameters are formed (calculated) with low accuracy. The experience of practical use of the sensors demonstrates significant increase of fluctuating components of «zeros», such as Markovian processes with a correlation time from 10 to 50 s. These properties of sensor errors specify some additional requirements to compensation methods.

2. Inaccurate geometric placing sensors on axes of measurement trihedron because even proper orientation of the sensor element in the microchip is specified with an accuracy of 1°, and further placing the sensors on board, and board in the case results in additional errors. So, geometric calibration with high precision is required. But test bench for this type of calibration is expensive, and

total cost will increase. In our opinion, it is necessary to develop a new procedure on inexpensive test benches.

3. Temperature dependence of sensor parameters and significant deviations of temperature from pointed in specification narrows exploiting conditions of such a system and requires to carry out exact temperature calibration for not only systematic errors of sensors, but scale factor as well. This problem can be solved only by metrology. That means carrying out thorough temperature calibration.

4. Level of MEMS errors results in such navigation parameter errors when linear models can not be used. It is necessary to choose equations of INS errors thoroughly and validate all range of errors value.

5. Using the extended Kalman filter for evaluation of INS errors does not allow one to estimate all the errors, because precision of evaluation is decreased and calculable loading of processor is increased with extension of state vector. To achieve the necessary precision of error estimation, it is required conducting test motions of INS, not characteristic for the used object of navigation.

6. At disconnecting the GPS of the receiver at object shading or disappearing navigation satellites autonomous application of INS is not allowed more than a few minutes. The improvement of such performance indexes is possible due to the use of adequate mathematical models of sensor errors that requires the decision of identification of transformation processes of navigation information.

Basic methods of INS multidimensional correction of open loop type and closed loop type were offered and described in [8, 5]. Moreover, closed correction scheme is called compensation scheme or scheme of correction as controlled process. In this case control object is computational process of forming navigation parameters using measurements from sensors (controlled input actions), and control actions or signals are signals for compensation of sensor instrumental errors. Let us consider the compensation of uncontrolled disturbances (instrumental errors) as the purpose of control. Then control problem can be considered as the task of selective invariant control [9]. This approach is based on the use of the model of disturbances as in [8] where it is named wave approach. This approach is often applied to the

tasks of INS errors, for example as in [4], using in the extended Kalman filter the model of sensor instrumental errors, although it does not correlate with invariant control. In this case the question is about the selective invariance of control or correction, and the precision of correction is determined by adequacy of the models used.

Other approach [5, 2] is based on the procedure of evaluation of the uncontrolled input signal of the dynamic system in the real time with the use of asymptotic observers of the state and disturbance. The disadvantage of this approach is high sensitivity of the system to information delay in the channels. Neglect of this fact results in instability of calculation process of navigation parameters. The approach under consideration is used at presence of INS hardware synchronization with external information sources.

It is possible to obtain high precision of integrated INS only at the comprehensive analysis of the closed computational process of navigation parameter calculation. Investigations into INS correction specify the actuality of improvement of compensation schemes of INS errors [10].

Let us consider the properties of correction schemes for type solutions of instrumental error compensation problem.

2. CORRECTION METHODS

2.1. Classification of correction methods. In recent years a number of INS correction methods using external measurements has been developed. Let us classify them according to the following features:

- according to integration level (tightly coupled / loosely coupled correction scheme, low level of integration / high level of integration);
- according to feedback (open-loop / closed correction scheme);
- according to functioning criterion (optimal / non-optimal).

2.2. Open loop correction with filtration (M1). This correction method is based on the evaluation of navigation parameter error vector and subtracting errors from the INS formed.

The condition for application of this correction scheme is saving smallness of navigation parameters errors in relation to supporting or basis

point of linearization of navigation equations. With violating the condition of relative smallness of INS error estimation it is possible to change the supporting point of linearization and reduce estimation errors to zero, that is realized by connection of type Feedback with initial condition in the certain time moments. This type of correction is used for the high-precision systems with precise sensors, when the period of correction can last tens of minutes.

The equations for this correction scheme are described as:

$$\begin{aligned}\Delta y(t) &= y_{\text{GPS}}(t) - y_{\text{INS}}(t), \\ \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}_{\text{FK}}(\Delta y(t) - \mathbf{C} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)), \\ \mathbf{x}_{\text{out}}(t) &= \mathbf{x}_{\text{INS}}(t) - \Delta \hat{\mathbf{x}}(t),\end{aligned}$$

where $\mathbf{L}_{\text{FK}}$ is matrix of feedback on an observation and $\mathbf{x}_{\text{out}}(t)$ is corrected vector of navigation parameters.

2.3. Correction scheme with feedback on estimation of sensor instrumental error (M2). For this scheme of correction, the requirements to the sensors can be significantly reduced, because the linearity of errors is valid for long time of the operation of the system. Adding direct connections as for the scheme M1, we have the scheme of the type M1 + M2.

The equations for this correction scheme are described as:

$$\begin{aligned}\Delta y(t) &= y_{\text{GPS}}(t) - y_{\text{INS}}(t), \\ \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t) \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}_{\text{FK}}(t)(\Delta y(t) - \mathbf{C} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)), \\ \mathbf{u}_\omega(t) &= -\Delta \hat{\boldsymbol{\omega}}(t), \\ \mathbf{u}_w(t) &= -\Delta \hat{\mathbf{w}}(t), \\ \mathbf{u}(t) &= [\mathbf{u}_\omega^T(t) \ \mathbf{u}_w^T(t)]^T, \\ \dot{\mathbf{x}}_{\text{INS}}(t) &= \mathbf{f}_{\text{INS}}(\mathbf{x}_{\text{INS}}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}_{\text{INS}}(t)), \\ y_{\text{INS}}(t) &= \mathbf{h}_{\text{INS}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \\ \hat{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{x}_{\text{INS}}(t) - \Delta \mathbf{x}_{\text{FK}}(t),\end{aligned}$$

where $u_\omega(t)$ and $u_w(t)$ are the correction signals (control signals) on angular rate and accelerations sensors and $v_{\text{INS}}(t)$ denotes disturbances (sensor errors).

2.4. Correction scheme with feedback on estimation of navigation parameter error (feedback

on the Kalman filter state vector), M3. This scheme of correction corresponds to the classic method of control using the state vector that can provide given dynamic properties of scheme by the matrix coefficient $\mathbf{K}_x$. The matrix coefficient can be calculated by solving the optimal control task using quadratic criterion (LQ) for the non-stationary system. However, the specificity of the matrix of the state allows one to get simplified solutions, for example as in [3]. The authors used the method of synthesis of stationary matrix coefficient by decomposition on autonomous channels. This method provides the required dynamics of adjustment on instrumental errors and, hence, ability of INS to operate.

The equations of this correction scheme are described as:

$$\begin{aligned}\Delta y(t) &= y_{\text{GPS}}(t) - y_{\text{INS}}(t), \\ \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t) \Delta \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{L}_{\text{FK}}(t)(\Delta y(t) - \mathbf{C} \Delta \hat{\mathbf{x}}(t)), \\ \mathbf{u}(t) &= \mathbf{K}_x \Delta \hat{\mathbf{x}}(t), \\ \dot{\mathbf{x}}_{\text{INS}}(t) &= \mathbf{f}_{\text{INS}}(\mathbf{x}_{\text{INS}}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}_{\text{INS}}(t)), \\ y_{\text{INS}}(t) &= \mathbf{h}_{\text{INS}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \\ \hat{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{x}_{\text{INS}}(t) - \Delta \hat{\mathbf{x}}(t).\end{aligned}$$

2.5. Correction scheme with feedback on navigation parameter error (M4). The scheme of correction corresponds to the method of control with the use of output vector that can not always provide given dynamic properties of the scheme by the calculated matrix coefficient $\mathbf{K}_y$. The authors developed the procedure for synthesis of stationary matrix coefficient by decomposition on autonomous channels that provides the required dynamics of adjustment on the instrumental errors of sensors. The advantage of this correction scheme is defined by the fact that it does not use the multidimensional observer of the state and, hence, the INS software is simplified.

The equations for this correction scheme are described as:

$$\begin{aligned}u(t) &= \mathbf{K}_y(y_{\text{GPS}}(t) - y_{\text{INS}}(t)), \\ \dot{\mathbf{x}}_{\text{INS}}(t) &= \mathbf{f}_{\text{INS}}(\mathbf{x}_{\text{INS}}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}_{\text{INS}}(t)), \\ y_{\text{INS}}(t) &= \mathbf{h}_{\text{INS}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)).\end{aligned}$$

3. INS ERROR EQUATIONS

3.1. The equations of orientation parameter errors (the Euler angles). Let us introduce the following designation:

- $\mathbf{\Lambda}$ is direction cosine matrix, which transforms vector from the body coordinate system to the inertial coordinate system, determined by quaternion $\mathbf{\lambda}$ and $\mathbf{\Lambda}(\mathbf{\lambda})$;
- $\Delta\mathbf{\Lambda}$ denotes the rotation matrix from calculated frame to navigation frame, then the relationship between the matrices is $\mathbf{\Lambda} = \Delta\mathbf{\Lambda}\tilde{\mathbf{\Lambda}}$;
- $\Delta\mathbf{\omega}_b$ is the vector of instrumental errors of gyros in the body frame.

The general equation of orientation parameter errors can be written as [7]:

$$\Delta\dot{\mathbf{\lambda}} = 0.5\Delta\mathbf{\lambda}\otimes\tilde{\mathbf{\lambda}}\otimes\Delta\mathbf{\omega}_b\otimes\tilde{\mathbf{\lambda}}^*, \quad (1)$$

where $\Delta\mathbf{\omega}_b = [0, \mathbf{\omega}_{bx}, \mathbf{\omega}_{by}, \mathbf{\omega}_{bz}]$ is quaternion of absolute angular rate in the body frame.

If the following representation is allowed:

$$\Delta\mathbf{\lambda} = [1, 0.5\alpha_x, 0.5\alpha_y, 0.5\alpha_z]^T,$$

$$\Delta\mathbf{\Lambda} = \mathbf{I} + \Phi,$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_z & \alpha_y \\ \alpha_z & 0 & -\alpha_x \\ -\alpha_y & \alpha_x & 0 \end{bmatrix},$$

the simplified equations of orientation parameter errors are used in the form:

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{\lambda})\Delta\mathbf{\omega}_b, \quad (2)$$

where vector $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]^T$ is angular errors of vertical and course.

3.2. The equations of navigation parameter errors. If $\Delta\mathbf{V}$ is the vector of velocity errors in the inertial frame, and $\Delta\mathbf{R}$ is the vector of position errors, the complete equation of errors can be written as [7]:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\mathbf{V}} &= \\ &= -(\Delta\mathbf{\Lambda}(\Delta\mathbf{\lambda}) - \mathbf{I})\mathbf{\Lambda}(\tilde{\mathbf{\lambda}})\mathbf{w}_b + \Delta\mathbf{\Lambda}(\Delta\tilde{\mathbf{\lambda}})\Delta\mathbf{w}_b + \mathbf{g}(\Delta\mathbf{R}), \\ \Delta\dot{\mathbf{R}} &= \Delta\mathbf{V}, \quad \Delta\mathbf{R} = |\Delta\mathbf{R}|, \end{aligned} \quad (3)$$

where $\mathbf{w}_b$ is the vector of acceleration in the body frame and $\Delta\mathbf{w}_b$ is accelerometer bias.

The linear equations of errors can be represented in the form:

$$\Delta\dot{\mathbf{V}} = \Phi(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{w}_{nav} + \mathbf{\Lambda}(\mathbf{\lambda})\Delta\mathbf{w}_b + \mathbf{g}(\Delta\mathbf{R}),$$

$$\Delta\dot{\mathbf{R}} = \Delta\mathbf{V}, \quad \Delta\mathbf{R} = |\Delta\mathbf{R}|, \quad (4)$$

$$\mathbf{g}(\Delta\mathbf{R}) = [0, \omega_0^2\Delta R_y, 0]^T,$$

where $\mathbf{w}_{nav}$ is the vector of acceleration in the navigation frame and ω_0 denotes Shuler's frequency.

3.3. General equations of INS errors. Let us combine equations (1) with (3) and write non-linear system:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)), \mathbf{y}(t) = \mathbf{G}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (5)$$

where:

$\mathbf{x}(t) = [\Delta\mathbf{\lambda}(t), \Delta\mathbf{V}(t), \Delta\mathbf{R}(t), \mathbf{x}_w(t), \mathbf{x}_v(t)]^T$ is the vector of INS errors;

$\mathbf{u}(t) = [\mathbf{u}_w(t), \mathbf{u}_v(t), \mathbf{u}_v(t)]^T$ is the vector of input;

$\mathbf{v}(t) = [\boldsymbol{\mu}_w(t), \boldsymbol{\mu}_v(t)]^T$ is the vector of disturbance (sensor errors).

To investigate the observability and precision of instrumental error restoration, the equations of errors are used in linearized form:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_u(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_v(t)\mathbf{v}(t),$$

$$\mathbf{A}(t) = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t))}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\substack{x = x^0 \\ u = u^0 \\ v = v^0}},$$

$$\mathbf{B}_u(t) = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t))}{\partial \mathbf{u}} \bigg|_{\substack{x = x^0 \\ u = u^0 \\ v = v^0}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{B}_v(t) = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t))}{\partial \mathbf{v}} \bigg|_{\substack{x = x^0 \\ u = u^0 \\ v = v^0}},$$

where x^0, u^0, v^0 denote working point of linearization.

For the Kalman filter realization, nonlinear system of equations (5) is used.

4. OBSERVABILITY AND DETECTABILITY OF INSTRUMENTAL ERRORS

Observability is fundamental concept of dynamic system identification theory, which is charac-

terized by the ability to estimate state variable using system output measurements. In the case under consideration it is necessary to solve the problem on testability of sensor instrumental errors and navigation parameters using measurements of velocity and position (attitude).

Linear system (6) is considered as observable on finite time interval, if all the coordinates of state vector at initial moment of this time interval can be determined with the use of information on system input and measurements of system output at this time interval.

Criterion of Observability

In order to system (3) would be observable, it is necessary and sufficient that the matrix of observability $\mathbf{K}_O(\mathbf{A}, \mathbf{C}) = [\mathbf{C}^T, \mathbf{A}^T\mathbf{C}^T, \dots, (\mathbf{A}^T)^{n-1}\mathbf{C}^T]$ of dynamic system has $\text{rank}(\mathbf{K}_O) = n$ equal to state vector dimension.

But in practice the situation may take place when criterion of complete observability is not satisfied, while error evaluations are converged and correction is possible. This situation corresponds to the detectability of state vector.

If the system is unobservable and $\text{rank}(\mathbf{K}_O) = \nu_2 < n$, using the Kalman structure transformation, system (6) can be expressed as:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \mathbf{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_v \\ \mathbf{B}_v \end{bmatrix} \mathbf{u}(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{C}_1, \mathbf{0}] \mathbf{x}(t) = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_1(t),$$

where

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t)]^T,$$

$$n_1 = \nu_2, \quad n_2 = n - \nu_2,$$

$$\text{rank}[\mathbf{C}_1^T, \mathbf{A}_{11}^T \mathbf{C}_1^T, \dots, (\mathbf{A}_{11}^T)^{\nu_2-1} \mathbf{C}_1^T] = \nu_2.$$

The pair $\{\mathbf{A}_{11}, \mathbf{C}_1\}$ is observable. If at the same time $\mathbf{A}_{22}$ matrix is Gurwitz matrix, the system is called detectable. This means that the possibility exists of evaluating all the components of state vector.

If the system is undetectable, principal possibility to calculate estimations of some INS errors is missed [6].

4.1. Observability of instrumental errors in one channel of INS. The equations of INS error model for this case take the form:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}(t) &= \Delta\omega, \\ \dot{\mathbf{V}}(t) &= \alpha(t)\mathbf{g} + \Delta\mathbf{w}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{V}(t),$$

where the state variables $\alpha(t)$, $\mathbf{V}(t)$, $\mathbf{R}(t)$, $\Delta\omega(t)$ and $\Delta\mathbf{w}(t)$ are attitude error, velocity error, position error, gyro sensor error, and accelerometer error, respectively. Let us suppose that measurable coordinates of error vector are velocity error and position error. Then matrices of the system can be written as:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ g & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

where g is gravity.

Using the R. Kalman criterion, determine the observability of system (8). The condition of observability is satisfied because $\text{rank}(\mathbf{K}_O^0) = 3$.

Let us verify condition of observability for extended system with matrices $\{\tilde{\mathbf{A}}_0, \tilde{\mathbf{B}}_0, \tilde{\mathbf{C}}_0, \tilde{\mathbf{D}}_0\}$, which is obtained by adding to system (8) the models of INS instrumental errors of INS in the form:

$$\Delta\dot{\omega}_M(t) = \alpha_\omega \Delta\omega_M(t) + \xi_\omega,$$

$$\Delta\dot{\mathbf{w}}_M(t) = \alpha_w \Delta\mathbf{w}_M(t) + \xi_w,$$

where ξ_ω and ξ_w are “white noise” components.

Then condition of observability can be written as $\text{rank}[\tilde{\mathbf{C}}_0^T, \tilde{\mathbf{A}}_0^T \tilde{\mathbf{C}}_0^T, \dots, (\tilde{\mathbf{A}}_0^T)^4 \tilde{\mathbf{C}}_0^T] = 4 < n$, which means that the components of state vector of extended system are unobservable. It should be mentioned that condition of observability of accelerometer errors and condition of observability of gyro sensor errors are satisfied separately.

Let us check condition of detectability of the extended system represented in the form similar to (7). Pair $\{\tilde{\mathbf{A}}_{011}, \tilde{\mathbf{C}}_{01}\}$ is completely observable because

$$\text{rank}[\tilde{\mathbf{C}}_{01}^T, \tilde{\mathbf{A}}_{011}^T \tilde{\mathbf{C}}_{01}^T, \dots, (\tilde{\mathbf{A}}_{011}^T)^3 \tilde{\mathbf{C}}_{01}^T] = 4.$$

Matrix $\tilde{\mathbf{A}}_{022}$ is Gurwitz matrix, which allows one to conclude detectability of extended system and evaluation of all the components of space vector.

Transformed to the new basis, extended system can be written as:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}_1(t) &= \bar{x}_3(t), \\ \dot{\bar{x}}_2(t) &= \bar{x}_1(t), \\ \dot{\bar{x}}_3(t) &= \bar{x}_4(t), \\ \dot{\bar{x}}_4(t) &= \alpha_w \bar{x}_4(t), \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{\bar{x}}_5(t) &= \alpha_w \bar{x}_5(t).\end{aligned}\quad (9)$$

From this it is clear that the fifth equation extracts unobservable component

$$\bar{x}_5(t) = -\frac{1}{g} \alpha(t) - \frac{\alpha_w}{g} \Delta\omega(t) + \Delta w(t),$$

which includes accelerometer bias $\Delta w(t)$, while the other variables contains are included in block of observable variables.

4.2. Observability of INS instrumental errors in multidimensional case. *The first case.* If space vector of error equation (6) consists of INS parameter errors $x(t) = [\Delta\lambda(t), \Delta V(t), \Delta R(t)]^T$ and matrix of observations determines only measurements of position and velocity errors

$$C = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

the system is unobservable. Moreover, error of course angle α_y remains an unobservable variable. It is determined that this system is undetectable as well.

When this variable is considered as measurable (for example by external course system), the matrix of observation

$$C = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

is changed and system (6) becomes observable.

The second case. If space vector of error equation consists of INS parameter

$$x(t) = [\Delta\lambda(t), \Delta V(t), \Delta R(t), x_w(t), x_v(t)]^T$$

and A_w, A_v are nonzero matrices, the system is observable on observation of velocity and position errors.

The third case. Let us consider the state of the navigation system for which A_w, A_v matrices are zero matrices and instrumental errors are constant. In this case the rank of constructed matrix of observability appeared to be smaller than the dimension of system space vector $\text{rank}(K_o^3) = 14$, which shows that the observability is missing completely from dynamic system. In that case let us verify detectability and determine unobservable components of navigation system error vector.

Selecting S basis correspondingly, let us transform the system to the view similar to (6). Condition of observability of pair $\{A_{11}, C_1\}$ is satisfied because $\text{rank}[C_1^T, A_{11}^T C_1^T, \dots, (A_{11}^T)^{13} C_1^T] = 14 = \nu_2$. Moreover, matrix A_{22} is Gurwitz one that allows one to conclude on detectability of the system, which corresponds to evaluation of all the components of system (6) state vector.

The transformed system (6) consists of two parts: the part of dimension with $\nu_2 = 14$ in which output $y(t)$ is observable and the unobservable part including the components of INS instrumental errors, Δw_y and Δw_z .

The results obtained demonstrate the following: when the parameters of both gyro and accelerometers error models are equal to zero, system (6) losses its observability. It should be noted that the availability at least, of rotation sensor or just accelerometers error model in the system provides the observability of the system. However, even if dynamic system losses its observability, the possibility exists of evaluating system space state, which means the detectability of the system.

5. ANALYSIS OF CORRECTION METHOD PRECISION

To analyse the precision of correction methods let us assume the following:

1. Unit of navigation parameters formation using inertial sensors is continuous and ideal system.
2. Unit of velocity vector and position measurements by correcting system is ideal.
3. It is analysed only influence of instrumental errors of inertial sensors on precision of navigation parameters in asymptotic mode (time tends to

infinity, $t \rightarrow \infty$).

Let us characterise the system precision by order of astaticism with respect to disturbance. The analysis of system astaticism can be performed through the structural method (using multidimensional transfer functions), at which the order of power of variable s is determined in numerator of transfer function, or by examining special matrices in state space.

5.1. Analysis of system astaticism in state space. Let us consider a controllable dynamic system (a closed system corrected for instrumental errors) in the form:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_0 \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_0 \mathbf{v}(t), \\ \Delta \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}_0 \Delta \mathbf{x}(t),\end{aligned}\quad (10)$$

where $\mathbf{A}_0$ is the matrix of state in fixed time, $\mathbf{v}(t)$ denotes disturbance in the system (instrumental errors), $\Delta \mathbf{x}(t)$ is vector of INS errors.

If the component of the vector of navigation parameter error $\Delta \mathbf{x}_\nu(\infty)$ does not depend on the μ th component of disturbance, the system has the first order of astaticism type $(\nu, \mu)_1$ [1].

For the linear system in form (10) astaticism type $((\nu, \mu)_1)$ is equivalent that the element of the μ th row and ν th column of matrix $\mathbf{A}_0^{-1} \mathbf{B}_0$ is equal to zero. For astaticism of the second order type $(\nu, \mu)_2$, the corresponding element of $\mathbf{A}_0^{-2} \mathbf{B}_0$ matrix has to be equal to zero etc. If matrix $\mathbf{A}_0$ is singular, the astaticism order can be determined through structural method using matrix transfer function.

5.2. Analysis of correction scheme type M1. Let us introduce the extended state vector consisting of estimations of INS errors and estimations of error observer of state type Kalman filter $\Delta \mathbf{z} = [\Delta \mathbf{x}^T, \Delta \hat{\mathbf{x}}^T]^T$. For this case matrices of state, control and observation are described in the form:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_z &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_0 - \mathbf{L}_{kf} \mathbf{C}_0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_z &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_z = [\mathbf{I}_{n \times n}, -\mathbf{I}_{n \times n}].\end{aligned}\quad (11)$$

It is impossible to specify the order of system astaticism in state space, so we apply structural method and determine matrix transfer function in the form $W_z(s) = \mathbf{C}_z(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_z)\mathbf{B}_z$ and matrix gain $\mathbf{K}_{sg} = \lim_{s \rightarrow 0} W_z(s)$.

The values of static gains of multidimensional

transfer function show that coefficients of errors on coordinates are zero and the system is astatic. Respectively, the errors of velocity and errors of angles are limited, and the system remains static.

5.3. Analysis of correction scheme type M2. For this case the matrices of state, control and observation are described in the form:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_z &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & -\mathbf{B}_0 \mathbf{K}_{err} \\ \mathbf{C}_0 \mathbf{L}_{kf} & \mathbf{A}_{0e} - \mathbf{L}_{kf} \mathbf{C}_0 - \mathbf{B}_{0e} \mathbf{K}_{err} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_{zu} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{B}_{0e} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{zv} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_z &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{ne \times ne} \end{bmatrix},\end{aligned}$$

where

$$\mathbf{K}_{err} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

is matrix of feedback.

It is impossible to specify the order of system astaticism in state space, so we apply the structural method and determine matrix transfer function in the form $W_z(s) = \mathbf{C}_z(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_z)\mathbf{B}_z$ and matrix gain $\mathbf{K}_{sg} = \lim_{s \rightarrow 0} W_z(s)$.

The values of static gains of multidimensional transfer function show that the coefficients of errors on angles are nonzero, hence the system is static. Respectively, the errors of velocity and errors of coordinates are unlimited. Similarly, from accelerometers errors we obtain unlimited coefficients, and system is even not static.

Let us analyse scheme M2 + M1, the matrix of observation will be changed:

$$\mathbf{C}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} & -\mathbf{I}_{ne \times ne} \\ 0 & \mathbf{I}_{ne \times ne} \end{bmatrix}.$$

The values of static gains of multidimensional transfer function show that the coefficients of errors on angles are zero and system is astatic. Respectively, the errors of velocity and errors of coordinates are limited, and system remains static. From accelerometers errors we obtain limited coefficients, and system become static.

5.4. Analysis of correction scheme type M4. For this case the matrices of state, control and observation are described in the form:

$$\mathbf{A}_z = [\mathbf{A}_0 - \mathbf{B}_0 \mathbf{K}_y],$$

$$\mathbf{B}_{zu} = [\mathbf{B}_0], \quad \mathbf{B}_{zv} = [\mathbf{B}_0], \quad \mathbf{C}_z = \mathbf{I},$$

where

$$\mathbf{K}_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K \\ 0 & K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K & 0 & 0 & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Using matrix $\mathbf{A}_z^{-1}\mathbf{B}_{zv}$ gives the possibility to determine the order of astaticism of scheme in state space. The elements of the given matrix show that the system is static as a whole, and is astatic with respect to some navigation parameters. If we supplement the system with the new variable, integral from error of course, the coefficients of staticism will be changed.

In this case the system remains astatic with respect to the angular variables from errors of gyros, and static with respect to the angular variables from errors of accelerometers.

6. EXPERIMENTAL RESULTS

Testing of the INS was carried out. The INS is built on the basis of microelectromechanical sensors (the accelerometer ADXL311 and gyros ADXR150) and the microcontroller of C8051F133 type. The INS correction was conducted with the use of GPS receiver of EM-406 type (GlobalSat, Taiwan) which provides a positioning accuracy of

10 m (RMS) and a speed accuracy of 0.1 m/s from datasheet. The system was located on the land vehicle driven on a given trajectory. The results of testing are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

The conclusions made on the basis of the testing are the following:

1. Noticeable increase of the error of yaw occurs at turning when an intensive change of yaw takes place. This error results in increasing the error in projection velocity, which produces increasing the estimate of gyro drift (Fig. 2, part 1—3). The effect is caused by low accuracy of determination of velocity and course by increment of coordinate.
2. Noise components of inertial sensors were within the limits specified in technical data.
3. Values of gyro drifts were evaluated within the limits specified in technical data, but the errors of drift evaluation significantly depended on error of course GPS. The best result was obtained through the method of correction type M1+M2.
4. The coincidence of INS and GPS navigation parameters did not exceed 20 m, which is sufficient for INS with microelectromechanical sensors.

CONCLUSIONS

In the majority of the correction schemes applied the accuracy of INS is determined by the property of staticism from instrumental errors and just in some cases the property of astaticism exists. To increase the precision of correction schemes it is

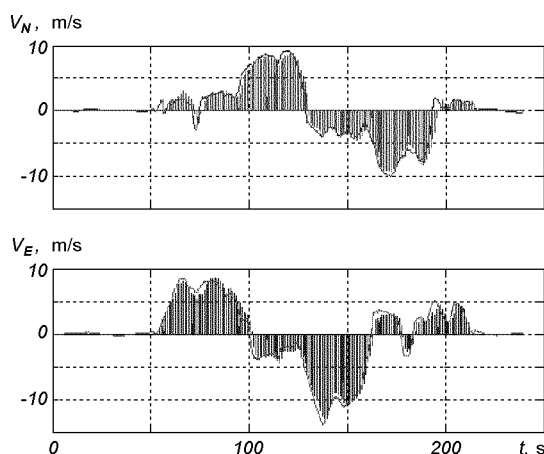


Fig. 1. Velocity of INS/GPS (north and east components)

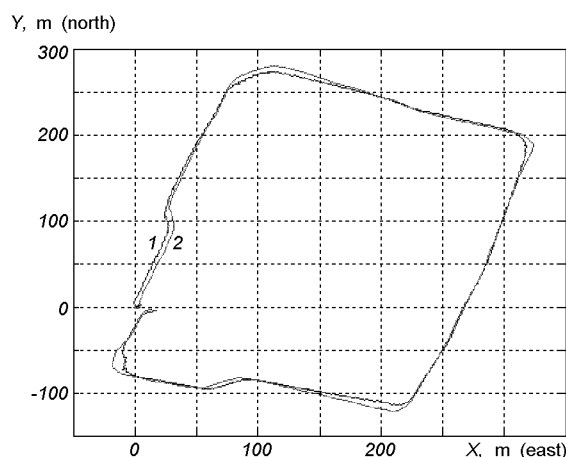


Fig. 2. Test trajectory: 1 — GPS, 2 — INS

necessary to increase the order of astaticism, to extend vector of control by integral variables and to apply combination. To provide selective invariance of instrumental errors it is sufficient to include models of errors into general model of INS. For low cost INS, we conclude that sufficient accuracy of the system is reached with the use of correction scheme with navigation parameter errors feedback, which does not require high specification to CPU. We consider that perspective direction of further research is the examination of the precision of two sample discrete system and the development of some methods for the enhancement of astaticism in discrete systems.

REFERENCES

1. Babich O. A. Information Processing in Navigation Complexes. — Moscow: Mashinostroenie, 1991.—512 p.
2. Branets V. N., Shmyglevskiy I. P. Introduction into Inertial Navigation Systems Theory. — Moscow: Nauka, 1992.—280 p.
3. Chernodarov A. V., Patrikeev A. P., Gladkin C. M., et al. Performance updating of integrated navigation systems on the base of closely coupled damping schemes of sensor errors // Proceedings of XIIIth St. Petersburg International Conference on Integrated Navigating Systems. — St. Petersburg, 2005.—P. 111—120.
4. Dmitriev S. P., Stepanov O. A., Koshaev D. A. Investigation of data interconnecting at inertial satellite systems development // Integrated Inertial Satellite Systems. — St. Petersburg, 2004.—P. 43—59.
5. Kuzovkov N. T., Salychev O. S. Inertial navigation and optimal filtration. — Moscow: Mashinostroenie, 1982.—216 p.

6. Kortunov V. I., Proskura G. A. Observability and detectability of strapdown INS instrumental errors // Aerospace technique and technology.—2006.—N 3 (29).—P. 31—38.
7. Kortunov V. I., Proskura G. A. Error equations of strapdown INS and observability analysis // Data reduction systems.—2006.—N 9 (58).—P. 112—115.
8. Parusnikov N. A., Morozov V. N., Borzov V. I. Correction problem in inertial navigation. — Moscow: Moscow State University, 1982.—176 p.
9. Panov A. P. Mathematical fundamentals of inertial navigation theory. — Kyiv: Naukova dumka, 1995.—278 p.
10. Stepanov O. A. Development features and future prospects of navigation inertial satellite systems // Integrated Inertial Satellite Systems. — St. Petersburg, 2004.—P. 25—43.

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ БЕЗПЛАТФОРМНИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

В. І. Кортунів, І. Ю. Дибська, Г. А. Проккура, Т. Трацесл

Наведено методи корекції в інтегрованих ІНС/GPS-системах. Розглянуто схеми корекції розімкненого й замкнутого типу зі зворотними зв'язками за оцінками інструментальних помилок, зі зворотними зв'язками за оцінками вектора стану помилок та зі зворотними зв'язками за помилками навігаційних параметрів. Корекція ІНС розглядається як процес управління обчисленням навігаційних параметрів і вирішується задача селективного інваріантного управління. Отримано лінійні рівняння помилок ІНС у кватерніонній формі. Представлено лінійні рівняння параметрів орієнтації та навігації. Оцінено спостережуваність і відновлюваність лінійних рівнянь помилок ІНС для різних комбінацій вектора помилок. Проведено аналіз точності компенсації інструментальних помилок для приведених схем корекції. Наведено результати тестування ІНС/GPS-системи на автомобілі.

УДК 621.37.08

А. Л. Макаров¹, В. В. Овсяников², А. Л. Ольшевский¹, В. М. Попель¹

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет

Исследование безэховости компактного антенного полигона в диапазоне сверхвысоких частот

Надійшла до редакції 15.03.07

Наведено результати досліджень характеристик невіддунності нового компактного антенного полігону, який розроблено в ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля для експериментального випробування радіоелектронного устаткування космічних апаратів з випромінювальними засобами діапазону надзвичайно високих частот. Наведено результати автономних досліджень окремих секцій радіопоглинального покриття камери та дослідження рівнів відбитого електромагнітного поля усередині компактного антенного полігону.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных проблем экспериментальной отработки радиоэлектронных средств и антенн космических аппаратов (КА) является создание компактных антенных полигонов (КАП) в виде экранированных снаружи безэховых камер небольших размеров, размещенных внутри помещений с нормальными условиями для обслуживания персонала и аппаратуры [3]. Внутренняя поверхность КАП с установленным внутри коллимационным зеркалом, испытываемой аппаратурой и оборудованием покрывается изнутри радиопоглощающим покрытием (РПП). Это необходимо для снижения до минимума паразитных переотражений и уровней взаимовлияния между антеннами в рабочих диапазонах сверхвысоких частот (СВЧ), и следовательно, для обеспечения высокой точности измерений.

В связи с тем что на практике РПП изготавливается из отдельных пластин (секций), которыми затем покрывается КАП изнутри, после изготовления проводятся два этапа испытаний

КАП. Первый — автономные исследования поглощательных свойств отдельных пластин РПП, второй — исследования уровней отраженного электромагнитного (ЭМ) поля и «безэховых» зон внутри КАП, покрытого поглощающими пластинами.

АВТОНОМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ СЕКЦИЙ КОМПАКТНЫХ АНТЕННЫХ ПОЛИГОНОВ

Автономные исследования коэффициентов отражения отдельных радиопоглощающих секций КАП в частотном диапазоне выполняются на специальном стенде (рисунок). При этом измеряются зеркальные коэффициенты отражения и электромагнитные поля рассеяния [1, 2, 4, 5]. Зеркальный коэффициент отражения — это отношение плотности потока мощности, отраженной от поверхности РПП к плотности потока мощности, падающей на поверхность РПП в случаях, когда углы падения и отражения относительно нормали равны и лежат вместе с ней в

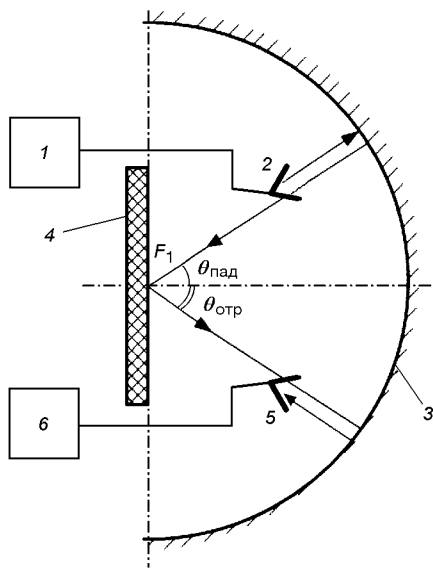


Схема измерений зеркальных коэффициентов отражений и электромагнитных полей рассеяния отдельных пластин РПП: 1 — микроволновый генератор, 2 — передающая антенна, 3 — эллипсоидальный отражатель, 4 — исследуемый материал (эталонный отражатель), 5 — приемная антенна, 6 — измерительный приемник

дной плоскости. Электромагнитное поле рассеяния это уровень электромагнитного излучения, рассеянный РПП под углами наблюдения, не совпадающими с углом, зеркальным углом падения [6]. Стенд включает в себя СВЧ генератор 1, выход которого соединен с передающей антенной 2, отражатель 3, образованный частью внутренней поверхности эллипсоида вращения. При калибровке в первом фокусе эллипсоида F_1 расположен плоский металлический отражатель (эталонный отражатель), а при измерениях — исследуемый материал 4. Приемная антенна 5 нагружена на измерительный приемник 6. Антенны 2 и 5 расположены в плоскости, перпендикулярной к большой оси эллипсоида и установлены с возможностью вращения вокруг нее, при этом они обращены к поверхностям отражателя 3, расположенным напротив исследуемого материала (или эталонного отражателя) 4, а их оси проходят через второй фокус эллипсоида. Отражатель 3 представляет собой вырезку из внутренней поверхности эллипсоида вращения, ограниченную плоскостью, проходящей через большую ось эллипсоида, а также двумя

параллельными плоскостями, перпендикулярными большой оси эллипсоида, одна из которых проходит через малую ось эллипсоида, а другая отстоит от нее на некотором расстоянии. Общая площадь эллипсоидального отражателя 3 составляет около 140 м^2 . Стенд позволяет реализовать измерения в диапазоне СВЧ-модулей зеркальных коэффициентов отражения в диапазоне углов падения $15 \dots 80^\circ$ при ТЕ- и ТМ-поляризациях падающей волны, а также измерения относительного распределения рассеянного поля при фиксированных углах падения $0 \dots 80^\circ$ и углах приема $\pm 80^\circ$ путем углового перемещения передающей и приемной антенн по направляющим. Применение эллипсоидального отражателя 3 в сочетании с традиционными схемами измерений позволяет повысить точность оценки и увеличить динамический диапазон.

При измерениях зеркальных коэффициентов отражения, на место исследуемого материала 4 (рисунок) устанавливается эталонный отражатель того же размера, например металлический лист, модуль коэффициента отражения от которого принимается за 1. Далее с помощью аттенюатора и индикатора измерительного приемника 6 измеряется угловая зависимость мощности $A_1(\theta)$ сигнала, отраженного от эталонного отражателя при заданной поляризации падающей волны (ТЕ или ТМ). Затем вместо эталонного отражателя устанавливается исследуемый материал 4 и производится таким же образом измерение угловой зависимости мощности $A_2(\theta)$ сигнала, отраженного от исследуемого материала. После этого вычисляется угловая зависимость модуля зеркального коэффициента отражения от исследуемого материала $R(\theta)$ при заданных поляризациях падающей и отраженной волн по формуле

$$R(\theta) = A_2(\theta) - A_1(\theta) \text{ (дБ)}.$$

При измерениях электромагнитных полей рассеяния передающая антенна устанавливается в положение, соответствующее углу падения падающей волны θ_1 , и с помощью аттенюатора и индикатора измерительного приемника 6 проводится измерение угловой зависимости $A_3(\varphi)$ мощности сигнала, рассеянного исследуемым материалом при заданной поляризации падающей волны. После этого вычисляется относительное поле рассеяния исследуемого материала

при заданных поляризациях падающей и рассеянной волн по формуле

$$P(\varphi) = A_3(\varphi) - A_1(\theta) \text{ (дБ)}.$$

При измерениях используются обычные СВЧ-генераторы и измерительные приемники. В качестве передающей и приемной антенн — стандартные измерительные антенны.

Применение изложенной методики позволило получить новые данные о характеристиках широкодиапазонного поглотителя типа «Универсал» в частотном диапазоне $f = 1 \dots 15$ ГГц. При этом модули зеркальных коэффициентов отражения изменяются в пределах $-6 \dots -56$ дБ, а электромагнитные поля рассеяния — в пределах $-15 \dots -60$ дБ в широком диапазоне углов θ, φ .

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ БЕЗЭХОВОСТИ КОМПАКТНЫХ АНТЕННЫХ ПОЛИГОНОВ

Исследуемый компактный антенный полигон имеет форму прямоугольного параллелепипеда размерами $26 \times 9 \times 9$ м, рабочие поверхности которого облицованы изнутри поглотителем электромагнитной волны (РПП) типа «Универсал» [3], а снаружи экранированы.

Целью исследований является определение уровней отраженного поля (коэффициентов безэховости) в КАП, а также расположение и размеры безэховой зоны, необходимой для размещения и нормального функционирования излучающих систем в см- и дм-диапазонах длин волн. Под коэффициентом безэховости понимается отношение величины отраженного сигнала рабочими поверхностями безэховой камеры к величине прямого сигнала, пришедшего от передающей антенны в заданной точке КАП. Под зоной безэховости понимается часть объема КАП, в любой точке которого коэффициент безэховости ниже заданного значения [5]. Измерения в КАП проводились по методу определения коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН) свободного пространства для ортогональной поляризации электромагнитной волны. В качестве передающей и приемной антенн использовались две пары одинаковых секториальных Е- и Н-рупоров, имеющих широкие (100°) диаграммы направленности (ДН) в одной

плоскости и узкие (15°) в другой, что позволяло отдельно оценивать величину отраженного поля от боковых стен, пола и потолка. Для оценки значений отраженного поля от боковых стен антенны ориентировались так, чтобы широкие ДН антенн находились в горизонтальной плоскости параллельно плоскости пола, а перемещение приемной антенны осуществлялось по прямой, соединяющей боковые стены КАП. При определении величины отражений от пола и потолка антенны были переориентированы на 90° , а приемная антенна перемещалась в вертикальной плоскости. Передающая и приемная антенны располагались в противоположных сторонах КАП в местах предполагаемого расположения антенного коллиматора и приемных антенн. Под плоскостью перемещения понимается плоскость, проходящая через направление перемещения и центр раскрытия передающей антенны.

При обработке результатов измерений на всех полученных экспериментальных кривых строились огибающие полученных максимумов ($P_{\max}$) и минимумов ($P_{\min}$). Выбирались точки, в которых отношение $P_{\max}/P_{\min}$ максимально, и уровень отражений в децибелах определялся по формуле

$$L_{\text{изм}} = 20 \lg \left[\left(\sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} - 1 \right) / \left(\sqrt{\frac{P_{\max}}{P_{\min}}} + 1 \right) \right].$$

Погрешность ΔL измеренного уровня отражений в децибелах определяем по формуле

$$\Delta L = 8.68 \frac{k_0^2}{k_0^2 - 1} \left(\frac{1}{P_{\max}} + \frac{1}{P_{\min}} \right) \Delta P,$$

где $k_0 = \sqrt{P_{\max}/P_{\min}}$, ΔP — погрешность измерения $P_{\max}$ и $P_{\min}$.

Направление прихода отраженного сигнала относительно плоскости, перпендикулярной к направлению перемещения приемной зондовой антенны, определяется по формуле

$$\nu = \arcsin \frac{\lambda}{T},$$

где λ — длина рабочей волны, T — пространственный период колебаний на исследуемом участке экспериментальной кривой. Погрешность определения угла $\Delta \nu$ в градусах определяем по формуле

Значение коэффициентов безэховости (в дБ)

f (ГГц) / λ (см)	Отражения от боковых стен КАП		Отражения от пола и потолка КАП		Отражения от торцевой стены КАП со стороны приемной антенны	
	Е-поляризация	Н-поляризация	Е-поляризация	Н-поляризация	Е-поляризация	Н-поляризация
15.0/2.0	-38.2	-34.9	-36.9	-33.8	-37.4	-37.4
4.3/7.0	-36.1	-33.8	-35.4	-33.6	-34.2	-34.2
1.0/30.0	-25.4	-21.6	-23.8	-20.1	-28.8	-28.8

$$\Delta\nu = \frac{\lambda/T}{57.3\sqrt{1 - (\lambda/T)^2}} \Delta T,$$

где ΔT — относительная погрешность измерения периода, являющаяся суммой погрешности измерения периода на экспериментальной кривой и погрешности измерения регистрирующего прибора.

Затем производим определение измеренного уровня отражений методом гармонического анализа. При этом каждую экспериментальную кривую дискретизируем, например, с шагом $q = 0.3\pi$, получая n чисел. Из совокупности m экспериментальных кривых получаем двумерные массивы P_{ij} с размерами $m \times n$.

Среднее значение P_0 массива чисел P_{ij} определяем по формуле

$$P_0 = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}.$$

Вычитаем из каждого элемента массива P_{ij} среднее значение P_0 , получаем массив $\hat{P}_{ij} = P_{ij} - P_0$.

Для значений углов ν и ζ от 0 до 90° с шагом 1° определяем измеренные уровни отражений $L_{изм}$, выраженные в децибелах для различных направлений прихода ν и ζ отраженных сигналов

$$L_{изм}(\nu, \zeta) = 20 \lg \frac{1}{P_0} \sqrt{S_p^2 + C_p^2},$$

где

$$S_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{P}_{ij} \sin(i\omega_i q + j\omega_j q),$$

$$C_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{P}_{ij} \cos(i\omega_i q + j\omega_j q),$$

$$\omega_i = k \sin \zeta, \quad \omega_j = k \sin \nu,$$

ζ — угол между направлением прихода отра-

женного сигнала и плоскостью перемещения, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Погрешность определения углов ζ и ν в градусах определяем по формулам

$$\Delta\zeta = \frac{57.3}{2(m-1)q},$$

$$\Delta\nu = \frac{57.3}{2(n-1)q}.$$

Таким образом, максимальное значение $L_{изм}(\nu, \zeta)$ это измеренный уровень отражения в децибелах, а углы ζ и ν , соответствующие максимальному $L_{изм}(\nu, \zeta)$, — направление прихода сигнала.

Результаты измерений коэффициентов безэховости приведены в таблице.

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что в случае расположения передающей антенны на равном удалении от боковых стен, потолка и пола и на расстоянии 6.0 м от торцевой стены, область наименьших отражений в КАП находится вокруг прямой линии (продольной оси), соединяющей передающую и приемную антенны. Общая погрешность оценки безэховости КАП не превышает 1.2—1.5 дБ.

Компактный антенный безэховый полигон, разработанный и изготовленный в КБ космических аппаратов, систем и комплексов Государственного конструкторского бюро «Южное» им. М. К. Янгеля является уникальным сооружением, позволяющим производить точные СВЧ-измерения, оценку электромагнитной совместимости радиосистем, оценку эффективной поверхности рассеяния аэрокосмических аппаратов и другие работы при обеспечении высокой

степени имитации безэховости свободного и космического пространства.

Использование данного компактного антенного полигона для измерений в СВЧ-диапазоне позволяет повысить качество и культуру производства, ускорить выпуск новой техники и по многим показателям получить экономию затрачиваемых средств.

Авторы выражают благодарность Ю. К. Александрову и В. М. Хохлову (Москва, Россия) за ценные советы и участие в проведении работ.

1. Алимин Б. Ф. Техника измерений коэффициентов отражения поглотителей электромагнитных волн: Обзор // Заруб. радиоэлектроника.—1977.—№ 2.—С. 88—110.
2. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. — М.: Сов. радио, 1972.—232 с.
3. Овсяников В. В., Попель В. М., Ольшевский А. Л., Попель П. В. Компактный антенный полигон для экспериментальной отработки антенн космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 85—91.
4. Ольшевский А. Л., Попель В. М., Костенко Г. А., Овсяников В. В. Исследование поглощающих свойств отдельных секций компактного антенного полигона в

микроволновом диапазоне // 16th Int. Crimean Conf. «Microwave and Telecommunication Technology» (11—15 Sept. 2006, Sevastopol). — Sevastopol, 2006.—P. 823—824.

5. ОСТ 92-4739-86. Камеры безэховые. Метод измерения коэффициента безэховости. — Введ. 01.01.88.
6. ОСТ 92-4740-86. Материалы радиопоглощающие для безэховых камер. Метод измерения коэффициента отражения в диапазоне углов падения электромагнитной волны. — Введ. 01.01.88

RESEARCH OF THE ECHOLESS OF COMPACT ANTENNA RANGE IN THE SUPER HIGH FREQUENCY BAND

O. L. Makarov, V. V. Ovsyanikov, O. L. Ol'shevskiy, V. M. Popel'

We present some results of our research of echoless characteristics of the new compact antenna range developed at the Yuzhnoe State Design Office named after M. K. Yangel for experimental investigation of radio-electronic and radiating devices of space vehicles for the super high frequency band. We give our results of independent research of separate parts of radio absorbing covering of the chamber as well as some results of complex research of the levels of the reflected electromagnetic field inside the compact antenna range.

УДК 681.4.002.2 (075.8)

В. П. Маслов

Інститут фізики напівпровідників ім. В. С. Лашкарьова НАН України, Київ

Перспективні матеріали і технології виготовлення полегшених дзеркал телескопів

Надійшла до редакції 15.12.06

Аналіз літературних даних і сукупність результатів, отриманих експериментальним шляхом, дозволяють виділити як найбільш перспективні матеріали для полегшених дзеркал телескопів SiC-кераміку і склокераміку. Розроблена технологія твердофазного спікання полірованих деталей за допомогою нанорозмірних вакуумних покриттів (ТСПД-технологія) дозволяє реалізувати «сандвіч»-конструкції полегшених дзеркал як зі склокераміки, так і комбіновані конструкції SiC-кераміка (основа) — склокераміка (верхній робочий шар).

Телескопи є найважливішим інструментом вивчення Всесвіту. За допомогою телескопів одержується значна частина інформації про властивості космічних об'єктів, розширюється уявлення про масштаби Всесвіту та його еволюцію.

Можливості «побачити далі» визначаються багато в чому розмірами, точністю виготовлення і стабільністю форми головного дзеркала телескопа. Вибір найкращих матеріалів для астрономічних дзеркал був і є питанням, що постійно стоїть перед розробниками телескопів [2, 6].

Ще в 17 столітті Мерсен (у 1636 р.), а потім англійський математик Джеймс Грегорі (у 1663 р.) розробили принципову схему телескопа з дзеркал з оптичною поверхнею параболічної й еліпсоїдальної форми, а Ньютон знайшов потрібний сплав для дзеркал (бронза) і придумав спосіб полірування цього сплаву. Найбільш відома система Кассегрена, що складається з двох дзеркал, була запропонована у 1672 р. Перевагою дзеркальних систем є не тільки істотне зменшення габаритів, але і можливість одночасно працювати в різних діапазонах спектру.

Відомо сім основних оптичних систем побудови дзеркальних телескопів, однак етапи їхнього розвитку великою мірою визначаються наявністю матеріалів і технології виготовлення дзеркал необхідної жорсткості, стабільності геометрії і якості оптичної поверхні. Сплави на основі міді використовувались для виготовлення оптичних дзеркал телескопів понад двісті років. Лібіх та Штейнгель у 1856 р., а потім Фуко у 1857 р. запропонували виготовляти телескоп зі скляним дзеркалом, яке було легшим і дешевшим, ніж бронзове. Відбивання забезпечувалося нанесенням спеціального покриття [7].

У 1948 році в США (Маунт-Паломар) було завершено будівництво телескопа з 5-м скляним дзеркалом. У 1976 р. в СРСР на Кавказі (станція Зеленчуцька) був введений у дію великий азимутальний телескоп з монолітним головним дзеркалом зі скла діаметром 6 м.

Для полегшення астрономічних дзеркал американський астроном Річі і радянські вчені І. В. Гребенщиков і Н. Г. Пономарьов висловили незалежно один від одного у 1930-х рр. ідею

чарункових дзеркал. У 1994 р. почав працювати такий телескоп, установлений на горі Мауна Кеа (Гаваї, США). Головне дзеркало діаметром 10 м виконано з 36 гексагональних сегментів зі склокераміки церодур («Шотт АГ», Німеччина) з практично нульовим коефіцієнтом температурного розширення (КТР). Кожен сегмент має форму шестигранника, вписаного в коло діаметром 1.8 м. Вторинне дзеркало цього телескопа виготовлене з берилію.

Наземним телескопам «побачити далі» заважає атмосферний шар, у якому відбувається поглинання ультрафіолетових променів, і якому властиві турбулентність, запиленість та інші небажані явища. Тому ще в книзі Германа Оберта «Ракети в космічному просторі», опублікованій в 1923 р., було запропоновано установити телескоп на штучний геостационарний супутник. Однак тільки в 1968 р. НАСА успішно запустило такий супутник. У 1977 р. Конгрес США виділив 475 млн доларів на космічну обсерваторію з телескопом, діаметр головного дзеркала якого складав 2.4 м — максимальний розмір вантажного відсіку шаттла. Оптична схема цього телескопа являла собою схему Кассегрена, модифіковану Річі й Анрі Кретьеном (головне і вторинне дзеркала мають поверхні гіперболоїда обертання). Заготовки для дзеркал були виготовлені зі склокераміки ULE (Corning, USA) з практично нульовим коефіцієнтом температурного розширення за технологією спікання «сандвіч»-конструкції, де внутрішній шар мав стільникову структуру. Це забезпечило полегшення більш ніж на 90 % від ваги монолітної заготовки таких же розмірів. Цьому телескопу було присвоєно ім'я Едвіна Хаббла. 24 квітня 1990 р. відбувся старт корабля «Дискавері», що вивів на орбіту телескоп Хаббла, а 20 травня на Землю були передані перші знімки космічних об'єктів, що відстоять від Сонця на 1300 світлових років. Орбітальний телескоп Хаббла відправив понад 700 тисяч зображень різних космічних об'єктів. За допомогою цієї інформації була встановлена наявність надмасивних чорних дір в галактичних ядрах і доведено, що Всесвіт розширюється, прискорюючись.

У 2003 р. був здійснений запуск японського супутника з інфрачервоним телескопом, діаметр головного дзеркала якого складав 70 см і був виконаний з карбідокремнієвої кераміки.

НАСА планує у 2011—2013 виведення на орбіту спадкоємця телескопа Хаббла — космічний телескоп «Джеймс Вебб» з головним дзеркалом діаметром 6.5 м, яке складається з 18 шестикутних берилієвих дзеркал. Діаметр такого дзеркала в 2.5 рази перевершує дзеркало телескопа Хаббла, а вага цього телескопа на 2/3 менша за вагу свого попередника.

Паралельно фахівцями розглядається можливість створення ультралегких оптичних дзеркал телескопів космічного базування нового покоління у вигляді тонких гнучких плівок, але вони ще не зайшли практичного застосування [15].

Наприкінці 1950-х рр. у СРСР вперше була розроблена склокераміка з практично нульовим коефіцієнтом термічного розширення (КТР) — астроситал СО 115М [8, 10]. Технологія астроситалу СО 115М дозволяє виготовляти дзеркала діаметром до 2.6 м. Такі дзеркала використовуються як в наземних (1.2 м сонячні телескопи), так і в космічних телескопах (станція «Астрон» та інші).

В Німеччині фірма «Шотт АГ» розробила технологію виготовлення заготовок діаметром до 8 м з матеріалу церодур, близького за складом та властивостями до астроситалу СО 115М.

В США фірма «Оуенс-Іллінойс Інкорпорейтед» (Тоledo, Огайо) розробила аналогічну кераміку цервіт з практично нульовим КТР, однак ширше застосування отримав матеріал фірми «Корнінг», який має торгову назву ULE і відрізняється тим, що його основою є кварц.

За фізичними властивостями всі названі матеріали можна віднести до однієї групи.

Берилій в якості матеріалу для дзеркал космічних телескопів вперше був запропонований у 1958 р. Н. Н. Міхельсоном. Берилій був використаний в космічному телескопі GEP (Goddard Experiment Package), і сьогодні цей матеріал запропоновано для виготовлення дзеркала діаметром 6.5 м космічного телескопа Вебба.

Таким чином, перспективними матеріалами для виготовлення великогабаритних дзеркал телескопів наземного і космічного базування є: склокераміка церодур з практично нульовим коефіцієнтом температурного розширення (його аналог СО 115М, цервіт) або ULE, берилій і карбідокремнієва кераміка (SiC). На рис. 1 приведені порівняльні дані для цих матеріалів з урахуванням комплексних показників їхньої

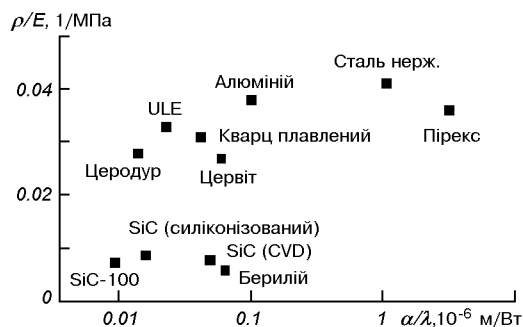


Рис. 1. Порівняльні властивості перспективних матеріалів (за даними www.astro.lu.se/~torben/euro50/publications/SiC_Panels.htm): залежність відношення питомої ваги ρ до модуля Юнга E від відношення коефіцієнта температурного розширення α до теплопровідності λ .

термічної стабільності, найменші значення яких відповідають вищій якості.

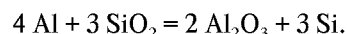
Видно, що за комплексними показниками термічної стабільності склокераміка і карбідокремнієва кераміка кращі, ніж берилій. Однак за питомою жорсткістю берилій трохи кращий за SiC, і ці два матеріали істотно перевершують склокераміку.

Розглянемо технологічні і виробничі фактори для оцінки перспективності застосування цих матеріалів. Насамперед необхідно відзначити, що виробництво берилію високої чистоти і виготовлення деталей з нього вимагає особливих умов безпеки персоналу, зв'язаних з його високою токсичністю. Відомо, що берилієвий пил, що утворюється при металургійних процесах, а також при механічній обробці (фрезерування, шліфування, полірування) викликає смертельно небезпечне захворювання — бериліоз. Витрати на забезпечення охорони персоналу і навколишнього середовища порівнянні з витратами при роботі з радіоактивними ізотопами. Крім того, великі витрати обумовлені необхідністю багаторазового очищення берилію для забезпечення високої механічної міцності, а також одержанням заготовок дзеркал у високовакуумних спеціалізованих електронно-променевих плавильних печах. Прагнення збільшити розмір заготовок берилієвих дзеркал вимагає збільшення розміру виробничого обладнання, що є складною науково-технічною проблемою. Усі ці негативні

фактори, зв'язані з виробництвом берилієвих дзеркал, викликають необхідність пошуку інших технічних рішень. З цього погляду особливу увагу привертають церодур і карбід кремнію.

Відповідно до інформаційних матеріалів фірми «Шотт АГ», церодур сьогодні — це єдиний матеріал для дзеркал телескопів, з якого можна отримувати заготовки розміром до 8.2 м по відносно простій технології скловаріння у виробничих умовах. Фірма «Шотт АГ» може виготовляти дзеркала з церодуру зі ступенем polegшення приблизно 60 % шляхом механічної обробки (свердління, фрезерування глухих отворів) тильної сторони монолітної заготовки дзеркала. Експериментальні дослідження з розробки технології низькотемпературного з'єднання (менше 100° С), проведені фірмою «Шотт СГТ» (США), дозволяють одержувати демонстраційні дзеркала «сандвіч»-конструкції діаметром 20 см [14]. Труднощі цієї технології обумовлені попереднім високоточним поліруванням поверхонь, що з'єднуються, як і у випадку з'єднання поверхонь за технологією оптичного контакту (ОК) і глибокого оптичного контакту (ГОК), відомих в оптичному виробництві [9]. Таким чином, великі переваги використання церодуру стримуються відсутністю виробничої технології виготовлення дзеркал «сандвіч»-конструкції.

Дослідження [11] показали, що алюмінієвий компонент вакуумного покриття на склокераміці церодур при температурі 400° С взаємодіє з поверхнею склокераміки:



Це дозволило припустити, що такі покриття можуть забезпечити з'єднання деталей з церодуру при температурах, не вищих за 600° С, при яких зберігаються фізичні властивості склокераміки. Експериментальні дослідження підтвердили таку можливість [3, 13].

З метою дослідження стабільності взаємного положення прецизійних вузлів, з'єднаних за розробленою технологією твердофазного спікання полірованих деталей за допомогою нанорозмірних вакуумних покриттів (ТСПД-технологія), були виготовлені дзеркальні призми 90°. Прецизійні вимірювання кута 90° проводили в Науково-виробничому інституті метрологічного забезпечення вимірювань геометричних, механічних і віброакустичних величин (НВІ ГМВ)

Укрметртестстандарту. З вересня 2004 р. до жовтня 2005 р. було проведено п'ять етапів вимірювань: на першому етапі деталі піддавали п'ятикратному термічному удару рідким азотом і нагріванню до плюс 400° С (витримка 1 год); на другому етапі зразки піддавали подвійному механічному удару 100g і 300g; на наступних етапах досліджувалася стабільність кутового положення деталей в нормальних умовах.

Результати досліджень показали, що:

- геометрична точність виготовлення вихідних деталей зберігається при їхньому з'єднанні і дозволяє задавати точність збірного вузла технологічними методами виготовлення поверхонь деталей;
- для дзеркальних призм 90° технологічна похибка виготовлення складала для різних зразків від 0 до 8.5";
- вплив екстремальних умов приводить до зміни взаємного положення для різних призм від 0.2 до 8.3";
- при збереженні призм у нормальних умовах відхилення взаємного положення не перевищувало 6" (рис. 2), а для кращого зразка № 1 — 1", тобто на рівні похибки вимірювань.

Експеримент показав високу стійкість і стабільність геометричних і механічних властивостей прецизійних наноз'єднань у збірних деталях і вузлах черодуру за розробленою технологією на основі адгезійно-активних вакуумних покриттів, що містять алюміній. Ці з'єднання здатні зберігати високу несучість і при екстре-

мальних впливах, що можуть мати місце у процесі експлуатації виробів.

Висока надійність і стабільність розробленого з'єднання була пояснена з погляду дислокаційної теорії міцності [4, 13]. Для тонкого шару металу руйнівне напруження можна описати залежністю

$$\sigma_f = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2},$$

де σ_0 — значення руйнівного напруження для монокристалу, K — константа, d — довжина площини ковзання дислокацій.

Дана формула була багаторазово експериментально і теоретично досліджена для металевих масивних деталей. При цьому за параметр d був прийнятий розмір зерна структури металу. Подрібнення зерен у результаті механічної термообробки дозволяє істотно збільшити величину руйнівного напруження. У випадку розробленої технології наноз'єднання такий підхід дозволяє за параметр d прийняти товщину сполучного шару, що складає сотні нанометрів. Тому міцність руйнування наноз'єднання може бути вищою в 20—100 разів в порівнянні з алюмінієвою масивною деталлю.

Хімічна взаємодія на границі полірованих деталей з нанесеними металевими шарами створює умови закріплення дислокацій, що істотно зменшує пластичність цього шару і збільшує міцність. Використання методу електронної мікроскопії дозволило роздивитися поверхню руйнування (рис. 3, а).

Видно, що тріщина проходить як через черодур, так і через сполучний шов, поверхня руйнування надзвичайно розвинута й у деяких випадках має вигляд «венного» візерунка.

Таке з'єднання набуває властивостей лінійно-пружного високоміцного композиційного матеріалу [12].

Розроблена технологія дає можливість виготовлення дзеркал «сандвіч»-конструкції з черодуру [5]. У цьому випадку середня частина дзеркала у виді стільникової конструкції має наскрізні отвори, які легко отримати шляхом механічної обробки алмазним інструментом або водяним струменем високого тиску (з абразивним порошком) за аналогією з дзеркалом з ULE телескопа Хаббла.

Експериментальні дослідження підтвердили можливість з'єднання стільникової структури з

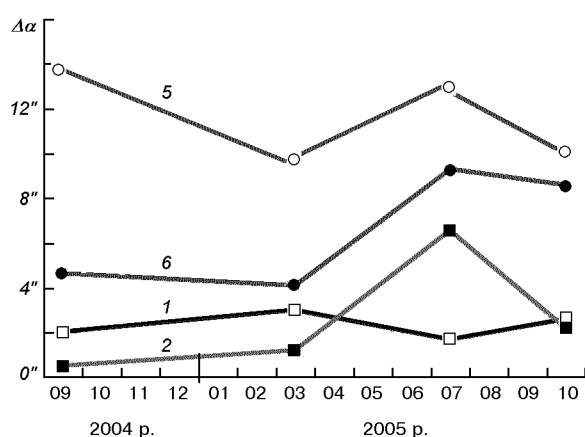


Рис. 2. Відхилення кута 90° для чотирьох зразків дзеркальних призм

Рис. 3. *а* — мікроструктура поверхні руйнування на границі церодур — сполучний шов, збільшення $10000\times$; *б* — з'єднання за розробленою технологією фрагмента стільникової структури з церодуру (алмазна і хімічна обробка) з тонкою нижньою пластиною з церодуру; *в* — наноз'єднання SiC-кераміки (нижня частина) зі склокерамікою

Переваги та недоліки конструкторсько-технологічних рішень з виготовлення полегшених астрономічних дзеркал

Ва- ріант	Конструкція полегшеного дзеркала	Технологія виготовлення	Недоліки	Переваги	Висновки
1.	Дзеркало з церодуру (CO115M, цервіт) виготовлене з монолітної заготовки	Послідовне алмазне свердління і фрезерування тильної сторони заготовки з наступною хімічною обробкою	— невисокий ступінь полегшення ($\approx 60\%$) — отвори в тильній стороні зменшують твердість і стабільність конструкції — тривалий цикл виготовлення, тому що технологічні операції виконуються послідовно	Дзеркала перевірені часом і мають довіру у споживачів на ринку, є принципова можливість виготовлення дзеркал діаметром до 8 м	Дані дзеркала і технологія можуть бути прийняті як базові для порівняння
2.	Дзеркало з ULE «сандвіч»-конструкції	Паралельно виготовляються три окремі деталі: дві пластини і середня стільникова пластина, полегшення в якій виконується різанням водяним струменем. Деталі з'єднуються спіканням при температурі $\approx 1000^\circ\text{C}$	— висока вартість матеріалу (ULE) — максимальний розмір, освоєний у виробництві — 4 м	— полегшення вище 90 % — висока жорсткість конструкції	Дані дзеркала переважніші, ніж дзеркала з церодуру (CO115M, цервіт) для використання в космічних телескопах. Успішне застосування такого дзеркала на телескопі Хаббла протягом 10 років
3.	Дзеркало «сандвіч»-конструкції з церодуру (CO115M, цервіт)	Паралельно виготовляються три окремі деталі: дві пластини і середня стільникова пластина може бути виконана: — з церодуру — з ULE — із трубчастих елементів — методом порошкової металургії без наступної механічної обробки отворів — з SiC порошкової заготовки. Усі перераховані варіанти можливо з'єднати завдяки розробленій ТСПД-технології	Необхідно полірувати поверхні, що з'єднуються, і наносити вакуумні покриття. Ці додаткові операції здорожують виготовлення	— високий ступінь полегшення (більш 90 %), а у випадку застосування SiC — до 98 % — висока жорсткість конструкції — можливість одержання дзеркал діаметром до 8 м — використання традиційних технологій і устаткування оптичного приладобудування	За критерієм якість/вартість має переваги перед варіантами № 1 і 2

тонкою плоскою пластиною (рис. 3, б).

Іншим перспективним матеріалом за даними рис. 1 для виготовлення полегшених дзеркал телескопів є карбід кремнію (SiC), для одержання якого використовуються дешеві і доступні матеріали, а методи порошкової металургії дозволяють виготовляти полегшену заготовку, форма і розміри якої максимально близькі до

вимог конструкції дзеркала. Однак при обробці робочої поверхні дзеркала розкриваються пори та інші дефекти, властиві матеріалам, одержуваним методами порошкової металургії. Цей недолік може бути усунутий використанням двошарового SiC: основа отримана методами порошкової металургії, а зовнішній робочий шар товщиною 0.5 мм створений методами осаджен-

ня SiC з газової фази (CVD — SiC). Сумарна щільність такого комбінованого полегшеного дзеркала діаметром 70 см (японський ІЧ-телескоп) складала 2.2 т/м^3 , а загальна вага дзеркала — 8.2 кг. Одним з головних достоїнств таких дзеркал є стабільність форми у широкому діапазоні температур, у тому числі і при криогенних температурах, необхідних для роботи ІЧ-фотоприймачів, що перетворюють оптичне зображення в цифрове. У Європі найбільш відома фірма ЕСМ, що випускає заготовки і дзеркала з SiC-кераміки високої якості під торговельною назвою «Cesic». А в США — фірма «Курстек», яка випускає продукцію оптичної якості за назвою «ultrasic».

Однак технологія CVD-Si складно реалізується у виробничих умовах для великогабаритних дзеркал діаметром понад 1 м. У зв'язку з цим, за повідомленням Європейського космічного агентства, дзеркало для телескопа Гершеля діаметром 3.5 м, запуск якого намічений на 2007 рік, виготовляється з 12 SiC-сегментів (за матеріалами Cosmiverse.com).

Тому одним з перспективних напрямків є можливість створення дзеркал на основі SiC-кераміки і верхнього робочого шару з більш технологічного матеріалу, наприклад оптичної склокераміки [1].

Дослідження показали можливість такого перспективного з'єднання SiC-кераміки зі склокерамікою з близьким значенням КТР (рис. 3, в).

Комбіноване дзеркало може мати рекордне значення показника полегшення, тому що питома жорсткість E/ρ (де E — модуль пружності, а ρ — питома вага) SiC-кераміки в кілька разів перевищує аналогічний показник для склокераміки. Тому загальна товщина такого комбінованого полегшеного дзеркала може бути принаймні у два-три рази меншою, ніж для дзеркала, виконаного цілком з церодуру.

Порівняльні дані за технологіями виготовлення полегшених астрономічних дзеркал із залученням результатів розробленої ТСПД-технології приведені у таблиці.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних даних і сукупність результатів, отриманих експериментальним

шляхом, дозволяють виділити в якості найбільш перспективних матеріалів для полегшених дзеркал телескопів SiC-кераміку і склокераміку.

2. Розроблена ТСПД-технологія дозволяє реалізувати «сендвіч»-конструкції полегшених дзеркал як зі склокераміки, так і комбіновані конструкції SiC-кераміка (основа) — склокераміка (верхній робочий шар).

Дослідження проведені при фінансовій підтримці УНТЦ (проект № 3045).

Автор вдячний Ю. М. Родічеву (Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України) за допомогу в дослідженнях механічної міцності зразків.

1. Декларационный патент Украины № 9167. Зеркало Маслова / В. П. Маслов. — Оpubл. 15.09.2005, Бюл. № 9.
2. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. — Л.-М.: ОГИЗ, 1948.
3. Маслов В. П. Стеклокерамика с практически нулевым коэффициентом термического расширения и способы ее прецизионного соединения // Тез. докл. Междунар. конф. «Современное материаловедение: достижения и проблемы». — Киев, 2005.—С. 627.
4. Маслов В. П. Наносоединение — новый тип бесклевого соединения прецизионных деталей для работы в экстремальных условиях // Тр. Междунар. конф. МЕЕ-2006 «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (18—22 сентября 2006, Ялта). — Жуковка, Крым, 2006.—С. 137.
5. Маслов В. П. Нано- та мікротехнології з'єднання прецизійних конструкцій вузлів оптико-електронних приладів авіаційно-космічної техніки // Зб. доп. VI Міжнар. науково-технічної конф. «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» — К.: НТУУ «КПІ», 2007.—Ч. I.
6. Михельсон Н. Н. Бериллий — возможный материал для астрономических зеркал будущего // Изв. Глав. astron. обсерватории в Пулковке.—1958.—№ 162.—С. 153—158.
7. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. — М.: Наука, 1976.—313 с.
8. Павлушкин Н. М., Сентюрин Г. Г., Ходаковская Р. Р. Практикум по технологии стекла и ситаллов. — М.: Стройиздат, 1970.—363 с.
9. Справочник технолога-оптика / Под общей ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. — Л.: Машиностроение, 1983.—С. 362—363.
10. Химическая технология стекла и ситаллов / Под ред. Н. М. Павлушкина. — М.: Стройиздат, 1983.—С. 391—411.
11. Berezehinsky L. I., Maslov V. P., Serdega B. K., et al. Study of chemical interaction at Al-ZERODUR interface // J.

- European Ceramic Soc.—2006.—26/16.—P. 3825—3830.
12. Int. Pat. application # PCT/UA2006/000045. The Maslov's ceramic bonding of the glassy-crystalline units.—, 17 July 2006.
13. Maslov V. P. High-reliability unglue bonding of Zerodur details // The Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (June, 2005, Munich, Germany). — Munich, 2005.—P. 777—779.
14. Strzelecki M., Wyckoff N., O'Malley R., et al. Sticking together // SPIE's Oemagazine.—2003.—May.—P. 27—29.
15. Zeiders G. W. ULTIMA Update — Ultra Light Telescope Integrated Missions for Astronomy // NGST Technology Challenge Review. — Goddard Space Flight Center, July 1997.

PERSPECTIVE MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTING LIGHT-WEIGHT TELESCOPE MIRRORS

V. P. Maslov

The analysis of literature data and the set of experimental results allow one to consider SiC-ceramics and glassceramics as the most perspective materials for light-weight telescope mirrors. The developed technology of solid-phase bonding of polished details with the help of nano-dimensional vacuum coatings (SBPD-technology) enables one to realize “sandwich”-constructions of the light-weight mirrors both of glass ceramics and of the combined constructions, SiC-ceramics (basis) — glassceramics (top working layer).

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, Л. Я. Емельянов¹, С. А. Пазюра¹, Л. Ф. Черногор²

¹Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков

e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

e-mail: Leonid. F. Chernogor@univer.kharkov.ua

Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г.

1. Результаты наблюдений

Надійшла до редакції 05.02.07

Досліджується поведінка шару F2 та зовнішньої іоносфери над Харковом під час геокоsmічної бури 7—10 листопада 2004 р., що стала результатом накладання двох послідовних дуже сильних магнітних збурень ($K_{\text{max}} = 8.7$). Спостереження проведено за допомогою радару некогерентного розсіяння. Зареєстровано значні ефекти негативного іоносферного збурення, зокрема зменшення електронної концентрації в максимумі шару F2 у шість-сім разів та повного електронного вмісту до висоти 1000 км удвічі, підйом шару F2 іоносфери на 300 км вночі та на 150—180 км вдень, незвичайне нічне нагрівання до 2000 та 3000 К для іонів та електронів відповідно, зменшення відносної концентрації іонів водню $N(\text{H}^+)/N_e$ до 3.5 разів за рахунок спустошення магнітної силової трубки, що проходить над Харковом. Під час головної фази бури знайдено ефекти, що зазвичай властиві високоширотній іоносфері, включаючи когерентні відбиття. Отримані результати могли свідчити про зміщення великомасштабних структур високоширотної іоносфери (аврорального овалу, головного іоносферного провалу, гарячої зони та ін.) до широти Харкова.

ВВЕДЕНИЕ

Расположение харьковского радару некогерентного рассеяния (параметр Мак-Илвейна $L \approx 1.9$) дает возможность исследовать эффекты, связанные с вариациями космической погоды глубоко во внутренней плазмосфере. Роль этих эффектов существенно увеличивается во время сильных геокосмических бурь. Возмущения охватывают не только высокие широты, они проникают также в средние широты, дестабилизируя технологическую деятельность человека и воздействуя на его здоровье. Многообразие и сложность процессов, развивающихся в периоды геокосмических бурь, делают каждую бурю уникальной, что затрудняет прогнозирование возмущенной

ионосферы. Анализ каждой новой бури дает дополнительную информацию для дальнейшего исследования и моделирования физических процессов в системе Солнце — Земля, а также для прогнозирования реакции ионосферы конкретного региона на возмущения на Солнце.

Единственный в среднеширотной Европе харьковский радар некогерентного рассеяния (НР) метрового диапазона на протяжении почти трех циклов солнечной активности (СА) проводит изучение ионосферы в зависимости от состояния космической погоды [4—7, 12, 13—16].

Целью работы является исследование особенностей поведения области F2 и внешней ионосферы во время сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. (максимальное значение

индекса $K_p = 8.7$). Буре 7—10 ноября 2004 г., называемой супербурей, экстрабурей, уникальной бурей посвящены многие работы [1, 8, 10, 11]. Эти наблюдения, выполненные другими методами и в других регионах земного шара, существенно дополняются нашими наблюдениями. Наши результаты дополняют результаты, полученные мировым научным сообществом.

Наблюдения бури проводились 8—13 ноября 2004 г. в соответствии с международной программой LTCS-C/NOFS (Lower Thermosphere Coupling Study-Communications / Navigation Outage Forecasting System).

СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Радар некогерентного рассеяния. Исследования ионосферы в Харькове проводятся с помощью радара некогерентного рассеяния (НР), расположенного в обсерватории Института ионосферы (географические координаты: 49.6° с. ш., 36.3° в. д., геомагнитные координаты: 45.7° , 117.8°). Описание радара и режимов его работы дано в работах [5, 12]. 8—13 ноября 2004 г. радар работал в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 660 и 130 мкс на частотах $f_1 \approx 158$ МГц и $f = f_1 \pm 100$ кГц. Такой режим обеспечивает высотное разрешение примерно 100 и 20 км в диапазонах высот 200—1000 и 100—400 км соответственно. Максимальная мощность двухканального передатчика радара достигает 3.6 МВт (средняя мощность — 100 кВт), поляризация — круговая. Коэффициент усиления крупнейшей в мире зенитной двухзеркальной 100-м параболической антенны — около 12700 (эффективная площадь близка к 3700 м^2 , ширина луча — 1°). Температура системы составляет 570—1320 К, шумовая температура входных цепей радиоприемного устройства достигает 120—240 К.

Ионозонд «Базис». Ионосферная станция служит для получения ионограмм вертикального зондирования (ВЗ) и измерения критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы с целью калибровки профиля электронной концентрации, получаемого методом НР.

Магнитометр-флюксметр. Исследования временных вариаций горизонтальной составной

геомагнитного поля (составляющие H и D в направлениях север—юг и запад—восток соответственно) осуществляются при помощи несерийного высокочувствительного ($0.5\text{—}1$ пТл) магнитометра-флюксметра, размещенного в Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета (ХНУ) имени В. Н. Каразина (геомагнитные координаты: $45^\circ 20'$, $119^\circ 20'$) [3].

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ. ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ

Процессы на Солнце. Буря представляла собой последовательное наложение двух сильнейших магнитных возмущений 7/8 и 9/10 ноября. Они были вызваны высокой активностью Солнца, связанной с быстрым развитием на его диске активной области 696. Бурная эволюция активной области 696 произвела за время ее прохождения по диску Солнца 13 рентгеновских вспышек балла М и две вспышки балла Х (таблица). Геоэффективность вспышек в рассматриваемом интервале наблюдений была высокой. Среди них 3 ноября имели место четыре интенсивные вспышки балла М2.8, М1.6, М5.0, М1.0, 4 ноября — две вспышки М2.5 и М5.4, 5 ноября — две вспышки М4.0 и М1.2, 6 ноября — четыре вспышки М9.3, М5.9, М3.6, М1.4, 8 ноября — вспышка М2.3, 9 ноября — М8.9, а также очень интенсивные вспышки 7 ноября балла Х2.0 и 10 ноября балла Х2.5, последняя явилась самым значительным событием за время жизни активной области 696 на Солнце. Вспышки сопровождались выбросами корональной массы (СМЕ) типа полного или частичного гало различной сложности и конфигурации, магнитных облаков, интенсивными всплесками радиоизлучения, высокоскоростными потоками плазмы, вытекающими из корональных дыр, изменениями динамического давления солнечного ветра (СВ), деформацией переносимого им межпланетного магнитного поля. 9 ноября вспышка М8.9 сопровождалась СМЕ типа «полного гало» со скоростью 1800 км/с в картинной плоскости. Скорость движения солнечной плазмы во время самой интенсивной вспышки Х2.5 10 ноября с выбросом СМЕ типа «асимметричного полного гало» достигла 2000 км/с. К 11 ноября активность

Данные о солнечной активности 1—13 ноября 2004 г.

Дата, ноябрь 2004 г.	$F_{10.7}$	Количество солнечных пятен	Площадь солнечных пятен, 10^{-6}	Рентгеновское излучение (фон)	Количество рентгеновских вспышек			Количество оптических вспышек				
					С	М	Х	S	1	2	3	4
1	136	144	1160	B3.3	2	1	0	1	1	0	0	0
2	133	110	1070	B5.1	7	0	0	2	0	0	0	0
3	136	123	1240	B5.4	11	4	0	6	3	0	0	0
4	136	135	1300	B4.5	6	2	0	2	1	0	0	0
5	141	83	1400	B4.9	10	2	0	6	1	0	0	0
6	129	106	1370	B4.3	6	4	0	2	3	1	0	0
7	130	94	980	B4.9	12	0	1	6	0	0	0	0
8	124	93	870	B4.9	5	1	0	10	2	0	0	0
9	127	90	980	B7.0	6	1	0	4	0	1	0	0
10	105	50	500	B5.2	8	0	1	1	0	0	2	0
11	95	70	550	B2.1	1	0	0	1	0	0	0	0
12	97	52	230	B1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
13	96	50	220	B1.0	0	0	0	0	0	0	0	0

области 696 значительно уменьшилась, а 12 ноября область переместилась на обратную сторону солнечного диска. Подробное описание солнечной вспышечной и эруптивной активности в ноябре 2004 г., вызвавшей возмущения в межпланетной среде и в магнитосфере, дано в работе [8].

Космическая погода. Параметры, определяющие состояние космической погоды 7—13 ноября 2003 г., приведены на рис. 1. На спутнике ACE 7 ноября в 02^h00^m UT зарегистрирован приход первой из шести межпланетных ударных волн, образованных облаками CME, возникшими во время вспышек 3, 4 и 5 ноября. Прохождения следующих двух волн наблюдались в 10^h00^m UT и 17^h55^m UT. Они привели к сильнейшей первой магнитной буре 7—8 ноября с минимальным значением индекса $D_{st} = -373$ нТл, зарегистрированным 8 ноября в 07^h00^m UT. С приходом ударных волн связано внезапное начало (SC) трех отдельных бурь (суббурь). SC были зарегистрированы 7 ноября как всплески геомагнитного поля в Боулдере со значениями индукции 7 нТл в 02^h58^m UT, 35 нТл в 11^h13^m UT и около 41 нТл в 18^h31^m UT [<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>], а также как положительные всплески индекса D_{st} (<http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp>) до значений +12 нТл около 04^h00^m UT, +51 нТл в 13^h00^m UT и +42 нТл в 20^h00^m UT. Эти события

свидетельствовали о сложном характере межпланетных возмущений, связанных с прохождением и наложением серии CME, произведенных в течение начального периода высокой активности области 696. В этот период зарегистрированы увеличения радиальной скорости V_{sw} солнечного ветра, в том числе 7 ноября от 310 до 700 км/с, температуры T и концентрации n_{sw} плазмы солнечного ветра, динамического давления p_{sw} , которое достигло 20 нПа при прохождении через спутник ACE третьей ударной волны в 17^h55^m UT, а также деформация межпланетного магнитного поля, сопровождаемая значительными флуктуациями, увеличением модуля B_t до 45 нТл и резким поворотом B_z -оставляющей на юг в 18^h30^m UT. Значение B_z достигло минимума -45 нТл 8 ноября в 02^h00^m UT и оставалось отрицательным до полудня. Сильное возмущение сменило спокойное магнитное поле: в полночь 6/7 ноября $K_p = 1.7$ [<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>], в следующую ночь $K_p = 8.0, 8.7, 8.7$ и 8.3 в течение четырех 3-ч интервалов соответственно. Фаза восстановления первой бури началась 8 ноября после 07^h00^m UT (см. кривую D_{st} на рис. 1). На ее плавное течение наложилось начало следующей бури 9/10 ноября. 9 ноября ударная волна была зарегистрирована на спутнике ACE в 09^h13^m UT, а

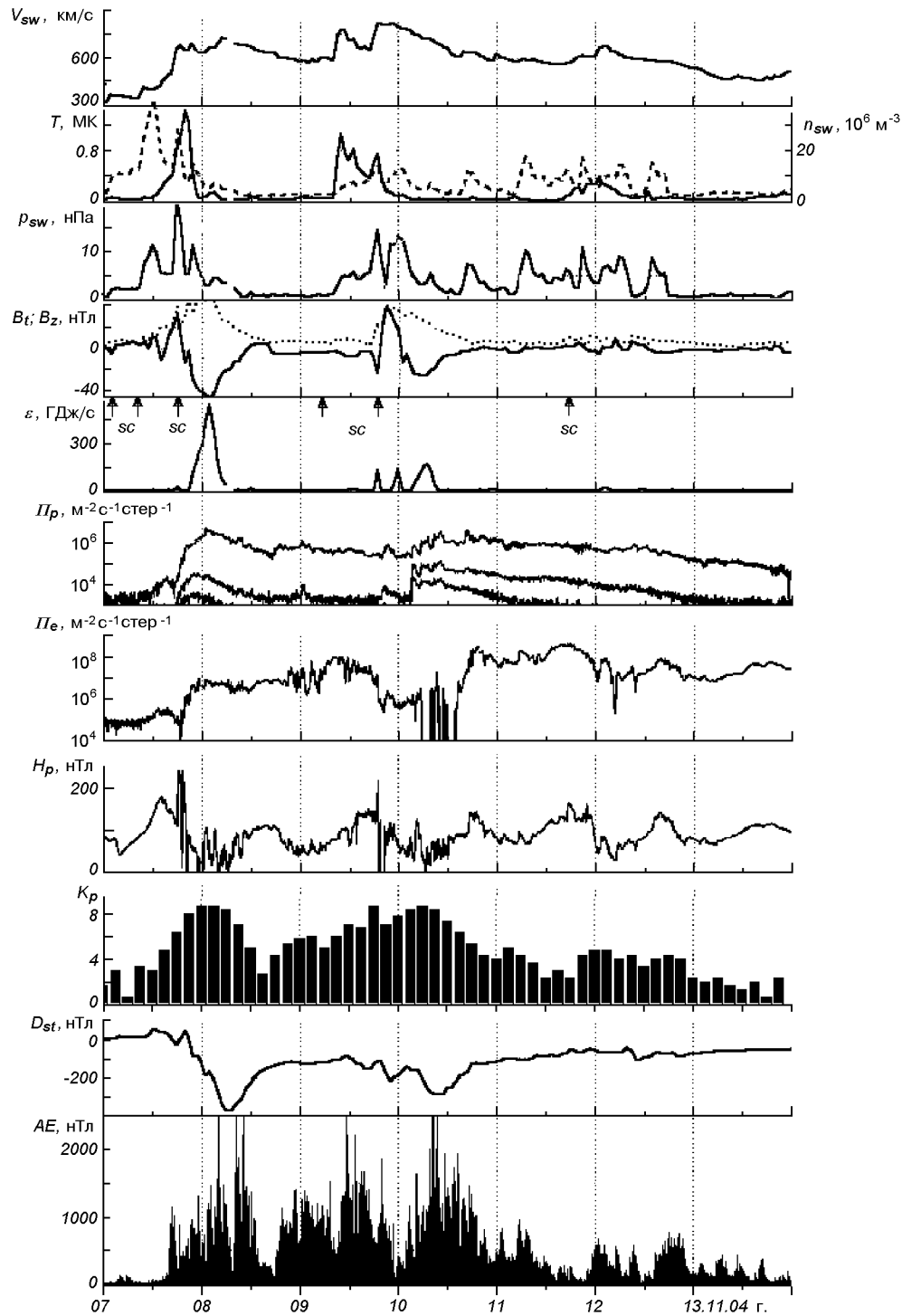


Рис. 1. Изменение параметров солнечного ветра (V_{sw} , T и n_{sw}), динамического давления p_{sw} , модуля B_t (точки) и B_z -составляющей ММП (данные КА ACE), энергии ϵ , плотности потоков протонов Π_p с энергиями более 10, 50 и 100 МэВ (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов Π_e с энергией более 2 МэВ (ИСЗ GOES-12), H_p -составляющей геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), индексов K_p (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto) в течение 7—13 ноября 2004 г. Стрелками отмечены начала суббурь (sc)

затем в 18^h18^m UT. Первая волна была слабой, хотя она вызвала увеличение V_{sw} от 600 до 750 км/с при незначительных изменениях модуля B_t - и B_z -составляющей межпланетного магнитного поля. Волна могла быть связана с наложением СМЕ, которые образовались 6 ноября во время двух вспышек М3.6 и М9.3 и распространялись с разными скоростями. Вторая ударная волна сопровождалась увеличением V_{sw} от 675 до 825 км/с и поворотом к югу B_z -составляющей, которая достигла значения -25 нТл 10 ноября около 06^h00^m UT и сохраняла южное направление примерно до 18^h00^m UT. В Боулдере 9 ноября в 18^h52^m UT зафиксирован новый всплеск геомагнитного поля до 46 нТл, вслед за которым спутники GOES-10 и GOES-12 пересекли магнитопаузу, что свидетельствовало о сжатии магнитосферы. Эти эффекты, вероятно, были связаны со вспышкой 7 ноября балла X2.0. Главная фаза второй бури протекала на фоне значительных флуктуаций параметров солнечного ветра, индекса D_{st} , значение которого достигло минимума (-289 нТл) 10 ноября в 10^h00^m—11^h00^m UT. Активный период бури был продолжительным, значения $K_p \geq 6$ наблюдались с 12^h00^m UT 9 ноября до 18^h00^m UT 10 ноября. Фаза восстановления продолжалась по крайней мере до конца измерений. Наконец, 11 ноября в 17^h14^m UT в Боулдере зарегистрирован еще один скачок поля около 12 нТл. Ему предшествовало прохождение через спутник ACE слабой волны, связанной, вероятно, с СМЕ, образовавшимся 9 ноября во время вспышки М8.9. В этот день начался второй период вспышечной активности Солнца, вызванный образованием нового потока пятен в активной области 696. К этому периоду относится и самая интенсивная вспышка X2.5 (10 ноября). Однако эти события не привели к значительным магнитосферным и геомагнитным возмущениям. К 12 ноября параметры солнечного ветра начали восстанавливаться, B_z -составляющая повернула на север, достигнув величины $+5$ нТл, геомагнитное поле возвращалось к норме.

Вспышки сопровождалась выбросами энергичных частиц. Поток протонов с энергией $E_p > 10$ МэВ наблюдался с 19^h10^m UT 7 ноября до 16^h00^m UT 13 ноября. Плотность потока достигла максимума $4.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ 8 ноября в 01^h15^m

UT. Усиление потока протонов с $E_p > 100$ МэВ зафиксировано в ночь 7/8 ноября. Эти события были связаны со вспышкой X2.0 7 ноября. 10 ноября наблюдалось новое вторжение высокоэнергичных протонов, выброс которых сопровождал вспышку X2.5 в 02^h13^m UT. При этом второй максимум плотности потока протонов с $E_p > 10$ МэВ был зафиксирован 10 ноября в 16^h55^m UT, а поток протонов с $E_p > 100$ МэВ наблюдался с 03^h20^m UT до 12^h50^m UT. Плотность потока электронов с энергиями $E_e > 2$ МэВ имела высокие значения. Наибольшие высыпания электронов наблюдались в ночь 8/9, 9/10 ноября и днем 10 ноября.

Колебания H_p во время магнитной бури были значительны (от 0 до 240 нТл) и коррелировали с вариациями динамического давления солнечного ветра p_{sw} (рис. 1). На фоне магнитных возмущений 7—10 ноября зарегистрирована последовательность интенсивных суббурь, при которых авроральный индекс AE достигал значения 1500—2500 нТл, тогда как перед началом бури 7 ноября $AE \approx 0$. Видно, что энергия, передаваемая солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени (энергетическая функция Акасофу ε), достигала высоких значений $\varepsilon \approx 600$ и 150 ГДж/с во время первой и второй бурь соответственно. Заметим для сравнения, что во время двух сильных магнитных бурь 25 сентября 1998 г. и 29—30 мая 2003 г. ($K_{p \max} = 8.3$) поступления энергии в магнитосферу Земли были значительно меньшими ($\varepsilon \approx 100$ и 75 ГДж/с).

Геомагнитная буря. На рис. 2 представлены временные вариации горизонтальных составных геомагнитного поля H и D , зарегистрированные магнитометром-флюксометром ХНУ с временным разрешением 0.5 с, а также вариации их средних квадратичных отклонений σ_H и σ_D с часовым усреднением. Как и следовало ожидать, наиболее сильные возмущения геомагнитного поля в районе г. Харькова наблюдались во время главной фазы магнитных бурь. При этом максимальные значения σ_H увеличились в четыре и семь, а σ_D — в 23 и 26 раз во время первой и второй бурь соответственно. Высокое временное разрешение магнитометра позволило уточнить моменты начала отдельных бурь, связанных с приходами серии облаков СМЕ. В районе г. Харько-

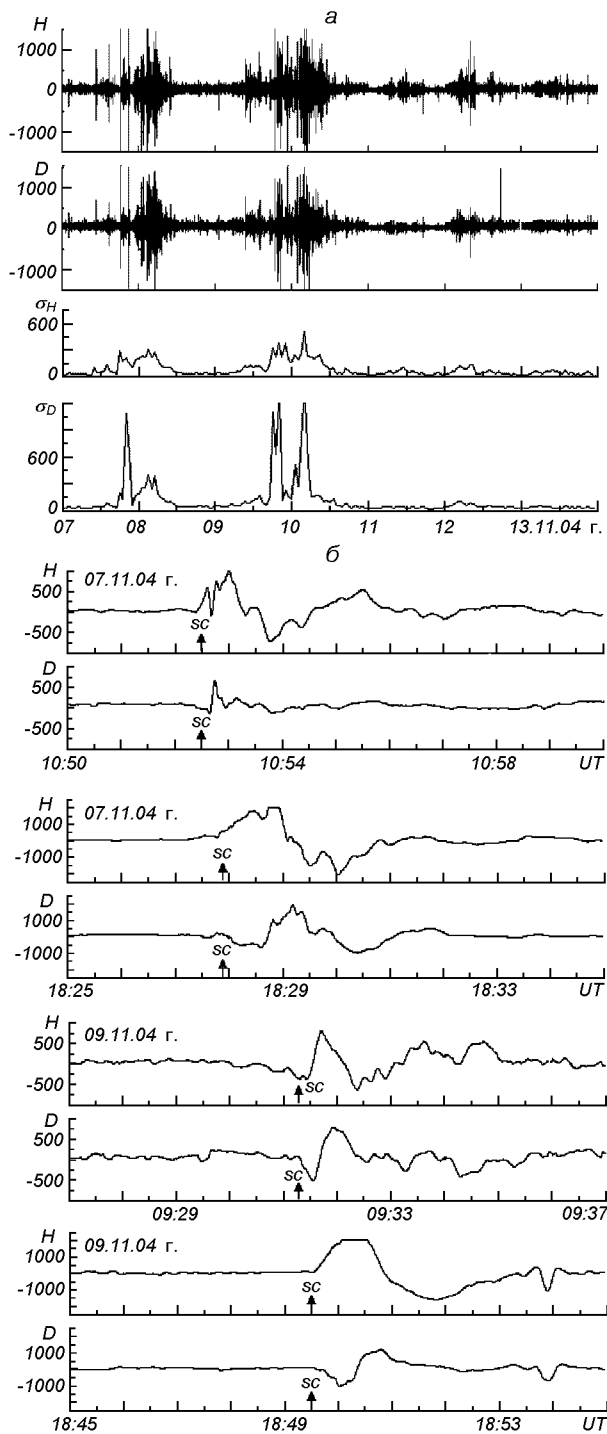


Рис. 2. Вариации H -, D -компонентов геомагнитного поля (в относительных единицах): a — измерения с временным разрешением 0.5 с и их стандартных отклонений σ_H , σ_D (с часовым усреднением); b — данные магнитометра-флюксметра (разрешение 0.5 с) для магнитных бурь 7 и 9 ноября 2004 г.

ва они были зарегистрированы, например, 7 ноября в $10^h52^m30^s$ и $18^h27^m50^s$ UT, а 9 ноября — в $09^h31^m25^s$ и $18^h49^m30^s$. Этим моментам SC предшествовали прохождения ударных волн, зарегистрированные на спутнике ACE 7 ноября в 10^h00^m и 17^h55^m , а 9 ноября в 09^h13^m и 18^h18^m . Учитывая расстояние от Земли до спутника, равное примерно 1.5 млн км, можно оценить скорости распространения возмущений СВ, которые составили около 470, 760 и 790 км/с 7 ноября в $10^h52^m30^s$, $18^h27^m50^s$ и 9 ноября в $18^h49^m30^s$ соответственно. Отличия полученных оценок скоростей V_{sw} от измеренных на спутнике не превышали 10 %.

ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ

Магнитные бури сопровождались отрицательным ионосферным возмущением, которое наблюдалось от начала и до конца измерений. Отклонение δf_0F2 критической частоты слоя F2 от значений в спокойный день достигло -60% в полуденные часы 8 и 10 ноября, когда геомагнитная активность была наиболее высокой. В качестве контрольных данных взяты усредненные значения f_0F2 за 28—30 октября 2004 г. ($A_p = 3, 3, 17$). Для радары НР в Харькове ($\lambda = 36.3^\circ$ E) местное время $LT \approx UT + 02^h25^m$. В утренние часы 9 ноября δf_0F2 уменьшилось и приблизилось к нулю вблизи полудня. В последующие сутки 11 и 12 ноября дневные значения δf_0F2 оставались отрицательными на уровне -30 и -20% , а ночью 8—12 ноября они составляли $-40, -45, -60, -40, -20\%$ соответственно.

Вариации концентрации электронов $NmF2$ в максимуме слоя F2. Интенсивность ионосферной бури сильно изменялась (рис. 3). Наибольшее уменьшение $NmF2$ по сравнению с контрольным днем составило семь раз вблизи полудня 8 ноября, сразу после главной фазы первой бури при $K_p = 7.0$, шесть раз — в дневные часы 10 ноября на фоне главной фазы второй бури при $K_p = 8.3$ — 8.7 . Уменьшение $NmF2$ до шести раз отмечалось также в ночь 10—11 ноября во время фазы восстановления второй бури при значениях $K_p = 5.3$ — 4.0 .

Наличие двух максимумов во временном ходе $NmF2$ для спокойных суток 28—30 октября сви-

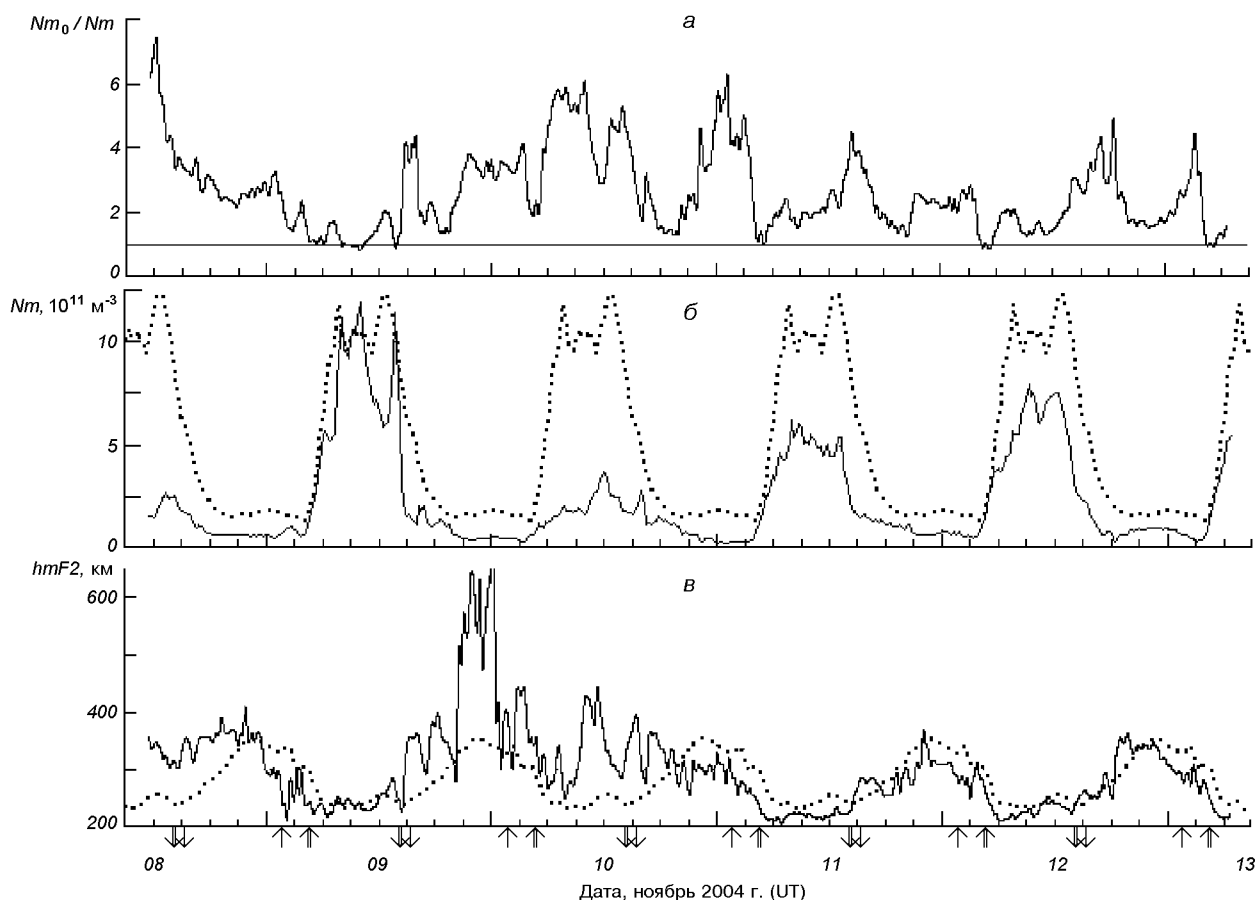


Рис. 3. Вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2: *а* — отношение концентраций в магнитоспокойный день 28—30 октября 2004 г. и возмущенные сутки 8—13 ноября 2004 г., *б*, *в* — значения концентрации $NmF2$ и высоты максимума $hmF2$ в контрольный день (пунктир) и возмущенные сутки (сплошная линия). Здесь и далее стрелки обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца на поверхности Земли в Харькове (двойная) и в магнитосопреженной точке (одинарная)

детельствует о неполном переходе к зимнему сезону. В то же время амплитуда суточных вариаций $NmF2$ составляла шесть раз и в большей степени соответствовала особенностям зимней ионосферы. Видно, что вечерний максимум $NmF2$ сопоставим с дневным, что характерно для спада СА.

На рис. 4 приведены вариации N_e на высотах 200—650 км. Видно, что с увеличением высоты вклад процессов диффузии в вертикальное распределение N_e в течение бури изменялся.

Вариации высоты $hmF2$ максимума слоя F2 в рассматриваемые дни показаны на рис. 3, б. В спокойные сутки высота изменялась при-

мерно от 230 днем до 350 км ночью. Во время бури наблюдался подъем слоя F2, который составил около 80 км днем 8 ноября, почти 300 км в ночь 9/10 ноября и 150—180 км в полдень 10 ноября.

Высотные распределения концентрации электронов в области F2 ионосферы. На рис. 5—7 приведены высотные профили N_e в последовательные моменты времени (через 15 мин) в течение главной фазы второй бури, а именно в ночь 9—10 ноября и днем 10 ноября ($K_p \geq 8$). Видно, что в течение продолжительного времени наблюдалась деформация профилей $N_e(h)$. Сопоставление их с данными ионозонда

показало, что при сильных деформациях профилей $N_e(h)$ на ионозонде были зарегистрированы ионограммы, характерные для высокоширотной ионосферы (рис. 6 и 7). Это проявилось, в частности, в увеличении диффузности отраженного сигнала.

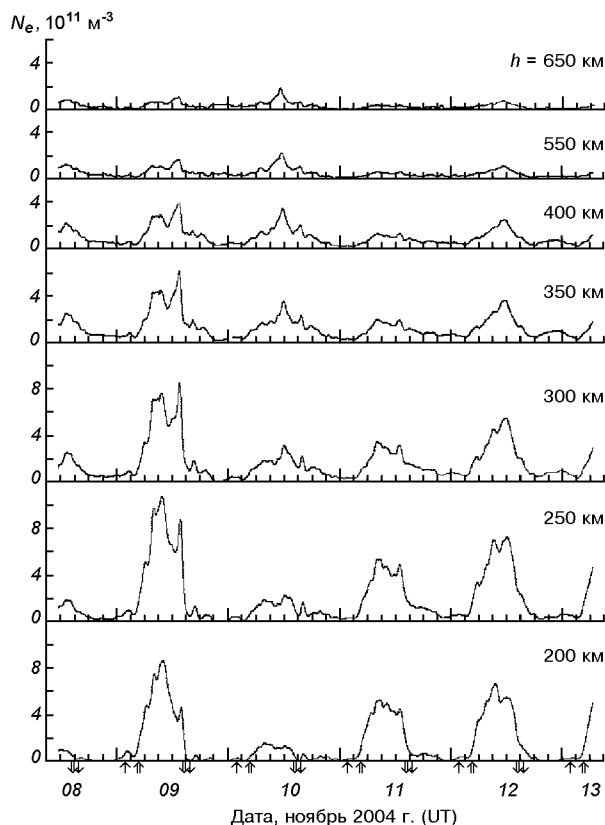


Рис. 4. Вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

ного сигнала.

Когерентное эхо. Редким для средних широт эффектом явились зарегистрированные в период главной фазы второй бури когерентные отражения, примеры которых приведены на рис. 8. Сигналы наблюдались 9 ноября примерно с 16^h12^m UT до 21^h30^m UT и 10 ноября около 02^h30^m UT, а также с 09^h15^m UT до 11^h15^m UT в интервале дальностей около 650—1500 км. Мощность эхо-сигналов изменялась в широких пределах, временами она на два порядка превышала мощность НР-сигнала. Иногда на профиле $N_e(h)$ наблюдались два эхо-сигнала, например, на дальностях 750 и 1400 км.

Необычные профили $N_e(h)$ (полученные с накоплением 1 мин) были зарегистрированы вблизи полудня 10 ноября с 11^h02^m UT до 11^h14^m UT. Они имели два дополнительных максимума (отражения) на высотах около 700 км (см. рис. 7 и 8) и 1100 км (рис. 8), соизмеримые с основным максимумом. Отражения возникли внезапно, наблюдались около 15 мин и так же внезапно исчезли. Следует отметить, что в это же время на ионограмме ВЗ над Харьковом наблюдался диффузный след, который был виден также примерно 15 мин (рис. 7).

Вариации температуры электронов T_e и ионов T_i в контрольные сутки 29 октября 2004 г. и во время бури 8—13 ноября 2004 г. показаны на рис. 9. Видно, что в спокойных условиях на высотах 250—750 км значения T_e изменялись примерно от 700—1400 К ночью до 1400—2500 К около полудня, а T_i — от 700—1100 К до 1000—1800 К. Во время бури 8 и 10 ноября вблизи местного полудня при низких значениях $NmF2 \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ температура T_e увеличилась примерно до 1800—3200 К за счет

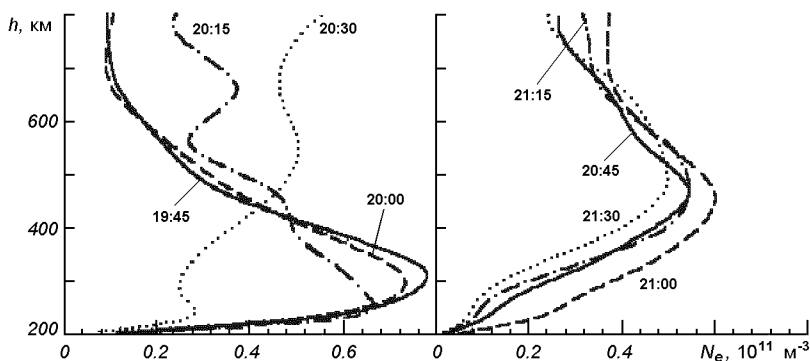


Рис. 5. Высотные профили N_e , полученные 9 ноября с 15 мин накоплением сигнала, в последовательные моменты времени UT в течение главной фазы второй магнитной бури

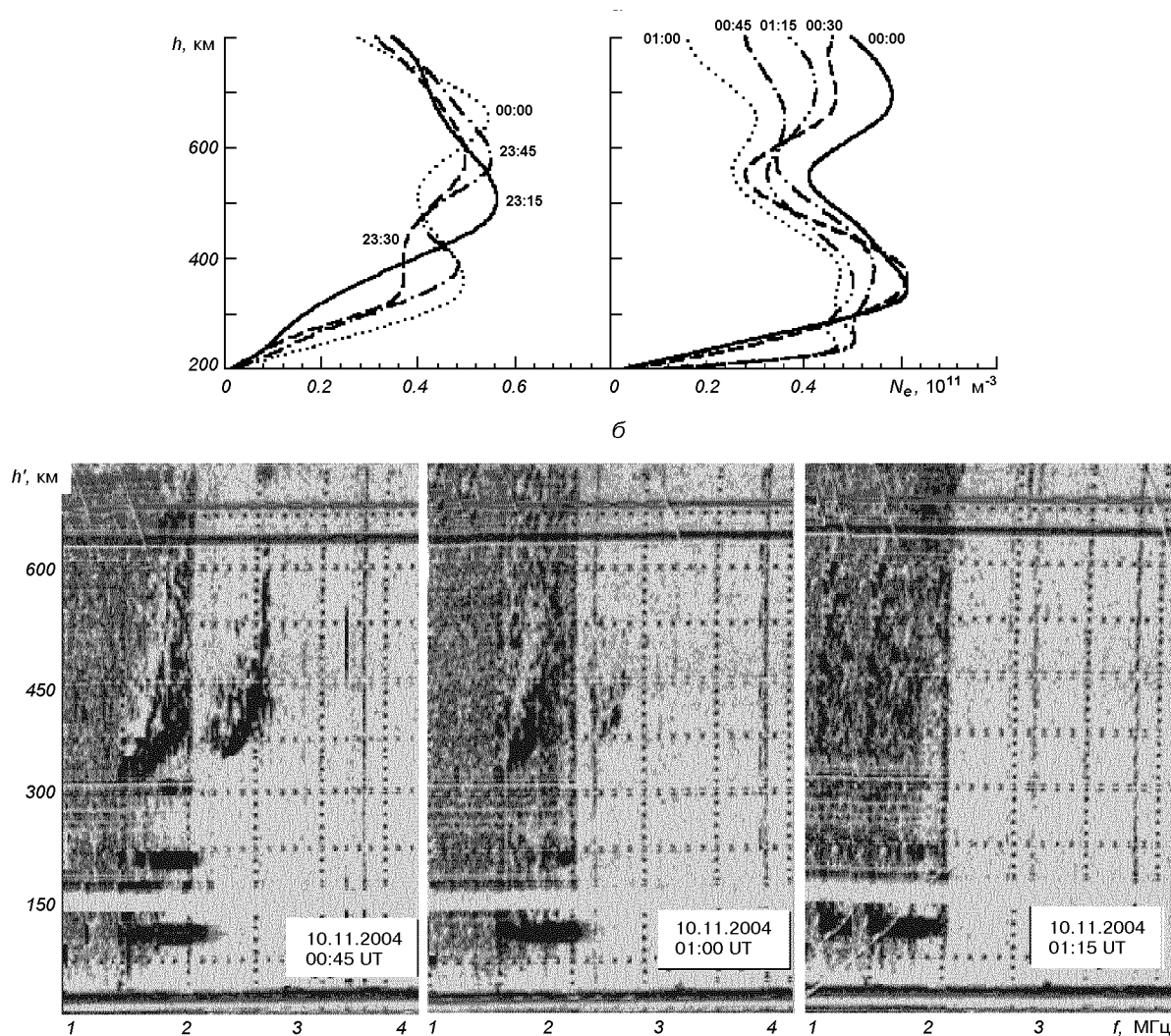


Рис. 6. Последовательные профили $N_e(h)$ (а) и ионограммы (б), полученные 9/10 ноября в течение главной фазы второй магнитной бури

уменьшения скорости охлаждения электронного газа в кулоновских соударениях с ионами, которая пропорциональна N_e^2 .

Необычный ночной нагрев плазмы на фоне низких значений N_e , когда температура T_e достигла дневных значений 1600—3000 К на высотах 250—750 км, отмечался ночью 8/9, 9/10, 10/11 и 11/12 ноября. Характер ночного нагрева электронов и его продолжительность в течение ночи изменялись. Температуры T_i в ночное время также увеличились до дневных значений около 1300—2000 К. Это происходило ночью

8/9, 9/10, 10/11, а также в период восхода Солнца 12 ноября. Необычный ночной нагрев плазмы в основном сопутствовал глубокой депрессии концентрации электронов на высотах области F2 (см. рис. 3, а и 9), что могло свидетельствовать об общей природе этих возмущений.

Полное электронное содержание. Рис. 10 иллюстрирует вариации полного электронного содержания (ПЭС) I в спокойные сутки 28—30 октября 2004 г. и во время бури. Значения ПЭС рассчитывались в интервале высот от 100

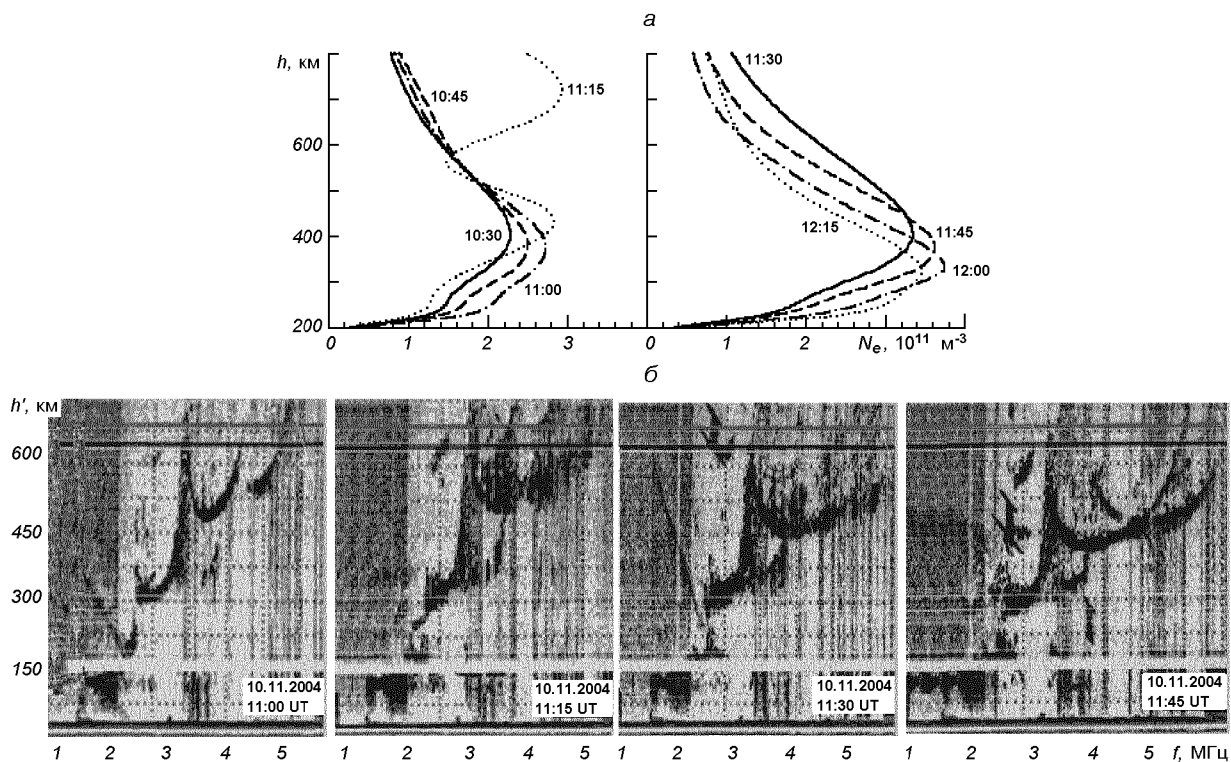


Рис. 7. То же для 10 ноября (при $K_p = 8.3$)

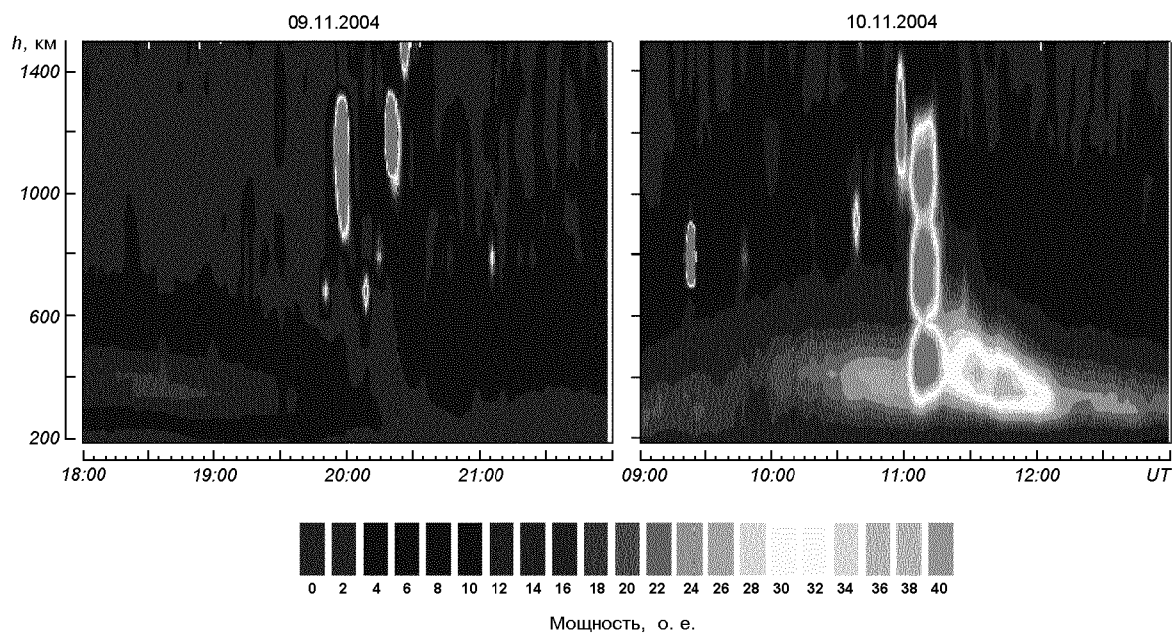


Рис. 8. Когерентные эхо во время магнитной бури 9/10 ноября 2004 г. Данные усреднены по высоте (дальности) с нарастающим шагом от 30 км на высоте 240 км до 160 км на высоте 1350 км. Усреднение по времени скользящее на интервале 3 мин с шагом 1 мин

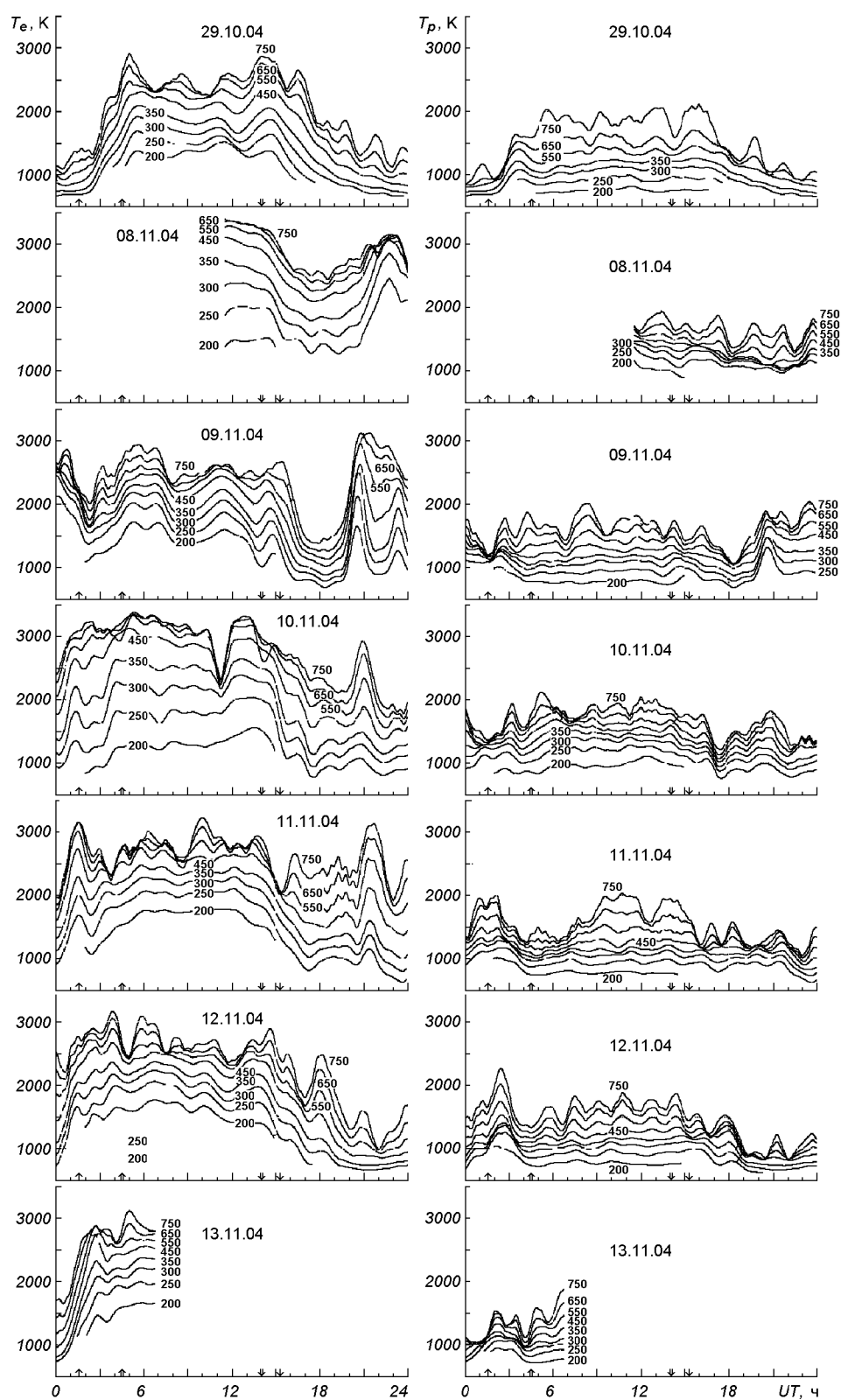


Рис. 9. Вариации температур электронов T_e и ионов T_i на разных высотах h (числа у кривых, км) в магнитоспокойный день 29 октября и возмущенные сутки 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

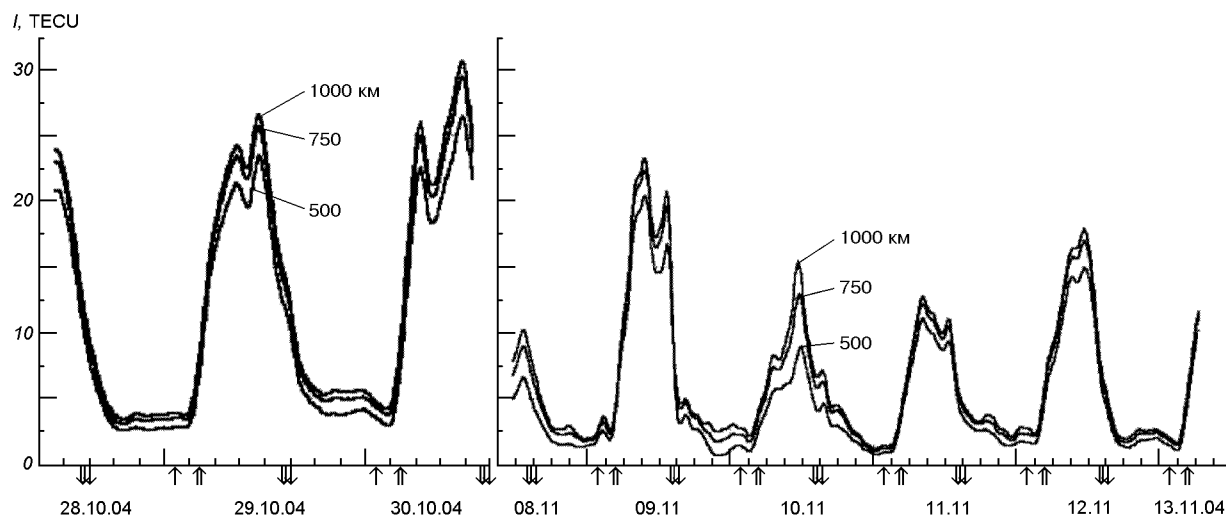


Рис. 10. Вариации полного электронного содержания до высот 500, 750 и 1000 км в спокойные сутки 28—30 октября и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

до 500, 750 и 1000 км в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). В спокойных условиях значения ПЭС плавно нарастали с наступлением местного восхода Солнца, достигнув максимальных значений вблизи полудня $I \approx 24 \text{ TECU}$ (до высоты 1000 км). Далее ПЭС плавно уменьшалось к ночным значениям. Минимум $I \approx 3.5 \text{ TECU}$ наблюдался перед восходом Солнца. Значительные суточные вариации I (около семи раз) характерны для зимних условий. В возмущенный период на фоне депрессии $NmF2$ зарегистрировано уменьшение значений I по сравнению с данными 29 октября. Вблизи местного полудня они уменьшались в 2, 2, 1.7 и 1.2 раза соответственно 8, 10, 11 и 12 ноября, а вблизи полуночи — примерно в 2.5 раза. 9 ноября, во время фазы восстановления первой магнитной бури, дневное значение I превысило его значение в контрольный день.

Вариации ионного состава во внешней ионосфере. Поведение относительной концентрации ионов водорода $N(\text{H}^+)/N_e$ на фиксированных высотах для спокойных и возмущенных условий показаны на рис. 11, а. Видно, что в спокойные сутки поведение $N(\text{H}^+)/N_e$ было типичным для зимнего сезона средней СА. Величина $N(\text{H}^+)/N_e$ нарастала после захода Солнца, достигла наибольшего значения вблизи местной полуночи, и при восходе Солнца начала умень-

шаться. Например, на высоте 1100 км ее максимальное ночное значение составило 0.9. Особенности регулярных сезонно-суточных и солнечно-циклических вариаций $N(\text{H}^+)/N$ в ионосфере над Харьковом описаны нами в работах [2, 9, 12].

В возмущенные сутки поведение $N(\text{H}^+)/N_e$ имело сложный характер. Известно, что оно отражает особенности вариаций таких параметров верхней атмосферы, как концентрация ионов O^+ , атомов водорода H , температура нейтралов, а также поток ионов H^+ на верхней границе рассматриваемой области и критический поток H^+ . Кроме того, наблюдались уменьшения («провалы») значений $N(\text{H}^+)/N_e$ ночью 9, 10, 11 и 12 ноября, которые составляли 1.5—3.5 раза на высоте 1100 км. Они имели разную продолжительность во времени. Из рис. 3, а, 9 и 11 видно, что возмущения ионного состава наблюдались почти одновременно с возмущениями концентрации электронов и температуры плазмы. На рис. 11, б приведены временные вариации высоты h_t перехода от ионов O^+ к ионам H^+ , где $N(\text{O}^+) = N(\text{H}^+)$. В спокойных условиях h_t изменялась плавно, достигая днем 1200—1300 км, а ночью около 650 км. При высокой геомагнитной активности 8 и 10 ноября днем h_t увеличилась до 1500 км, т. е. примерно на 200 км. В слабо возмущенные сутки 9 и 12

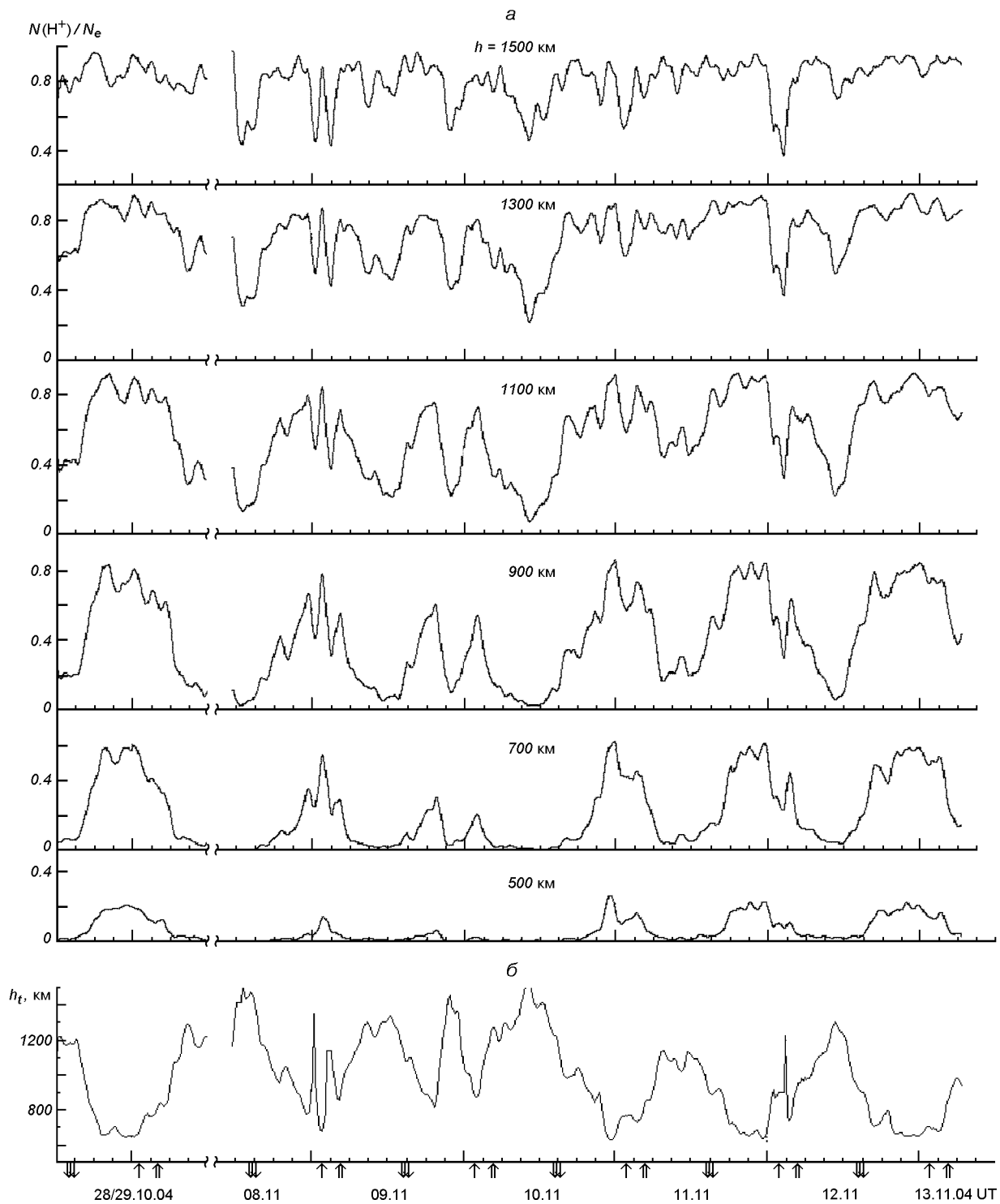


Рис. 11. Вариации в контрольные сутки 28—29 октября и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин): *a* — относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах, *б* — высоты h_t , где $N(O^+) = N(H^+)$

ноября она приблизилась к значению в спокойный день (1300 км), а 11 ноября была на 100—200 км меньше. На плавные вариации высоты h_f накладывались ее быстрые увеличения, которые имели разную продолжительность и величину и соответствовали описанным выше «провалам» значений $N(H^+)/N_e$.

Выводы

Проведены ионосферные наблюдения во время сильнейшей магнитной бури, которая состояла из двух последовательных магнитных возмущений 7/8 и 9/10 ноября 2004 г. со значениями индексов: $A_p = 189$ и 181 , $D_{stmin} = -373$ и -289 нТл, $K_{pmax} = 8.7$ и 8.7 . Буря была связана с высокой всплывчатой активностью Солнца, необычной для перехода к фазе минимума солнечного цикла.

1. Зарегистрированы эффекты сильного отрицательного ионосферного возмущения, в том числе уменьшение концентрации электронов $NmF2$ в максимуме слоя F2 до 6—7 раз во время главной фазы бури.

2. Во время бури наблюдался необычный ночной нагрев плазмы до дневных значений температур $T_i = 1300—2000$ К и $T_e = 1600—3000$ К на высотах 250—750 км.

3. Зарегистрировано увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя F2 в активные периоды бури примерно на 300 км ночью и на 150—180 км в дневное время.

4. Сопоставление высотных профилей концентрации электронов, полученных из данных НР, с ионограммами вертикального зондирования показало, что во время магнитной бури ионосфера средних широт приобретала свойства, характерные для высокоширотной ионосферы. К их числу относится, в частности, увеличение диффузности отраженного сигнала.

5. Во время главной фазы второй магнитной бури зарегистрированы среднеширотные когерентные эхо-сигналы, обусловленные, по-видимому, генерацией двухпотоковой неустойчивости плазмы в области E ионосферы.

6. Зарегистрировано редкое для средних широт событие, когда днем наблюдались когерентные отражения на расстоянии 700—1100 км. При этом на ионограмме вертикального зонди-

рования над Харьковом зарегистрировано диффузное рассеяние. Когерентные отражения и диффузный след (на ионограмме) возникли внезапно и просуществовали около 15 мин.

7. Получено, что полное электронное содержание во время главной фазы бури уменьшилось по сравнению с контрольным днем в два раза вблизи полудня и в 2.5 раза около полудня.

8. Зарегистрированы уменьшения («провалы») значений относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах во время главной фазы бури по сравнению с контрольным днем (в 1.5—3.5 раза). Возмущения ионного состава коррелировали во времени с возмущениями концентрации электронов и температуры плазмы.

1. Афраимович Э. Л., Воейков С. В., Первалова Н. П., Ратовский К. Г. Крупномасштабные возмущения аврального происхождения во время магнитных бурь 29—31 октября 2003 г. и 7—11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов // Геомагнетизм и аэронавигация.—2006.—46, № 5.—С. 627—636.
2. Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И. Солнечно-циклические вариации концентрации ионов водорода во внешней ионосфере // Космічна наука і технологія. Додаток до журналу.—2003.—9, № 2.—С. 164—172.
3. 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.
4. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Чернороз Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
5. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Чернороз Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57—94.
6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Чернороз Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 6.—С. 789—802.
7. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И. и др. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 года // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 6.—С. 803—823.
8. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н. и др. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 6.—С. 723—765.

9. Кияшко Г. А., Григоренко Е. И. Особенности высотно-временного распределения ионов водорода над Харьковом // Вестник Харьков. ГПУ.—2000.—Вып. 103.—С. 45—47.
10. Козырева О. В., Клейменова И. Г., Корнилова Т. О. и др. Необычная пространственно-временная динамика геомагнитных возмущений в главную фазу сверхсильной магнитной бури 7—8 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2006.—46, № 5.—С. 614—626.
11. Полех Н. М., Пирог О. М., Воейков С. В. и др. Ионосферные возмущения в восточно-азиатском регионе во время геоактивного периода в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2006.—46, № 5.—С. 627—636.
12. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
13. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrtov O. F. Ionosphere wave-like disturbances (WLD) following the September 23, 1998 Solar flare from Kharkiv incoherent scatter radar observations // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science: Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC); Maastricht the Netherlands, 17—24 August 2002. — Maastricht, 2002.—P. 2278.
14. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrtov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science: Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands, 17—24 August 2002. — Maastricht, 2002.—P. 2280.
15. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // EOS Trans. AGU. 81 N 48. Fall Meeting. F 947. — San Francisco, 2000.
16. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998 // EOS Trans. AGU. 82 No. 20. Spring Meeting. S 291. San Francisco. USA. May 15. 2001.

IONOSPHERIC PROCESSES DURING THE 7—10 NOVEMBER 2004 EXTREME GEOSPACE STORM.

1. OBSERVATION RESULTS

Ye. I. Grigorenko, L.Ya. Emelyanov, S. A. Pazura, L. F. Chernogor

The study results of the F2 region and topside ionosphere behaviour during the 7—10 November 2004 geospace storm that arises from the imposition of two consistent extreme magnetic disturbances ($K_p \text{ max} = 8.7$) are presented. The observations were carried out with the Kharkiv incoherent scatter radar. Substantial effects of negative ionosphere disturbance were detected. Among them were the decrease in the F2 layer peak electron density by a factor of 6—7 and in the total electron content below 1000 km height by a factor of 2, uplifting in the ionosphere F2 layer height by about 300 km during the night and by 150—180 km in the daytime, unusual night heating of plasma with increase of ion and electron temperatures by up to 2000 and 3000 K, respectively; decrease of the fractional hydrogen ion density $N(H^+)/N_e$ by a factor of 3.5 due to the emptying of the magnetic flux tube over Kharkiv. During the main storm phase the effects that are usually peculiar to the high latitude ionosphere including coherent echoes were revealed. The results obtained can point to the shift of large-scale structures of the high latitude ionosphere (auroral oval, main ionospheric trough, hot zone etc.) to the latitudes that are closed to the Kharkiv radar latitude.

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, С. А. Пазюра¹, Л. Ф. Черногор²

¹Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков
e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
e-mail: Leonid. F. Chernogor@univer.kharkov.ua

Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение

Надійшла до редакції 05.02.07

Розраховано ефекти термосферних збурень та збурень теплового режиму верхньої атмосфери Землі під час дуже сильної магнітної бури 7—10 листопада 2004 р. Використано результати вимірювань параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння та термосферної моделі NRLMSISE-00. Оцінено ефекти проникнення в середні широти магнітосферних електричних полів. Ефекти іоносферно-термосферних збурень пояснюються процесами високоширотного нагрівання за рахунок підведення енергії сонячного вітру, а також висипання частинок, зсуву високоширотних структур (аврорального овалу, головного іоносферного провалу, гарячої зони та ін.) до широти харківського радару.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть нашего исследования ионосферных процессов во время сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. (см. [6]) посвящена оценке эффектов термосферных возмущений и возмущений теплового режима верхней атмосферы Земли, а также обсуждению основных физических процессов, которые сопровождали эту бурю. Параметры ионосферной плазмы измерялись непосредственно с помощью радара некогерентного рассеяния в Харькове. Были получены температуры электронов T_e и ионов T_i , концентрация электронов N_e , изучен ионный состав внешней ионосферы. На базе измеренных параметров ионосферы с привлечением справочной термосферной модели NRLMSISE-00 рассчитывались параметры нейтральной атмосферы: нейтральный состав, температура нейтралов, высота термпаузы в магнитоспокойных и

возмущенных условиях. Исследовались возмущения теплового режима плазмы: подвода энергии к электронному газу, процессов теплообмена электронов с ионами и нейтрами, плотности теплового потока, переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов, теплового баланса в системе ионосфера — плазмосфера во время магнитной бури. Проанализированы эффекты проникновения в средние широты магнитосферных электрических полей, связанные как с их нестационарными возмущениями, так и с высыпаниями энергичных частиц из магнитосферы. Интерпретируются результаты наблюдений и моделирования ионосферно-термосферных возмущений, вызванных высокоширотным нагреванием за счет поступления энергии солнечного ветра, высыпанием энергичных частиц, смещением высокоширотных структур (аврорального овала, главного ионосферного провала, горячей зоны и др.) к экватору.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ, СОПУТСТВОВАВШИХ БУРЕ

Концентрация нейтралов. Для корректного изучения вариаций концентраций нейтралов в магнитовозмущенных условиях разрабатывались специальные модели [1, 12, 13, 18, 40—42, 49]. Мы ограничимся оценкой «снизу», а именно оценкой возмущения концентраций нейтралов, считая, что и в возмущенных условиях работает модель NRLMSISE-00. Хотя эта модель по замыслу ее авторов должна правильно определять изменение нейтральной атмосферы во время магнитных бурь, однако эффекты в нейтральной атмосфере получаются заниженными. Скорее всего, учет магнитной активности недостаточно полный и последовательный. Такой вывод напрашивается также и при сопоставлении параметров нейтрального состава, полученных из модели NRLMSISE-00 и данных спутника TIMED.

На рис. 1 приведены вариации концентраций $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ основных компонентов нейтральной атмосферы на высоте 300 км в спокойные сутки 29 октября 2004 г. и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. Расчет нейтрально-

го состава выполнен по термосферной модели NRLMSISE-00 [42]. Дополнительно приведен параметр $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который, как известно, в фотохимическом приближении в стационарных условиях определяет соотношение процессов ионообразования и потерь ионов O^+ и концентрацию заряженных частиц. Видно, что состав нейтральной атмосферы во время отрицательной ионосферной бури 8 и 10 ноября изменился. В дневное время около 12^h UT концентрация $N(O)$ на высоте 300 км по сравнению с контрольным днем 29 октября составила 0.9 и 1.3, $N(N_2)$ — 0.9 и 1.8, $N(O_2)$ — 0.9 и 2.7. В результате параметр p увеличился в 1.1 раза 8 ноября и уменьшился в 1.3 раза 10 ноября.

Температура нейтралов и нагрев атмосферы. Температура нейтралов T_n вычислялась из уравнения теплового баланса ионного газа [4, 21, 50] с привлечением модели NRLMSISE-00. При этом полагалось, что в квазистационарных условиях на высотах 250—300 км, где теплопроводностью ионного газа можно пренебречь, скорость нагрева ионов O^+ за счет теплообмена с электронами можно считать равной скорости охлаждения за счет передачи тепла нейтральным частицам. Для этого случая уравнение

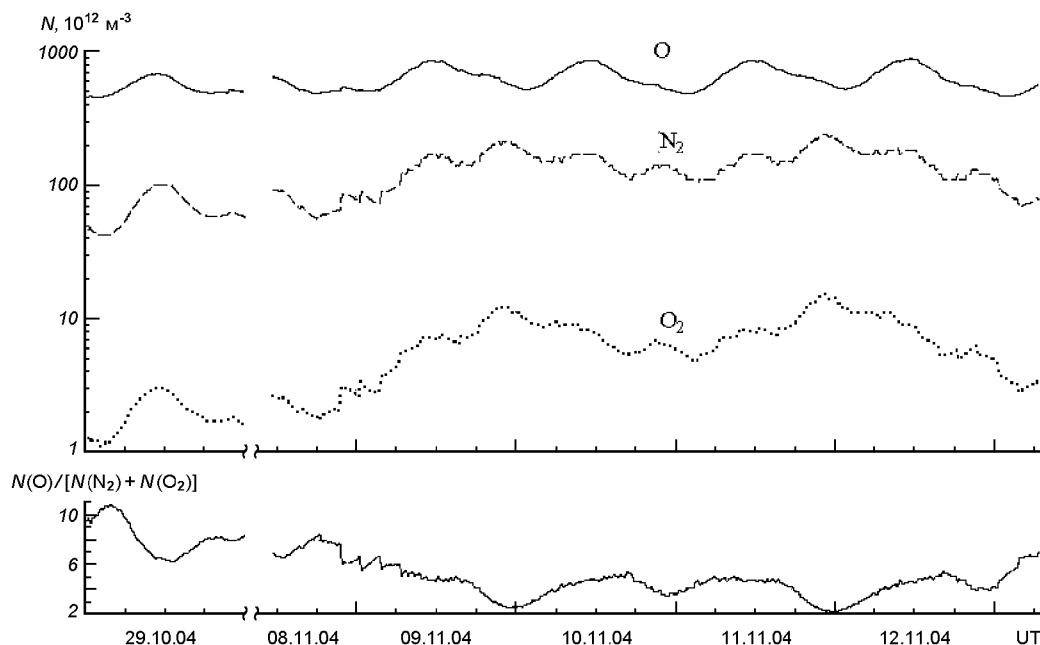


Рис. 1. Изменение концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы и параметра $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ на высоте 300 км на протяжении контрольных суток 29 октября и возмущенного периода 8—13 ноября 2004 г. (расчет по модели NRLMSISE-00 [...http://uap-www.nrl.navy.mil/models_web/msis/NRLMSISE-00.DIST17.TXT])

теплового баланса можно записать в виде [47, 48]

$$T_i - T_n = \frac{4.82 \cdot 10^7 N_e (T_e - T_i) T_e^{-3/2}}{6.6 N(N_2) + 5.8 N(O_2) + 0.2 N(O) (T_i + T_n)^{1/2}}.$$

При расчетах использовались значения параметров ионосферы N_e , T_e , T_i , полученные методом НР. Концентрации нейтральных компонентов определены из модели NRLMSISE-00. Временные вариации T_n в спокойные сутки 29 октября и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. на высотах 250—450 км показаны на рис. 2. Здесь же для сравнения приведены данные T_{nMSIS} , рассчитанные по модели NRLMSISE-00.

Анализ полученных значений T_n и T_{nMSIS} обнаружил следующие особенности.

1. В течение первой и второй магнитных бурь 8 и 10 ноября около полудня температура T_n изменялась почти аналогично температуре ионов T_i , увеличиваясь при этом с увеличением высоты по крайней мере до 400 км. Это свидетельствовало о нагревании и расширении нейтральной атмосферы.

2. В возмущенный день 8 ноября около 12^h UT значения T_n на высотах 250—450 км превышали значения в спокойный день 29 октября на 380, 360, 310, 250, 200 К, а 10 ноября — на 340, 320, 260, 220, 200 К соответственно.

3. В ночные часы, когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F2, T_n и T_i одновременно испытывали аналогичные увеличения (всплески) до значений дневных температур. Например, на высоте 300 км во время таких всплесков значения T_n достигали 1250, 1380, 1280, 1340, 1120 К в последовательные ночи 8—13 ноября. Для сравнения отметим, что в спокойные сутки ночные значения T_n не превышали 700 К (см. рис. 2).

4. Модель NRLMSISE-00 дает в основном заниженные значения T_n в спокойные и возмущенные сутки. Отличия T_n , рассчитанных по данным радара, от модельных значений T_{nMSIS} около 12^h UT составляли примерно –80, 60, 170, 220 и 240 К в спокойный день, 380, 460, 480, 480 и 450 К 8 ноября, 300, 350, 420, 420 и 420 К 10 ноября на высотах 250—450 км.

5. Во время главной фазы первой и второй магнитных бурь высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, увеличилась не менее чем до 400 км, тогда как в спокойных условиях (из модели NRLMSISE-00) она составляла около 350 км.

Подвод энергии к электронам. Нагревание тепловых электронов в дневное время осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \leq 300$ —350 км) из-за малости длин их свободного пробега носит локальный характер. На этих высотах основными механизмами охлаждения электронного газа являются кулоновские соударения с ионами и возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода [23, 50]. Тогда для стационарных условий уравнение баланса энергии электронов в системе СИ имеет вид [23, 30]:

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

где Q — энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода (Q , L_{ei} и L_e — соответствующие значения энергии в единицу времени, отнесенные к единичному объему).

На рис. 3 приведены рассчитанные значения энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, а также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами (L_{ei}/N_e) и нейтрами (L_e/N_e). В расчетах использовались значения T_e , T_i и N_e , полученные методом НР. Параметры T_n и $N(O)$ взяты из модели NRLMSISE-00. Представлены данные, полученные в контрольный день 29 октября и во время ионосферной бури 8—13 ноября 2004 г. на высотах 250, 300 и 350 км. Видно, что в разные даты вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был различным. Например, в спокойный день 29 октября вблизи максимума слоя F2, на высотах 250 км и 300 км, около местного полудня

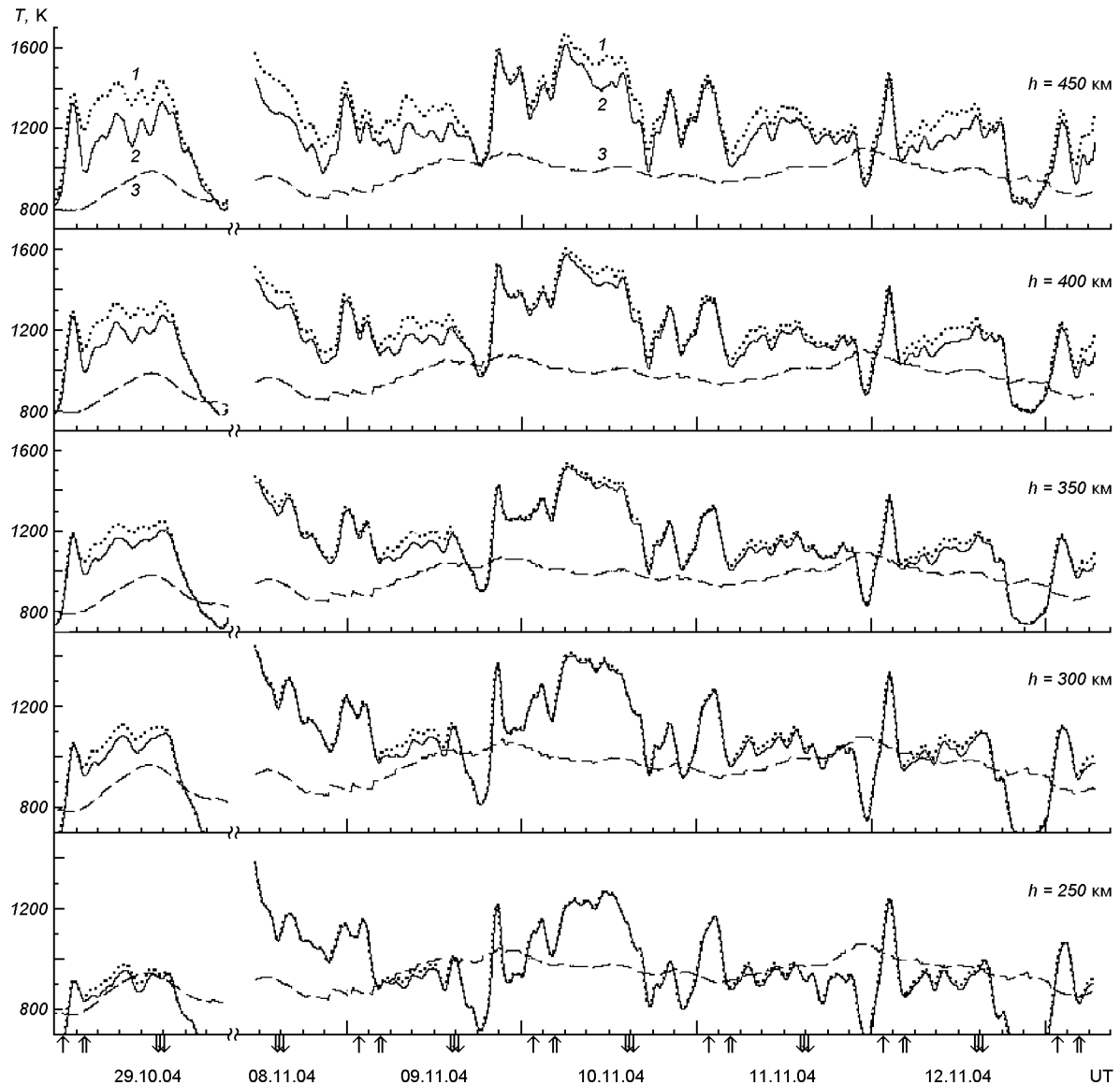


Рис. 2. Временные вариации измеренных температур ионов T_i (точки) и рассчитанных температур нейтралов T_n по данным радара НР (сплошные линии) и T_{nMSIS} по модели NRLMSISE-00 (штриховые линии) в контрольные сутки 29 октября и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г.

($f_0F2 \approx 9$ МГц) вклад двух механизмов охлаждения электронов за счет кулоновских соударений с ионами и неупругого теплообмена с нейтралами сравнялся. С увеличением высоты (на 350 км) стали преобладать потери энергии электронов L_{ei}/N_e в кулоновских соударениях с ионами. В возмущенный день 10 ноября в условиях

сильнейшей депрессии N_e ($f_0F2 \approx 4.0$ МГц вблизи местного полудня) потери L_{ei}/N_e были малы, и вплоть до высоты 350 км преобладали потери в процессе неупругого теплообмена электронов с нейтралами L_e/N_e за счет высокой разности температур $T_e - T_i$ при малых значениях N_e . Аналогичная картина наблюдалась и

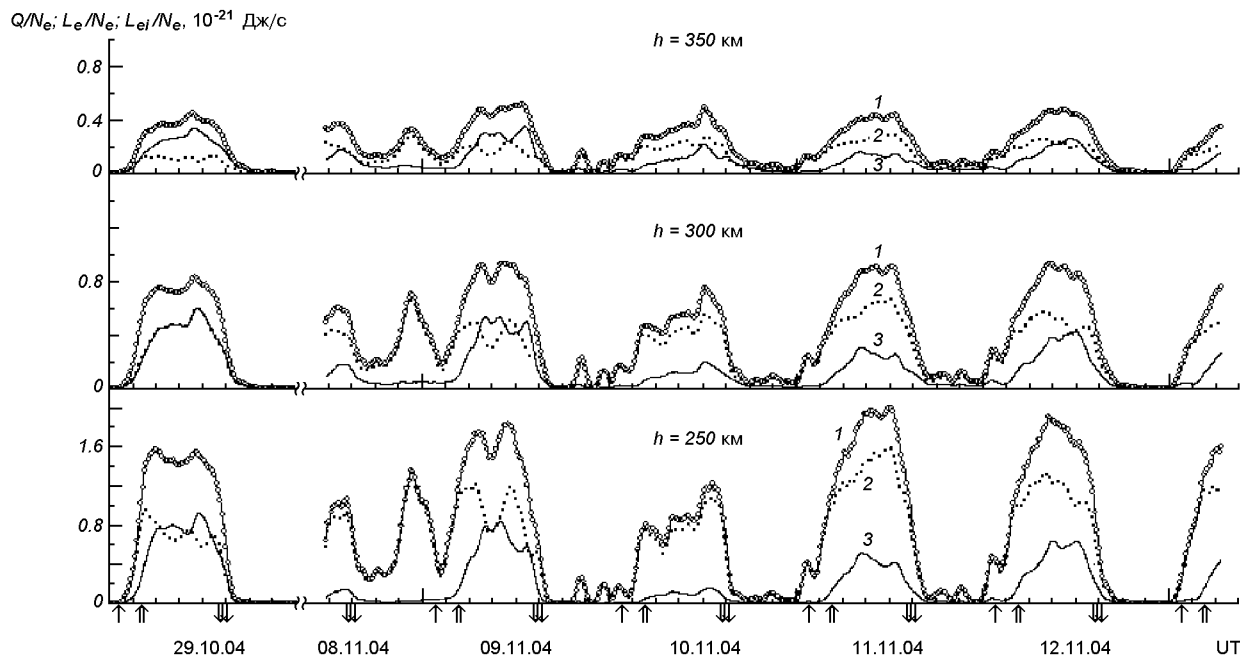


Рис. 3. Временные вариации скоростей нагрева электронного газа Q/N_e (1) и теплообмена электронов с ионами L_{ei}/N_e (3) и атомами кислорода L_e/N_e (2) в контрольные сутки 29 октября и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

8 ноября в условиях такой же глубокой депрессии N_e ($f_oF2 \approx 4.5$ МГц). По мере затухания бури значения N_e увеличивались, и потери L_{ei}/N_e и L_e/N_e сравнялись 12 ноября на высоте 350 км.

В результате, например, вблизи местного полудня на высоте 300 км подвод энергии к электронному газу Q/N_e , который в спокойный день 29 октября составлял около $0.8 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, во время бури 10 ноября 2004 г. уменьшился до $0.65 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, т. е. примерно в 1.2 раза.

Особенностью теплового режима ионосферы стал ночной нагрев электронного газа. Значения Q/N_e вблизи местной полуночи 8/9 ноября и 9/10 ноября в условиях высокой геомагнитной активности ($K_p = 8.0$ и 7.0) составляли на высоте 300 км около $0.8 \cdot 10^{-21}$ и $0.25 \cdot 10^{-21}$ Дж/с соответственно, тогда как в спокойный день $Q/N_e \approx 0$. Увеличения значений Q/N_e в ночные часы коррелировали с ночными всплесками T_e [6, рис. 9]. При этом в процессе охлаждения электронного газа основную роль играло, по-ви-

димому, возбуждение тонкоструктурных уровней атомарного кислорода. Потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами были малы из-за низкой их концентрации.

Потоки тепла, переносимого электронами, как известно, характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. Вертикальный компонент плотности потока тепла равен

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z},$$

где $\kappa_e = 2.08 k^2 N_e T_e / (m \nu_{ei})$ — коэффициент теплопроводности электронного газа, k — постоянная Больцмана, m — масса электрона, $I = 66.4^\circ$ — наклонение геомагнитного поля, ν_{ei} — частота столкновений электронов с ионами. В системе СИ $\nu_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} N_e T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N_e^{-1/3})$ [5].

Рассчитанные значения Π_T в контрольные сутки 29 октября 2004 г. и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. приведены на рис. 4. Редко наблюдаемой в средних широтах особенностью теплового режима ионосферы ста-

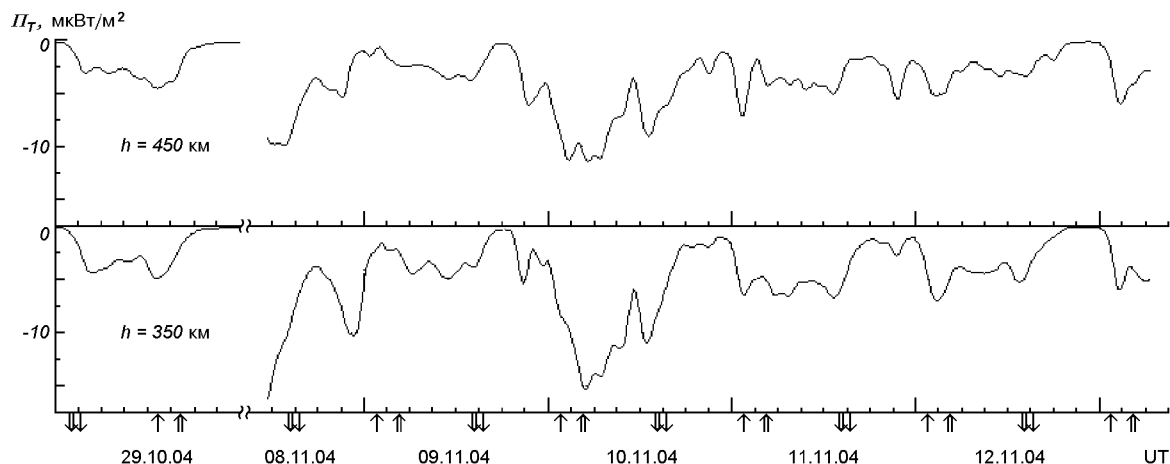


Рис. 4. Временные вариации плотности потока тепла P_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, в контрольные сутки 29 октября и возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

ло высокое значение P_T в ночное время в возмущенные сутки 8—12 ноября 2004 г., особенно вблизи местной полуночи 8/9 и 9/10 ноября при значениях $K_p = 8.0$ и 7.0 , когда значения P_T достигали -10 и -5 мкВт/м² на высоте 350 км в указанные даты соответственно. В последующие две ночи при затихающей буре ($K_p \approx 5$) плотность потока P_T уменьшилась до значений -2 и -2.5 мкВт/м². В спокойный день, а также в ночь 12/13 ноября она была близка к нулю. Максимальные значения P_T наблюдались сразу после главной фазы первой магнитной бури 8 ноября и во время главной фазы второй бури в утренние часы 10 ноября. Они составляли около -15 мкВт/м². Вблизи местного полудня $P_T \approx -3$ и -4 мкВт/м² в контрольный день 29 октября и в слабо возмущенный день 9 ноября. Во время сильного возмущения 10 ноября $P_T = -11.5$ мкВт/м², т. е. в три раза больше, чем в контрольный день.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вариации электронной концентрации NmF2 в максимуме слоя F2. Эффекты отрицательной ионосферной бури, сопровождающей магнитосферные возмущения, достаточно хорошо изучены. Среди ряда факторов, ответственных за

уменьшение электронной концентрации и имеющих различные пространственные и временные масштабы, одним из основных принято считать возмущение нейтрального состава [11, 25, 44]. Нагревание высокоширотной атмосферы во время поступления энергии из магнитосферы вызывает подъем газа вверх и движение его в стороны к более холодным областям. На ионосферных высотах это приводит к уменьшению концентрации атомов O и увеличению концентраций молекулярных компонентов N₂ и O₂. Это вызывает уменьшение параметра p , определяющего соотношение процессов ионообразования и потерь в фотохимическом приближении, и способствует развитию отрицательной бури. Градиенты давления, возникающие при расширении области нагрева, а также изменение картины магнитосферной конвекции и ее воздействие на нейтральные ветры в высоких широтах посредством ион-нейтрального трения (см., например, [27, 28, 33]) вызывают глобальную перестройку термосферной циркуляции. При этом усиливаются ветры, направленные к экватору, которые переносят газ измененного состава в средние и низкие широты. Возмущения нейтрального состава и термосферного ветра могут также передаваться из высоких в средние широты перемещающимися атмосферными возмущениями (ПАВ), когда энергия поступает в виде отдельных импульсов. Это происходит во время интен-

сивных магнитосферных суббурь, которые сопровождаются быстрыми изменениями авроральных токов.

Проанализируем возможности модели NRLMSISE-00 и данных спутника TIMED в оценке вклада возмущенного нейтрального состава в вариации электронной концентрации $NmF2$. Так, уменьшение $NmF2$ во время бури до шести и семи раз днем 8 и 10 ноября, а также до четырех и шести раз ночью 9/10 и 10/11 ноября (см. [6, рис. 3]) невозможно объяснить изменением нейтрального состава и уменьшением параметра p , полученным из модели NRLMSISE-00, поскольку днем 8 ноября этот параметр даже увеличился в 1.1 раза, а 10 ноября он уменьшился в 1.3 раза (см. рис. 1).

На рис. 5 для сравнения приведены вариации параметра $p = N(O)/N(N_2)$ и TEC по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED в спокойные дни 28—30 октября 2004 г. и во время магнитной бури 8—10 ноября 2004 г. Видно, что по сравнению со спокойным днем 29 октября уменьшение параметра p во время главной фазы бурь 8 ноября в 12^h UT и 10 ноября в 11^h40^m UT (время прохождения спутника TIMED над Харьковом) составило 3.5 и 4.2 раза соответственно, тогда как значения $NmF2$ уменьшились в это время в семь и четыре раза (см. [6, рис. 3]). Отсюда следует, что возмущения нейтрального состава вполне могли быть причиной отрицательной фазы второй бури 10 ноября.

В работе [43] показано, что отрицательные возмущения среднеширотной ионосферы в дневное время могли стать результатом расширения области нагрева и возмущенного состава в средние широты за счет меридионального переноса нейтральными ветрами (в виде ПАВ и/или крупномасштабной перестройки термосферной циркуляции), а также за счет зонального переноса из ночного в дневной сектор посредством адвекции.

Однако во время первой бури 8 ноября изменения нейтрального состава только частично могут объяснить уменьшение $NmF2$. Такие случаи отмечались и ранее [24, 46]. Необходимо привлечение дополнительных механизмов для объяснения депрессии N_e . В условиях рассматриваемой бури, по-видимому, мог быть существенным вклад в увеличение скорости потерь ионов

O^+ таких факторов, как нагрев атмосферы, усиление электрических полей, а также колебательное возбуждение молекул N_2 и O_2 [35, 36, 39—41, 49]. Известно, что вклад $N_2(v)$ и $O_2(v)$ может иметь место при значениях $T_e \geq 1500$ —2000 К [3, 23, 41, 50], которые наблюдались в нашем случае [6, рис. 9].

Особенности высотного распределения концентрации электронов в области F2 ионосферы. Можно полагать, что деформация профилей $N_e(h)$ в ночь 9/10 ноября (см. [6, рис. 5 и 6]) с уменьшением $NmF2$ и подъемом слоя F2 служит подтверждением упомянутого выше смещения «зоны возмущенного состава» в средние широты и перестройки термосферной циркуляции, вызванных высокоширотным нагревом термосферы. Вместе с тем есть эффекты, косвенно свидетельствующие о смещении структур высокоширотной ионосферы — главного ионосферного провала и аврорального овала на широту, близкую к широте Харькова во время главной фазы бури (при $K_p = 8.7$). Так, сопоставления НР-профилей $N_e(h)$ с ВЗ-ионограммами показали, что в ночь 9/10 ноября ионосфера средних широт приобретала свойства, характерные для высокоширотной ионосферы. К ним относится, например, увеличение диффузности отраженного сигнала [6, рис. 6]. Оно могло быть связано с рассеянием сигнала на мелкомасштабных ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях, генерируемых вблизи экваториальной границы аврорального овала во время сильной бури и имеющих большой пространственный масштаб (сотни и тысячи километров) [2, 19].

Наклонные когерентные отражения зарегистрированы во время главной фазы второй бури (ночью 9 ноября и в первой половине суток 10 ноября) в интервале дальностей 650—1500 км [6, рис. 8]. По-видимому, эти эхо-сигналы принимались с северного направления боковыми лепестками диаграммы направленности антенны, которые под достаточно малыми углами (5—10°) просвечивали E-область ионосферы. Известно, что отражение происходит на дальностях, где выполняются условия ракурсного рассеяния, и могут быть обусловлены рассеянием на неоднородностях электронной концентрации E-слоя, генерируемых двухпоточковой неустойчивостью ионосферной плазмы (см., например, [2, 14]). В течение бури в ионосфере над

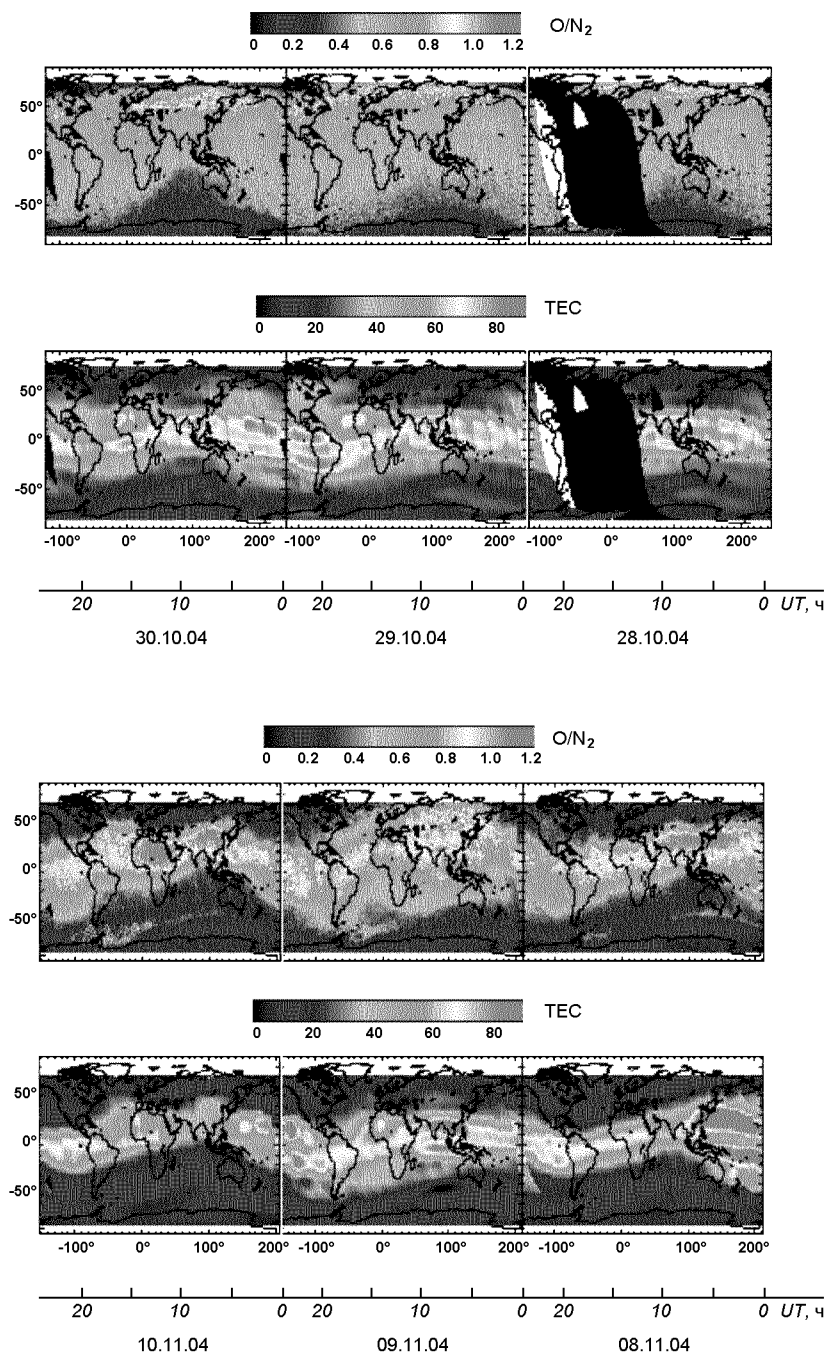


Рис. 5. Вариации отношения концентраций $N(O)/N(N_2)$ и TEC по данным прибора GUVI на борту спутника TIMED в спокойные дни 28—30 октября 2004 г. и во время магнитной бури 8 и 10 ноября 2004 г. Для Харькова данные относятся примерно к 12^h UT 8 ноября и к 11^h40^m UT 10 ноября

радаром напряженность электрических полей, скорее всего, увеличилась. Об этом может свидетельствовать увеличение высоты $hmF2$ (см. далее). Можно полагать, что на 650—1500 км к северу от Харькова (т. е. 6—15° по широте), поля E_y были еще интенсивнее и могли превышать пороговое значение $E_{yth} \approx 20$ мВ/м, необходимое для возникновения двухпоточковых неустойчивостей. Такого типа рассеяния редки для средних широт. Они наблюдались, например в Иркутске и Харькове во время магнитных бурь 25 сентября 1998 г., 15 июля 2000 г., 29/30 мая 2003 г., 9/10 ноября 2004 г. [2, 14—16].

Остановимся на необычном профиле $N_e(h)$, зарегистрированном 10 ноября в 11^h15^m UT. Он искажен из-за когерентных отражений на высотах 700 и 1000 км с мощностью, соизмеримой с мощностью сигнала на высоте максимума слоя F2 [6, рис. 7 и 8]. Кроме того, этому профилю $N_e(h)$ соответствовала ВЗ-ионограмма с рассеянным отражением, характерным для дневной высокоширотной ионосферы. Такие эффекты могут косвенно свидетельствовать о том, что в это время экваториальная граница аврорального овала на 15 мин сместилась на широту Харькова. При этом рассеяние радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях над Харьковом дали диффузный след на ионограмме ВЗ. Область турбулизации плазмы, вероятно, простиралась по широте к северу от радара, по крайней мере на расстояние 700—1000 км, где выполнялись условия для ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях E-слоя. Быстрый характер процесса мог быть связан с изрезанностью и/или быстрой изменчивостью авроральной зоны за счет нестационарности магнитосферной конвекции. Важно отметить, что столь редкое дневное событие наблюдалось, когда индекс D_{st} , характеризующий интенсивность магнитосферного кольцевого тока, имел экстремальное значение –289 нТл. Известно, что кольцевой ток вносит существенный вклад в изменение экваториальной границы аврорального овала [19].

Вероятность смещения высокоширотных структур (аврорального овала, главного ионосферного провала) на широту радара во время бури была высокой. Об этом могут косвенно свидетельствовать максимальные значения уровня авроральной активности (POES Auroral Activity Level), равные 10, которые были зарегистрированы

на спутнике NOAA POES примерно с 18^h30^m UT 7 ноября до 12^h49^m UT 8 ноября почти непрерывно, а также с 10^h44^m 44 UT 9 ноября до 17^h30^m UT 10 ноября с кратковременными уменьшениями индекса до значений 9 и еще реже 8 [[http:// solar.sec.noaa.gov/Aurora/index.html](http://solar.sec.noaa.gov/Aurora/index.html)]. Значение этого параметра, характеризующего мощность энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу аврорального овала, свидетельствовало о возможном смещении экваториальной границы овала до геомагнитных широт $\Phi \approx 51...45^\circ$. Вероятность такого смещения значительно увеличивается, если учесть особенности классификации значений индекса POES Auroral Activity Level. Так, значение 9 соответствует мощности авроральных частиц 96 ГВт, индекс 10 — более 100 ГВт, а во время рассматриваемой бури мощность зачастую существенно превышала 100 ГВт. Например, 9 ноября в 19^h28^m UT и 21^h10^m UT эта мощность составляла 399 и 172 ГВт, а 10 ноября в 02^h20^m, 03^h31^m, 06^h57^m, 08^h39^m и 09^h10^m UT она имела значения 278, 461, 468, 419 и 644 ГВт соответственно. Отсюда можно предположить, что овал мог приблизиться к месту расположения харьковского радара ($\Phi = 45.7^\circ$), когда последний находился в ночном и утреннем секторах. Смещение к экватору главного ионосферного провала во время магнитной бури отмечалось неоднократно, например на радаре в Миллстоун Хилл ($L = 3.3$) [24, 26]. В Харькове ($L \approx 1.9$) подобное явление наблюдалось во время магнитных бурь 25 сентября 1998 г. и 29/30 мая 2003 г. [7, 8, 10, 17, 29, 37, 38].

Следует отметить также, что полярное сияние над Харьковом наблюдалось и было запечатлено фотографически во время сильнейшей магнитной бури в ночь 30/31 октября 2003 г. при значениях $K_p = 9.0...8.3$ [20].

Вариации высоты $hmF2$ максимума слоя F2. Увеличение высоты $hmF2$ составляло 50—80 км днем 8 ноября после главной фазы первой бури, достигло 300 км ночью 9—10 ноября во время главной фазы второй бури и 150—180 км в полдень 10 ноября [6, рис. 3]) и объясняется совместным воздействием ряда факторов. Среди них эффекты расширения термосферы, а также увеличения меридиональной скорости термосферного ветра, направленной к экватору. Наряду с этим существенный вклад может вносить

также проникновение магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (в течение нескольких суток) высыпания энергичных частиц, зарегистрированных на спутниках GOES-8 и GOES-12. Высыпания частиц ведут к повышению проводимости ниже лежащей авроральной ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации, и способствуют проникновению магнитосферных электрических полей в средние широты [3, 34]. Исходя из увеличения $hmF2$, можно полагать, что зональная составляющая электрического поля E_y над Харьковом была направлена на восток. Оценка сверху E_y по величине изменения $hmF2$ [3] дала максимальные значения напряженности проникающих в ионосферу над Харьковом полей 12—45 мВ/м днем и 50 мВ/м ночью. Такие значения E_y свойственны высокоширотной ионосфере.

На фоне продолжительного подъема слоя F2 зарегистрированы также быстрые вариации величины $hmF2$. Например, 9 ноября около 16^h UT она резко уменьшилась примерно на 60 км, за ней с запаздыванием около 40 мин начала уменьшаться концентрация $NmF2$. Можно предположить, что произошло переключение поля с восточного направления на западное со значением $E_y \approx -15$ мВ/м (оценка E_y получена по величине изменения $hmF2$ [3]). Такие события могут свидетельствовать о проникновении импульса электрического поля в ионосферу над Харьковом в результате нестационарных возмущений магнитосферных электрических полей [26, 31, 32]. Причиной таких возмущений могла быть высокая суббуревая активность (при значениях индекса $AE \approx 1500$ —1700 нТл в авроральной области), вызванная внезапными изменениями динамического давления солнечного ветра и составляющей B_z межпланетного магнитного поля. Случаи быстрых «переключений» восточно-западного направления электрического поля, которые связаны с изменениями электродинамической обстановки во время магнитосферной суббури, с нестационарностью магнитосферной конвекции и т. д., рассмотрены, например, в работе [45]. Аналогичные эффекты наблюдались также в Харькове во время магнитных бурь 20/21 марта и 29/30 мая 2003 г. [9, 10].

Особенности вариаций T_e и T_i . К ним относится необычный ночной нагрев плазмы, кото-

рый был зарегистрирован не только во время главной фазы бури, но вплоть до конца измерений, когда магнитное поле было все еще возмущено (индекс $D_{st} \leq -65$ нТл). Совпадение во времени периодов депрессии $NmF2$ и ночного нагрева плазмы (см. [6, рис. 3 и 9]), которое нередко отмечалось в течение активного периода бури (в ночь 8/9 и 9/10 ноября), можно рассматривать как косвенное подтверждение эффекта смещения главного ионосферного провала на широту радара и горячей зоны вместе с плазмопаузой вплоть до геомагнитной оболочки радара $L = 1.9$. В Харькове аналогичный эффект наблюдался, например, во время магнитной бури 29/30 мая 2003 г. при $A_p = 89$ и $K_p = 8.3$ [10].

Вариации ионного состава. Зарегистрированные уменьшения («провалы») в 1.5—3.5 раза величины $N(H^+)/N_e$, например на высоте 1100 км, которые наблюдались ночью 8/9 и 9/10 ноября [6, рис. 11], по-видимому, можно объяснить все теми же эффектами смещения главного ионосферного провала, провала легких ионов и опустошения магнитной силовой трубки над Харьковом. Нестационарность магнитосферной конвекции и неравномерность высыпания заряженных частиц усложняют картину распределения плазмы в субавроральной ионосфере, делают ее нерегулярной, изрезанной, вызывают расслоения главного ионосферного провала. Это находит отражение в окрестности провала легких ионов в виде пиков, провалов относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$. Так, вблизи полуночи 9/10 ноября концентрации $N(H^+)/N_e$ на высоте 900 км уменьшились от значения 0.7 в спокойный день до 0.2, т. е. в 3.5 раза, а высота h_i перехода от ионов O^+ к ионам H^+ увеличилась от 650 до 1450 км, что характерно для условий магнитных возмущений [22].

Вариации TEC, полученные из данных радара и спутника GUVI TIMED, имеют хорошее согласие в спокойные и возмущенные дни [6, рис. 4 и 10].

Выводы

С привлечением наблюдательных данных радара НР проведены исследования ионосферных возмущений во время сильнейшей магнитной бури, которая состояла из двух последовательных маг-

нитных возмущений 7/8 и 9/10 ноября 2004 г. со значениями индексов: $A_p = 189$ и 181 , $D_{stmin} = -373$ и -289 нТл, $K_{pmax} = 8.7$ и 8.7 . Буря была связана с высокой всплывшей активностью Солнца, необычной для фазы перехода к минимуму 23-го цикла.

Результаты исследований сводятся к следующему.

1. Одной из причин редко наблюдаемого в средних широтах очень сильного отрицательного ионосферного возмущения (уменьшение концентрации электронов $NmF2$ в максимуме области F2 ионосферы до 6—7 раз на фоне высокой геомагнитной активности; необычный ночной нагрев плазмы до дневных значений температур ионов и электронов около 2000 и 3000 К соответственно) могла быть деформация магнитосферы, сопровождаемая смещением главного ионосферного провала на широту харьковского радара, и горячей зоны вместе с плазмопаузой вплоть до геомагнитной оболочки радара $L = 1.9$.

2. Уменьшение концентрации электронов $NmF2$ в дневное время до 6—7 раз в активные периоды бури обусловлено расширением области нагрева и зоны возмущенного состава из высоких в средние широты в результате меридионального переноса нейтральными ветрами (в виде ПАВ и/или крупномасштабной перестройки термосферной циркуляции), а также зональным переносом из ночного сектора вплоть до дневного сектора посредством адвекции. Такие события регистрируются во время сильных магнитных бурь.

3. Дневные значения отношения концентраций $N(O)/N(N_2)$, полученные с помощью прибора GUVI на спутнике TIMED, показали, что возмущение нейтрального состава полностью объясняет уменьшение $NmF2$ в четыре раза 10 ноября, однако для полного объяснения уменьшения $NmF2$ в семь раз 8 ноября необходимо привлечение дополнительных факторов (например колебательного возбуждения молекул N_2 и O_2 при $T_e \geq 1500$ —2000 К).

4. Совместный анализ высотных профилей концентрации электронов $N_e(h)$, полученных из данных НР, и ионограмм вертикального зондирования показал увеличение диффузности отраженного сигнала на фоне значительной деформации профилей $N_e(h)$. Скорее всего, оно обусловлено рассеянием сигнала на мелкомасштаб-

ных неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля и генерируемых вблизи экваториальной границы аврорального овала во время сильной магнитной бури, а также смещением этой границы к экватору, причем область турбулизации плазмы может простирается вплоть до широты харьковского радара.

5. Обнаруженное увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя F2 в активные периоды бури примерно на 300 км ночью и на 150—180 км в дневное время объясняются эффектами расширения термосферы, усилением меридиональной скорости термосферного ветра и смещением к экватору главного ионосферного провала, а также проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (в течение нескольких суток) выпадения энергичных частиц, зарегистрированного на спутниках GOES-8 и GOES-12. Оценка сверху зонального компонента электрического поля по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения напряженности проникающих в ионосферу над Харьковом полей $E_y \approx 12$ —45 мВ/м днем и 50 мВ/м ночью. Такие значения E_y свойственны высокоширотной ионосфере.

6. Зарегистрированные внезапные возмущения высоты $hmF2$ на фоне общего подъема слоя F2 во время бури, за которыми с запаздыванием около 40 мин следовали изменения концентрации $NmF2$, обусловлены, скорее всего, проникновением импульса электрического поля в ионосферу над Харьковом в результате нестационарных возмущений магнитосферных электрических полей. Причиной таких возмущений могла быть высокая суббуревая активность, вызванная резкими изменениями динамического давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

7. Обнаруженные среднеширотные когерентные отражения (эхо) в интервале дальностей 650—1500 км во время главной фазы второй магнитной бури свидетельствовали о превышении напряженности электрических полей магнитосферного происхождения порогового значения $E_{yth} \approx 20$ мВ/м, необходимого для возникновения токовых двухпоточковых неустойчивостей, поскольку когерентные отражения обусловлены рассеянием сигнала на неоднородностях электронной концентрации E-слоя, генерируемых указанной неустойчивостью. Зарегистрировано

редкое событие, когда во время максимума главной фазы бури (при $D_{st} = -289$ нТл и $K_p = 8.3$) когерентные отражения наблюдались днем.

8. Расчеты показали, что и для обсуждаемой бури значения полного электронного содержания I в ионосферном столбе единичного сечения коррелировали в основном с вариациями электронной концентрации в максимуме области F2. Во время главной фазы первой и второй магнитных бурь значения I уменьшились по сравнению с контрольными сутками примерно в два раза около местного полудня, и в 2.5 раза — вблизи полночи.

9. Зарегистрированные во время главной фазы бури уменьшения («провалы») значений относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах в 1.5—3.5 раза по сравнению с контрольным днем свидетельствовали об опустошении магнитной силовой трубки, проходящей над Харьковом, связанном, скорее всего, с деформацией магнитосферы, смещением главного ионосферного провала и провала легких ионов в средние широты. Изрезанность суточных вариаций $N(H^+)/N_e$ могла быть вызвана нестационарностью магнитосферной конвекции и нерегулярностью выпадения заряженных частиц, которые усложняли картину распределения плазмы в субавроральной ионосфере.

10. На основе расчетов с привлечением термосферной модели NRLMSISE-00 показано, что во время бури температура нейтрального газа на высоте 300 км увеличилась вблизи полудня на 300 К, а высота термпаузы — не менее чем до 400 км, в спокойных условиях она составляла около 350 км.

11. Подвод энергии к электронному газу вблизи местного полудня на высоте 300 км в возмущенный день 10 ноября 2004 г. уменьшился в 1.3—1.5 раза по сравнению со спокойным днем. Это привело к росту плотности потока тепла P_T , переносимого электронами из плазмосферы, в среднем в три раза. Особенностью теплового режима ионосферы стал значительный нагрев электронов и увеличение значений P_T в ночное время в возмущенные сутки 8—12 ноября 2004 г., тогда как в спокойных условиях их значения близки к нулю.

12. Наиболее интересным результатом проведенных исследований является то, что во время

сильнейшей магнитной бури 7—10 ноября 2004 г. крупномасштабные образования высокоширотной ионосферы (авроральный овал, ионосферный провал и др.) и связанные с ними неоднородности ионосферной плазмы могли смещаться к экватору до широты Харькова.

1. Аннакулиев С. К., Деминов М. Г., Шубин В. Н. Полуэмперическая модель бури в ионосфере средних широт // Солнечно-земная физика.—2005.—Вып. 8.—С. 145—146.
2. Афраймович Э. Л., Косоголов Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2002.—42, № 4.—С. 491—498.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.
4. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИ-ЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6—30.
5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.
6. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокоsmической бури 7—10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 62—76.
7. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
8. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57—94.
9. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2005.—45, № 6.—С. 789—802.
10. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И. и др. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 года // Геомагнетизм и аэрномия.—2005.—45, № 6.—С. 803—823.
11. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
12. Жеребцов Г. А., Пирог О. М., Полех Н. М. и др. Реакция ионосферы на большую геомагнитную бурю: наблюдение и моделирование // Геомагнетизм и аэрномия.—2005.—45, № 5.—С. 642—651.
13. Карпов И. В., Бессараб Ф. С. Моделирование отклика параметров термосферы на геомагнитную активность // Геомагнетизм и аэрномия.—2004.—44, № 3.—С. 394—401.
14. Куркин В. И., Пирог О. М., Полех Н. М. и др.

- Комплексные исследования ионосферных эффектов геомагнитных бурь в северо-восточном регионе России // Тр. XX Всерос. конф. по распространению радиоволн; Нижний Новгород, 2—4 июля 2002 г. — Нижний Новгород, 2002.—С. 62—63.
15. Лысенко В. Н., Черняк Ю. В. Особенности методики определения параметров ионосферной плазмы во время естественных возмущений в ионосфере // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 110—113.
 16. Лысенко В. Н., Черняк Ю. В. Определение параметров ионосферы при изменениях космической погоды // Радиофизика и электроника.—2006.—11, № 3.—С. 409—414.
 17. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
 18. Тащилин А. В., Романова Е. Б. Моделирование отклика ионосферы на геомагнитную бурю 22 марта 1979 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 2.—С. 224—226.
 19. Урядов В. Н., Куркин В. И., Вертоградов Г. Г. и др. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика.—2004.—67, № 12.—С. 1041—1056.
 20. Черногор Л. Ф. Нелинейная радиофизика. — Харьков: Харьков. нац. ун-т им. В. Н. Каразина, 2004.
 21. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1969.—С. 292—352.
 22. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. Calculated daily variations of O^+ and H^+ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results // J. Atmos. and Terr. Phys.—1979.—41.—P. 471—482.
 23. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577—584.
 24. Buonsanto M. J. Millstone Hill incoherent scatter F region observations during the disturbances of June 1991 // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A4.—P. 5743—5755.
 25. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci. Revs.—1999.—88.—P. 563—601.
 26. Buonsanto M. J., Gonzalez S. A., Pi X., et al. Radar Chain Study of the May, 1995 Storm // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 233—248.
 27. Burns A. G., Killeen T. L., Deng W., et al. Geomagnetic storm effects in the low- to middle-latitude upper thermosphere // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A8.—P. 14673—14691.
 28. Burns A. G., Killeen T. L., Roble R. G. A theoretical study of thermospheric composition perturbations during an impulsive geomagnetic storm // J. Geophys. Res.—1991.—96, N A8.—P. 14153—14167.
 29. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science: Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17—24 August 2002. — Maastricht, 2002.— P. 2280.
 30. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // Planet. Space Sci.—1968.—16.—P. 125—132.
 31. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.367—26.372.
 32. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.359—26.366.
 33. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffet R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A3.—P. 3.893—3.914.
 34. Gonzales C. A., Kelley M. C., Behnke R. A., et al. On the Latitudinal Variations of the Ionospheric Electric Field During Magnetospheric Disturbances // J. Geophys. Res.—1983.—88, N A11.—P. 9135—9144.
 35. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime Thermosphere Above Millstone Hill During Severe Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17.275—17.282.
 36. Mikhailov A. V., Förster M. Some F2-layer effects during the January 6—11, 1997 CEDAR Storm Period as Observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Facility // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 249—261.
 37. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // EOS Trans. AGU. 81 N 48. Fall Meeting. F 947. San Francisco. USA. 2000.
 38. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998 // EOS Trans. AGU. 82 N. 20. Spring Meeting. S 291. San Francisco. USA. May 15. 2001.
 39. Pavlov A. V. The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the ionosphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 6—12 April 1990 // Ann. geophys.—1998.—16.—P. 589—601.
 40. Pavlov A. V., Buonsanto M. J. Using steady-state vibrational temperatures to model effects of N_2^* on calculations of electron densities // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 26941—26945.
 41. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5—11 June 1991 storm // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 263—279.
 42. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res.—2002.—107, N 12.—P. 1468—1483.
 43. Prölss G. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 1—9.
 44. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms // Handbook of Atmospheric Electrodynamics / Ed. H. Volland. — Boca Raton, Fla. CRC Press, 1995.—P. 195—248.
 45. Reddy C. A., Nishida A. Magnetospheric Substorms and Nighttime Height Changes of the F2 Region at Middle and

- Low Latitudes // J. Geophys. Res.—1992.—97, N A3.—P. 3039—3061.
46. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurement // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A12.—P. 23.359—23.365.
 47. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // Space Res.—1973.—13.—P. 267—286.
 48. Salah J. E., Evans J. V., Alcayde D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin // Ann. geophys.—1976.—32, N 3.—P. 257—266.
 49. Schlesier A. C., Buonsanto M. J. The Millstone Hill Ionospheric Model and its Application to the May 26—27, 1990, Ionospheric Storm // J. Geophys. Res.—1999.—104, N A10.—P. 22.453—22.468.
 50. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // Rev. Geophys. and Space Phys.—1978.—16, N 3.—P. 355—399.

IONOSPHERIC PROCESSES DURING THE 7—10 NOVEMBER 2004 EXTREME GEOSPACE STORM.

2. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Ye. I. Grigorenko, S. A. Pazura, L. F. Chernogor

The simulation results of the effects of the thermosphere and the Earth's upper atmosphere heat regime disturbances during the extreme magnetic storm on 7—10 November 2004 are presented. The measurement results of the ionosphere parameters with the incoherent scatter technique and thermospheric model NRLMSISE-00 are used. The effects of the magnetospheric electric field penetration to the midlatitudes are estimated. The ionosphere-thermosphere disturbance effects are explained by the processes of high latitude heating due to the solar wind energy input, as well as particle precipitation, shift of the high latitude structures (auroral oval, midlatitude trough, hot zone etc.) to the latitudes that are closed to the Kharkiv radar latitude.

НАШІ АВТОРИ

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

Напрямок науки — геофізичне приладобудування.

ГРИГОРЕНКО Олена Іванівна — завідувач сектору обробки та геофізичного аналізу даних Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — морфологія і динаміка середньоприродної іоносфери, іоносферно-плазмосферна взаємодія, іоносферні ефекти гео-космічних бур.

ДИБСЬКА Ірина Юріївна — доцент кафедри систем управління літальними апаратами та комплексами Національного аерокосмічного університету ім. Н. Є. Жуковського (ХАІ), кандидат технічних наук.

Напрямок науки — цифрові системи управління.

ДУДКІН Федір Львович — старший науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — дослідження електромагнітних полів.

ЄМЕЛЬЯНОВ Л. Я. — співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — фізика іоносфери, сонячно-земні зв'язки.

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

Напрямок науки — астрофізика, фізика сонячно-земних зв'язків, навколоземний космічний простір.

КОЗЛОВА Анна Олександрівна — аспірантка Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — дослідження біологічного різноманіття з використанням аерокосмічної інформації і геоінформаційних технологій.

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

Напрямок науки — дослідження електромагнітних полів у провідних середовищах.

КОРТУНОВ В'ячеслав Іванович — старший науковий співробітник, професор кафедри прийому, передачі і обробки сигналів Національного аерокосмічного університету ім. Н. Є. Жуковського (ХАІ), доктор технічних наук.

Напрямок науки — методи робастного управління і спостереження в задачах корекції безплатформних інерціальних систем, високоточної гіростабілізації оптично-електронних систем, методи адаптивного управління безпілотними літальними апаратами.

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

Напрямок науки — інформатика.

ЛИЗУНОВ Георгій В'ячеславович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.
Напрямок науки — фізика плазми, навколоземний космічний простір.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — головний конструктор і начальник конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля (м. Дніпропетровськ), кандидат технічних наук, Лауреат Державної премії України.
Напрямок науки — космічна електроніка та телеметрія.

МАСЛОВ Володимир Петрович — старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України, заступник директора Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки з наукової роботи, кандидат технічних наук, доцент, Заслужений винахідник України.
Напрямок науки — забезпечення надійності та працездатності оптико-електронних приладів фізико-технологічними методами.

ОВСЯНИКОВ Віктор Володимирович — професор кафедри електронних засобів телекомунікацій Дніпропетровського національного університету, доктор технічних наук.
Напрямок науки — антено-фідерні пристрої та засоби мікрохвильової техніки.

ОЛЬШЕВСЬКИЙ Олександр Лаврентійович — начальник відділу антено-фідерних та НВЧ-пристроїв конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, м. Дніпропетровськ.
Напрямок науки — антено-фідерні пристрої та засоби мікрохвильової техніки.

ПАЗЮРА Сергій Олександрович — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.
Напрямок науки — фізика іоносфери, сонячно-земні зв'язки.

ПОПЕЛЬ Анатолій Михайлович — заступник головного конструктора і начальника конструкторського бюро космічних апаратів і систем Державного конструкторського бюро «Південне».
Напрямок науки — конструювання космічних апаратів.

ПОПЕЛЬ Валерій Михайлович — заступник начальника відділу антено-фідерних та НВЧ-пристроїв конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, м. Дніпропетровськ.
Напрямок науки — антено-фідерні пристрої та засоби мікрохвильової техніки.

ПРОСКУРА Галина Анатоліївна — аспірант кафедри прийому, передачі і обробки сигналів Національного аерокосмічного університету ім. Н. Є. Жуковського (ХАІ).
Напрямок науки — оцінювання помилок інерціальних систем по зовнішнім вимірюванням; корекція безплатформних інерціальних навігаційних систем.

СТАНКЕВИЧ Сергій Арсенійович — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, доцент.
Напрямок науки — оцінка інформативності оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі, цифрова обробка та інтерпретація матеріалів аерокосмічного моніторингу.

ТОМАС ТРАЧСЕЛ — аспірант Швейцарського технологічного інституту.

Напрямок науки — вбудовані мікроконтролерні операційні системи і надійність таких систем.

УСЕНКО Павло Олександрович — інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України.

Напрямок науки — інформатика.

ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика 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.

Напрямок науки — матеріалознавство, космічні дослідження.

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.

Напрямок науки — космічна радіофізика, фізика та екологія геокосмосу, космічна погода.

Місяць: від зонда до полігона. Проект російської програми досліджень Місяця

(за матеріалами журналу «Новости космонавтики», 2007, № 3)

Спеціалісти НПО ім. С. О. Лавочкина спільно з Російською академією наук підготували проект програми досліджень Місяця за допомогою автоматичних станцій. Реалізація основних етапів програми розрахована на період з 2009 по 2015 рр. Участь космонавтів поки що не передбачається. Першим після тривалої перерви великомасштабним проектом з дослідження Місяця повинен стати проект «Луна-Глоб», запуск по якому планується на 2012 р. Метою цього проекту є дослідження Місяця за допомогою орбітального автоматичного наукового комплексу з апаратурою дистанційного зондування поверхні, а також спускного апарата. В рамках проекту «Луна-Глоб» для проведення досліджень з орбіти штучного супутника Місяця буде використовуватись така апаратура: оптико-електронний комплекс, спектрометричний комплекс, радіофізичний комплекс дистанційного зондування ґрунту Місяця і радіохвильовий детектор. В рамках посадочної експедиції планується виконати такі дослідження на поверхні Місяця: низку сейсмічних експериментів, визначення механічних і міцнісних характеристик місячного реголіту, визначення вмісту основних породотворних хімічних елементів в поверхневому шарі реголіту та наявності води в породі тощо.

За новою програмою передбачається виконання чотирьох етапів дослідження Місяця.

Перший етап. Дослідження внутрішньої будови Місяця і розвідка запасів корисних копалин (в тому числі води) з допомогою дистанційного зондування з селеноцентричної орбіти і на поверхні. Першу частину завдання буде виконувати орбітальний апарат станції, на якому після

відділення посадочного КА (на висоті близько 300 км на поверхню Місяця) будуть розгорнуті антени радіофізичного комплексу дистанційного зондування і радіохвильового детектора. Майже біля поверхні від посадочного апарата відділиться автоматична станція, яка після посадки на Місяць випустить антени і розгорне виносну штангу з науковими інструментами.

Другий етап. Контактні дослідження на поверхні з допомогою мобільної лабораторії — місяцехода. На місячну поверхню буде відправлений мобільний науковий комплекс. Ровер буде оснащений маніпулятором для більш детального вивчення і транспортування окремих зразків місячного ґрунту. Для зв'язку з Землею буде застосована поворотна гостроспрямована антена.

Третій етап. Доставка на Землю зразків місячного ґрунту з району, який є найцікавішим з наукового погляду. Лабораторне вивчення цих зразків дозволить дати відповідь на численні наукові і технологічні запитання, такі як походження Сонячної системи і вміст в поверхневому шарі корисних копалин, придатних для переробки безпосередньо на поверхні Місяця.

Космічний комплекс «Луна-Ґрунт» буде складатись з таких елементів: рушійної установки виведення (аналогічній тим, що використовувались на попередніх етапах), орбітально-посадкового апарата і злітної ракети.

Четвертий етап (наймасштабніший і найамбітніший). Створення на поверхні Місяця автоматичного науково-дослідницького полігона для відпрацювання принципів методик переробки місячного ґрунту, доставки отриманих зразків і

матеріалів на Землю, а також виконання широкого спектру наукових і технологічних досліджень.

У складі цього полігона передбачаються такі компоненти:

- стаціонарні службові модулі на базі уніфікованої посадкової платформи, які будуть забезпечувати функціонування полігона;

- мобільні службові і технологічні модулі. Ці місяцеходи будуть виконувати різноманітні підсобні завдання, починаючи від ремонтних робіт і закінчуючи монтажем обладнання;

- стаціонарна багатофункціональна наукова станція на базі уніфікованої посадкової платформи;

- стаціонарний астрофізичний комплекс;

- дослідницький місяцехід з великим радіусом дії;

- транспортний комплекс для доставки матеріалів на Землю (на базі технічних засобів проекту «Луна-Грунт»).

Полігон планується розділити на чотири функціональні зони: наукову, технологічну, службову та злітно-посадкову.

У перспективі НПО ім. С. О. Лавочкина має намір нарощувати полігон, в тому числі і за рахунок міжнародного співробітництва. Можливості автоматичного науково-дослідницького Місячного комплексу повинні дозволити розв'язати багато актуальних завдань фундаментальної і прикладної науки. Результати, отримані в процесі функціонування полігона, можуть бути використані при розгортанні в майбутньому населеної Місячної бази.

В. С. Кислюк

Є. Кордюм, Д. Чепмен «Рослини в космосі»

(Київ: Академперіодика, 2007.—216 с.)

16 травня 2007 р. в рамках фестивалю науки в будинку вчених Національної академії наук України відбулась презентація книги «Рослини в космосі». Це науково-довідкове видання, присвячене 10-річчю Спільного Українсько-Американського експерименту (СУАЕ), проведеного за участю першого космонавта незалежної України Леоніда Каденюка на борту космічного корабля Колумбія під час 87-ї місії (19 листопада — 5 грудня 1997 р.). Видання базується на офіційних документах, матеріалах робочих нарад та публікацій в Наукових записках, які систематично публікувалися протягом 1996—1998 рр.

Численні фотографії (вони займають в книзі 55 сторінок) демонструють об'єкти СУАЕ на орбіті та в наземному контролі, його учасників в Космічному центрі ім. Кеннеді та в Києві під час роботи і відпочинку. На презентації виступили один з авторів книги, науковий керівник експерименту СУАЕ член-кореспондент НАН України Є. Л. Кордюм та льотчик-космонавт України Леонід Каденюк, які детально ознайомили присутніх з виконанням експерименту.

Книга написана українською та англійською мовами.