

УКРАЇНСЬКІ СУПУТНИКОВІ ПРОЕКТИ ІОНОСФЕРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ: ВІД "ПОПЕРЕДЖЕННЯ" ДО "ІОНОСАТУ"

Представлено історичний огляд космічних експериментів у галузі іоносферних досліджень, реалізованих за роки незалежності України



Георгій Лізунов
канд. фіз.-мат. наук,
зав. лаб.
супутникових досліджень
ближнього космосу
Інституту космічних
досліджень
НАН України — ДКА України,
м. Київ

Україна — космічна держава. Протягом космічної ери запущено понад 400 ракет та супутників українського виробництва, а вітчизняні ракети-носії "Циклон", "Зеніт" та "Дніпро" здобули доброї слави на світових ринках. Однак переважна частина космічних проектів, в реалізації яких брали участь українські науковці та інженери, задумувалась та реалізовувалась у рамках загальносоюзних, а потім російських наукових програм. Українська сторона відігравала в них роль співвиконавця, відповідального за створення супутникових платформ або вузлів космічних апаратів і, меншою мірою, приладів корисного навантаження. Після набуття Україною державної незалежності склалася незвичайна ситуація, коли в країні функціонує потужна космічна галузь, але відсутні (чи майже відсутні) наукові кадри з досвідом постановки завдань та управління космічними проектами. Тому найважливішим завданням новоствореного Національного космічного агентства України¹ стало просування проектів, авторами та головними виконавцями яких виступали б вітчизняні вчені. Йдеться не тільки про розбудову національної школи космічних досліджень, а й про демонстрацію нашої спроможності виступати гідним партнером європейських держав і міжнародних організацій у вирішенні масштабних завдань сучасної космонавтики.

Наукові проекти в галузі досліджень навколосемного космосу, реалізовані за роки незалежності України, представлені в таблиці. Як видно, більшою частиною проектів керувала російська сторона — Роскосмос².

ПРОЕКТ ПОПЕРЕДЖЕННЯ

Проект "Попередження" був задуманий на межі 1980-х років і, якби не розпад СРСР, міг би стати наймасштабнішим у світі проектом іоносферних досліджень. За ініціативою КБ "Південне"³

¹ Національне космічне агентство України (НКАУ) було створене в 1992 р. (з 2010 р. — Державне космічне агентство України (ДКАУ)).

² Роскосмос — Федеральне космічне агентство Росії

³ Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне" ім. М.К. Янгеля" — провідне українське підприємство в галузі конструювання ракетно-космічної техніки та штучних супутників Землі

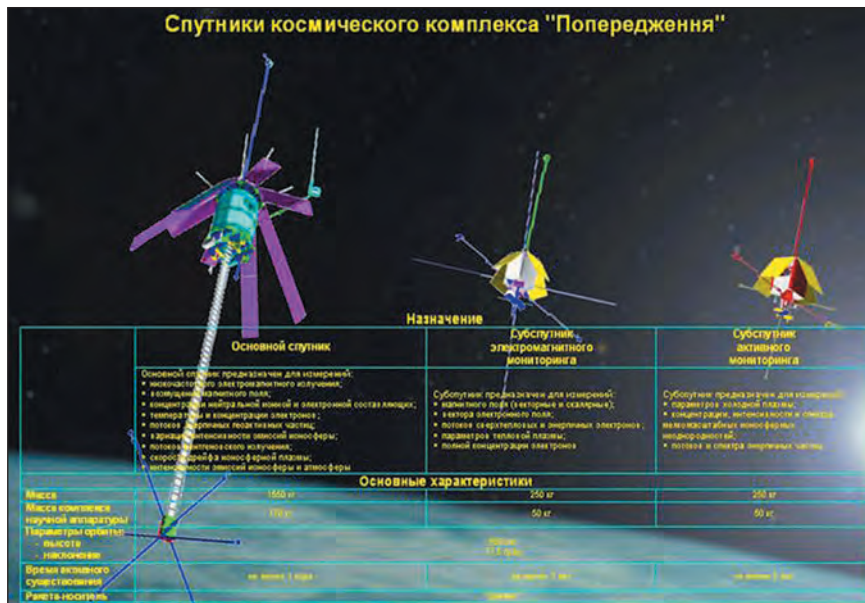
Таблиця.
Супутникові дослідження ближнього космосу за участі України після 1991 р.

Місія/агентство	Космічна система	Реалізація	Предмет дослідження, завдання
Інтербол (Роскосмос)	2 супутники + 2 субсупутники	Запущений в 1995, апарат Інтербол-2 функціонував до 1999 р.	Морфологія магнітосфери, динамічні процеси в магнітосфері
Попередження (НКАУ)	3 супутники	Наукова програма, ескізний проект	Впливи на іоносферу "знизу", іоносферні провісники землетрусів
Інтербол - Прогноз (Роскосмос, НКАУ)	2 кластери мікросупутників	Концепція, технічні пропозиції	Комбіновані спостереження іоносфери та магнітосфери
Варіант (НКАУ)	Супутник ДЗЗ "Січ-1М"	Запущений в 2004 р., функціонував протягом I кварталу 2005 р.	Вимірювання електромагнітних полів і струмів в іоносфері
Компас-2 (Роскосмос)	Мікросупутник	Запущений в 2006 р.	Іоносферні провісники землетрусів
Коронас-Фотон (Роскосмос)	Супутник	Реалізований в 2009 р.	Сонце і сонячно-земні зв'язки
Обстановка (Роскосмос)	МКС	Реалізація, починаючи від 2013 р.	Електромагнітна обстановка навколо МКС
Потенціал (ДКАУ)	Мікросупутник ДЗЗ "Січ-2"	Запущений в 2011 р. Здійснений в 2011—2012 рр.	Реєстрація параметрів нейтральної і зарядженої компонентів іоносфери
Радіоастрон (Роскосмос)	Супутник	Запущений в 2011 р.	Радіоастрономія, фізика плазми
Чібіс (Роскосмос)	Мікросупутник	Запущений в 2012 р.	Блискавична активність, геофізичний моніторинг
Іоносат-Мікро (ДКАУ)	Мікросупутник	Запуск після 2015 р.	Іоносфера, космічна погода, геофізичні ефекти в космосі
Резонанс (Роскосмос)	2 супутники	Запуск після 2014 г.	Мазерні ефекти в магнітосфері

роботу зі створення космічної системи проекту було продовжено в Україні й після 1992 року. Незважаючи на те, що головна мета проекту — вивчення іоносферних провісників землетрусів з метою попередження про них (звідки, власне, й походить назва проекту), — викликала неабиякий скепсис у фахівців, проект викликав величезний міжнародний інтерес. Адже вперше в історії космічних досліджень планувався запуск в іоносферу супутникового кластера, в тому числі, орбітальної станції масою більше ніж півтори тони та двох півтонних субсупутників. Наукове устаткування космічних апаратів створювалось силами міжнародної кооперації ІНТЕРКОСМОС і містило датчики параметрів

плазми, енергійних частинок, електромагнітних полів широкого спектру частот, атмосферних оптичних емісій тощо. А використання новітніх інформаційних технологій відкривало немислимі для того часу потужності збору та передачі даних на Землю. Вперше в космічному експерименті ставили за мету здійснення комплексних та моніторингових спостережень іоносфери. На рис. 1 і 2 представлені плакати КБ "Південне" тих років, що ілюструють задум проекту.

Спроба практичної реалізації проекту "Попередження" була здійснена в другій половині 1990-х років. У КБ "Південне" під керівництвом головного конструктора **В. Драновського** було випущено ескізний проект космічної системи. Авторами наукової



Плакаты КБ "Південне" 1990-х років, які демонструють задум проекту "Попередження":
 рис. 1 (верхній) — ілюстрація прогнозів землетрусів за допомогою космічного моніторингу сейсмічної активності;
 рис. 2 (нижній) — комплекс пропонуваніх супутників

програми виступила група фахівців на чолі з академіками НАН України **В. Бар'яхтаром**, а потім — **Л. Литвиненком** (наукове керівництво проектом загалом), членом-кореспондентом НАН України **Ю. Ямпольським** (підсупутникове зондування іоносфери) та д.т.н. **В. Корепановим** (бортовий приладовий комплекс).

За темою проекту здійснювалися цільові науково-дослідні роботи, проводилися міжнародні симпозіуми та робочі зустрічі, участь у проекті мала великий вплив на

багатьох, тоді ще молодих, вчених (у тому числі й автора цієї статті).

У 1998 р. роботи над проектом припинилися через брак фінансування, необхідного для реалізації космічної системи "в залізі".

Головні принципи проекту "Попередження" — створення іоносферного супутникового кластеру, комплексний підбір вимірювальної апаратури, пріоритет моніторингових режимів спостережень, — досі не втілені в життя і, на наш погляд, містять основні вимоги до майбутніх іоносферних місій.

ЕКСПЕРИМЕНТ "ВАРІАНТ" НА СУПУТНИКУ "СІЧ-1М"

"Варіант" — це перший вітчизняний науковий космічний експеримент. Рішення про його проведення на борту супутника дистанційного зондування Землі "Січ-1М" було прийняте в 1997 р., коли корисне навантаження супутника було вже укомплектоване й очікувалося, що незабаром відбудеться запуск. Проте науковий керівник експерименту **В. Корепанов** зумів переконати керівництво КБ "Південне" в доцільності установки на борту супутника "ще одного дуже маленького приладу" (слова в лапках — пряма мова **В. Корепанова**, під маленьким приладом мався на увазі т. зв. хвильовий зонд).

Згодом, в міру того, як запуск "Січ-1М" знову і знову відкладався, до корисного навантаження додавалися все нові й нові "дуже маленькі прилади" — датчики електричного і магнітного полів, електричних струмів, система збору наукової інформації — і в кінцевому підсумку наукова апаратура виросла в солідний вимірювальний комплекс, а учасниками космічного експерименту стали сім організацій із п'яти країн світу.

Набір інструментів для експерименту "Варіант" створювався як прообраз приладу для діагностики хвильових процесів у плазмі.

Як відомо, через ефект Доплера на борту супутника рееструється зміщена частота хвильового процесу: $\omega^* = \omega - k_x V_{SC}$, де ω — частота хвилі в нерухомій системі відліку, k_x — компонента хвильового вектора вздовж траєкторії супутника, V_{SC} — швидкість супутника (перша космічна швидкість). Тим самим ні частота ω , ні хвильове число k_x окремо не визначені (це окремий випадок загальної проблеми розділення часових та просторових варіацій середовища, що рухається відносно спостерігача).

Російський вчений **О. Вайсберг** вперше обґрунтував можливість встановлення повного спектрального складу електромагнітних хвиль $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$ за даними синхронних вимірювань елек-



Рис. 3. Запуск КА "Січ-1М" українською РН "Циклон-3" 24 грудня 2004 р. з космодрому Плесецьк (Росія)

тричного струму, магнітного поля та/або електричного поля в космічній плазмі [1]. На цій основі спеціалісти з львівського Фізико-механічного інституту НАН України під керівництвом д.т.н. **В. Корепанова** та Інституту космічних досліджень РАН під керівництвом д.т.н. **С. Клімова** розробили спеціальний прилад — хвильовий зонд WP (аббревіатура від Wave Probe), який поєднує в єдину вимірювальну схему електричний зонд, індукційний магнітометр та датчик струму (так званий щілинний зонд Ленгмюра), — тобто набір вимірювальних приладів, необхідних для відновлення спектру хвиль "по Вайсбергу" [10]. Апробація та відпрацювання хвильового зонду в льотних умовах були ще одним, технологічним завданням космічного експерименту "Варіант".

Запуск "Січ-1М" відбувся 24 грудня 2004 р. з космодрому Плесецьк (Росія) вітчизняною ракетою-носієм "Циклон-3" (рис. 3). Через аварію третього розгінного блоку супутник виявився виведеним на нештатну орбіту з апогеєм 650 км і перигеєм 283 км. Ця обставина додала ваги космічному експерименту — жоден із сучасних супутників не спускається так низько в іоносферу, а на висотах ~ 300 км плазмові збурення найпотужніші. Вимірювання за допомогою добре оснащеного комплексу наукової апаратури "Варіант" надавали унікальну діагностичну інформацію про хвильові процеси в щільних областях іоносфери.

Реалізація експерименту виявилася недовгою. Внаслідок того, що перигей орбіти був занурений у відносно густу атмосферу, на космічний апарат діяв

непередбачений конструкцією "Січ-1М" аеродинамічний момент, що унеможливило стабілізацію супутника. Найгірше це позначилося на роботі сонячних батарей, які в штатному режимі мають бути орієнтованими на Сонце. Навесні 2005 р. система живлення супутника вийшла з ладу. За період роботи "Січ-1М" вдалося провести тільки 11 випадкових увімкнень наукової апаратури тривалістю від двох до двадцяти хвилин. Через хаотичність моментів вимірювань, їх невелику кількість і тривалість основні завдання проекту, пов'язані з моніторингом іоносфери, не були виконані. Вже нефункціонуючий супутник згорів у щільних шарах атмосфери в квітні 2006 р. (рис. 4), термін його польоту склав 477 діб.

На рис. 5 представлено один з прикладів реєстрації спектру плазмових хвиль в експерименті "Варіант" [4]. Вузька горизонтальна лінія на частоті 3 кГц — сигнал наземної навігаційної радіостанції, 4 майже вертикальні дуги на проміжку часу 1,5...7,5 с — це так звані "вістлери", горизонтальна дифузійна смуга в межах частоти 4 кГц — "нижньогібридний шум", вертикальні смуги в нижній частині рисунка — "плазмосферні шипіння". Ці сигнали є типовими для іоносфери, їхня реєстрація демонструє правильність роботи наукової апаратури. Важливим результатом також стала валідація приладу WP [9].



Рис. 4. Супутник "Січ-1М" після 477 діб польоту припинив своє існування у квітні 2006 р.

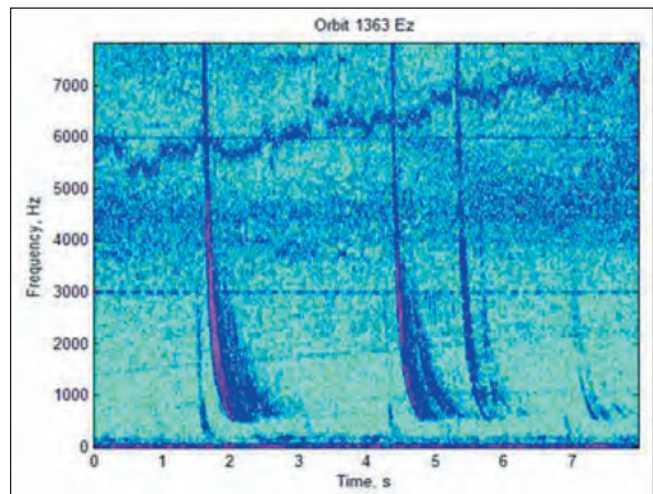


Рис. 5. Приклад спектру плазмових хвиль в експерименті "Варіант" (пояснення — у тексті статті)

ЕКСПЕРИМЕНТ "ПОТЕНЦІАЛ" НА СУПУТНИКУ "СІЧ-2"

"Потенціал" став другим українським науковим космічним експериментом. На відміну від експерименту "Варіант", метою якого була реєстрація хвильових процесів в іоносфері, "Потенціал" ставив за мету вимірювання параметрів самої іоносфери [5]. При цьому величезний інтерес становила діагностика нейтрального газу, на іоносферних висотах — домінуючої компоненти космічного середовища.

За всю космічну еру було запущено 6 космічних апаратів НАСА⁴ для реєстрації параметрів верхньої нейтральної атмосфери *in situ*: 5 супутників серії "Atmosphere Explorer" та "Dynamics Explorer 2". Всі проекти "старі", останній КА літав у 1981—1983 рр. Датчики атмосферного тиску (манометри) встановлювалися також на "Space Shuttle" і орбітальних станціях "Spcelab-2" та "Мир", але збурення середовища при русі таких великих тіл не дозволяли реєструвати на них природні атмосферно-іоносферні варіації.

Американські "Експлорери" оснащалися мас-спектрометрами для визначення концентрації, хімічного складу, температури та швидкості нейтрального газу. Для експерименту "Потенціал" в Інституті технічної механіки НАН України та ДКА України під керівництвом д.т.н. **В. Шувалова** було створено відносно компактний і економний датчик концентрації та температури повітря DN (аббревіатура від Density of Neutrals), а для реєстрації параметрів заряджених частинок — зонд Ленгмюра DE (від Density of Electrons) [6, 7]. На рис. 6 показано експеримент із тестування приладового комплексу "Потенціал" на плазмовому газодинамічному стенді Інституту технічної механіки НАН України та ДКА України.

Супутник "Січ-2" був запущений 17 серпня 2011 р. з військової бази "Ясний" (Оренбургська область, Росія) ракетою-носієм "Дніпро-1". На рис. 7 представлено перший переданий на Землю тестовий "науковий сигнал" — складне зображення, яке було

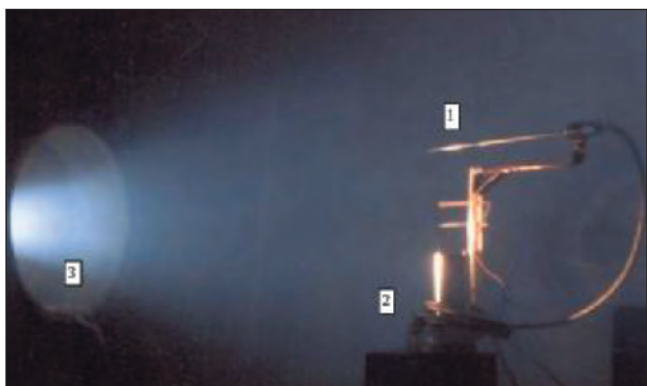


Рис. 6. Комплекс "Потенціал" під час тестування в Інституті технічної механіки НАН України та ДКА України



Рис. 7. Перший переданий на Землю тестовий "науковий сигнал" з КА "Січ-2". Серпень 2011 р.

закладено в пам'ять бортового комп'ютера і скинуто на Землю для перевірки тракту передачі наукової інформації. Термін роботи "Січ-2" склав 15 місяців — супутник завершив функціонування після деградації сонячних батарей в листопаді 2012 р. Всього за період польоту було проведено 31 сеанс наукових вимірювань тривалістю від декількох хвилин (ВЧ режим) до півтори години (моніторинговий режим), одержані дані розміщені на *ftp*-сервері Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України (<http://promis.ikd.kiev.ua>). На рис. 8 наведено приклад спостережених плазмових варіацій та аналізу їхнього зв'язку з сейсмічною активністю Землі [8, 12].

ПРОЕКТ "ІОНОСАТ—МІКРО"

Експерименти "Варіант" та "Потенціал" стали майданчиком для подальшої підготовки повномасштабного дослідницького проекту "Іоносат—Мікро", метою якого є дослідження динамічних процесів в іоносфері, за допомогою узгоджених космічних та наземних вимірювань, для пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, в магнітосфері, атмосфері та внутрішніх оболонках Землі [3]. Проект також передбачає низку часткових завдань:

- відпрацювання методик здійснення іоносферного моніторингу;
 - створення та апробація необхідних комплексів наукової апаратури;
 - створення за даними спостережень віртуальної обсерваторії для вивчення динаміки іоносфери широким колом фахівців та зацікавлених осіб;
 - впровадження в освітній процес;
 - популяризація космічних досліджень в Україні.
- Для реалізації проекту "Іоносат—Мікро" КБ "Південне" буде спеціальний космічний апарат "Мікросат-М".

⁴ НАСА — Національне управління США з авіації та дослідження космічного простору.

⁵ Європейське космічне агентство.

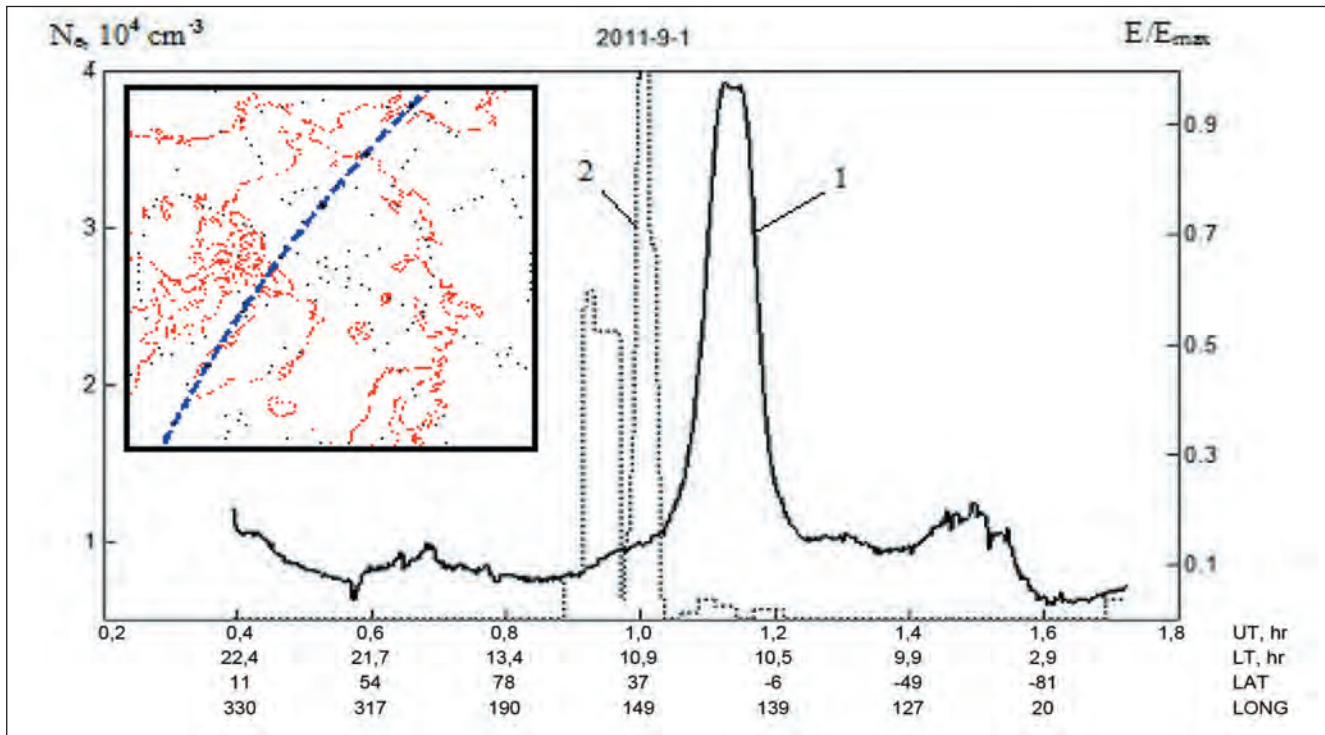


Рис. 8. Приклад спостережуваних плазмових варіацій та аналізу їхнього зв'язку зі сейсмічною активністю Землі, отриманих в експерименті "Потенціал" за даними КА "Січ-1М"

Запуск спочатку планувався на 2015 р. першим стартом нової української ракети-носія "Циклон-4" з космодрому Алкантара (Бразилія), але в нинішній політичній ситуації підготовка проекту заморожена.

Комплекс наукової апаратури на борту "Мікросат-М" включає прилади для реєстрації електромагнітних полів та плазмових струмів EP, WP і FGM (розробник — Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України), датчики параметрів нейтрального газу і плазми DN і DE (Інститут технічної механіки НАН України та ДКА України), радіочастотний аналізатор спектру плазмових хвиль RFA (Центр космічних досліджень Польської академії наук) та вимірювач повного електронного вмісту іоносфери ПЕС (Інститут земного магнетизму, іоносфери та поширення радіохвиль РАН). Розміщення датчиків на платформі космічного апарату показано на рис. 9.

ЗАМІСТЬ ВИСНОВКУ

Цей рік приніс Україні важкі випробування. Ніби на морський корабель, який багато років вірою й правдою служив своїй команді, налетів шквал, що вибив заіржавілі скріпи та зламав трухляві щогли.

І в цьому потрясінні ми бачимо велику надію на майбутнє. По-перше, для всіх стала очевидною необхідність реформування устрою держави зверху—донизу. По-друге, коли під загрозою опинилося саме існування незалежної України (причому головна загроза виходить не з зовнішньої військової або внутрішньої корупційної небезпеки, що було б півбіди, а з переддефолтного стану національної економіки), реформи стали неминучими. Вітер змін торкнеться

серед іншого й космічної сфери, про що в інтелектуальних колах точаться палкі дискусії. Користуюсь нагодою наведу власну думку.

Серед широкого спектру міркувань на тему шляхів модернізації нашої країни доводиться чути й таку, на наш погляд, дуже помилкову точку зору, що космічна спадщина стала для України непосильним тягарем. Що за прикладом багатьох країн світу Україні слід відмовитися від власної космічної політики, власної космічної програми і пов'язаних з цим наукових програм.

Адже ніхто не забороняє українським вченим самостійно брати участь в зарубіжних проектах або ж брати виставлені в Інтернеті дані зарубіжних супутників для проведення власних досліджень. Іншими словами, стверджується, що космонавтика — доля багатих країн. За нашими спостереженнями, справа стоїть так, що з точністю до навпаки — *держави, які ведуть космічні дослідження, багатіють, бо космонавтика в них виступає "локомотивом інновацій"*. Ось прикметний факт: в умовах всесвітньої економічної кризи розвинуті країни світу збільшують витрати на космічну діяльність [2].

Ми стверджуємо: шлях модернізації України йде через розвиток, в тому числі, космонавтики. А для цього необхідно запускати нові українські супутники та ракети, ставити на них власні наукові прилади, здійснювати оригінальні космічні експерименти. І одночасно прагнути до партнерської участі України в міжнародних космічних місіях під егідою ЄКА⁵ та НАСА, розуміючи, що в грошовому еквіваленті внесок України в здійснення цих місій може бути відносно малим. Тут головне, щоб наш внесок був незамінним.

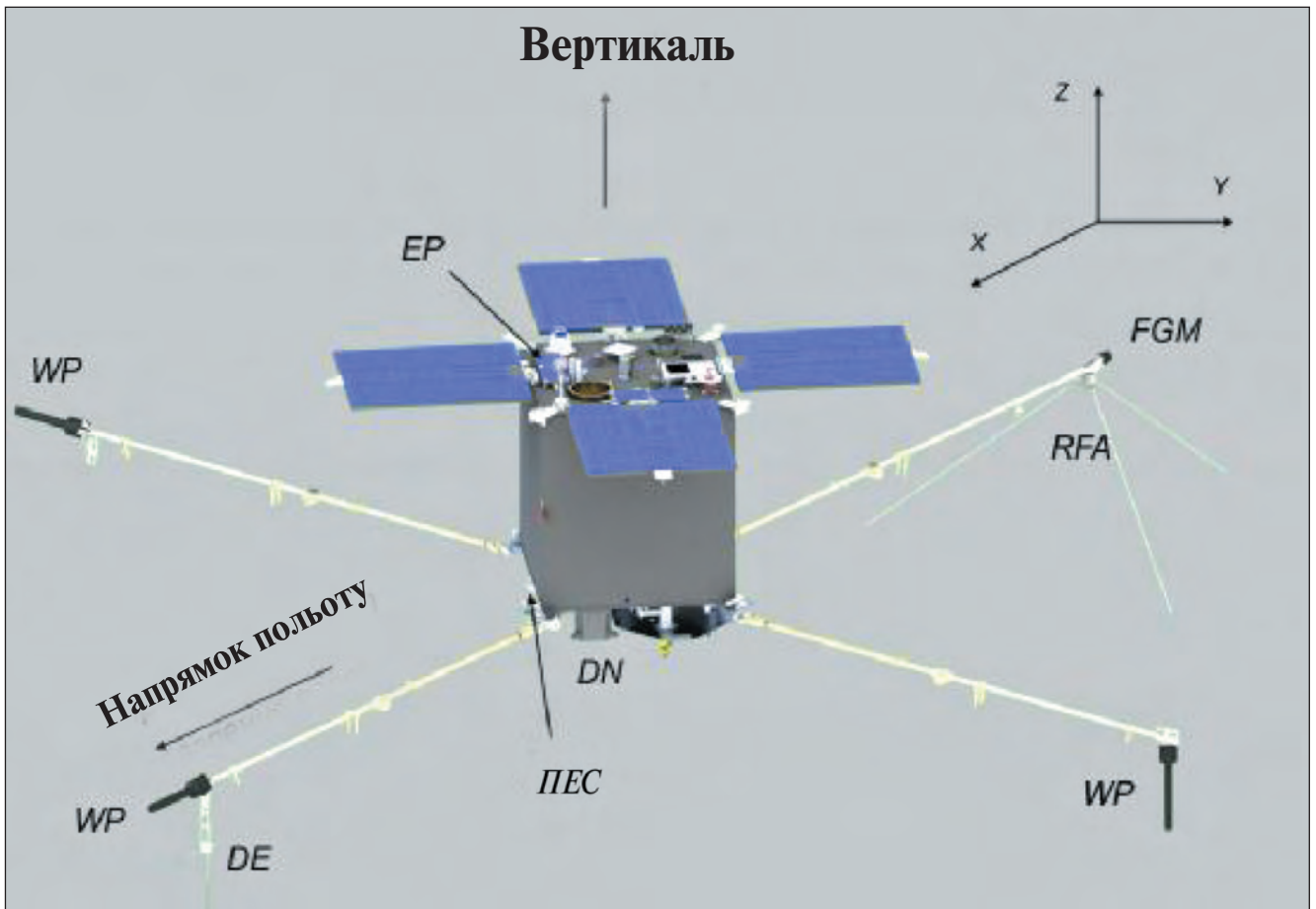


Рис. 9. Схема розміщення комплексу наукової апаратури на борту КА "Мікросат-М" (пояснення — у тексті статті)

Про матеріали, наведені в цій статті, можна докладніше прочитати на сайті лабораторії супутникових досліджень ближнього космосу Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України: <http://nearspace.ikd.kiev.ua/>. ■

Література

1. Вайсберг О.Л. К определению пространственной шкалы в движущейся плазме // Космические исследования. — 1985. — Т. 12, № 6. — С. 947—949.
2. Горбулин В., Федоров О. Космическая стратегия: не имейшь своей — становишься частью чужой / "Зеркало недели", № 6—7 (786—787), 20 февраля 2010 г.
3. Космический проект "Ионосат-Микро" / Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. — К.: Академперіодика, 2013. — 218 с.
4. 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 // Космічна наука і технологія. — 2007. — Т. 13, № 4. — С. 3—9
5. Лізунов Г.В., Глемба В.И., Корепанов В.Е., Крючков Е.И., Лукениук А.А., Скороход Т.В., Федоров О.П., Шувалов В.А. Космический эксперимент "Потенциал" на борту спутника "Сич-2" // Космічна наука і технологія. — 2008. — Т. 14, № 4. — С. 3—8.
6. Шувалов В.А., Корепанов В.Е., Лукениук А.А., Токмак Н.А., Кочубей Г.С. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА "Сич-2" // Космічна наука і технологія. — 2012. — Т. 18, №6. — С. 5—13.

7. Шувалов В.А., Письменный Н.И., Лазученков Д.Н., Кочубей Г.С. Зондовая диагностика потоков лабораторной и ионосферной разреженной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — Москва: Наука, Международная академическая издательская компания "Наука" / Интерперіодика, Российская АН — 2013. — №4. — С. 98—107.
8. Шувалов В.А., Лукениук А.А., Письменный Н.И., Кулагин С.Н. Зондовая диагностика околоспутниковой среды на КА "Сич-2" // Космічна наука і технологія. — 2013. — Т. 19, № 1. — С. 13—19.
9. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT — first results from wave probe // Advances in Space Research. — 2009. — V. 43. — P. 1904—1909.
10. Korepanov V., F. Dudkin. Comparative analysis of current density meters operating in space plasma // Advances in Space Research. — 1999. — V. 23, No 8. — P. 1541—1544.
11. Korepanov V., Lizunov G., Fedorov O., Yampolsky Yu., Ivchenko V. Ionosat — ionospheric satellite cluster // Advances in Space Research. — 2008. — V. 42. — P. 1515—1522.
12. Makarov O.L., Lizunov G.V., Lukeniuk A.A., Korepanov V.Ye., Shuvalov V.O., Shovkopliias Yu.A., Moskalev S.I.. Experiment POTENTIAL onboard SICH-2 microsatellite — first results / In: Proc. 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, October 1—5, 2012. IAC—12—B4.2.13571.