

проблем фізики сонячно-земних зв'язків; її дослідженню присвячено цілий ряд міжнародних наукових програм, що передбачають проведення наземних магнітометричних спостережень, зондування іоносфери, ресстрацію іоносферної та магнітосферної конвекції радарними некогерентного розсіювання SuperDARN та проведення прямих супутникових спостережень. Кінцевою метою цих досліджень є моніторинг стану навколоземної плазми, достатньо повний для прогнозу параметрів іоносфери та магнітосфери.

Але прогноз іоносферних збурень є дуже складним завданням. Іоносфера — це відкрита система, яка тісно взаємодіє з магнітосферою. В цій взаємодії роль іоносфери не зводиться тільки до поглинання потоків корпускулярної та хвильової енергії, що надходять з магнітосфери, та замикання електричних струмів магнітосферної плазми. Між іоносферою та магнітосферою існують канали зворотного зв'язку, що робить всю систему нестабільною. Наприклад, електричні струми, що течуть в магнітосферній плазмі вздовж силових ліній магнітного поля, замикаються на висотах шару E через поперечну провідність іоносферної плазми (педерснівську та холлівську). При цьому будь-які варіації поперечної провідності (наприклад, зумовлені перерозподілом іоносферної плазми під дією атмосферних вітрів та іншими причинами) модифікують початкову структуру електричного струму та пов'язаний з ним глобальний розподіл електричного поля в магнітосфері.

Незважаючи на інтенсивне дослідження цих явищ у ряді супутникових експериментів («Болгарія-1300», S33, «Geotail», FAST, «Interball» [1, 6—8, 11]), цілий ряд принципових питань залишається досі відкритим. Особливу цікавість викликає дослідження таких явищ:

- розподіл струмів на денній стороні авроральної іоносфери, оскільки конфігурація цих струмів значною мірою залежить від орієнтації міжпланетного магнітного поля,
- електродинамічні процеси у плазмі полярних каспів, сильно збуреній впливом частинок та полів сонячного вітру,
- просторова структура іоносферної конвекції, що також залежить від орієнтації та величини міжпланетного магнітного поля,
- статистичні характеристики струмових структур.

Поряд із сонячною активністю, на стан іоносфери впливають і потоки енергії, що проникають в іоносферу «знизу» — від Землі. Велика кількість спостережень останніх років свідчить про те, що в стані іоносфери локально виявляються тропосферні

явища (грози, циклони, особливості циркуляції атмосфери), антропогенні фактори (пуски великих ракет, вибухи, робота потужних радіостанцій, ліній електропередач і т. д.), а також тектонічні процеси (землетруси, виверження вулканів, активні розломи, зони субдукції). В літературі широко обговорюється можливість використання іоносферних спостережень для прогнозу сейсмічної активності, а також для моніторингу природних та антропогенних катастроф.

Основна проблема, що перешкоджає експериментальному дослідженню впливів на іоносферу «знизу», пов'язана з порівняною слабкістю цих впливів; тільки в поодиноких випадках відповідні ефекти перевищують шуми, тобто збурення іоносфери іншої природи. Спостереження сейсмогенних ефектів в іоносфері проводяться за умови низької сонячної активності (звичайно при значеннях індексу $K_p < 4$). Замасковані шумами сейсмогенні ефекти в принципі можуть бути відновлені на підставі сучасних математичних методів розділення сигналів та шумів. Але для цього треба знати критерій розділення, тобто знайти структурні відмінності сейсмічних та геліофізичних збурень іоносфери. Такий підхід, очевидно, потребує великої кількості експериментальних даних та відповідного математичного моделювання.

Проект ВАРІАНТ має на меті прямі вимірювання розподілу електричного струму та електромагнітних полів в плазмі іоносфери; результати цих вимірювань будуть внесені до створюваної бази даних про сонячно-земні зв'язки.

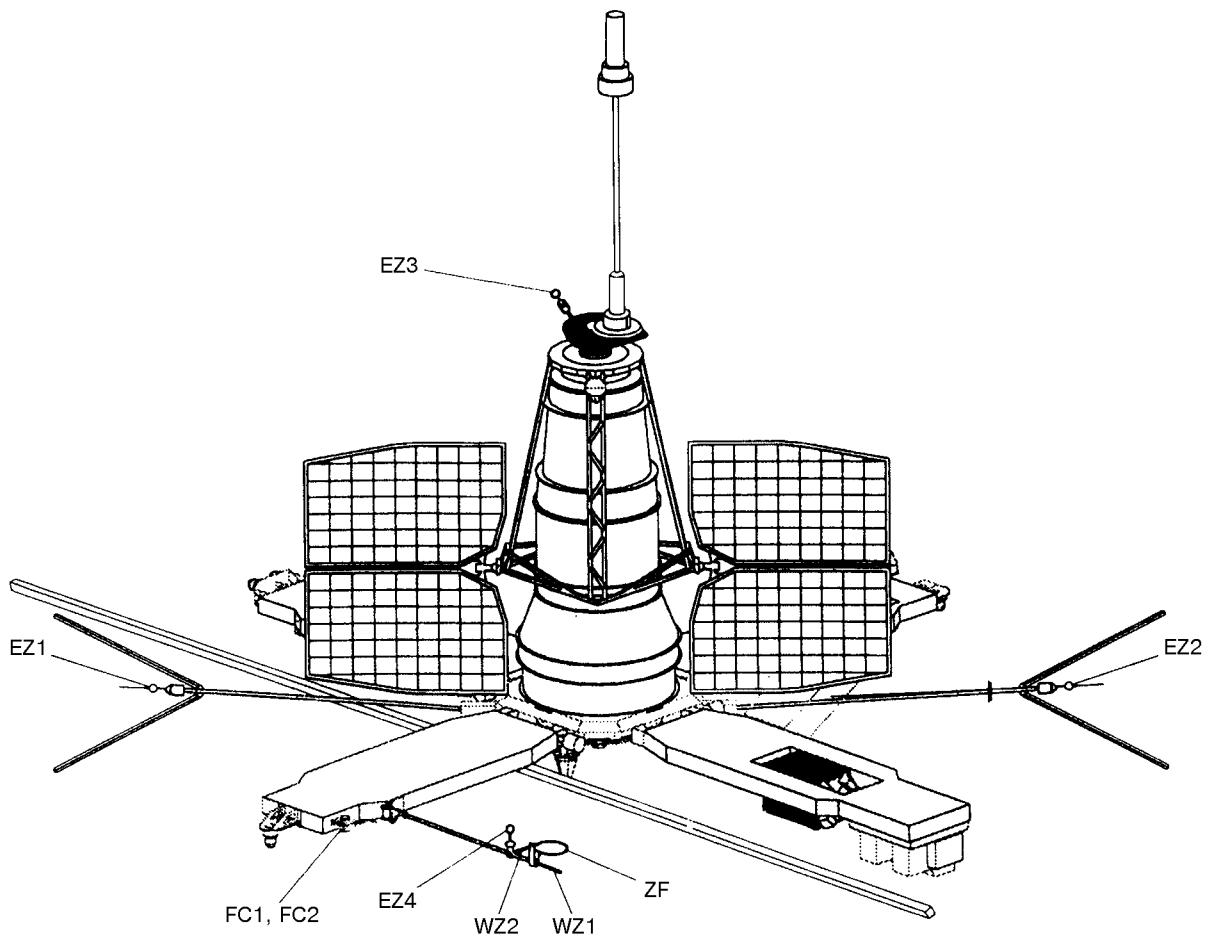
Другою метою проекту ВАРІАНТ є статистичне дослідження слабких проявів сейсмогенних ефектів у іоносфері та їхня селекція на тлі іоносферних збурень геліофізичної природи.

НАУКОВЕ ОБЛАДНАННЯ СУПУТНИКА

Як вже вказано, основною метою проекту ВАРІАНТ є дослідження реакції іоносфери на впливи «згори» (з магнітосфери та сонячного вітру) та «знизу» (з Землі). Для цього на борту українського супутника дистанційного зондування Землі «Січ-1М» запропоновано встановити додатковий комплекс апаратури та провести серію електромагнітних експериментів. Запуск супутника заплановано на 2002 р.; час його активного функціонування — 1 рік; супутник буде виведено на колову полярну орбіту з висотою 670 ± 30 км та нахилом 83° , яка перетне основні морфологічні структури іоносферної плазми: авроральний овал, середньоширотний провал, області полярних каспів

Наукові інструменти проекту ВАРІАНТ

Інструменти	Вимірювані параметри	Установи, що відповідають за розробку та виготовлення
Хвильовий зонд WZ	Густина електричного струму J: діапазон 0.1 Гц—40 кГц, чутливість 10^{-12} А/см ² Гц ^{1/2} Вектор магнітного поля В: діапазон 0.1 Гц—40 кГц, чутливість 10^{-13} Тл/Гц ^{1/2} Електричний потенціал ϕ : діапазон частот 0.1 Гц—40 кГц, чутливість 10^{-6} В/Гц ^{1/2}	ЛЦ ІКД НАНУ-НКАУ, Україна (В. Є. Корепанов) СВК PAN, Польща (J. Juchniewicz), ИКИ РАН, Росія (С. І. Климов)
Пояс Роговського ZF	Густина електричного струму J: діапазон 0.1 Гц—400 Гц, чутливість 10^{-12} А/см ² Гц ^{1/2}	LPCE/CNRS, Франція (V. Krasnoselskikh)
Електричний зонд EZ	Вектор електричного поля E: діапазон 0.1 Гц—200 кГц, чутливість 10^{-6} В/Гц ^{1/2}	ЛЦ ІКД НАНУ-НКАУ, Україна (В. Є. Корепанов)
Циліндр Фарадея FC	Густина електричного струму J: діапазон 0.1 Гц—1 кГц, чутливість 10^{-10} А/см ² Гц ^{1/2}	Sheffield University, Великобританія (H. Alleyne, M. Balikhin)



Розміщення датчиків комплексу ВАРІАНТ на борту супутника «Січ-1М»: WZ — щілинний зонд Ленгмюра; ZF — пояс Роговського; FC — циліндр Фарадея; EZ — електричний зонд

і т. д. Параметри та склад датчиків комплексу ВАРІАНТ, встановлених на борту супутника «Січ - 1М», наведені в таблиці.

В програму експерименту ВАРІАНТ закладено ряд нових ідей. Перш за все, в корисне навантаження супутника введено одразу три незалежні

інструменти для вимірювання густини електричного струму, який розглядається як основний «агент» іоносферно-магнітосферного зв'язку [4, 5, 9, 10]. Одночасно з вимірюванням електричного струму будуть спостерігатися флуктуації електромагнітного поля, що дасть можливість розділити просторові та часові варіації вимірюваних параметрів. Ця можливість базується на ідеї [10] прямої реєстрації густини струму $j(r)$ при перетині струмового шару супутником. Крім того, густина струму визначає $\text{rot}V$. Отже, якщо магнітне поле B реєструється одночасно і незалежно, то виникає можливість розрахувати розподіл хвильових векторів k і обчислити частоту хвилі ω [5]. В експерименті ВАРИАНТ (рисунок) густина струму буде вимірюватись щільним Ленгмюрівським зондом (прилад WZ), поясом Роговського (ZF) та циліндром Фарадея (FC). Більш детально ці пристрої описані в роботі [3]. Якщо FC є широко відомим приладом, що часто використовується в космічних дослідженнях, то ZF буде запущено вперше, а хвильовий зонд WZ взагалі є новою унікальною розробкою. Цей прилад створено в результаті тісної співпраці ЛЦ ІКД НАНУ—НКАУ, ІКД РАН (Москва) та ЦКД ПАН (Варшава). Він дозволяє одночасно й незалежно вимірювати флуктуації густини просторового струму, магнітного поля та електричного потенціалу [2]. Електричні та магнітні поля будуть реєструватись електричними та магнітними сенсорами (прилади EZ та WZ) в діапазоні частот ELF/VLF. Інтерес саме до цього діапазону частот пов'язаний з тим, що ELF/VLF випромінювання є характерним автографом різноманітних типів іоносферних збурень як геліофізичної, так і сейсмічної природи.

Як видно з таблиці, запропоноване корисне навантаження складається з чотирьох типів детекторів. Три з них будуть незалежно вимірювати густина електричного струму, що дасть унікальну можливість в космічному експерименті провести порівняльне дослідження трьох існуючих методів реєстрації іоносферних струмів.

НАУКОВА МЕТА ПРОЕКТУ ВАРИАНТ

Метою проекту ВАРИАНТ є вирішення наступних наукових завдань:

1. Дослідження глобального розподілу поздовжніх електричних струмів в полярній іоносфері, структури великомасштабних електричних полів та конвективних рухів іоносферної плазми.

2. Зіставлення супутникових спостережень з даними зондування іоносфери радарми системи SuperDARN.

3. Дослідження хвильових процесів у плазмі полярних каспів.

4. Реєстрація іоносферних явищ, зумовлених сейсмічною та вулканічною активністю; дослідження антропогенного впливу на іоносферу.

5. Дослідження взаємодії інфразвукових хвиль з іоносферною плазмою; комбіновані експерименти з наземним джерелом акустичних хвиль.

6. Активні експерименти над модифікацією параметрів іоносферної плазми потужним радіовипромінюванням бортового радара.

Розглянемо ці завдання більш детально.

1. Дослідження глобального розподілу поздовжніх електричних струмів у полярній іоносфері, структури великомасштабних електричних полів та конвективних рухів іоносферної плазми. Як було вказано вище, комплексне дослідження високоширотної іоносфери дозволяє зрозуміти фізичні механізми переносу та дисипації енергії в системі «сонячний вітер \rightarrow магнітосфера \rightarrow іоносфера». Прискорені у хвості магнітосфери заряджені частинки висипаються в областях авроральних овалів, а частинки сонячного вітру безпосередньо досягають іоносфери через полярні каспи, викликаючи оптичні сйива та додаткову іонізацію атмосфери. Завдяки високій поперечній провідності (холлівській та педерсенівській), іоносфера замикає магнітосферні поздовжні струми, впливаючи на розподіл електричного потенціалу в магнітосфері. В результаті глобальний розподіл електричних струмів є залежним як від структури електричних та магнітних полів магнітосфери, так і від стану іоносфери (розподілу поперечної провідності, рухів нейтральної атмосфери). Експериментальне дослідження цих процесів потребує високоточного вимірювання струмів і електричних полів (конвекції) у високоширотній іоносфері (одна з головних цілей проекту ВАРИАНТ).

2. Зіставлення супутникових спостережень з даними зондування іоносфери радарми системи SuperDARN. Мережа радарів SuperDARN призначена для спостереження й дослідження магнітосферної конвекції в полярних районах методами некогерентного розсіювання. Система складається з шести радарів, які визначають дві складові швидкості плазмового дрейфу в шарах E та F. Спостереження провадяться в моніторинговому режимі; їхні дані згодом розповсюджуються на компакт-дисках. Група французьких фахівців з LPCE (Віллайн та Андре) проводить дослідження явища розмагнічування іонів і формування дрібномасштабних конвективних структур у вечірньому секторі магнітосфери. Вважається, що цей процес супроводжується генерацією поздовжніх електричних струмів. У

проекті ВАРИАНТ буде проведено скорельовані вимірювання струмів і конвективних рухів з борту супутника «Січ-1М» та радарми SuperDARN.

3. Дослідження хвильових процесів у плазмі полярних каспів. Наукове обладнання супутника «Січ-1М» дозволяє реєструвати низькочастотні типи плазмових хвиль: нижньогібридні, іонно-звукові, іонно-циклотронні, іонні моди Бернштейна і т. д. Такі хвилі характерні для областей, де полярні каспи проєктуються на іоносферу.

Полярні каспи є ділянками прямого доступу частинок і полів сонячного вітру до внутрішньої магнітосфери та іоносфери. Теоретичні моделі передбачають складний характер руху плазми у каспі — генерацію вихорів, плазмових неоднорідностей та перезеднання магнітних силових ліній. В результаті виникають потужні поздовжні струми, плазмові філаменти та хвильові структури (на іонно-циклотронній частоті та її гармоніках), які спостерігались раніше з борту супутників VIKING, OGO-5 на менших висотах. Завданням проекту ВАРИАНТ є дослідження спектрального складу плазмової турбулентності в ділянках проєкцій полярних каспів на іоносферу.

4. Реєстрація іоносферних явищ, зумовлених сейсмічною та вулканічною активністю; дослідження антропогенного впливу на іоносферу. Зміни параметрів верхньої атмосфери та іоносфери можуть свідчити про сейсмічні процеси в літосфері Землі. За кілька годин чи діб до землетрусу часто спостерігаються характерні свічення нічного неба, електромагнітні випромінювання в різних діапазонах частот, різноманітні плазмові явища, що свідчать про турбулізацію іоносфери. Природа цих явищ вивчена дуже мало; їхнє дослідження виводить на фундаментальні проблеми фізики іоносфери (наприклад, проблему енергетичного балансу іоносфери).

Генерація електромагнітних емісій є одним з основних виявів сейсмічного впливу на іоносферну плазму. Ці емісії спостерігались з борту іоносферних супутників, як правило, в VLF-діапазоні (свистові хвилі) та рідше — в ELF-діапазоні (альвенівські хвилі). Спостереження сейсмогенних електромагнітних емісій в іоносфері мали місце на супутниках «Інтеркосмос-19», OGO-6, NIMBUS, «Ореол-3», GEOS-1, GEOS-2, «Інтеркосмос—Болгарія-1300», DE-2 та «Інтеркосмос-24». Було встановлено, що специфічний VLF шум звичайно генерується на частотах кількох десятків кГц над епіцентром майбутнього землетрусу в ділянці розмірами близько 200—300 км в широтному напрямі і значно більш витягнутій у довготному напрямі. Радіовипромінення виникає за 10—20 годин до

початку землетрусу і продовжується приблизно стільки ж після нього, досягаючи максимуму в момент головного поштовху.

«Герцові» ELF-збурення магнітного поля спостерігались за кілька годин до землетрусу у вузькій магнітній трубці (40—100 км вздовж траєкторії космічного апарата), що спирається на епіцентр землетрусу. У випадку помірною землетрусу ($M = 3.5—5$) амплітуда збурень магнітного поля складала 0.2—0.5 нТл на висотах 800—900 км на частоті 8 Гц. Експеримент ВАРИАНТ має на меті поповнення бази такого роду експериментальних даних.

5. Дослідження взаємодії інфразвукових хвиль з іоносферною плазмою; комбіновані експерименти з наземним джерелом акустичних хвиль. Фізичні механізми сейсмічного впливу на іоносферу, згадані в попередньому параграфі, надійно не встановлені. Одна з гіпотез полягає в тому, що на іоносферу діють акусто-гравітаційні хвилі, які збуджуються в атмосфері сейсмічними коливаннями земної поверхні, що передують землетрусу. Оскільки характерні частоти сейсмічних хвиль лежать в діапазоні 0.01—1 Гц, в цьому випадку природно говорити про інфразвуковий канал сейсмо-іоносферного зв'язку. Вважається, що дисипація інфразвуку в іоносфері може спровокувати збудження іоносферної конвекції та помітно змінити енергетичний баланс іоносфери. Крім того, при перетині динамо-шару іоносфери (що розташований на висотах 80—150 км) інфразвукові хвилі безпосередньо трансформуються в альвенівські електромагнітні хвилі тієї ж частоти. Вірогідно, що останні і реєструвалися супутниками.

У розпорядженні ЛЦ ІКД НАНУ-НКАУ знаходяться потужні джерела акустичних хвиль. Попередні експерименти показують, що інфразвукове випромінення цих джерел може досягти іоносфери і спричинити генерацію ELF-випромінення, найбільш імовірно — альвенівських хвиль. Проект ВАРИАНТ створює зручну можливість для проведення активних експериментів з наземними акустичними джерелами і дослідження реакції іоносфери з борту супутника.

В рамках наземної підтримки експерименту ВАРИАНТ планується також організація вимірювань магнітного поля та його флуктуацій перш за все в сейсмоактивних зонах на території України — в Криму та Закарпатті. Особливу увагу буде приділено скоординованим спостереженням на борту супутника і на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». При наявності на станції розвинутої системи високочутливих приладів для реєстрації електричних та магнітних полів саме в

ELF—VLF-діапазоні та практичній відсутності індустріальних завад можна сподіватися на отримання нових даних щодо динаміки іоносфери у південних полярних широтах.

6. Активні експерименти над модифікацією параметрів іоносферної плазми потужним радіовипроміненням бортового радару. Супутникові спостереження плазмових резонансів, що їх збуджує робота бортового радару (в ряді експериментів — потужного телеметричного передавача), раніше давали можливість зареєструвати спектр плазмових хвиль тільки в системі відліку супутника. Це створювало неоднозначність в ідентифікації модового складу емісій, що спостерігались. В проекті ВАРІАНТ плазмовий струм, вектори електричного та магнітного полів будуть реєструватись одночасно, що вперше дасть можливість чисто експериментальними методами (без використання теоретичних припущень) визначити хвильовий вектор та дисперсію хвиль у системі відліку «нерухомої» плазми при роботі потужного бортового радару, що входить до складу системи дистанційного зондування Землі супутника «Січ-1М».

ВИСНОВОК

Національна космічна програма України передбачає запуск великого космічного апарата типу АУОС під попередньою назвою «Січ-1М». Вперше у вітчизняній практиці космічних досліджень на борту супутника з додатковим навантаженням буде проведено науковий експеримент ВАРІАНТ, що розробляється у широкій міжнародній кооперації. Успішна реалізація експерименту сприятиме не тільки подальшому поступу у вивченні фундаментальних проблем космічної фізики, але й вперше у світі дозволить надійно визначити можливість проведення безпосередніх вимірювань одного з найважливіших носіїв інформації про електромагнітний стан плазми — густини просторового струму.

Робота виконується при підтримці контракту з НКАУ № 1189 та гранту INTAS 97-1769.

1. Chmyrev V., Bilichenko S., Pokhotelov O., et al. Alfvén vortices and related phenomena in the ionosphere and magnetosphere // *Phys. Scripta*.—1988.—38.—P. 841.
2. Korepanov V., Dudkin F., Berkman R. New technique for future wave experiments // Abstracts of «Magnetospheric research with advanced techniques», p. 19, China, Beijing (April, 1996).
3. Korepanov V., Dudkin F. Comparative analysis of current density meters operating in space plasmas // *Adv. Space Res.*—1999.—23, N 8.—P. 1541—1544.

4. Krasnosel'skikh V., Natanzon A., Reznikov A., et al. On the possibility of supporting the multi-satellite measurements of the cluster mission with single-satellite measurements in the Regatta-Cluster Project // Proc. of an International Workshop on «Space Plasma Physics Investigations by Cluster and Regatta» / Ed. by E. J. Rolf. — ESA SP-306, p. 79, Published by European Space Agency, (May, 1990)
5. 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 // *Advances in Space Research.*—1991.—11, N 9.—P. 37—40.
6. Lysak R. L., Carlson C. W. The effect of microscopic turbulence on magnetosphere-ionosphere coupling // *Geophys. Res. Lett.*—1981.—8.—P. 269.
7. Lysak R. L., Dum S. T. Dynamics of magnetosphere-ionosphere coupling including turbulent transport // *J. Geophys. Res.*—1983.—88.—P. 365.
8. Titova V., Yurov E., Molchanov O., et al. Small scale structures of electric field variations and particle precipitations as observed onboard of Aureol-3 satellite // Proc. of «Results of the ARCAD-3 Project and of the Recent Programs in Magnetospheric and Ionospheric Physics»; p. 447, CEPADUES-EDITION, France (May, 1984).
9. Vaisberg O. On the determination of the spatial scale in the moving reference frame // *Sov. J. Space Res.*—1985.—12, N 6.—P. 1241.
10. Vaisberg O., Klimov S., Korepanov V. Current density measurements in the shock front by means of splitted Langmuir probe // *Sov. J. Space Res.*—1989.—27, N 3.—P. 512.
11. Volokitin A., Krasnosel'skikh V., Mishin E., et al. // *Sov. J. Space Res.*—1984.—22.—P. 749.

PROJECT VARIANT: MEASUREMENTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS AND CURRENTS IN THE IONOSPHERIC PLASMAS ABOARD THE SICH-1M SATELLITE

V. Korepanov, O. Negoda, G. Lizunov, H. Alleyne, M. Balikhin, J. Blecky, F. Dudkin, A. Fedorov, J. Juchniewich, S. Klimov, V. Krasnoselskikh, and F. Lefevre

VARIANT is a joint international space experiment on current density measurements in the ionospheric-magnetospheric plasmas. The experiment will be performed aboard the Ukrainian remote-sensing satellite SICH-1M which will be launched in 2002 into the polar circular orbit with an inclination of about 83° and altitude of 670±30 km. The scientific payload includes three instruments for the registration of space current density: split Langmuir probe, Rogovski coil, and Faraday cup. The first two instruments are specially designed to measure the current density variations, the last one allows the measurements of particle fluxes. The equipment includes also the sensors for measurements of the electric and magnetic field fluctuations in the frequency range from 0.1 Hz to 40 kHz. These measurements are complementary of the current density ones and they will be used to make comparison between direct and implicit estimates of the distribution and fine structure of currents. The next goal of the VARIANT experiment is the observation of the fine structure of currents in space with the simultaneous ground-based measurement of the ionospheric convection in the E and F layers by the SuperDARN system of radars. The scientific objectives of the VARIANT mission are discussed.