

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 знизу (метеорологічні,

Таблиця 1. Учасники проекту «Варіант»

Країна	Організація	Внесок у проект
Україна	Львівський центр інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ (ЛЦ ІКД) 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 борту «Січ-1М», приймання телеметричної інформації.
Росія	Інститут космічних досліджень Російської академії наук (ИКИ РАН)	Хвильові зонди WZ, циліндри Фарадея FC
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 плазмових 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 плазмових 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 рівняннями 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: щілинний 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». Смуга 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

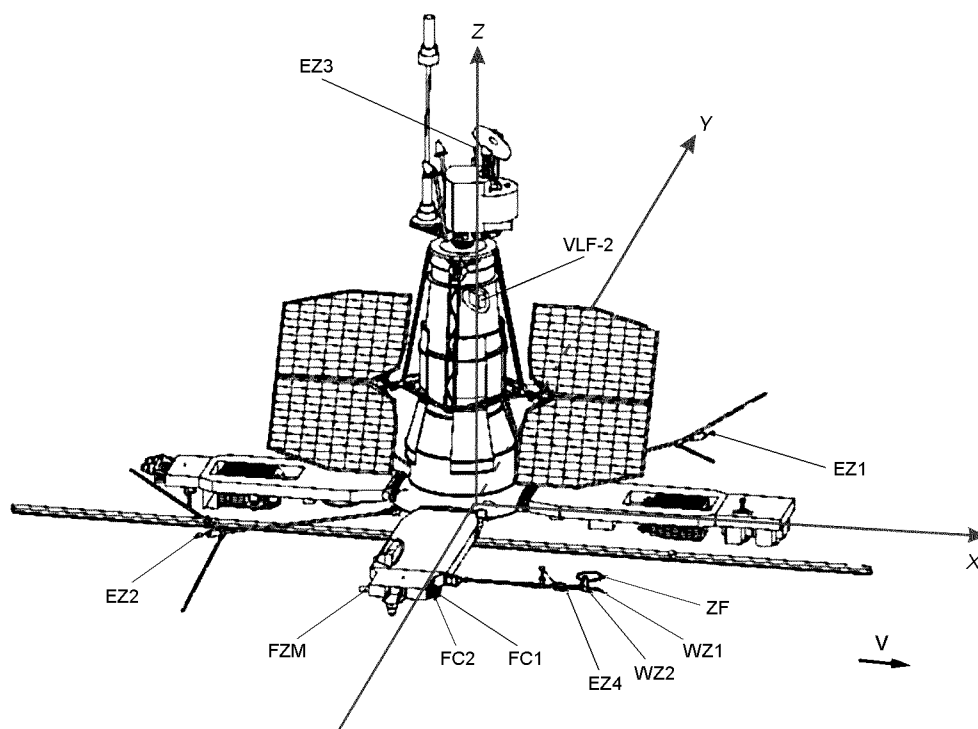


Рис. 1. Система координат супутника «Січ-1М» та розташування приладів проекту «Варіант»

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 плазмових 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 постраждала 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 політних 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	Дунайвіці (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», обгрунтовано 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-

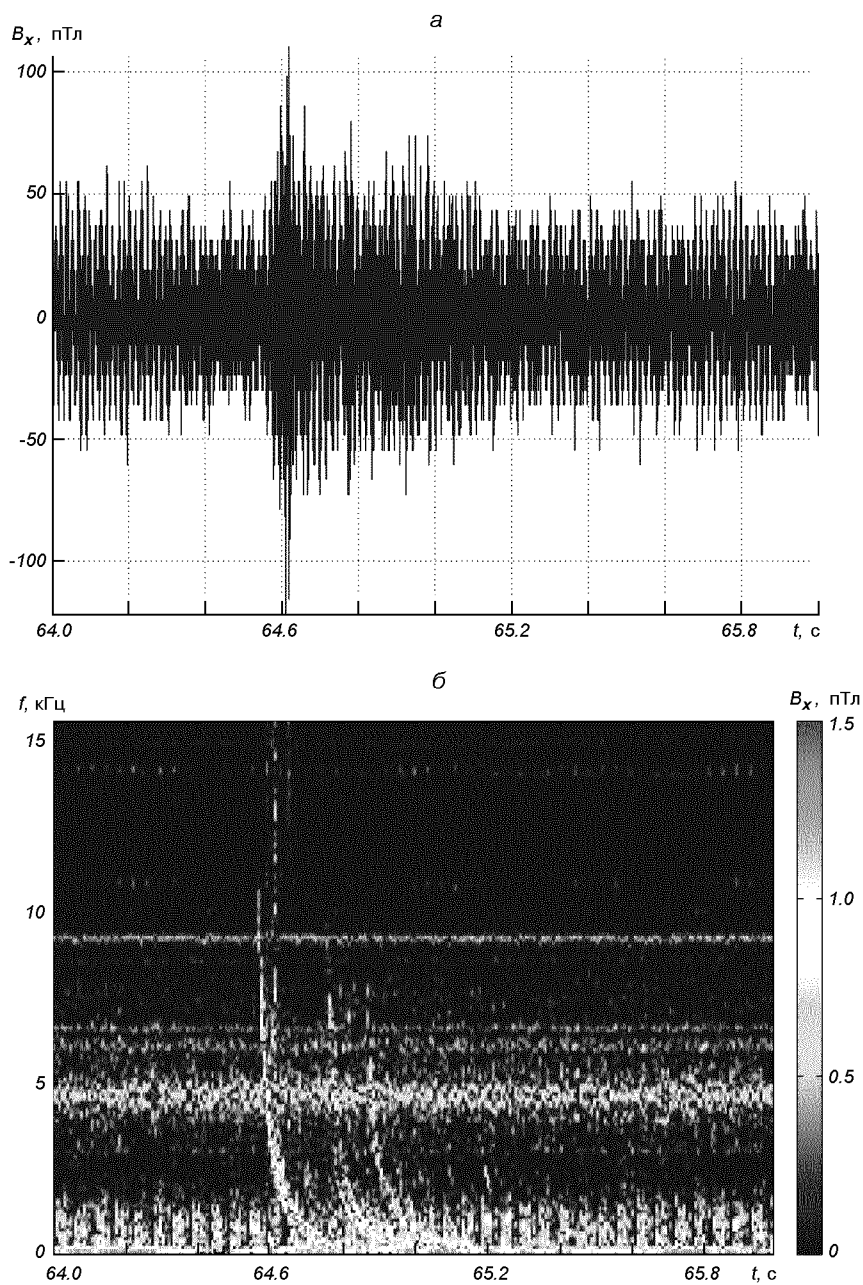


Рис. 2. Складова B_x магнітного поля на витку 1057: *a* — вихідний відрізок даних, *б* — динамічний спектр Фур'є для того ж відрізка даних

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. Измерение 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. Сопрунок 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.