

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 іоносферний 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 2005 р.) відбулася серія ввімкнень комплексу наукової апаратури «Варіант». Подаються 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 вищі орбіти (для порівняння: висота орбіти супутника DEMETER, наукові завдання та можливості 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 багатокомпонентністю 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 Допплера: $\omega' = \omega -$

$k_x V_s$, 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 — щілинного 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 , $E_{3\sim}$, J_{yz} спостерігаються ті самі сигнали: 1) електронний свист (спадаюча дуга в проміжку часу $t = 2.2\ldots3.2$ с), який обрізається знизу поблизу протонної гірочастоти 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. Вирізняються вузькосмугові свисти спадаючої частоти: прямий свист з малою дисперсією (в інтервалі 2.2—2.5 с), який прийшов на висоті 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 гірочастоті.

Три з чотирьох описаних типів сигналів — свисти, шипіння та сигнали ДНЧ-передавачів — є характерними радіоемісіями, 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 частою 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			

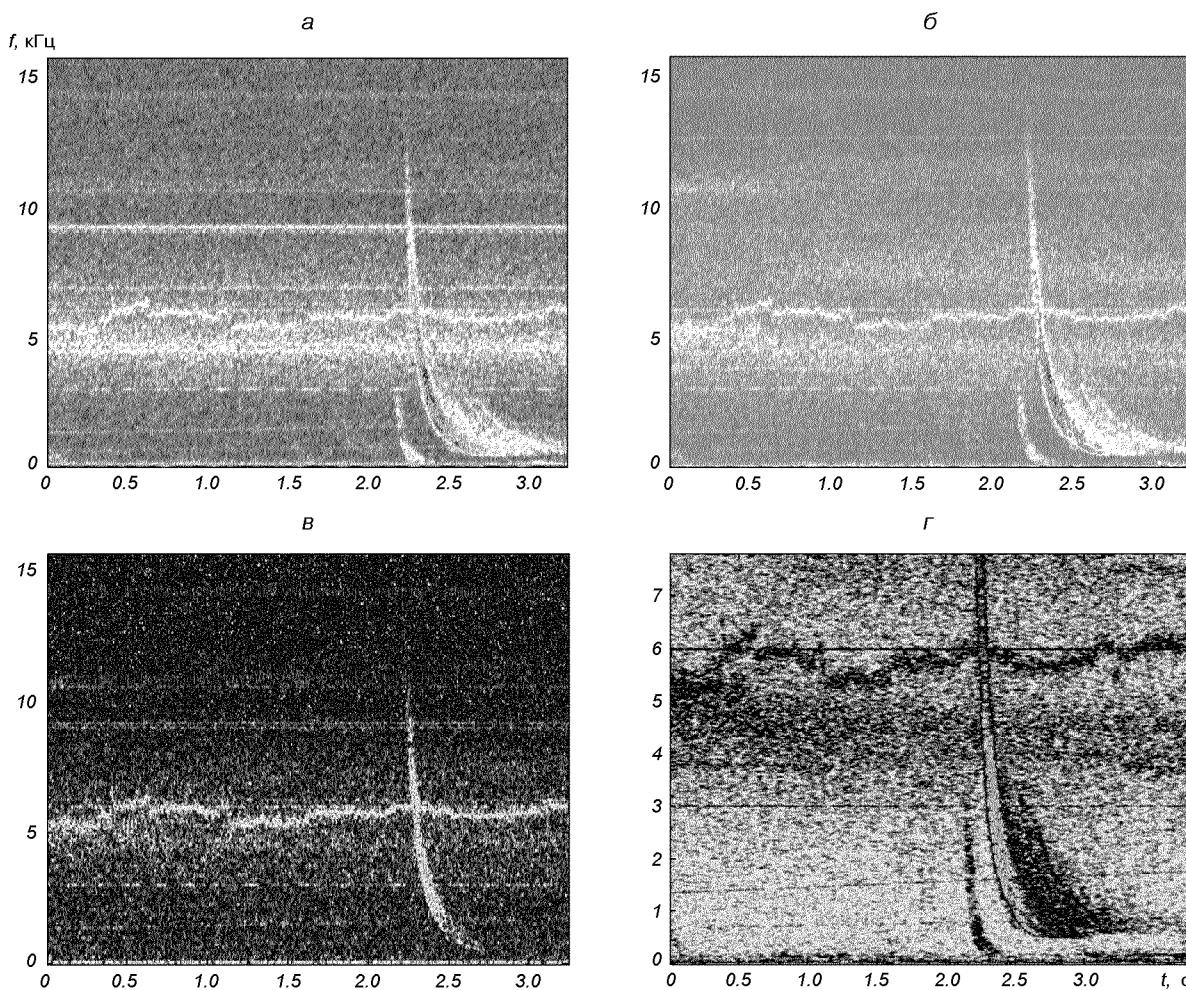


Рис. 1. Динамічні спектри Фур'є на витку 1363 (відліки 980000—1080000): *а* — складова магнітного поля B_x , *б* — складова електричного поля E_z , *в* — складова електричного струму J_z , *г* — складова електричного поля E_z після усереднення по двох точках

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 $E_{3\sim}$. 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 $\{\omega, \mathbf{k}\}$, про яку йшлося вище. Фазова швидкість свисту набагато більша від швидкості супутника, тому ефектом Допплера в даному випадку можна знехтувати, і частота сигналу

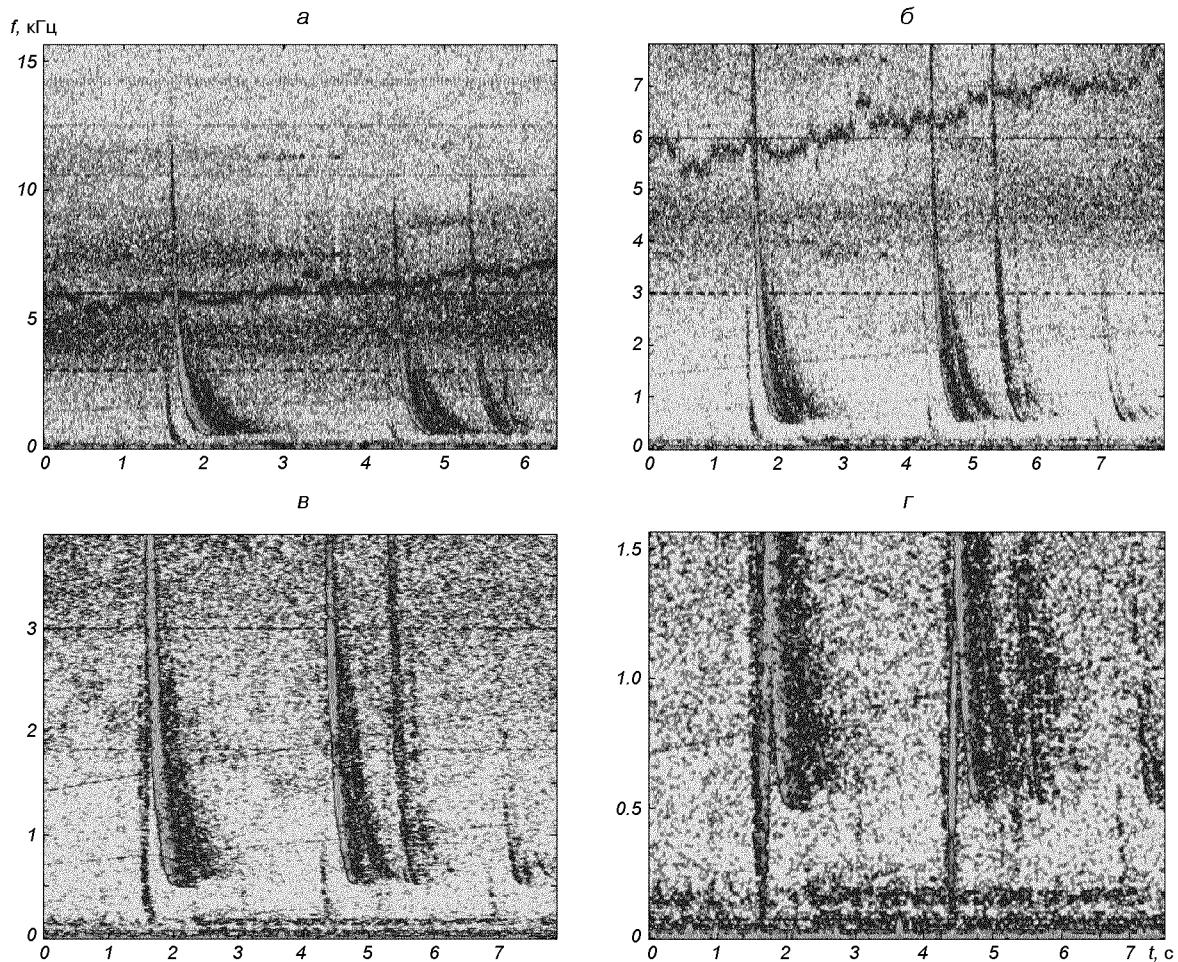


Рис. 2. Динамічні спектри E_z на витку 1363 (відліки 1000000—1200000): a — без усереднення, b — після усереднення по двох точках, c — після усереднення по чотирьох точках, Γ — після усереднення по десяти точках

$\omega' \approx \omega$ 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 електричного поля $E_{z\sim}$, магнітного поля $B_{x\sim}$ та орто-гональної складової струму J_{yz} (рис. 4). Цей сигнал також реєструвався давачем ZF (пояс Роговського), але оскільки верхня частота зразу 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

тричного поля $E_{z\sim}$, магнітного поля $B_{x\sim}$ та орто-гональної складової струму J_{yz} (рис. 4). Цей сигнал також реєструвався давачем ZF (пояс Роговського), але оскільки верхня частота зразу 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

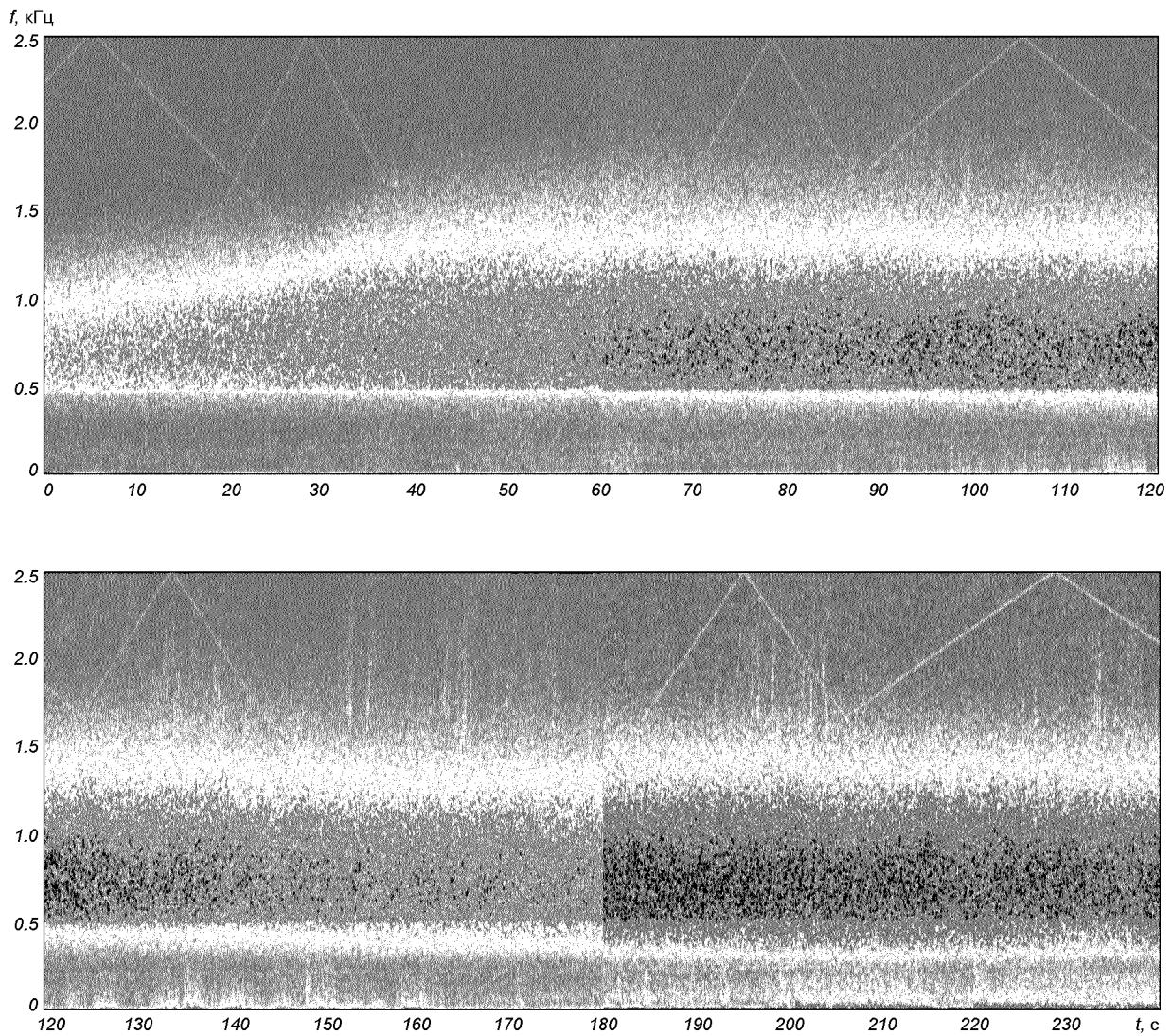


Рис. 3. Зміна частоти обрізання смуги ННЧ-шипіння на витку 1278 протягом 240-с сеансу вимірювань

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	i_{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 хвилі є квазіпоздовжньою: $\cos\theta \sim 1$, де θ — кут між хвильовим вектором і напрямом магнітного поля. Дисперсійне рівняння в цьому випадку має вигляд [1]

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

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

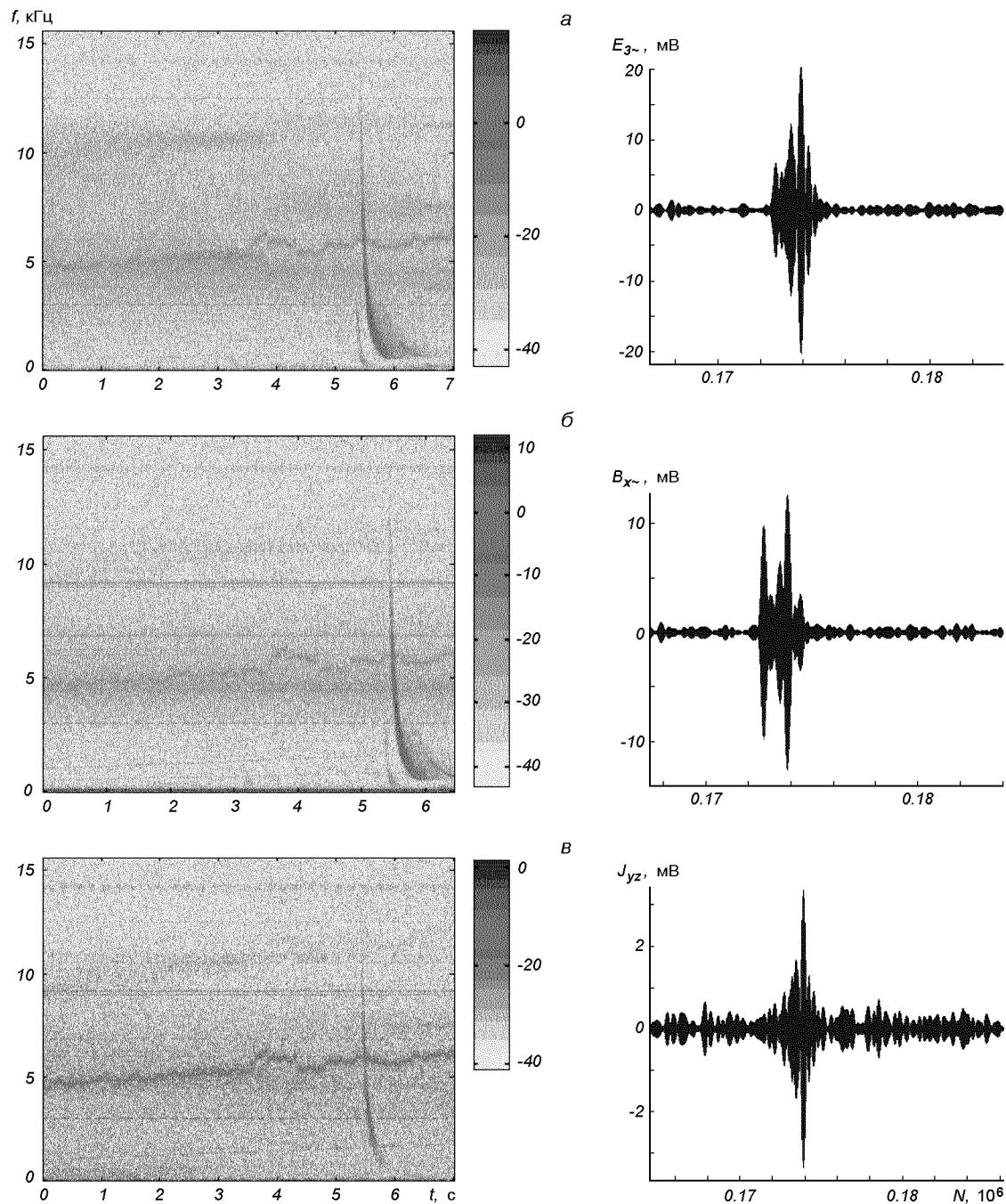


Рис. 4. Динамічні спектри $E_{3\sim}$, $B_{x\sim}$ та J_{yz} (зліва) та відфільтровані на частоті 4 кГц вихідні сигнали у інструментальних одиницях (справа)

моделі іоносфери MSIS-90 для даного положення супутника ($\omega_b \approx 3 \cdot 10^7$ рад/с, $\omega_c \approx 5 \cdot 10^6$ рад/с), за формулою (1) обчислюємо показник заломлення і довжину свистової 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 вимірюними 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 свистової 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, *г* 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 важливим 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. Изменение 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.