

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003>

УДК 629.783, 550.388

Г. В. ЛІЗУНОВ¹, зав. лаб., канд. фіз.-мат. наук

В. Є. КОРЕПАНОВ², заст. дир., д-р техн. наук

А. А. ЛУКЕНЮК², дир., д-р техн. наук

О. В. П'ЯНКОВА¹, наук. співроб.

О. П. ФЕДОРОВ¹, дир., д-р фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

та Державного космічного агентства України

Проспект Академіка Глушкова 40, Київ, Україна, 03187

² Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України

та Державного космічного агентства України

вул. Наукова 5а, Львів, Україна, 79060

КОСМІЧНИЙ ПРОЄКТ «ІОНОСАТ-МІКРО»: ГОТОВНІСТЬ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ

«Іоносат-Мікро» — це фундаментальний науковий проєкт у сфері досліджень навколосемного космічного простору. Загальною метою проєкту є вивчення динамічних процесів в іоносфері для пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, у магнітосфері, атмосфері та внутрішніх оболонках Землі. Проєкт задумано як відповідь на виклики, пов'язані з сучасним розвитком знань про космічну погоду та про вплив на іоносферу поверхневих джерел енерговиділення (погодних явищ, ліній електропередач, землетрусів та процесів їхньої підготовки, потужних техногенних катастроф тощо). Крім того, проєкт «Іоносат-Мікро» є логічним продовженням і розвитком попередніх іоносферних місій, таких як «Dynamics Explorer 2» (запущений у 1982 р.), «Freja» (1992 р.), «DEMETER» (2004 р.), «Swarm» (2013 р.) та CSES (2018 р.). Підготовка проєкту ведеться за підтримки і в рамках Загальнодержавної космічної програми України і Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень. В статті викладено наукові засади проєкту, описано параметри космічної системи, що створюється, склад і логіка роботи наукової апаратури. Для реалізації проєкту в ДП «КБ «Південне» створено спеціальну супутникову платформу «Мікросат-М», призначену для проведення наукових і технологічних експериментів. Планована орбіта — кругова сонячно-синхронна з нахилом 98° і висотою 600...700 км (параметри орбіти, спосіб і дата запуску підлягають уточненню). Корисне навантаження супутника включає набір наукових приладів для реєстрації динамічної структури і фізичних параметрів нейтральних і заряджених компонентів космічного середовища, тонкої просторової структури і фізичних параметрів космічних струмових систем і магнітного поля Землі, спектрів та хвильових форм електромагнітних збурень УНЧ-ННЧ-ДНЧ-діапазону. Для накопичення і цільового опрацювання даних вимірювань створено Центр збору, обробки і поширення даних проєкту, який надаватиме користувачам потужні засоби пошуку та отримання інформації.

Ключові слова: іоносфера, сонячно-земні зв'язки, космічна погода, комплекс наукової апаратури.

Цитування: Лізунов Г. В., Корепанов В. Є., Лукенюк А. А., П'янкova О. В., Федоров О. П. Космічний проєкт «Іоносат-Мікро»: готовність до реалізації. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6 (139). С. 3—11. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003>

ВСТУП

Український супутниковий проєкт «Іоносат-Мікро» запропоновано з метою дослідження процесів у іоносфері, що виникають при дії потужних природних та антропогенних джерел енерговиділення. Формування наукових завдань проєкту відбувалося протягом тривалого часу, а концептуальні положення з'явилися ще в 1990-х роках, в ході підготовки космічної місії «Попередження», яка не була здійснена. Підготовка проєкту «Іоносат-Мікро» спершу велася в рамках і за підтримки Загальнодержавної космічної програми України, а у період 2018—2022 рр. — виключно Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень. В цей період спроектовано, виготовлено та випробувано бортовий комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро» (далі — КНА «Іоносат-Мікро»), розгорнуто Центр збирання, опрацювання та розповсюдження даних, а в ДП «КБ «Південне» імені М. К. Янгеля» створено необхідну для реалізації проєкту супутникову платформу «Мікросат-М». Станом на сьогодні роботи над проєктом призупинені на стадії інтеграції та випробувань космічного апарата (КА) в цілому. В умовах мирного часу і при належному фінансуванні запуск КА «Мікросат-М» міг би відбутися вже в 2022 році.

Незважаючи на довгий строк підготування проєкту, його актуальність з часом тільки підвищилася. Це пов'язано із нещодавно виявленим відлунням в іоносфері процесів передавання електроенергії через високовольтні лінії електропередач [7]. Враховуючи, що об'єм вироблення електроенергії постійно збільшується, цей процес необхідно дослідити з метою запобігання появи ще одного джерела забруднення ближнього космосу.

НАУКОВІ ЦІЛІ ПРОЄКТУ

Навколоземний космічний простір є об'єктом широкого кола наукових досліджень — від робіт прикладного характеру (у сфері навігації, телекомунікації, екологічного моніторингу, космічної погоди) до фундаментальних досліджень (космічна електродинаміка, колективні процеси у плазмі, прискорення елементарних

частинок, сонячно-земні зв'язки тощо). Особливу роль у структурі навколоземного космосу відіграє іоносфера — ущільнений шар плазми в діапазоні висот 50...1000 км. Як проміжна область між нейтральною атмосферою і високоіонізованою магнітосферою, іоносфера контролює взаємодію цих геосфер і сама бере в ній участь. Як наслідок, іоносфера демонструє потужний відгук на впливи як згори, так і знизу. В стані іоносфери відображаються фактори сонячної активності [12], а також потужні приземні явища, як природні — грози й тайфуни, виверження вулканів, землетруси і цунамі [4, 5, 9], так і антропогенні — запуски важких ракетноносіїв [3], робота навігаційних і широкомовних радіостанцій тощо [6, 8, 11]. Спеціального дослідження вимагають дані про іоносферні провісники землетрусів [13]. Науковою спільнотою дискутується можливість використання іоносферних спостережень з метою діагностики значених джерел енерговиділення, і це закладає основи цілої нової методології моніторингу навколишнього середовища [10]. Слід підкреслити, що окреслена таким чином тематика відноситься до ключових компетенцій України в галузі космічних досліджень і у майбутньому може використовуватися як ефективний інструмент розвитку співробітництва з ЄКА.

Практична важливість іоносферних досліджень зумовлена ще й тією обставиною, що навколоземний космос став середовищем розміщення численних технічних систем, які забезпечують глобальну навігацію, телекомунікацію, спостереження Землі з космосу тощо, причому угруповання штучних супутників Землі з часом тільки розростається. Космічна інфраструктура зазнає безпосереднього впливу космічних факторів (так, варіації електронного вмісту іоносфери обмежують точність, а в ряді випадків й саму працездатність навігаційних супутникових систем, атмосферні збурення при впливі сонячних спалахів порушують траєкторії низькоорбітальних КА), що диктує необхідність контролю та своєчасного попередження операторів про зміни «космічної погоди» [12].

Призначення проєкту «Іоносат-Мікро» можна окреслити як наукова іоносферна місія. За-

гальною метою проєкту є вивчення динамічних процесів в іоносфері для пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, у магнітосфері, атмосфері та внутрішніх оболонках Землі. Для досягнення зазначеної мети за допомогою узгоджених космічних та наземних вимірювань планується накопичити обширну статистику спостережних даних про стан іоносфери в областях космічного простору, через яку проходить траєкторія КА «Мікросат-М», що створюватиме основу для систематичного дослідження іоносферних відгуків на впливи згори і знизу — на фактори сонячної активності (сильні сонячні спалахи, корональні викиди мас, магнітні бурі), земні катаклізми (сильні та надсильні землетруси, виверження вулканів), техногенні джерела енерговиділення (робота енергомереж тощо).

Методологія реалізації проєкту «Іоносат-Мікро» ґрунтується на певних принципах, які вирізняють його на тлі попередників:

- комплексна діагностика газоплазмових та електродинамічних параметрів іоносфери на борту одного КА. З цією метою — проведення вимірювань відразу всім складом наукової апаратури або цілими групами приладів;

- пріоритетність моніторингових вимірювань з метою накопичення статистично значної вибірки даних про іоносферні параметри та їхню залежність від геліо- і геофізичних умов;

- проведення узгоджених космічних та дистанційних наземних спостережень;

- створення вебресурсу даних проєкту з метою залучення до обробки даних широкого кола фахівців.

Консорціум виконавців проєкту представлено в табл. 1.

КОСМІЧНИЙ АПАРАТ ТА ОРБИТА

Комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро» встановлюється на платформу КА «Мікросат-М», створену в ДП КБ «Південне» для проведення наукових і технологічних експериментів [12]. Супутник планується запустити на кругову сонячно-синхронну орбіту, в діапазоні значень місцевого сонячного часу 10:00...11:00, з нахилом орбіти $I = 98^\circ$ і висотою 600...700 км. Така орбіта перетинатиме всі основні широтні утворення іоносфери: плазмосферу, авроральні овали, полярні вихори, середньоширотний провал, область каспа тощо. З точки зору фізики нейтральної атмосфери супутник запускатиметься

Таблиця 1. Організації-учасники проєкту «Іоносат-Мікро»

Організація-учасник	Роль
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України (ІКД)	Координація виконання наукової програми. Центр управління ходом космічного експерименту. Центр обробки наукової інформації.
Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України (ЛЦ ІКД)	Координація робіт зі створення бортового комплексу наукової апаратури. Виготовлення магнітно-хвильового комплексу МВС, блоку електроніки для аналізатора щільності частинок АГЧ, системи збору наукової інформації СЗНІ. Проведення вимірювань, опрацювання даних.
Інститут технічної механіки НАН України та ДКА України (ІТМ)	Виготовлення аналізатора щільності частинок АГЧ в складі давачів DN, DE, проведення вимірювань, опрацювання даних
Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» (ДП «КБ «Південне»)	Створення КА «Мікросат-М», інтеграція корисного навантаження, планування роботи КА, формування супроводжувальної інформації про параметри КА
Національний центр управління та випробування космічних засобів ДКА України (НЦУВКЗ)	Керування польотом, прийом наукової та телеметричної інформації з борту КА
Центр космічних досліджень Польської академії наук (SRC PAS)	Виготовлення спектроаналізатора RFA, проведення вимірювань, опрацювання даних

Таблиця 2. Експлуатаційні характеристики КА «Мікросат-М»

ОРБИТА	
Кругова, експлуатаційний діапазон висот	620...710 км
Нахил	97.9...98.2°
Сонячно-синхронна, місцевий час в низхідному вузлі	10...14 год
ОРІЄНТАЦІЯ	
Тип	активна тривісна
Точність орієнтації в орбітальній системі координат	5° (3σ)
Кутові швидкості стабілізації КА	<0.01 °/с (3σ)
ПЕРЕДАЧА ДАНИХ НА ЗЕМЛЮ	
Радіолінія Х-діапазону	30.72 Мбіт/с
Службова радіолінія S-діапазону	32 кбіт/с
МАСА КА	
Загальна	до 200 кг
Зокрема корисного навантаження	до 75 кг
ГАРАНТІЙНИЙ ТЕРМІН ФУНКЦІОНУВАННЯ КА	не менше трьох років
ПОХИБКИ КООРДИНАТНО-ЧАСОВОЇ ПРИВ'ЯЗКИ ВИМІРЮВАНЬ	
Похибка позиціонування КА	≤1 км
Похибка визначення орієнтації КА (осей датчиків)	≤1°
Похибка шкали бортового часу	≤1 мс

в екзосферу. Експлуатаційні характеристики КА «Мікросат-М» вказано в табл. 2.

НАУКОВА АПАРАТУРА

Комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро» призначений для досягнення мети проекту шляхом реєстрації:

- динамічної структури і фізичних параметрів нейтральних і заряджених компонентів космічного середовища,
- тонкої просторової структури і фізичних параметрів космічних струмових систем і магнітного поля Землі,
- електромагнітних хвиль УНЧ — ННЧ — ДНЧ-діапазону.

Загальну характеристику КНА наведено в табл. 3. Розміщення давачів на платформі КА показано на рис. 1.

З метою реєстрації повного спектру плазмових хвиль, наявних в іоносфері, до складу корисного навантаження введено відразу два прилади для електромагнітних вимірювань: магнітно-хвильовий комплекс MWC для вимірювання низькочастотних хвиль і спектроаналізатор RFA для вимірювань в області високих частот.

Магнітно-хвильовий комплекс MWC складається з ферозондового магнітометра FGM для реєстрації вектора постійного магнітного поля Землі та його варіацій, трьох хвильових зондів

Таблиця 3. Комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро»

Прилади	Вимірювані параметри/інше	Керівник
Магнітно-хвильовий комплекс MWC у складі ферозондового магнітометра FGM, трьоххвильових зондів WP та електричного зонда EP	Три компоненти магнітного поля (0...18500 Гц), три компоненти електричного поля (1...18500 Гц), три компоненти густини електричного струму (1...18500 Гц)	С. М. Беляєв, ЛЦ ІКД, Україна
Спектроаналізатор RFA	Спектри трьох компонентів електричного поля (20 кГц ... 15 МГц)	Н. Rothkaehl, SRC-PAS, Польща
Аналізатор щільності частинок АГЧ у складі блоку давачів нейтрального газу DN і теплових електронів DE	Концентрація і температура нейтрального газу (10 ⁵ ...10 ¹¹ см ⁻³ , 600...2000 К), концентрація і температура теплових електронів (10 ³ ...10 ⁸ см ⁻³ , 0.1...1 eВ)	В. А. Шувалов, ІТМ, Україна
Система збору наукової інформації (СЗНІ)	Вхідний інформаційний потік (до 100 Мбіт/с). Вихідний потік (до 64 Мбіт/с). Обсяг накопичувача (512 ГБ).	А. А. Лукенюк, ЛЦ ІКД, Україна

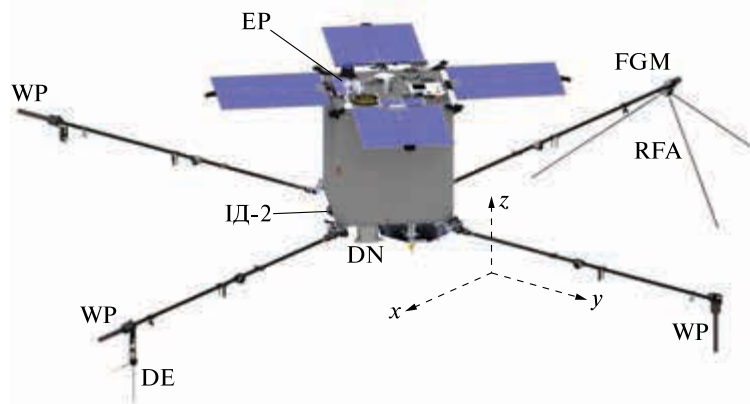


Рис. 1. Загальний вигляд КА «Мікросат-М» із зазначенням розташування давачів КНА «Іоносат-Мікро». Розміри апарату $0.7 \times 0.7 \times 0.75$ м, довжина штанг в розгорнутому стані 2 м. В штатній конфігурації вісь Z орієнтована вертикально, супутник рухається в напрямку осі X

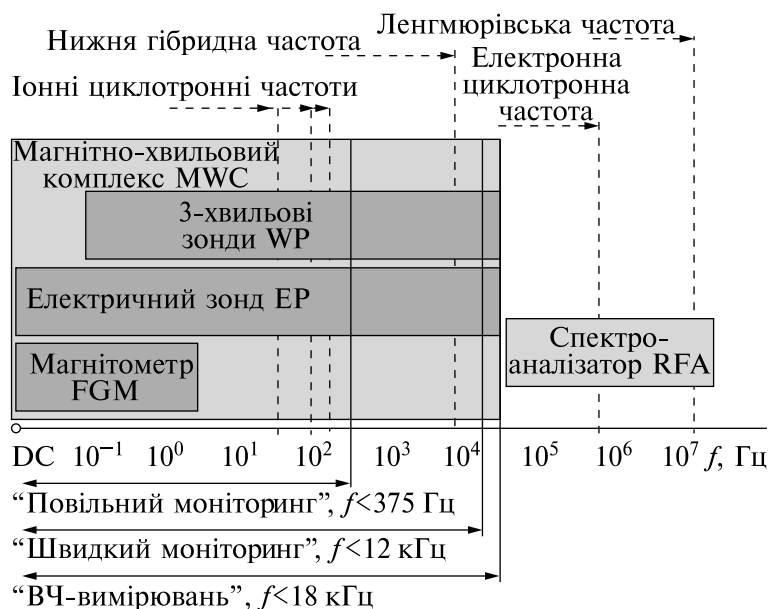


Рис. 2. Покриття частот вимірювань приладами MWC і RFA

WP для реєстрації змінного магнітного поля, електричного струму та електричного потенціалу плазми, і електричного зонда EP. При цьому частотні діапазони ферозондового магнітометра FGM (0...10 Гц) й індукційних магнітометрів у складі хвильових зондів WP (1...18500 Гц) перекриваються між собою, що забезпечує вимірювання трьох компонентів магнітного поля у загальній смузі частот 0...18500 Гц.

До складу кожного з хвильових зондів WP входить щілинний зонд Ленгмюра для вимірювання однієї складової електричного струму (1...18500 Гц) і потенціалу плазми (1...18500 Гц). Три щілинні зонди Ленгмюра в складі MWC забезпечують реєстрацію трьох складових змінного електричного струму і двох складових електричного поля. Для вимірювання третьої складової електричного поля служить електричний зонд

ЕР, встановлений на корпусі КА поза площиною розташування WP. Таким чином, у смузі частот 1...18500 Гц досягається реєстрація всіх трьох складових електричного поля і трьох складових електричного струму.

Реєстрація хвильових форм приладом MWC доповнюється вимірюваннями спектрів трьох складових електричного поля спектроаналізатором RFA в діапазоні частот 20 кГц ... 15 МГц. Робочі діапазони частот приладів MWC і RFA показано на рис. 2.

Для діагностики газодинамічних параметрів космічного середовища служить аналізатор щільності частинок АГЧ, який включає блок з двох інверсійно-магнетронних перетворювачів DN для вимірювання концентрації і температури нейтрального газу і два зонди Ленгмюра DE для вимірювання концентрації і температури теплових електронів. Частота знімання даних АГЧ становить 1...10 Гц, що забезпечує реєстрацію просторових неоднорідностей космічного середовища з роздільністю 1.5...15 км. Давачі цього приладу розміщуються в зонах, не збурених рухом КА: блок DN — безпосередньо на корпусі КА в носовій частині, блок DE винесено вперед по ходу руху на штанзі.

Детальне обґрунтування та опис приладів КНА «Іоносат-Мікро» представлено в роботі [1].

ПРОГРАМА ВИМІРЮВАНЬ

Досягнення наукових цілей проекту «Іоносат-Мікро» вимагає, з одного боку, довгострокових і безперервних спостережень, які забезпечать глобальне покриття іоносфери або її значних районів, а з іншого боку — якомога детальніших вимірювань при спільній роботі з наземними або іншими космічними засобами. Конкретні циклограми вимірювань укладатимуться як компроміс цих вимог, з урахуванням необхідності дотримання інформаційного балансу — кількість інформації, що реєструється на борту КА, та кількість інформації, що передається на Землю, повинні бути в середньому рівні, а також дотримання енергетичного балансу КА.

Інформаційний баланс. До складу КНА входить високоінформативний магнітно-хвильовий комплекс MWC з частотою дискретизації даних

до 50 кГц і відносно низькоінформативні прилади: спектроаналізатор RFA (з частотою зйому даних 1 Гц) та аналізатор щільності частинок АГЧ (1...10 Гц). Інформаційна продуктивність зазначених приладів становить:

- магнітно-хвильової MWC — до 1 Мбайт/с,
- спектроаналізатор RFA — порядку 4 кбайт/с,
- аналізатор густини частинок АГЧ — порядку 10 кбайт/с.

Дані наукових приладів передаються на Землю по радіолінії X-діапазону в обсязі до 5 Гбайт за добу. В таких умовах режими проведення вимірювань поділено на три основні групи.

1. «Повільний моніторинг» — режим неперервної реєстрації параметрів іоносфери впродовж декількох діб і більше з частотою дискретизації даних MWC 780 Гц, частотою зрізу фільтра нижніх частот в складі MWC 375 Гц, частотою знімання даних інших приладів — відповідно до швидкості їхнього спрацювання. Сумарна інформативність режиму 20...30 кбайт/с. Внаслідок обмеженого енергоресурсу КА (див. далі) режим повільного моніторингу вимушено розділяється на підрежими, що відрізняються комбінаціями одночасно працюючих приладів.

2. «Швидкий моніторинг» — режим вимірювань всім складом КНА протягом двох-трьох витків на добу. При цьому частота опитування MWC становить 25 кГц, частота зрізу фільтра нижніх частот MWC — 11.9 кГц, інформативність режиму — порядку 0.5 Мбайт/с або 2.5 Гбайт/виток. Цей режим реалізує реєстрацію хвильових форм електромагнітних збурень аж до ДНЧ-діапазону.

3. «ВЧ-вимірювання» — режим максимально детальних вимірювань всім складом КНА з тривалістю менше 1 витка. Частота опитування MWC в цьому режимі становить 50 кГц, частота зрізу фільтра нижніх частот MWC — 18.5 кГц, інформативність режиму — порядку 1 Мбайт/с, або 5 Гбайт/виток. Режим «ВЧ-вимірювань» забезпечує реєстрацію спектру іоносферних плазмових хвиль практично без проміжку між частотами зрізу магнітно-хвильового комплексу MWC і спектроаналізатора RFA (рис. 2).

Описані режими вимірювань є орієнтовними. Оскільки технологія управління КНА забезпе-

чує можливість вмикання довільних комбінацій і циклограм роботи приладів, в ході експерименту він може бути змінений.

Енергетичний баланс. Система енергозабезпечення КА виділяє на корисне навантаження до 200 Вт пікової потужності і до 28 Вт середньодобової потужності, при чому по мірі деградації сонячних батарей остання величина буде з часом зменшуватися.

Водночас енергоспоживання приладів становить:

- магнітно-хвильового комплексу MWC — до 12.5 Вт,
- спектроаналізатора RFA — від 7 до 12 Вт,
- аналізатора густини частинок АГЧ — до 6 Вт,
- системи збору наукової інформації СЗНІ — 7 Вт пікове та 5...6 Вт середнє значення.

В таких умовах реалізація режиму «повільного моніторингу» можлива тільки при умові вмикання частини приладів корисного навантаження. Конкретну циклограму роботи буде розроблено при проведенні передполітних випробувань. Режими «швидкого моніторингу» і «ВЧ-вимірювань» передбачають вмикання КНА цілком.

ЦЕНТР ОБРОБКИ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для накопичення і цільового опрацювання отриманих даних в Інституті космічних досліджень утворено Центр збору, обробки і поширення супутникових даних, програмно-апаратний компонент якого отримав найменування PROMIS (від PROCessed Measurements of Ionospheric Satellites). Створене програмне забезпечення системи PROMIS забезпечує багаторівневу обробку інформації — від завантаження вхідних даних із серверів приймальних радіостанцій у вигляді, в якому ці дані були отримані від супутника, до створення бази даних, прив'язаних до місця та часу і перетворених у загальноприйняті у фізиці іоносфери одиниці вимірювань. Для системи PROMIS розроблено перспективний вебінтерфейс, який надає користувачам потужні засо-

би пошуку та отримання інформації. Детальний опис системи PROMIS представлено у роботі [2].

ВИСНОВКИ

1. Протягом підготовки проєкту «Іоносат-Мікро» вперше в Україні здійснено повноцінну підготовку та реалізацію повного циклу наукового космічного проєкту від розроблення наукової програми та інструментарію до інтеграції з космічною платформою та створення центру оброблення наукової інформації. Запуск космічного апарата з науковим інструментарієм «Іоносат-Мікро» забезпечить не тільки виконання запланованих експериментів, а й слугуватиме тестом на спроможність України реалізувати власний науковий космічний проєкт.

2. Аналіз результатів підготовки проєкту «Іоносат-Мікро» та стану сучасних досліджень в галузі моніторингу іоносфери та космічної погоди свідчить про актуальність завдань, поставлених при ініціюванні проєкту та про зацікавленість міжнародної наукової спільноти (зокрема фахівців ЄКА) в одержанні результатів проєкту «Іоносат-Мікро».

3. Проведені дослідження в галузі динамічних процесів у навколоземній плазмі, а також створення кооперації, яка забезпечує орбітальні та наземні спостереження, відкривають можливість подальшого розвитку одного з найперспективніших напрямів досліджень в Україні — вивчення геокосмосу.

4. Перспективи використання результатів проєкту «Іоносат-Мікро» суттєвим чином пов'язані із перспективним для України масштабним завданням організації системного супутникового моніторингу загрозливих та катастрофічних явищ. Забезпечення завдань у сфері енергетичної безпеки мають високі шанси на ефективне вирішення при умові залучення даних іоносферного моніторингу.

Роботу виконано в рамках і за фінансової підтримки договорів Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Космический проект «Ионосат-Микро»*: монография. Под общ. ред. С. А. Засухи, О. П. Фёдорова. Киев: Академ-периодика, 2013. 218 с.
2. П'янкova Е. В., Лизунов Г. В., Меланченко А. Г., Протас А. Н. Информационная система сбора, обработки и распространения данных для геокосмических спутниковых проектов. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 1 (122). С. 37—47. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.037>
3. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет*. Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
4. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 555 с.
5. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Грос К., Мордвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2004. **9**, № 2. С. 130—151
6. Bullough K., Kaiser R. Strangeways H. J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.* 1985. **47**. P. 1211—1223.
7. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1—60 Hz. *Geophys. Res. Lett.* 2015. **42**. P. 5686—5693. <https://doi.org/10.1002/2015gl064595>
8. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Ann. Geophys.* 1990. **8**. P. 135—145.
9. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*. 2011. **63**, № 7. P. 853—857.
10. Rothkaehl H., Izhovkina N., Prutensky I., Pulinets S., Parrot M., Lizunov G., Blecki J., Stanislawski I. Ionospheric disturbances generated by different natural processes and by human activity in Earth plasma environment. *Ann. Geophys.* 2004. **47**, № 2/3. P. 1215—1226.
11. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.* 2005. **67**, № 8-9. P. 821—828
12. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D., Denardini C. M., Gibson S. E., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Hapgood M., Heynderickx D., Jakowski N., Kalegav V. V. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015—2025 commissioned by COSPAR and ILSW. *Adv. Space Res.* 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
13. *The Frontier of Earthquake Prediction Studies*. Ed. M. Hayakawa. Tokyo, Nihon-senmontosho-Shuppan, 2012. 794 p.

REFERENCES

1. Space Project “Ionosat-Micro”: monograph (2013). Eds S. A. Zasukha, O. P. Fedorov. K.: Academperiodic, 218 p. [in Russian].
2. Piankova O., Lizunov G., Melanchenko A., Protas O. (2020). Information system for collection, processing and distribution data of Geospace projects. *Space Science and Technology*, **26**, № 1 (122), 37—47. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.037>
3. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysics and geomagnetic effects of rocket launches*. Monograph. Kharkov: KhNU named after V. N. Karazin [In Russian].
4. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of catastrophes*. Monograph. Kharkov: KhNU named after V. N. Karazin [In Russian].
5. Yampolski Yu. M., Zalizovski A. V., Litvinenko L. N., Lizunov G. V., Groves K., Moldwin M. (2004). Magnetic field variations in Antarctica and the conjugate region (New England) stimulated by cyclone activity. *Radiophysics and Radioastronomy*, **9**, № 2, 130—151 [In Russian].
6. Bullough K., Kaiser R. Strangeways H. J. (1985). Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.*, **47**, 1211—1223.
7. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. (2015). Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1—60 Hz. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 5686—5693. <https://doi.org/10.1002/2015gl064595>
8. Parrot M. (1990). World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Annales Geophysicae*, **8**, 135—145.
9. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. (2011). The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, № 7, 853—857.
10. Rothkaehl H., Izhovkina N., Prutensky I., Pulinets S., Parrot M., Lizunov G., Blecki J., Stanislawski I. (2004). Ionospheric disturbances generated by different natural processes and by human activity in Earth plasma environment. *Ann. Geophys.*, **47**, № 2/3. P. 1215—1226.

11. Rothkaehl H., Parrot M. (2005). Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.*, **67**, 8-9, 821–828.
12. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D., Denardini C. M., Gibson S. E., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Naggood M., Heynderickx D., Jakowski N., Kalegaev V. V. (2015). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILSW. *Adv. Space Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
13. *The Frontier of Earthquake Prediction Studies*. Hayakawa M. (Ed.) (2012). Tokyo, Nihon-senmontosho-Shuppan.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2022

Після доопрацювання 08.09.2022

Прийнято до друку 17.11.2022

Received 07.09.2022

Revised 08.09.2022

Accepted 17.11.2022

G. V. Lizunov, Head of Laboratory, Ph. D. in Phys & Math.

E-mail: georgii.lizunov@gmail.com

V. Korepanov, Deputy Director, Dr. Sci. in Tech

A. A. Lukenyuk, Director, Dr. Sci. in Tech

O. V. Piankova, Researcher

O. P. Fedorov, Director, Dr. Sci. in Phys & Math, Correspondent Member of NAS of Ukraine

¹ Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine

40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

² Lviv Centre of Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

and State Space Agency of Ukraine,

5a Naukova Str., Lviv, 79060 Ukraine

SPACE PROJECT “IONOSAT – MICRO”: READINESS FOR IMPLEMENTATION

Ionosat-Micro is a fundamental scientific project devoted to the study of near-Earth space. The project is conceived as an answer to the challenges posed by the modern development of knowledge about Space Weather and the ionospheric responses to surface energy sources (such as weather phenomena, power lines operation, earthquakes and processes of their preparation, powerful technogenic hazards, etc.). Furthermore, the project Ionosat-Micro is a logical continuation and addition to previous ionospheric missions, such as Dynamics Explorer 2 (launched in 1982), Freja (1992), DEMETER (2004), Swarm (2013), and CSES (2018). The project is being prepared with the support and within the framework of The National Space Program of Ukraine and The Program of the National Academy of Sciences of Ukraine for Scientific Space Research. The article outlines the scientific principles of the project, describes the parameters of the space system being created, and the composition and operation logic of the scientific equipment. The project is to be implemented on board the satellite platform Microsat-M, which has been designed by Yuzhnoye State Design Office to conduct scientific and technological experiments. The planned satellite orbit is circular sun-synchronous with an inclination of 98 degrees and altitude of 600–700 km (orbital parameters, method and date of the launch are being clarified). Ionosat-Micro payload includes a set of scientific instruments designed to register the global structure and physical parameters of the neutral atmosphere and plasma, the structure and parameters of the space current systems and geomagnetic field, as well as the spectra and wave-forms of ULF-ELF-VLF electromagnetic perturbations. The Center for Collection, Processing, and Distribution of Measurement Data was created for the purpose of accumulating and targeted data processing.

Keywords: ionosphere, solar-terrestrial links, space weather, scientific instrumentation