



ЗАЛІЗОВСЬКИЙ
Андрій Владиславович —
доктор фізико-математичних
наук, завідувач відділу
радіофізики геокосмосу
Радіоастрономічного інституту
НАН України

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ГЕОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УКРАЇНИ В АНТАРКТИЦІ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 29 червня 2022 року

У доповіді наведено стислий огляд результатів досліджень за актуальним сьогодні напрямом фізики і астрономії — вивченням навколосемного космічного простору. Наголошено, що подальшому розвитку геокосмічних досліджень перешкоджає складність обслуговування вимірвальних комплексів в Антарктиці, особливо під час війни, що потребує запровадження нових організаційних форм співробітництва Національної академії наук України з Державною установою «Національний антарктичний науковий центр» МОН України, а також поглиблення співпраці із закордонними партнерами.

Шановний пане президенте Академії!

Шановні члени Президії!

Геокосмосом прийнято вважати ту частину космічного простору, в якій на властивості середовища впливає наявність планети Земля. Структурними складовими геокосмосу знизу є іоносфера, а зовні — магнітосфера. Її межі простягаються від висот близько 50 км приблизно до орбіти Місяця.

Від початку космічної ери людство інтенсивно використовує геокосмічний простір. На сьогодні величезна кількість штучних супутникових систем забезпечують нашу цивілізацію послугами зв'язку, глобальної навігації, дистанційного зондування Землі, прогнозування погоди тощо. Саме тому дослідження, моніторинг та прогнозування виникнення й перебігу різних процесів у геокосмосі мають важливе практичне значення для багатьох галузей життєдіяльності суспільства.

Більшість експериментальних засобів для дослідження сонячно-земних зв'язків і процесів в іоносфері та магнітосфері Землі зосереджено у полярних регіонах. Саме тут відбувається взаємодія потоків заряджених частинок від Сонця — сонячного вітру з магнітним полем та верхніми шарами атмосфери Землі. Результатом такої взаємодії є деформація магнітосфери, турбулізація іоносфери, збудження широкого спектра плазмо-

вих неоднорідностей, виникнення інтенсивних варіацій електромагнітних полів і, як наслідок, формування збурень космічної погоди у планетарному масштабі.

Україна почала вивчати геокосмос у високих широтах Південної півкулі з 1996 р., коли Велика Британія передала під юрисдикцію нашої держави свою антарктичну станцію «Фарадей», розташовану на острові Галіндез у районі Антарктичного півострова поблизу протоки Дрейка.

Антарктичний півострів, де знаходиться українська антарктична станція «Академік Вернадський» (УАС), є одним з найзручніших місць на планеті для досліджень впливу процесів у нейтральній атмосфері на стан навколосемної плазми. Цьому є кілька причин. По-перше, тут спостерігається винятково висока циклонічна активність, наслідком якої є інтенсивне енерговиділення у тропосфері і генерація внутрішніх атмосферних хвиль. Такі хвилі з малим поглинанням поширюються на висоти геокосмосу і транспортують енергію збурень від нейтрального газу до іоносферної плазми. Квазіперіодичні коливання щільності, тиску і температури нейтралів приводять до модуляції електронної концентрації, провідностей іоносфери, струмових систем, що, у свою чергу, стимулює варіації магнітного поля. Другою визначною особливістю є вплив найбільшої на планеті Південно-Атлантичної магнітної аномалії. Внаслідок її впливу нахилення геомагнітного поля низьке, що значно полегшує передачу енергії від нейтральної до іонізованої компоненти атмосфери. Саме з цим пов'язана іоносферна аномалія моря Ведделла з центром над нашою станцією, яка проявляється в тому, що антарктичним літом електронна концентрація і повний електронний вміст над півостровом максимальні опівночі і мінімальні опівдні. Такого добового ходу немає більше ніде на планеті. Це також демонструє, як динаміка нейтральної атмосфери впливає на основні характеристики іоносфери. По-третє, в регіоні Антарктичного півострова щороку формується озонова діра. Дослідження динаміки цього унікального атмосферного явища дозволяють

вивчати особливості поширення хвиль нейтральної компоненти вгору крізь стратосферу і мезосферу. Отже, збіг цих факторів зумовлює унікальність регіону для дослідження впливу енергії, що вивільняється знизу, у нейтральній атмосфері, на стан навколосемного космосу. Це й дало поштовх до активних досліджень взаємодії атмосферної і космічної погодних систем, що являє собою оригінальну наукову проблему.

Ще однією особливістю розташування станції є її близькість до умов магнітного сполучення з одним з найбільш промислово розвинених регіонів земної кулі — східним узбережжям США. Це дозволяє синхронно досліджувати процеси, що поширюються вздовж силових ліній магнітного поля, а саме, магнітогідродинамічні хвилі і резонансні коливання уздовж силової трубки магнітного поля. Відсутність штучних електромагнітних джерел випромінювання в Антарктиці створює унікальні можливості для моніторингу трьох глобальних електромагнітних резонаторів — магнітосферного (МР), іоносферного альфвенівського (ІАР) і шуманівського резонатора Земля—іоносфера (ШР). Ці дослідження ведуться в рамках оригінальної концепції використання глобальних електромагнітних резонаторів як індикаторів збурень космічної погоди. Низький рівень локальних завад дозволяє також проводити дослідження електромагнітного клімату Землі і відстежувати поширення «електромагнітного смогу» техногенного походження з промислово розвинених регіонів Північної півкулі.

Моніторинг і аналіз фізичних властивостей верхньої атмосфери та геомагнітного поля Землі були одними з основних напрямів досліджень на цій антарктичній станції від часу її заснування британцями. Саме через це станцію символічно було названо ім'ям основоположника вчення про електромагнітне поле Майкла Фарадея. Українські вчені продовжили, розвинули й узагальнили цей напрям.

На сьогодні можна виокремити такі основні наукові проблеми, які вивчають за цим напрямом в Антарктиці:

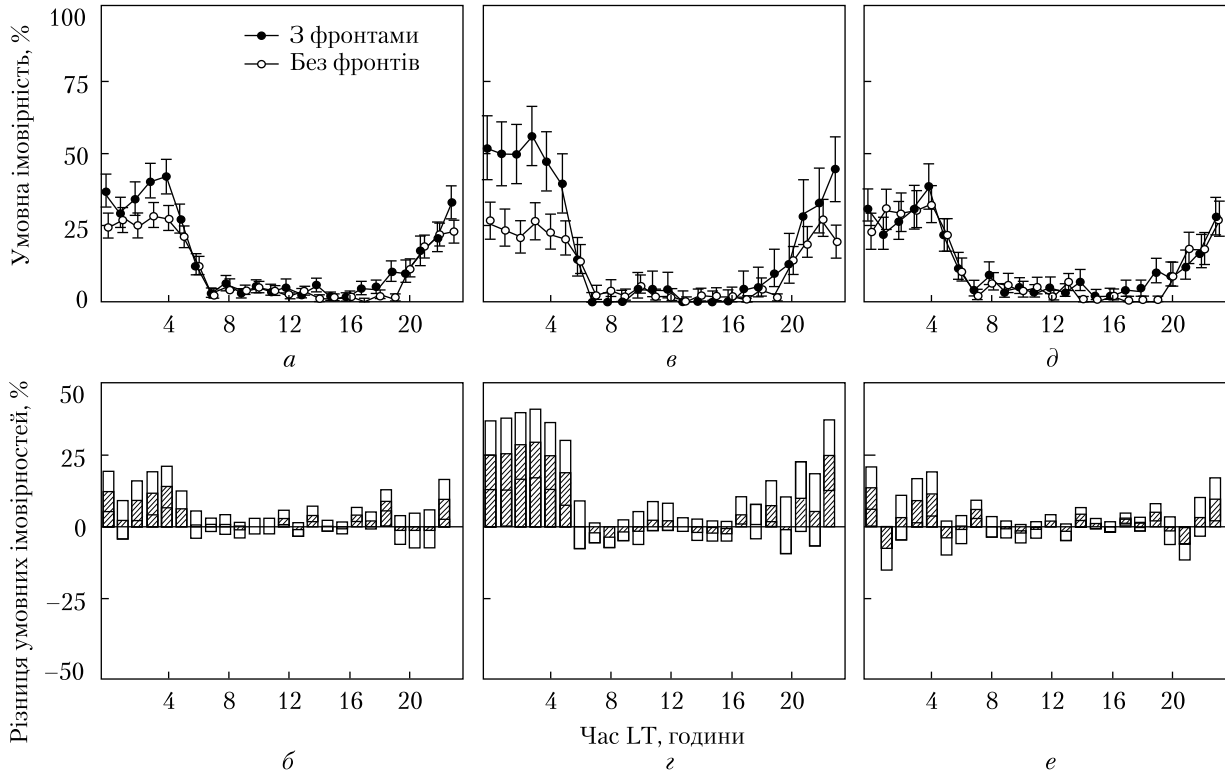


Рис. 1. Добові варіації умовних ймовірностей спостереження F-розсіювання за наявності й відсутності атмосферних фронтів (*a, в, д*) та різниць цих умовних ймовірностей (*б, г, е*) для днів з 11 вересня по 5 жовтня у 1995–2004 рр.; *a, б* – для всіх днів інтервалу; *в, г* – для днів, що характеризувалися величиною загального вмісту озону, меншою за 180 ОД; *д, е* – для днів, що характеризувалися величиною загального вмісту озону, більшою за 180 ОД. Видно, що за низького рівня загального вмісту озону ймовірність появи іоносферних неоднорідностей збільшується над атмосферними фронтами з 23-ї до 5-ї години за місцевим часом (*в, г*), тоді як за високого рівня озону вона не змінюється (*д, е*)

- взаємодія атмосферної і космічної погодних систем;
- іоносферні неоднорідності природного і штучного походження;
- глобальні електромагнітні резонатори і світова грозова активність;
- електромагнітний клімат Землі та вплив на нього техногенного забруднення;
- нові методи дистанційного зондування геокосмосу.

На станції у моніторинговому режимі реєструють регулярні і спорадичні варіації просторово-часових властивостей іоносфери як над Антарктичним півостровом, так і на великих відстанях від нього. Стан електромагнітного клімату планети контролюється безперервною

реєстрацією природних електромагнітних випромінювань і радіосигналів штучного походження, які поширюються на глобальні відстані.

Що стосується вивчення взаємодії атмосферної і космічної погодних систем, то накопичені довгі безперервні ряди метеорологічних, озонових, іоносферних та геомагнітних даних дозволили детально дослідити і з'ясувати закономірності впливу енергії, що виділяється в нижній атмосфері (урагани, торнадо, циклони, атмосферні фронти тощо), на стан геокосмосу. Вплив атмосферної погоди на стан геокосмосу відбувається внаслідок збудження і поширення атмосферних гравітаційних хвиль, які генеруються в нижній атмосфері потужними погодними фронтами, землетрусами, вулканіч-

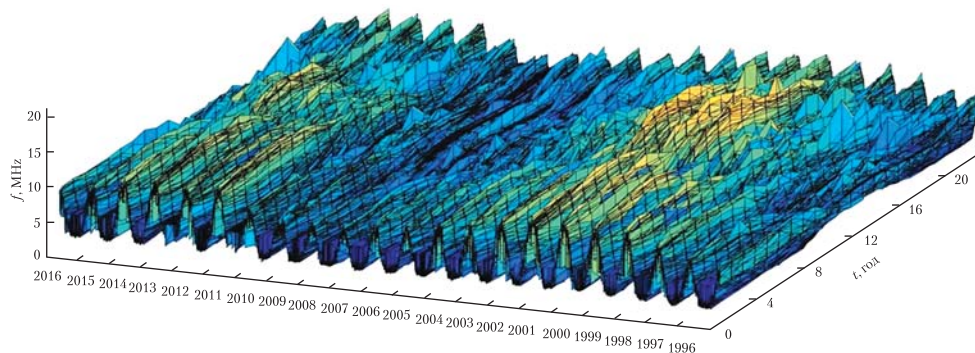


Рис. 2. Варіації критичних частот за даними вертикального зондування іоносфери на УАС за період 1996–2016 рр. Горизонтальні осі – роки, місцевий час; вертикальна вісь – критична частота іоносфери foF2 (МГц)

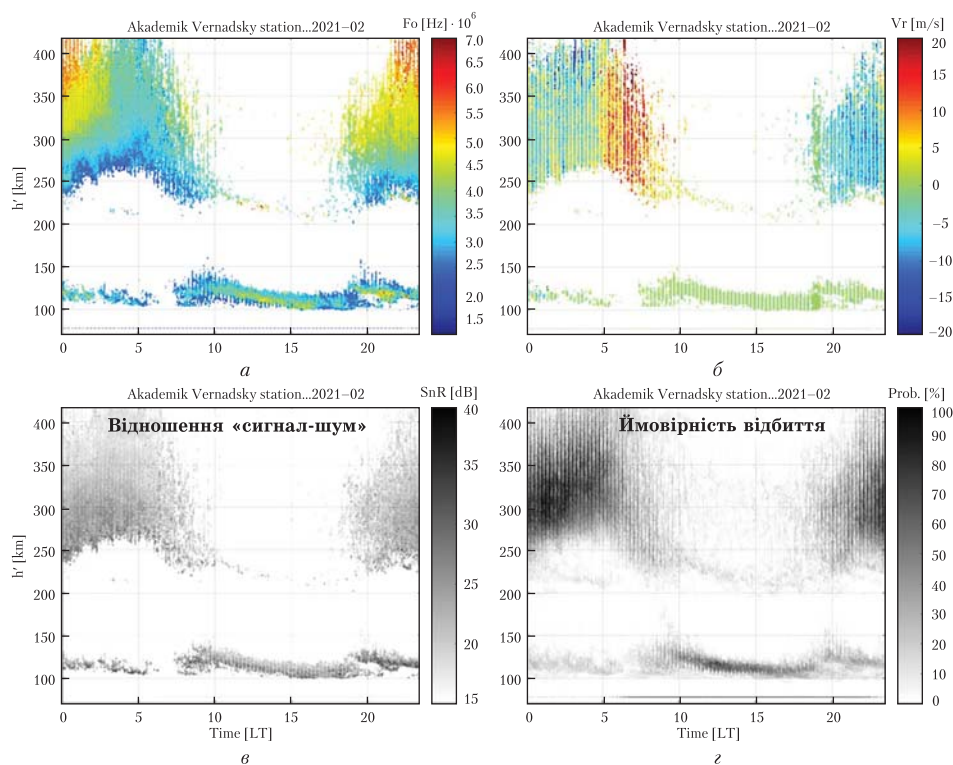


Рис. 3. Висотно-часові діаграми іоносферних параметрів: *a* – плазмова частота (МГц); *б* – швидкість вертикального руху плазмових шарів (м/с); *в* – відношення сигнал/шум (дБ); *г* – ймовірність відбиття сигналів (%)

ними виверженнями і можуть поширюватися швидко і без суттєвих втрат на висоти верхньої іоносфери.

Так, було продемонстровано, що погода у тропосфері впливає на збурення іоносфери. Цей вплив проявляється у зростанні ймовірності утворення інтенсивних плазмових неоднорідностей над потужними циклонами і атмосферними фронтами. Найбільш ефективно тропосферно-іоносферна взаємодія відбувається антарктичною зимою, а також навесні, всередині озonoвої діри (рис. 1).

Накопичені довгі ряди даних дозволяють досліджувати кліматичні зміни, що відбуваються у геокосмосі над Антарктичним півостровом. Як приклад на рис. 2 показано варіації критичних частот в іоносфері за багаторічними даними вертикального зондування на УАС, що охоплюють майже два сонячні цикли; видно збільшення критичних частот іоносфери під час максимумів сонячної активності.

Для вирішення численних оригінальних завдань за напрямом геокосмічних досліджень станцію «Академік Вернадський» було облад-

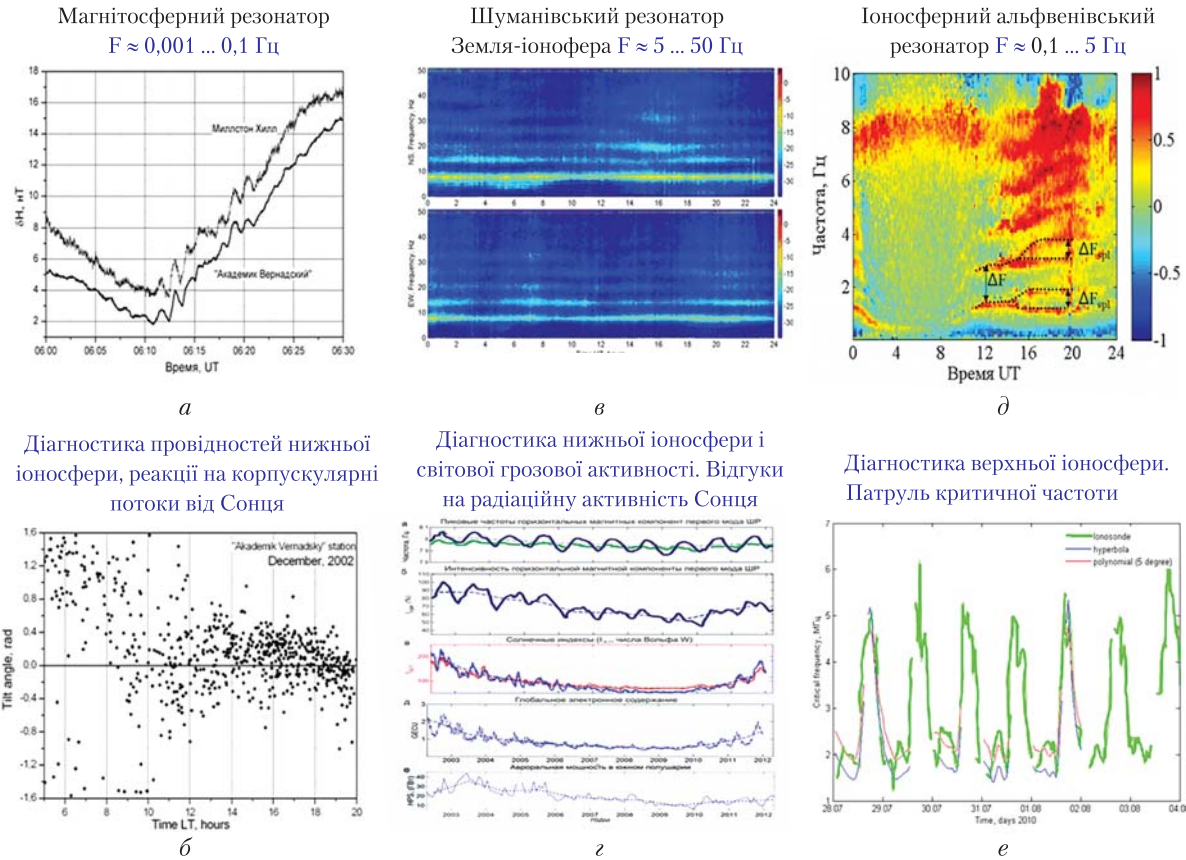
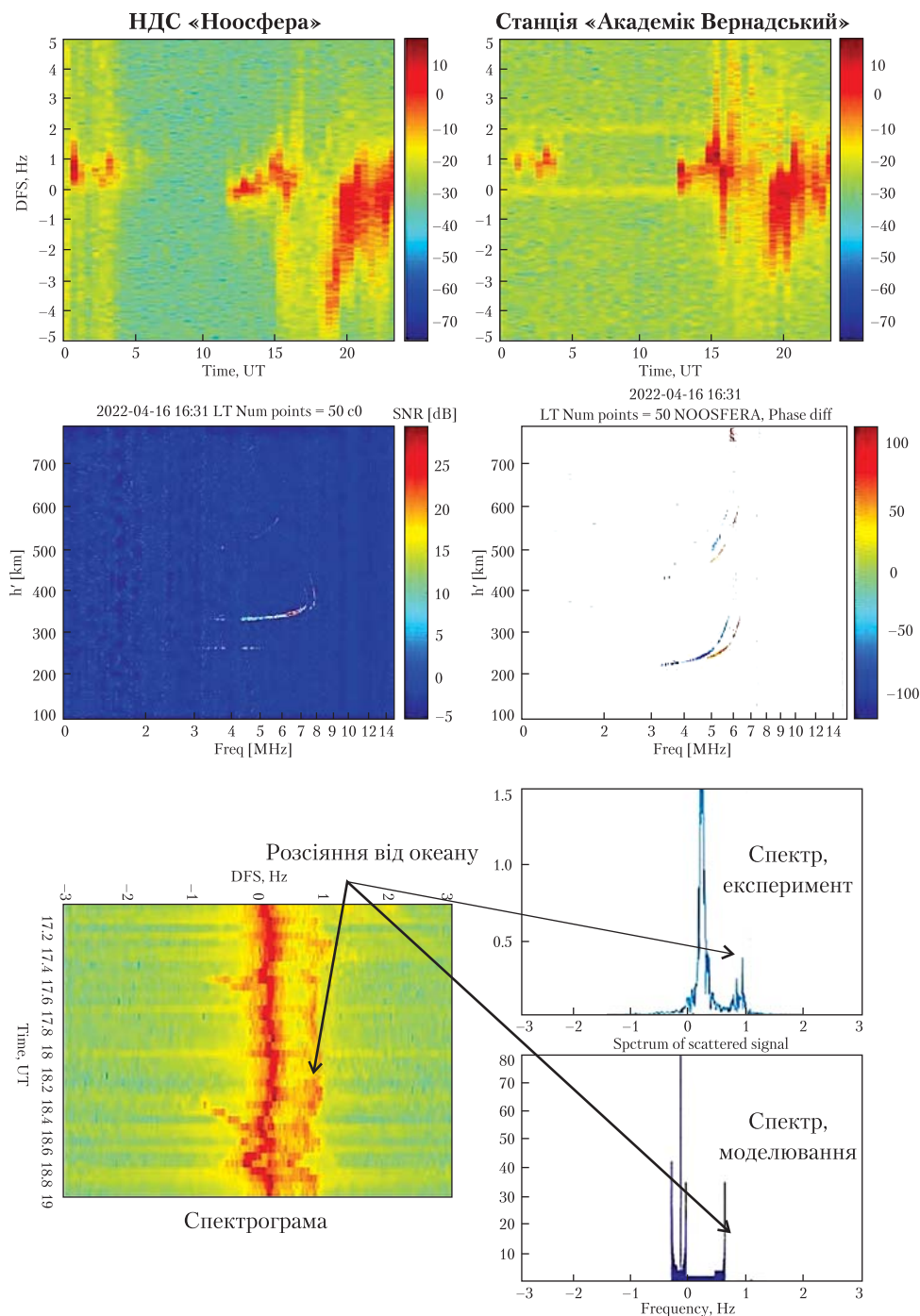


Рис. 4. Ілюстрація використання сигналів глобальних електромагнітних резонаторів як індикаторів космічної погоди. **Альфвенівський магнітосферний резонатор:** а – варіації Н-компоненти магнітного поля на УАС та в Мілстоун Хіллі (магнітосполученій точці) демонструють високий рівень кореляції; б – добові варіації поляризації резонансних пульсацій класу Pc4 на УАС у грудні 2002 р. **Шуманівський резонатор:** в – добові спектрограми варіацій горизонтальних компонент магнітного поля в діапазоні частот 0–50 Гц (проекції «південь–північ» і «захід–схід»); г – порівняння варіацій основних параметрів резонатора в повному сонячному циклі 2002–2012 рр., згори вниз: частота першого спектрального максимуму, інтенсивність першого спектрального максимуму, число Вольфа, глобальний електронний вміст, потужність висипань заряджених частинок в авроральній області Південної півкулі. **Іоносферний альфвенівський резонатор:** д – добова спектрограма горизонтальної компоненти магнітного поля в діапазоні частот 0–10 Гц; е – приклад відновлення варіацій критичних частот іоносфери foF2 за частотним розносом між спектральними максимумами IAP

нано сучасними науковими вимірювальними установками українського виробництва у широкому діапазоні частот, від ультранизких частот порядку мілігерців ($\sim 10^{-3}$ Гц) до надвисоких порядку гігагерців ($\sim 10^9$ Гц). Зокрема, у 2017 р. на станції було встановлено доплерівський іонозонд, розроблений і виготовлений у рамках кооперації між Радіоастрономічним інститутом НАН України і Міжнародним центром теоретичної фізики імені Абдуса Салама

(ІСТР, Італія). На рис. 3 показано усереднені за місяць (лютий 2021 р.) висотно-часові діаграми іоносферних параметрів, таких як плазмова частота, відношення сигнал/шум, вертикальна швидкість руху шарів, а також ймовірність відбиття сигналів. Зазначимо, що вимірювання вертикальної швидкості руху плазми та відношення сигнал/шум були неможливі за допомогою «старого» іонозонда IPS-42, який використовується на станції з 1982 р.



Зондування іоносфери сигналами станції служби точного часу РВМ (Європа). Добові спектрограми сигналів на частоті 9996 кГц, зареєстровані 17.04.2022 на борту НДС «Ноосфера» та на УАС «Академік Вернадський»

Приклади похилої іонограми за сигналами доплерівського іонозонта на УАС, зареєстрованої на борту НДС «Ноосфера», і вертикальної іонограми, отриманої в той самий час на УАС

Приклади реєстрації і моделювання спектра сигналу на частоті 10577 кГц, що випромінюється з УАС, розсіюється схвильованою морською поверхнею і реєструється на борту НДС «Ноосфера»

Рис. 5. Ілюстрації перших результатів, отриманих у рейсі НДС «Ноосфера» до Антарктики у січні—квітні 2022 р.

За останнє десятиліття за нашим науковим напрямом було отримано досить багато вагомих результатів, серед яких варто назвати такі:

- відтворення добових, сезонних і річних властивостей атмосферних гравітаційних хвиль та рухомих іоносферних збурень, а також ідентифікація джерел їх збудження;

- створення методу частотно-часової селекції радіосигналів на наддовгих радіолініях, що дало змогу контролювати з Антарктики динаміку іоносферних неоднорідностей навіть у північній авроральній області (Арктика);

- підтвердження можливості штучного живлення глобальних хвилеводів за допомогою електромагнітного випромінювання надпотужних нагрівних стендів;

- розроблення фізичної моделі переносу потужних атмосферних збурень на іоносферні висоти і до магнітосполученого регіону;

- демонстрація можливості використання трьох глобальних електромагнітних резонаторів як індикаторів стану геокосмосу (рис. 4).

Більшість цих результатів отримано у плідній кооперації з вченими Сполучених Штатів Америки, Норвегії, Польщі, Японії, Великої Британії, Італії, Угорщини та інших країн. Співробітники Радіоастрономічного інституту НАН України виконували роботи в рамках Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці, розрахованої на 2011–2023 рр., а також за фінансової підтримки в межах відомчої та конкурсної тематик НАН України.

З появою в Україні науково-дослідного судна (НДС) «Ноосфера» відкриваються нові можливості для дослідження геокосмосу. Якщо на борту судна створити постійно діючу радіофізичну обсерваторію, це дасть змогу проводити роботи за такими напрямками:

- зондування іоносфери сигналами станцій служби точного часу (разом з вимірюваннями на станції «Академік Вернадський»);

- двопозиційне синхронне вертикальне і похиле зондування іоносфери за сигналами активних іонозондів, розташованих в Україні

й на станції «Академік Вернадський», і пасивного іонозонда на борту НДС «Ноосфера»;

- дослідження розсіювання радіохвиль поверхню океану (радіоокеанографічні дослідження);

- локація грозових розрядів та вивчення нижньої іоносфери за сигналами грозових розрядів.

Ілюстрації деяких перших результатів, отриманих під час першого рейсу НДС «Ноосфера» до Антарктики у січні–квітні 2022 р., наведено на рис. 5.

Перспективи продовження і розвитку досліджень геокосмосу в Антарктиці та Арктиці означено в національних наукових програмах і проектах, а також договорах про наукову співпрацю, насамперед з колегами з Польщі та США. За договором про співпрацю між Радіоастрономічним інститутом НАН України та Центром космічних досліджень Польської академії наук уже виконуються і плануються на майбутнє спільні роботи з оперативного використання іоносферних даних у роботі центрів космічної погоди для потреб цивільної авіації. Плідне багаторічне співробітництво дає сторонам підстави ініціювати створення спільної науково-дослідної лабораторії з геокосмічних досліджень.

Отже, дослідження геокосмосу на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» є актуальними і важливими як з наукового погляду, так і з точки зору прикладного застосування. Тому вивчення навколосемного космічного простору слід продовжувати і розвивати. Водночас є також і проблеми. Складність обслуговування вимірювальних комплексів в Антарктиці, особливо під час війни, потребує застосування нових організаційних форм співробітництва НАН України як з ДУ «Національний антарктичний науковий центр» МОН України, так і із закордонними партнерами.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Andriy V. Zalizovski

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-0126>

STATUS AND PROSPECTS OF GEOSPACE RESEARCH OF UKRAINE IN ANTARCTICA

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 29, 2022

The report provides a brief overview of the results of research in today's relevant field of physics and astronomy – the study of near-Earth space. It was emphasized that the further development of geospatial research is connected with the complexity of maintaining measuring complexes in the Antarctic, especially during the war, which requires the introduction of new organizational forms of cooperation between the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Institution “National Antarctic Scientific Center” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, as well as deepening the cooperation with foreign partners.