

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем  
Кафедра космічної радіофізики

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**



**Леонід ЧОРНОГОР**

“ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**Кваліфікаційна робота  
магістра**

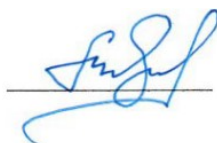
на тему: ЕФЕКТИ ІОНОСФЕРНОЇ БУРІ  
23–24 КВІТНЯ 2023 р. НАД КИТАЄМ

Виконав: студент II курсу магістратури,  
групи РР-66 спеціальності 105 Прикладна фізика та  
наноматеріали, освітньо-професійна програма  
«Радіофізика і електроніка»



**Ге ЦЗЯВЕЙ**

Керівник  
доктор фіз.-мат. наук,  
професор



**Леонід ЧОРНОГОР**

2024 рік

## Анотація

Ге Цзявей. Ефекти іоносферної бурі 23 – 24 квітня 2023 року над Китаєм. Кваліфікаційна робота магістра. Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2024, 7 рис., 32 сторінки, 29 посилань.

Метою роботи є викладення результатів спостережень методом багаточастотного багатотрасового похилого ВЧ радіозондування іоносферних збурень протягом геокосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. Проведено аналіз геокосмічної бурі та її складових – магнітної та іоносферної бур 23–24 квітня 2023 р. Встановлено, що бурі були рекурентними. Помірна геокосмічна буря супроводжувалася надсильними (superstrong) магнітними бурями, а також severe та strong іоносферними бурями. Обидві іоносферні бурі були негативними (індекс INIS становив 6.6 та 4.0). За допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлено значні збурення характеристик радіохвиль у діапазоні частот 5–10 МГц та параметрів іоносфери на висотах ~130–260 км. 22 та 23 квітня 2023 р. не лише суттєво збурювалися параметри регулярної іоносфери (концентрація електронів зменшувалась у 2.5–4.6 рази), але й значно збільшилася хвильова активність у магнітному полі, атмосфері та іоносфері, особливо в діапазоні періодів 100–120 хв. Довготривалі (~100–120 хв) квазіперіодичні процеси в іоносфері призводили до зміщення висоти відбиття радіохвиль на 30–130 км із середньою швидкістю ~10–60 м/с залежно від радіотраси. Короткочасні (~10 хв) зміщення області відбиття на 30–70 км відбувалися зі швидкістю 50–100 м/с. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів змінювалася від 1.6–3.5% до 29–39% для періоду 8–15 хв та 40 хв відповідно.

*Ключові слова:* іоносферна буря, доплерівське зміщення частоти, амплітуда сигналу, квазіперіодичні варіації, багаточастотне похиле зондування

## Abstract

He Jiawei, Ionosphere storm effects on April 23–24, 2023 over China, Master Thesis, Department of Space Radio Physics, School of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Systems, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2024, 32 Pages, 7 Figures, 29 References.

The objective of this study is to present the findings from observations conducted using the multi-frequency, multi-track inclined HF radio sounding method to investigate ionospheric disturbances during the geospace storm on April 23–24, 2023. An analysis of the geospace storm and its components—magnetic and ionospheric storms—was performed for the same period. It was determined that the storms were recurrent. The moderate geospace storm was accompanied by extremely intense magnetic storms, as well as severe and strong ionospheric storms. Both ionospheric storms were negative, with INIS indices of 6.6 and 4.0, respectively. Utilizing the multi-frequency, multi-track inclined ionospheric sounding complex, significant disturbances were detected in the characteristics of radio waves within the 5–10 MHz frequency range and ionospheric parameters at altitudes of 130–260 km. On April 22 and 23, 2023, not only were the parameters of the regular ionosphere significantly disrupted (with electron concentration decreasing by 2.5–4.6 times), but there was also a notable increase in wave activity in the magnetic field, atmosphere, and ionosphere, particularly within the 100–120 minute period range. Long-term (100–120 minute) quasi-periodic processes in the ionosphere resulted in shifts in the height of radio wave reflection by 30–130 km, with an average speed of 10–60 m/s, depending on the radio path. Short-term (10 minute) shifts in the reflection area by 30–70 km occurred at speeds of 50–100 m/s. The relative amplitude of electron concentration disturbances varied from 1.6–3.5% to 29–39% for periods of 8–15 minutes and 40 minutes, respectively.

**Keywords:** ionospheric storm, Doppler frequency shift, signal amplitude, quasi-periodic variations, multi-frequency oblique sounding

## ЗМІСТ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ                                                              | 5  |
| ВСТУП                                                                                  | 6  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД                                                            | 7  |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕНЬ                                                  | 9  |
| РОЗДІЛ 3. СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ                                                        | 13 |
| РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЕФЕКТІВ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ                                             | 16 |
| 4.1. Аналіз іоносферної бурі                                                           | 16 |
| 4.2. Аналіз магнітної бурі                                                             | 20 |
| 4.3. Результати багаточастотного багатотрасового похилого<br>радіозондування іоносфери | 23 |
| ВИСНОВКИ                                                                               | 27 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                            | 29 |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

UT – всесвітній час

ДЗЧ– доплерівське зміщення частоти,

ДС– доплерівський спектр

## Вступ

Потужні сонячні бурі на нашій планеті викликають інтенсивні збурення всіх геосфер. Ці збурення суттєво впливають на функціонування систем космічного та наземного базування. З ладу виходить електроніка космічних апаратів, недопустимо опромінюються космонавти, гальмуються та навіть падають низькоорбітальні супутники. На землі пошкоджуються енергосистеми, лінії комунікацій.

*Актуальність.* Геокосмічні бурі супроводжуються іоносферними бурями. Остання призводять до порушення або навіть припинення комунікації за допомогою іоносферного радіоканалу. Найбільше страждають радіолінії декаметрового діапазону. З цієї причини дослідження особливостей поширення радіохвиль декаметрового діапазону під час іоносферних бур є актуальною задачею радіофізики.

*Метою* кваліфікаційної роботи є викладення результатів спостережень методом багаточастотного багатотрасового похилого ВЧ радіозондування іоносферних збурень протягом геокосмічної бурі 23 – 24 квітня 2023 року.

*Об'єкт дослідження* – збурена над Китаєм іоносфера впродовж 23 – 24 квітня 2023 року.

*Предмет дослідження* – характеристики радіохвиль декаметрового діапазону, що поширюються у збуреній іоносфері.

## Розділ 1. Аналітичний огляд

Вивчення та прогнозування стану космічної погоди – найважливіша міждисциплінарна та прикладна проблема [1]. Основна причина варіацій космічної погоди – сонячні бурі та їх наслідок – геокосмічні бурі [2–9].

Геокосмічна буря – синергетично взаємодіючі бурі у магнітному полі (магнітна буря), іоносфері (іоносферна буря), атмосфері (атмосферна буря), та електричному полі атмосферно-іоносферно-магнітосферного походження (електрична буря) (див., наприклад, [4, 8]).

Прояви геокосмічних бур, які за традицією, що склалася, називають магнітними бурями, досліджують досить давно (див., наприклад, [10, 12, 13]). Магнітні та іоносферні бурі останніх років описані в цитованих нижче роботах.

У низці робіт [13, 14] описані ефекти найсильнішої в 24-му циклі сонячної активності бурі в магнітному полі та іоносфері, що сталася у першій декаді вересня 2017 р.

У роботі [15] описані прояви слабкої геокосмічної бурі (для магнітної бурі  $D_{stmin} = -65$  нТл) 3–4 лютого 2022 у термосфері. Виявлено помітні збурення температури термосфери. Стверджується, що навіть слабка буря може призвести до суттєвого збільшення густини в термосфері, а за нашою термінологією до дуже сильної атмосферної бурі.

У роботі [16], використовуючи 122 магнітні бурі за період 2010–2019 рр., намагалися відповісти на запитання: чи можна передбачити обурення магнітного поля за допомогою спостережень на наземних магнітометрах? Виявилось, що для середніх широт відповідь позитивна.

Автори [17–19] обговорюють взаємозв'язок атмосферних та іоносферних бур з магнітними бурями.

Вивчення всієї різноманітності фізичних ефектів, що супроводжують геокосмічні бурі, як і раніше, залишається актуальним завданням. Причин цього кілька. По-перше, кожна буря, крім загальних закономірностей, має індивідуальні особливості. По-друге, прояви геокосмічних бур залежать від

специфіки сонячної бурі, положення у циклі сонячної активності, пори року, доби, географічних координат місця спостереження. По-третє, прояви геокосмічних бур залежать від застосовуваного засобу діагностики обурень, що виникають у різних геооболонках і геофізичних полях.

Для дослідження збурень магнітного поля зручною є система магнітометрів, об'єднана в мережу Intermagnet [[https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1/GINForms2](https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2)]. Іоносферні збурення реєструються за допомогою Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) [<https://cddis.nasa.gov/DataandDerivedProducts/GNSS>]. Ефективною є мережа іонозондів (GIRO). До найбільш інформативної відноситься мережа радарів некогерентного розсіяння [6].

Важливу інформацію про процеси в іоносфері під час геокосмічних бур дає похиле зондування іоносфери [22]. Крім того, при цьому є можливість дослідити не тільки варіації параметрів іоносфери, але і характеристик ВЧ радіохвиль.

## Розділ 2. Методи та засоби досліджень

Спостереження за іоносферними ефектами геокоосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. здійснювалися за допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери. Цей комплекс описаний в роботах [23]. Він успішно використовувався у дослідженнях іоносферних бур [4, 5, 8, 9], іоносферних ефектів сонячних затемнень, падінь великих космічних тіл, землетрусів [25] та тайфунів [26, 27].

Комплекс розміщений на території Харбінського інженерного університету (КНР) (географічні координати: 45.78°N, 126.68°E). З його допомогою здійснюється безперервний моніторинг стану іоносфери та іоносферного каналу радіозв'язку на 13 радіотрасах. Використовується радіовипромінювання мовних та службових радіостанцій, розміщених у КНР, Республіці Корея, Російської Федерації та Японії в діапазоні частот 5–10 МГц (рис. 2.1). Параметри радіотрас наведено у табл. 2.1. Довжина радіотрас складає 1–2 тис. км. Прийом та обробка радіосигналів проводиться на території Харбінського інженерного університету. Для кожної радіотраси вимірюється доплерівське зміщення частоти (ДЗЧ) і амплітуда сигналу. Роздільна здатність за часом становить 7.5 с. Застосування авторегресійного аналізу [28] для спектрального оцінювання дозволило досягти роздільної здатності за частотою 0.02 Гц. Для кожної радіотраси будувалися часові залежності доплерівських спектрів (ДС), що підлягали подальшому аналізу. Часові залежності ДЗЧ основної, найбільш потужної моди сигналу  $f_D(t)$  і амплітуди сигналу  $A(t)$ , піддавалися вторинній обробці з метою отримання трендів  $\overline{f_D}(t)$  та амплітуди сигналу  $\overline{A}(t)$ , флуктуацій  $\delta f_D(t) = f_D(t) - \overline{f_D}(t)$ ,  $\delta A(t) = A(t) - \overline{A}(t)$ , а також спектрів в діапазоні періодів 1–120 хв. Для оцінки спектрів використовувався системний спектральний аналіз [30].

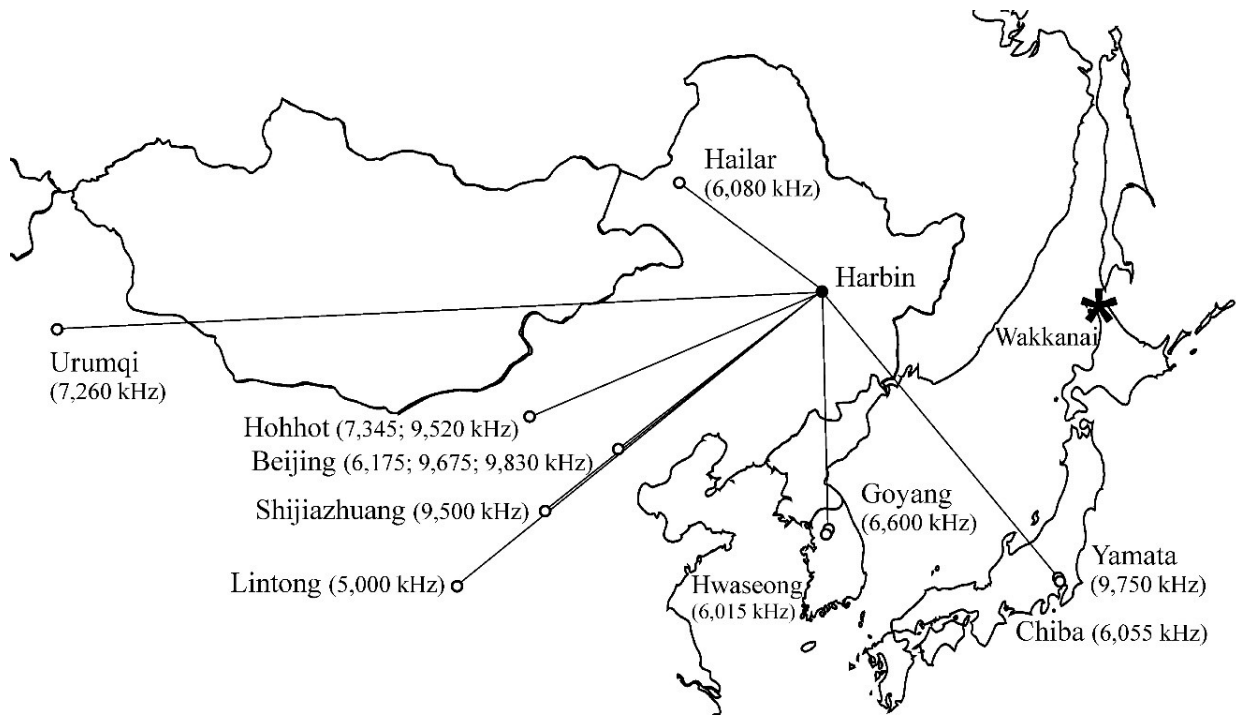


Рис.2.1. Схематичне представлення шляхів розповсюдження за великим колом між системою приймачів у місті Харбін та передавачами, які використовуються для моніторингу динамічних процесів в іоносфері.

Для оцінки загального стану іоносфери використовувався найближчий іонозонд, розміщений у Японії поблизу р. Wakkanai, URSI-код WK546 (географічні координати:  $45.16^{\circ}\text{N}$ ,  $141.75^{\circ}\text{E}$ ) [URL:[wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionosonde\\_Map\\_E.html](http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionosonde_Map_E.html)].

Для загального контролю над збуреністю геомагнітного поля використовувалися станції мережі Intermagnet, наведені у табл. 2.2 [[https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1/GINForms2](https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2)]. Роздільна здатність за часом становить 1 хв, а по амплітуді – 1 нТл.

Таблиця 2.1 Частоти передавача, розташування, відстань до Харбіна та координати середини шляху (отримано з <https://fmscan.org/index.php>)

| Частота<br>(кГц) | Широта /<br>Довгота  | Розташування<br>(країна)   | Відстань<br>до Харбіна<br>(км) | Середина шляху<br>Широта/довгота |
|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 5,000            | 34.95°N/<br>109.56°E | Lintong/Pucheng<br>(China) | 1,875                          | 40.37°N/<br>118.12°E             |
| 6,015            | 37.21°N/<br>126.78°E | Hwaseong<br>(Korea)        | 950                            | 41.50°N/<br>126.73°E             |
| 6,055            | 35.47°N/<br>140.21°E | Chiba/Nagara<br>(Japan)    | 1,610                          | 40.63°N/<br>133.45°E             |
| 6,080            | 49.18°N/<br>119.72°E | Hailar/Nanmen<br>(China)   | 645                            | 47.48°N/<br>123.2°E              |
| 6,175            | 39.75°N/<br>116.81°E | Beijing<br>(China)         | 1,050                          | 42.77°N/<br>121.75°E             |
| 6,600            | 37.60°N/<br>126.85°E | Goyang<br>(Korea)          | 910                            | 41.69°N/<br>126.77°E             |
| 7,260            | 43.97°N/<br>87.25°E  | Urumqi/Changji<br>(China)  | 3,080                          | 44.88°N/<br>106.97°E             |
| 7,345            | 40.72°N/<br>111.55°E | Hohhot<br>(China)          | 1,340                          | 43.25°N/<br>119.12°E             |
| 9,500            | 38.47°N/<br>114.13°E | Shijiazhuang<br>(China)    | 1,310                          | 42.13°N/<br>120.41°E             |
| 9,520            | 40.72°N/<br>111.55°E | Hohhot<br>(China)          | 1,340                          | 43.25°N/<br>119.12°E             |
| 9,675            | 39.75°N/<br>116.81°E | Beijing<br>(China)         | 1,050                          | 42.77°N/<br>121.75°E             |
| 9,750            | 36.17°N/<br>139.82°E | Yamata<br>(Japan)          | 1,570                          | 40.98°N/<br>133.25°E             |
| 9,830            | 39.75°N/<br>116.81°E | Beijing<br>(China)         | 1,050                          | 42.77°N/<br>121.75°E             |

Таблиця 2.2. Загальні відомості про геомагнітні станції

| Назва станції      | Географічні координати | Країна                     |
|--------------------|------------------------|----------------------------|
| Beijing Ming Tombs | 40.3000°N, 116.2000°E  | People's Republic of China |
| Cheongyang         | 36.3700°N, 126.8540°E  | Republic of Korea          |
| Kanoya             | 31.4200°N, 130.8800°E  | Japan                      |

### Розділ 3. Стан космічної погоди

Стан космічної погоди зручно оцінювати за допомогою спеціально розробленого формату (рис. 3.1). 21 та 22 квітня 2023 р. концентрація частинок  $n_{sw}$  у сонячному вітрі флуктувала близько значення  $5 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ . 23 квітня 2023 р. приблизно о 07:00 (тут і далі UT) значення  $n_{sw}$  приблизно подвоїлися, а близько 19:00 збільшилися до  $21.1 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Збільшення  $n_{sw}$  тривало близько 11 години. 24, 25 і 27 квітня значення  $n_{sw}$  флуктували в межах від  $10^6$  до  $8 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ .

До 16:00 23 квітня 2023 р. швидкість частинок  $V_{sw}$  у сонячному вітрі флуктувала в межах 350-400 км/с, а після цього вона досить різко збільшилася до 706 км/с. Після 02:00 24 квітня 2023 р.  $V_{sw}$  флуктувала близько значення 550 км/с. Лише наприкінці доби 26 квітня 2023 р. вона збільшилася до 650 км/с, після чого мало місце поступове зменшення швидкості. Майже до 16:00 23 квітня 2023 р. значення температури частинок  $T_{sw}$  у сонячному вітрі флуктували в межах  $10^5$ – $2 \times 10^5$  К. Після цього спостерігався сплеск  $T_{sw}$ , який тривав близько 10 години. Найбільше значення  $T_{sw} \approx 2.05 \times 10^6$  До. Після сплеску мали місце незначні флуктуації температури (не більше  $10^5$ – $3 \times 10^5$  К).

Значення динамічного тиску  $p_{sw}$  частинок у сонячному вітрі зазвичай не перевищували 1–3 нПа.

Поведінка компонентів  $B_y$  і  $B_z$  міжпланетного магнітного поля була наступною. Майже до 09:00 23 квітня 2023 р. рівень обох компонент флуктує в межах  $\pm 5$  нТл. З 10:00 23 квітня 2023 р. рівень флуктуацій збільшився приблизно в 4 рази. Максимальне значення  $B_y \approx 9.5$  нТл, а мінімальне  $B_y \approx -30.2$  нТл. Компонента  $B_z$  стала негативною після 09:00, що тривало до 21:00 23 квітня 2023 року. Після нетривалого підвищення рівня  $B_z$  до 10 нТл спостерігалось поступове зменшення до  $-32.4$  нТл, яке мало місце близько 02:00 24 квітня 2023 р. Далі відзначалося поступове збільшення  $B_z$  від  $-32.4$  нТл до 22.5 нТл, яке настало близько 16:00 24 квітня 2023 р. На початок нової доби значення  $B_z$  зменшилось до 5 нТл, а далі флуктували поблизу 0 нТл. Приблизно такою була й поведінка компоненти  $B_y$  25, 26 і 27 квітня 2023 р.

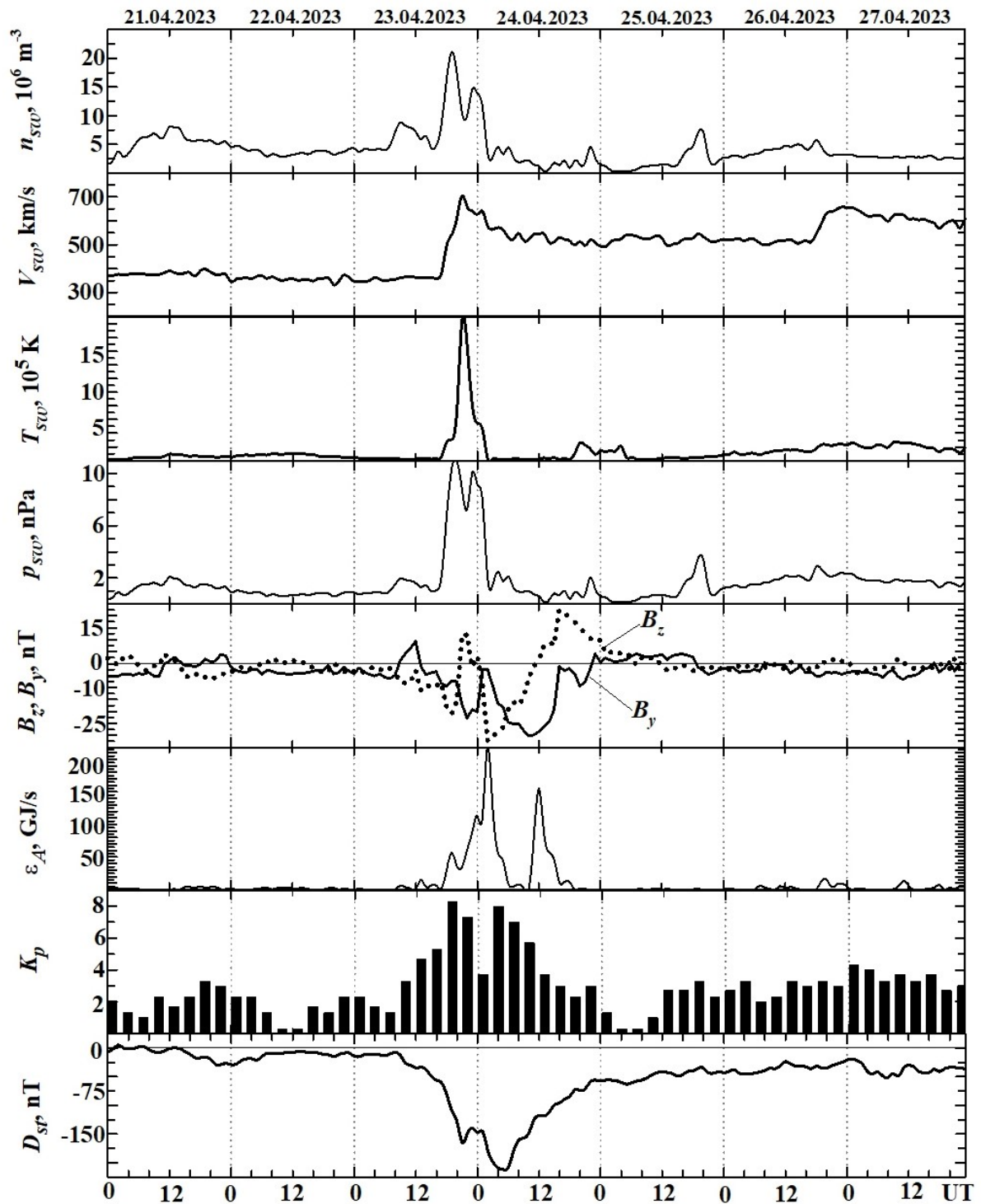


Рис. 3.1. UT варіації параметрів сонячного вітру: виміряна концентрація  $n_{sw}$  частинок, температура  $T_{sw}$ , радіальна швидкість  $V_{sw}$ , розрахований динамічний тиск  $p_{sw}$ , виміряний  $B_z$  та  $B_y$  за складовими міжпланетного магнітного поля; розраховані значення енергії  $\epsilon_A$ , переданої від сонячного вітру в магнітосферу Землі за час;  $K_p$ -індекс та  $D_{st}$ -index (отримано з <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) за період з 21 по 27 квітня 2023 року. Дати вказані по верхній осі абсцис.

Варіації функції Акасофу  $\varepsilon_A$ , яка характеризує інтенсивність геокоосмічної бурі та описує величину енергії в одиницю часу, що надходить до магнітосфери Землі, були наступними. До 09:00 23 квітня 2023 р. значення  $\varepsilon_A$  знаходилися в межах 10 ГДж/с. Приблизно з 16:00 23 квітня 2023 р. до 20:00 24 квітня 2023 р. спостерігалися два потужні сплески  $\varepsilon_A$ . При цьому  $\varepsilon_A$  становила 220.3 ГДж/с та 160 ГДж/с. Тривалість першого сплеску була 14 годин, а другого – близько 7 годин.

Значення планетарного індексу  $K_p$  21 та 22 квітня 2023 р. не перевищували 3+. Після 12:00 23 квітня 2023 року цей індекс збільшувався від 4 до 8.3. Далі протягом 6 годин він зменшувався до 4. В інтервалі часу 03:00–06:00  $K_p$ -індекс збільшився до 8–, а потім протягом усієї доби з 24 на 25 квітня 2023 р. поступово зменшувався до 0+. З 12:00 25 квітня до кінця доби 27 квітня 2023 р. індекс флуктуював у межах від 2 до 4+.

До 08:00 23 квітня 2023 р. значення індексу  $D_{st}$  флуктуювали в межах від +5 нТл до –30 нТл. Після 08:00 та до 21:00 спостерігалось стрімке падіння  $D_{st}$ -індексу від –10 нТл до –170 нТл. Далі зазначалося короткочасне (близько 2 годин) зростання індексу від –170 до –145 нТл. Протягом наступних 2–3 годин варіації  $D_{st}$ -індексу були незначними. Після 01:00 24 квітня 2023 р. продовжилося падіння індексу від –150 нТл до –212 нТл, що тривало близько 4–5 годин. Далі  $D_{st}$ -індекс, флуктуюючи, поступово збільшувався від –212 нТл до –25 нТл. До кінця доби 27 квітня 2023 р. індекс залишався негативним.

## Розділ 4. Аналіз ефектів геокосмічної бурі

### 4.1. Аналіз іоносферної бурі

Часові залежності основних параметрів іонограм для 22-25 квітня 2023 р. наведено на рис. 4.1 та 4.2. З рис.4.1 можна побачити, що варіації частоти  $f_{min}$  у дні геокосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. якісно практично не відрізнялися від варіацій у контрольні дні. Шар  $E_s$  з'являвся щодня приблизно з 20:00 до 08:00 наступної доби. 24 квітня 2023 р. шар  $E_s$  також існував з 08:00 до 12:30 та з 14:30 до 19:30. Частота  $f_oE_s$  збільшувалася від  $\sim 2$  МГц до 5-6 МГц. Вночі з 20:30 до 22:30 24 квітня 2023 р. частота  $f_oE_s$  збільшувалася до 10-12 МГц.

Критична частота  $f_oF2$  шару  $F2$  у контрольні дні з 00:00 до 05:00 спочатку збільшувалася від 7–8 МГц до 8–10 МГц, а потім, флуктуюючи, спадала до 6 МГц до 18:00. 23 квітня 2023 р. варіації  $f_oF2$  до 18:00 були подібні до варіацій у контрольні дні.

Після 18:00 вона, флуктуюючи, зменшувалась від 6 МГц до  $\sim 4$  МГц. Це тривало приблизно до 08:00 24 квітня 2023 року. В інтервалі часу 08:00–14:00 частота  $f_oF2$ , сильно флуктуючи, поступово збільшувалася від 4 МГц до 6 МГц. З 16:00 до 24:00 спостерігався провал в залежності від  $f_oF2(t)$ , що досягає приблизно 3 МГц. Близько 24:00 значення  $f_oF2 \approx 6$  МГц, тобто. стали близькими до значень у контрольні дні.

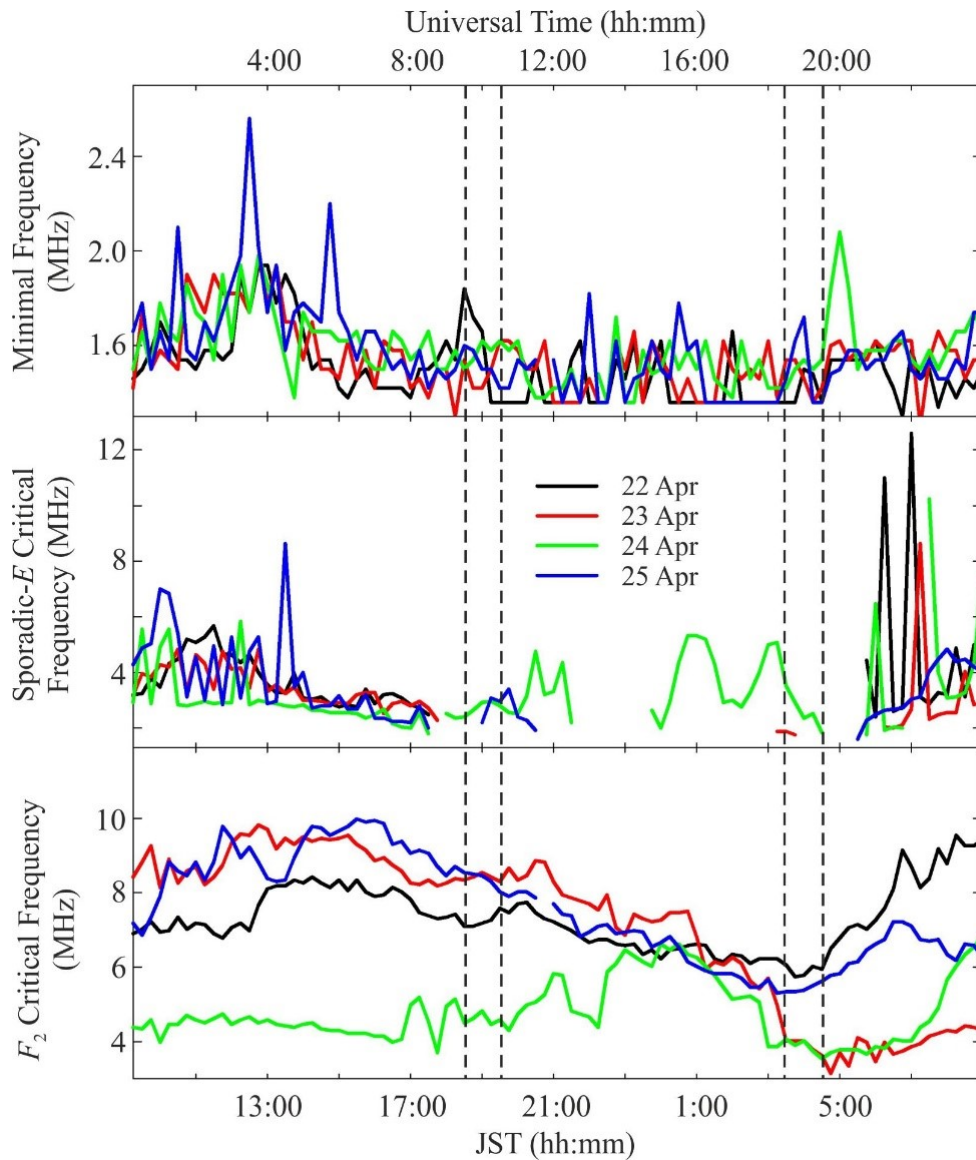


Рис. 4.1. Часова залежність основних параметрів іонограми: Мінімальна частота,  $f_{min}$ , що спостерігається на іонограмах, спорадична критична частота  $E$ ,  $f_oE_s$ , критична частота  $F_2$ -шару  $f_oF_2$ , для звичайної хвилі на панелях зверху вниз відповідно за період 22–25 квітня 2023 року. Вертикальні лінії показують захід і схід сонця на висоті 0 і 100 км. Отримано з <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>. Дані іонозонду з Вакканай, Японія (45,39°N, 141,68°E).

Опишемо часові варіації висот, що діють (рис. 4.2). Висота  $h'_E$  помітно збільшувалася вночі від  $\sim 90$  км до 120–130 км. Істотне збільшення цієї висоти до 150 км відзначалося в нічний та ранковий час 24 квітня 2023 р.

Діюча висота  $h'_{Es}$  в основному флуктувала поблизу значення  $\sim 100$  км. Короткочасне збільшення цієї висоти до 155 км відбулося 24 квітня 2023 року в інтервалі часу 14:15–15:00.

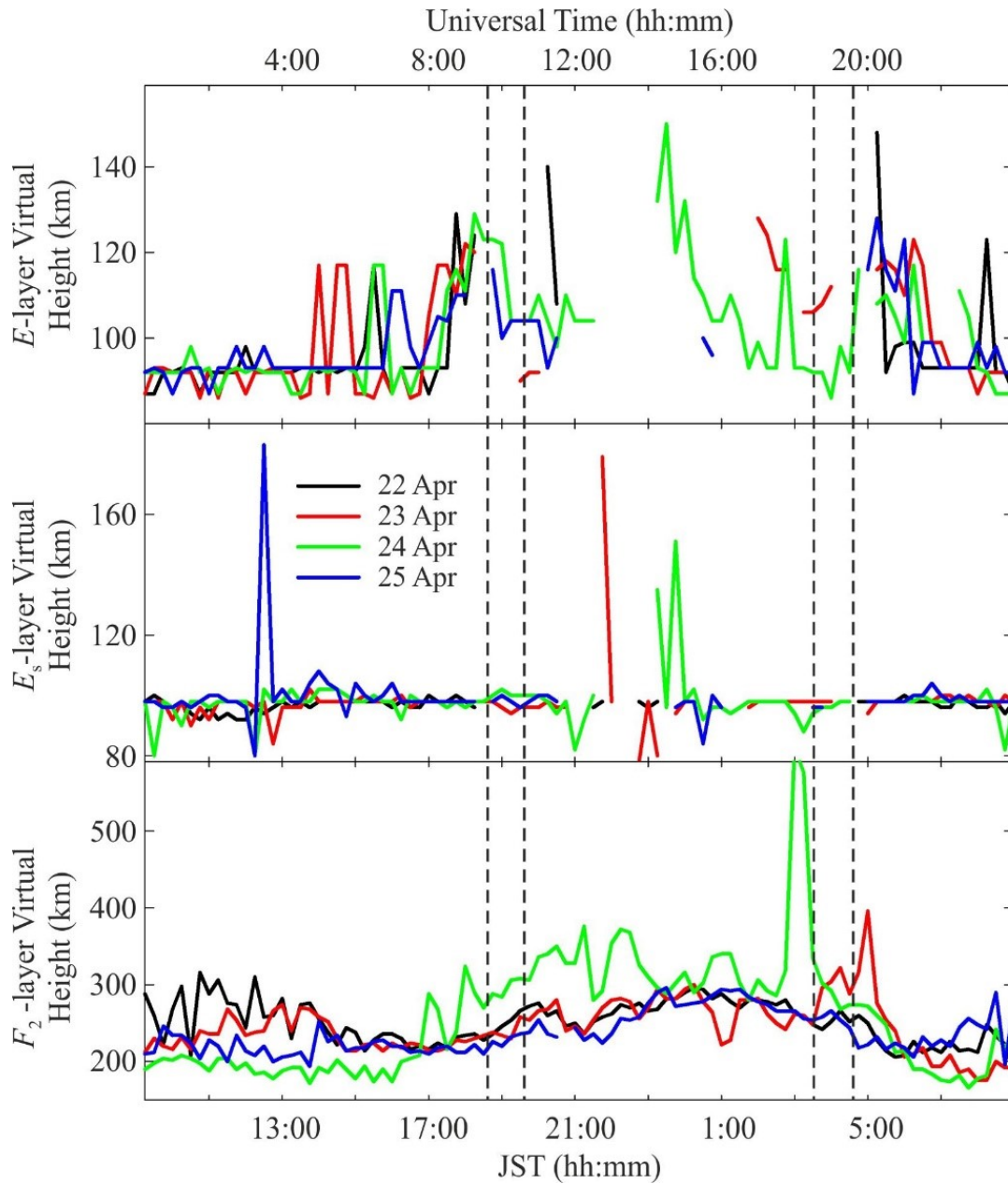


Рис. 4.2. Часова залежність основних параметрів іонограми: віртуальної висоти  $h'_E$ ,  $E$  шару; спорадична- $E$  віртуальна висота  $h'_{Es}$ ; віртуальна висота  $h'_{F_2}$ , шару  $F_2$  за період 22–25 квітня 2023 року. Вертикальні лінії показують захід і схід сонця на висоті 0 та 100 км. Отримано з <http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index-E.html>. Дані іонозонду з Вакканай, Японія ( $45,39^\circ\text{N}$ ,  $141,68^\circ\text{E}$ ).

Діюча висота  $h'_{F2}$  зростала вночі від  $\sim 230$  км до 300 км. Мінімальне значення  $h'_{F2}$  спостерігалось з 06:00 до 08:00 та з 20:00 до 23:00 23 квітня 2023 р. Висота  $h'_{F2}$  сильно флукутувала з квазіперіодом близько 2 годин з 10:00 до 20:00.

Амплітуда коливань досягала 30–50 км із 22:00 23 квітня 2023 р. до 07:00 24 квітня 2023 р.  $h'_{F2}$  змінювалась у межах 180–200 км. З 07:00 до 21:00 вона збільшувалася до 300–400 км і сильно флукутувала. Максимальне значення близько 18:00 сягало 600 км. Квазіперіод становив 45–60 хв, а амплітуда 40–50 км.

Таким чином, мали місце дві негативні іоносферні бурі. Перша з них розпочалася близько 18:00 23 квітня 2023 р. і тривала близько 20 години. Друга буря відзначалася 24 квітня 2023 року в інтервалі часу 16:00–24:00.

Протягом бур значення  $f_{oF2}$  зменшувалися від 7.5 до 3.5 МГц і від 6 до 3.8 МГц відповідно. Це означає, що обидві бурі були негативними. На повільні варіації  $f_{oF2}(t)$  накладалися квазіперіодичні коливання з періодами від 30–45 хв до 120 хв та амплітудою 0.1–0.3 МГц.

Для кількісної характеристики бур у роботі [5] введено спеціальний індекс. Для негативних іоносферних бур

$$I_{NIS} = 10 \lg \frac{N_{m0}}{N_{min}} = 20 \lg \frac{f_{oF2}}{f_{oF2min}},$$

де  $N_{m0}$  – незбурене значення концентрації електронів,  $N_{min}$  – її мінімальне значення під час бурі. Цим значенням  $N$  відповідають  $f_{oF2}$ .

Для першої бурі  $I_{NIS} \approx 6.6$  (дуже сильна буря severe), для другої –  $I_{NIS} \approx 4.0$ . Друга буря стосується сильних (strong). Для першої бурі  $N_{m0}/N_{min} \approx 4.6$ , а для другої –  $N_{m0}/N_{min} \approx 2.5$ .

Квазіперіодичним варіаціям з амплітудою 0.1–0.9 МГц і  $f_{oF2} \approx 4–6$  МГц відповідали амплітуди відносних варіацій концентрації електронів  $\delta N \approx 3–30\%$ . Очевидно, що ці варіації обумовлені рухом атмосферних гравітаційних хвиль з  $T \approx 30–120$  хв. Квазіперіодичні варіації також мали місце й у тимчасових залежностях  $h'_{F2}$ .

Значні (до 1.5 МГц) квазіперіодичні варіації  $f_{oEs}$  24 квітня 2023 року також, мабуть, пов'язані з хвильовими процесами на висотах іоносфери.

#### 4.2. Аналіз магнітної бурі

Для якісного порівняння ефектів, спричинених різними компонентами геокосмічної бурі, на рівні з іоносферними ефектами було досліджено магнітні ефекти.

Часові варіації всіх компонентів на станціях BMP, CYG та KNY були практично синхронними (рис. 4.3). У магнітоспокійні дні 21 та 22 квітня 2023 р. добові варіації  $X$ -компоненти були наступними. З 00:00 до 03:00 мало місце зменшення тренду  $\overline{X}(t)$  на 15 нТл і 30 нТл відповідно для 21 та 22 квітня 2023 р. Потім було збільшення  $\overline{X}(t)$  на 40 нТл і 60 нТл відповідно. За цим спостерігалось зменшення  $\overline{X}(t)$  на 35 та 27 нТл відповідно. Далі мали місце флуктуації  $X(t)$  ( $\pm 10$  нТл та  $\pm 5$  нТл відповідно).

23 квітня 2023 р. до 11:15 варіації тренду були якісно подібні до варіацій 21 і 22 квітня 2023 р. Після 17:30 23 квітня 2023 р. та до 12:30 24 квітня 2023 р. спостерігалось зменшення  $\overline{X}(t)$  на 230 нТл. Рівень флуктуацій починаючи з 11:15 23 квітня 2023 р. та до 12:30 24 квітня 2023 р. збільшувався до  $\pm(30-40)$  нТл. Після 12:30 24 квітня 2023 р. значення  $X(t)$ , флуктуюючи, поступово поверталися до незбурених значень.

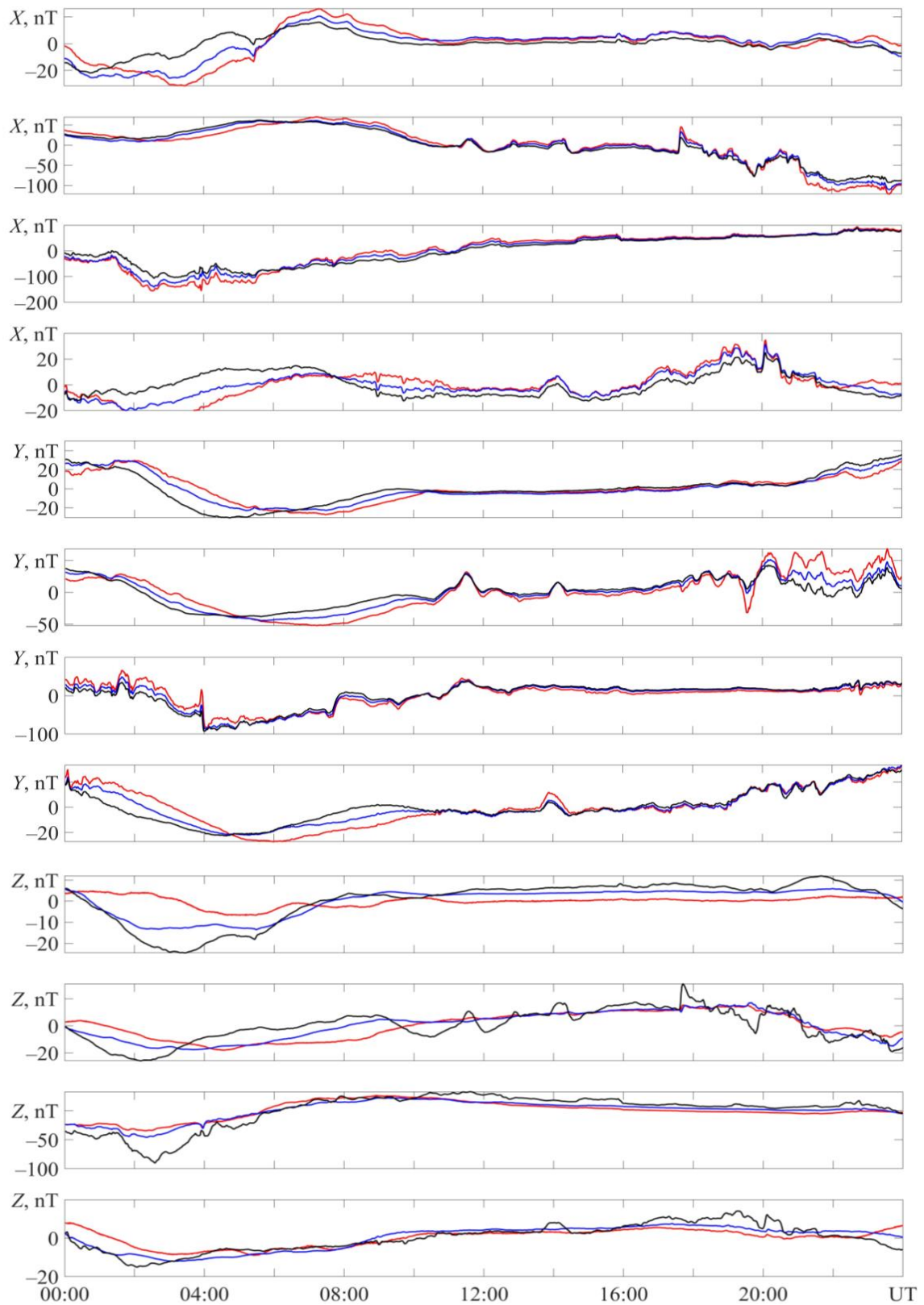


Рис. 4.3. Компоненти  $X$ ,  $Y$  та  $Z$  за 22–25 квітня 2023 року ([https://img-data.bgs.ac.uk/GIN\\_V1/GINForms2](https://img-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2), останній доступ: 18 червня 2023 року). Червона лінія — станція ВМТ (Китайська Народна Республіка), синя лінія — станція CYG (Республіка Корея), чорна лінія — станція KNY (Японія).

25 та 26 квітня 2023 р. добові варіації  $\bar{X}(t)$  були якісно подібні до варіацій 21 та 22 квітня 2023 р. Рівень флуктуацій не перевищував  $\pm 10$  нТл і  $\pm 20$  нТл відповідно.

27 та 28 квітня 2023 р. на добові варіації  $X(t)$  наклалися квазіперіодичні коливання. Особливо чітко коливання відзначалися 27 квітня 2023 року. При цьому період  $T \approx 6$  год, амплітуда  $\Delta X_a \approx 20\text{--}30$  нТл. Для  $T \approx 20\text{--}25$  хв  $\Delta X_a \approx 1\text{--}2$  нТл.

Опишемо варіації  $Y$ -компоненти. Добові варіації тренду  $\bar{Y}(t)$  були такими. З 00:00 до 02:00 спостерігалось збільшення рівня приблизно 10 нТл. Після 02:00 до 07:00 значення зменшувалися на 40–80 нТл. В інтервалі часу 7:00–24:00 тренд порівняно повільно зростав на 50–100 нТл. Рівень флуктуацій зазвичай не перевищував  $\pm(5.0\text{--}10)$  нТл. Приблизно після 11:00 23 квітня 2023 р. та до 13:00 24 квітня 2023 р. рівень флуктуацій збільшився до  $\pm(30\text{--}40)$  нТл. Такі сильні флуктуації були відсутні в інші дні.

У добових варіаціях  $Z$ -компоненти 21, 27 та 28 квітня 2023 р. з 00:00 до 04:30 спостерігалось зменшення  $\bar{Z}(t)$  на 20–35 нТл, за яким до 10:00 було збільшення до приблизно вихідного рівня. Далі значення  $\bar{Z}(t)$  змінювалися порівняно слабо.

22 квітня 2023 р. на повільні добові варіації наклалися варіації з амплітудою  $\sim 2$  нТл.

Посилення рівня флуктуацій цієї компоненти мало місце приблизно з 11:00 23 квітня 2023 року. та до 06:00 24 квітня 2023 р. З 19:40 23 квітня 2023 р. та до 00:00 24 квітня 2023 р. спостерігалось зменшення  $\bar{Z}(t)$  на 20 нТл. З 00:00 до 09:00 24 квітня 2023 р. значення  $\bar{Z}(t)$  зросли приблизно 50 нТл. Далі відзначався повільний спад приблизно на 30 нТл.

25 та 26 квітня 2023 р. рівень флуктуацій зазвичай не перевищував  $\pm(1\text{--}2)$  нТл. Найбільші варіації всіх трьох компонентів геомагнітного поля

спостерігалися з ~12:00 до 21:00 23 квітня 2023 р. і з 01:00 до 05:00 24 квітня 2023 р. Це означає, що магнітна буря була рекурентною.

#### 4.3. Результати багаточастотного багатотрасового похилого радіозондування іоносфери

Спочатку відзначимо дві особливості цих вимірювань. По-перше, з 14 радіопередаючих пристроїв лише 9 мали прийнятні режими роботи. По-друге, у денний час, як правило, був присутній шар  $E_s$ , що зробило вимірювання малоефективними.

##### *Радіотраса Hwaseong-Harbin*

Радіостанція, яка працює на частоті 6015 кГц, розміщена в Республіці Корея ( $R \approx 950$  км). Станція вимикалася в інтервалі 00:00–03:00. Дифузність ДС була незначною (рис. 4.4). Деяке її посилення мало місце лише 25 квітня 2023 р. з 14:00 до 21:00. 22 квітня 2023 р. сигнал був найчастіше одномодовим.

Варіації ДЗЧ були скоріше хаотичними та зазвичай не перевищували  $\pm 0.2$  Гц. Рівень варіацій помітно зростав у дні близько сонячних термінаторів. 23 квітня 2023 р. варіації ДЗЧ ставали квазіперіодичними. На коливання з  $T \approx 120$  хв та  $f_{Da} \approx 0.4\text{--}0.6$  Гц накладалися слабкі коливання з  $T \approx 8$  хв та  $f_{Da} \approx 0.04$  Гц. 24 квітня 2023 р. весь нічний час реєструвалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з  $f_{Da} \approx 0.5\text{--}0.7$  Гц та змінним періодом від 20 до 120 хв. Нічна іоносфера 25 квітня 2023 р. також була частково збурена.

Амплітуда сигналу 23 квітня 2023 р. з 18:00 до 21:00 також була збурена, вона зазнавала квазіперіодичних коливань з амплітудою близько 7–8 дБВ. З 20:20 до 21:00 амплітуда сигналу зменшувалася від –15 дБВ до –53 дБВ. Помітними були й варіації  $A(t)$  у нічний час 24 та 25 квітня 2023 р. (див. рис. 4.4).

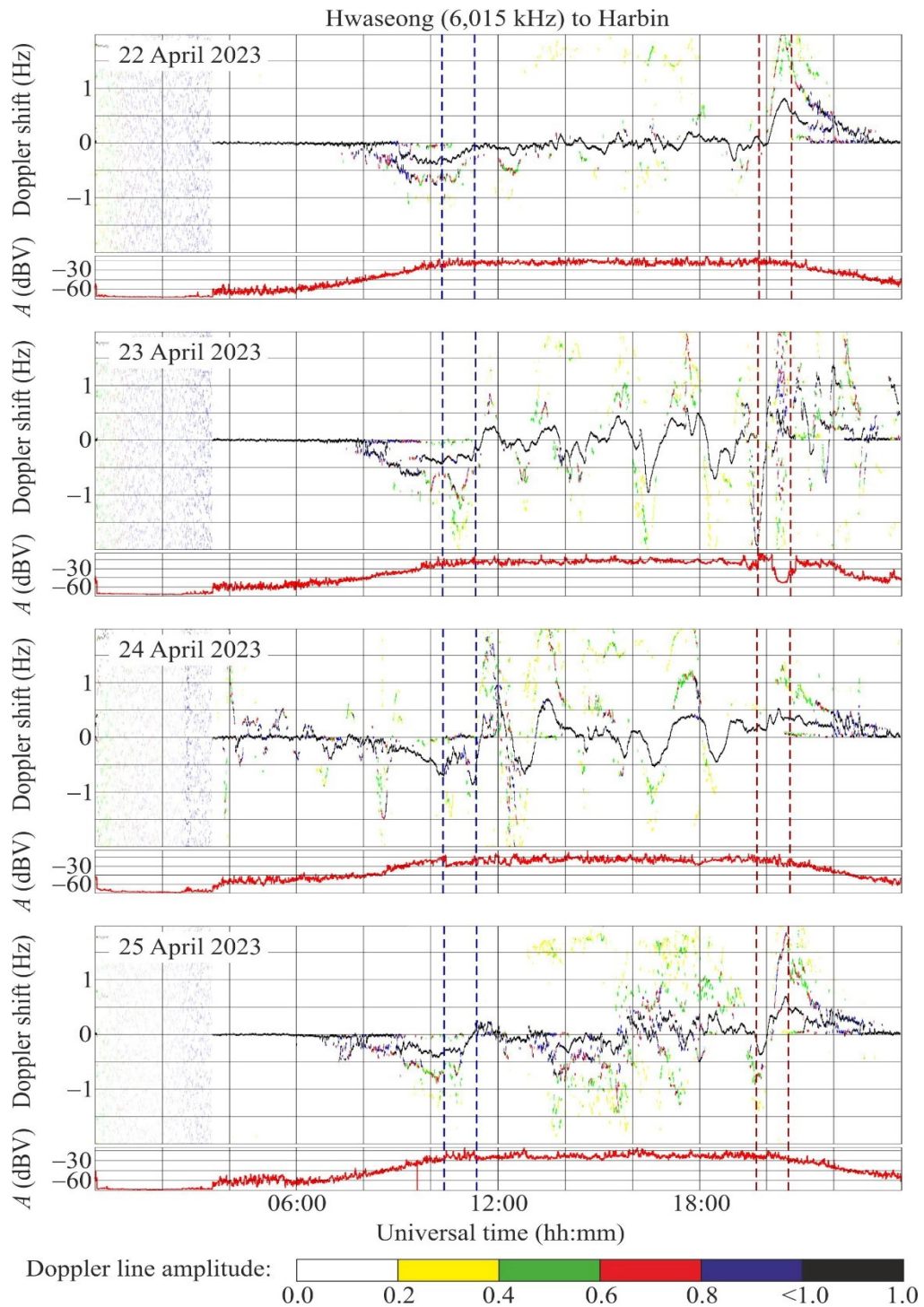


Рис. 4.4. Варіації спектрів Доплера та амплітуд сигналу в UT часі вздовж шляху розповсюдження Hwaseong до Харбіна за 22–25 квітня 2023 року (панелі зверху вниз відповідно). Частота радіохвиль становить 6015 кГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії відповідно 1, 0.8, 0.6, 0.4 і 0.2 у відносній шкалі. Діаграма доплерівського зміщення складається з 117 600 точок у кожному 1-годинному інтервалі. Пунктирні сині та червоні лінії позначають захід і схід сонця, відповідно, на висоті 0 і 100 км. Амплітуда сигналу  $A$  на виході приймача в децибелах дБВ, відносно 1 В показана під доплерівським спектром на кожній панелі.

### *Радіотраса Shijiazhuang-Harbin*

Радіопередавальний пристрій, що випромінює на частоті 9500 кГц, дислокований на території КНР ( $R \approx 1310$  км). Випромінювання вимикалося з 18:00 до 20:15. Вдень значення  $A$  зменшувалися до  $-68$  дБВ, а в нічний час вони збільшувалися до  $-48$  дБВ (рис. 4.5).

22 квітня 2023 р. вдень варіації ДЗЧ були переважно хаотичними. Спостерігалася тенденція зменшення ДЗЧ від  $\sim 0.5$  Гц до  $-0.8$  Гц. Вечірній термінатор призвів до збільшення ДС від 0 Гц до  $-1.5$  Гц. У нічний час варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з  $T \approx 20\text{--}24$  хв і  $f_{Da} \approx 0.10\text{--}0.15$  Гц. Після 15:30 відзначалося збільшення періоду до 30 хв та  $f_{Da}$  до 0.2 Гц.

23 квітня 2023 р. у денний час варіації ДЗЧ були подібні до варіацій 22 квітня 2023 р. Суттєві відмінності розпочалися після 11:00. З'явився інтенсивний квазіперіодичний процес з  $T \approx 100\text{--}110$  хв і  $f_{Da} \approx 0.3\text{--}0.4$  Гц. З 14:00 до 15:40 варіації ДЗЧ були незначними. В інтервалі часу 15:45–17:15 відбулося різке зниження ДЗЧ від 0.5 Гц до  $-1.5$  Гц. Далі спостерігався квазіперіодичний процес з  $T \approx 40$  хв і  $f_{Da} \approx 0.15$  Гц. Істотна дифузність ДС відзначалася з 08:30 до 18:00.

24 квітня 2023 р. вдень  $f_D(t) \approx 0$  Гц, дифузність практично була відсутня. ДЗЧ основної моди виділялося не чітко. Поблизу вечірнього термінатора були сильні варіації ДЗЧ: від  $-1.5$  Гц до  $+0.7$  Гц і назад до  $-1.5$  Гц. З 14:00 до 16:00  $f_D(t) \approx 0$  Гц. Далі ДЗЧ збільшувалося від  $-1$  Гц до  $+0.2$  Гц.

25 квітня 2023 р. передавальний пристрій відключався з 06:00 до 09:00. В інтервалі часу 00:00–06:00 варіації ДЗЧ були хаотичними. Після 09:00 та до 15:00 ДС ставали дифузними, а ДЗЧ змінювалося хаотично. З 13:40 до 15:00 квазіперіод  $T \approx 20$  хв,  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. В інтервалі часу 15:10–16:00 відбулося різке падіння ДЗЧ від 0 Гц до  $-0.55$  Гц.

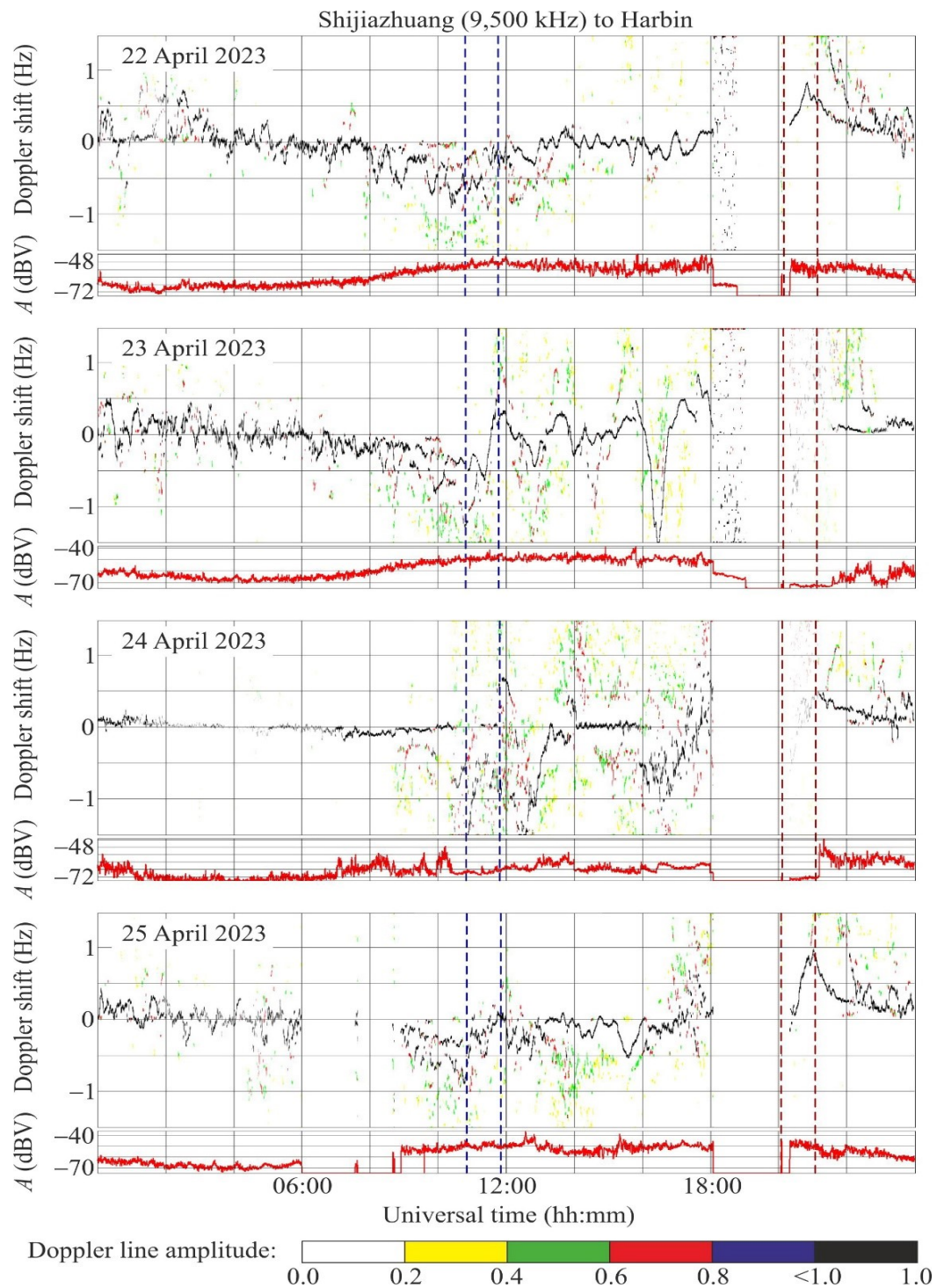


Рис. 4.5. Варіації спектрів Доплера та амплітуд сигналу в UT часі вздовж шляху розповсюдження Shijiazhuang до Харбіна за 22–25 квітня 2023 року (панелі зверху вниз відповідно). Частота радіохвиль становить 9500 кГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії відповідно 1, 0.8, 0.6, 0.4 і 0.2 у відносній шкалі. Діаграма доплерівського зміщення складається з 117 600 точок у кожному 1-годинному інтервалі. Пунктирні сині та червоні лінії позначають захід і схід сонця, відповідно, на висоті 0 і 100 км. Амплітуда сигналу  $A$  на виході приймача в децибелах дБВ, відносно 1 В показана під доплерівським спектром на кожній панелі.

## ВИСНОВКИ

1. Потужність рекурентної геокоосмічної бурі становила 220 ГДж/с та 160 ГДж/с. Їхня енергія не перевищувала 11 ПДж та 4 ПДж. Такі бурі належать до помірних.

2. Енергія рекурентної магнітної бурі була близька до 9.1 ПДж та 9.7 ПДж. Середні потужності досягали 173 ГВт та 674 ГВт. Такі бурі відносяться до надпотужніших. Найбільші варіації  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ -компонентів досягали відповідно 230, 40 та 50 нТл. Істотно збільшився рівень флуктуацій цих компонент (до  $\pm(10-40)$  нТл).

3. Геокоосмічна буря супроводжувалася рекурентною іоносферною бурею. У першій бурі значення концентрації електронів зменшились у 4,6 рази (індекс  $I_{NIS} \approx 6,6$ , дуже сильна буря). Для другої бурі зменшення склало 2,5 рази (індекс  $I_{NIS} \approx 4,0$ , сильна буря)

4. За допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлено значні збурення характеристик радіохвиль та параметрів іоносфери.

5. У збурені дні 23 та 24 квітня 2023 р. виявлено суттєве (до  $\pm 1.5$  Гц) розширення ДС, посилення багатопроменивості та розсіювання радіохвиль. Цими днями значно збільшилася хвильова активність в іоносфері. ДЗЧ зазнавало коливань у широкому діапазоні періодів (від  $\sim 8-10$  хв до  $100-120$  хв) з амплітудою від 0.04 Гц до 0.3–0.4 Гц. В інтервалі часу  $\sim 16:00-16:25$  реєструвалося спочатку короткочасне зменшення ДЗЧ на 1–1.2 Гц, а потім таке ж короткочасне її збільшення до 1–1.5 Гц.

Амплітуда сигналу протягом іоносферної бурі змінювалася до 10 дБВ.

6. Іоносферна буря супроводжувалася тривалими (до 10 годин) квазіперіодичними варіаціями висоти відображення радіохвиль, амплітуда яких в залежності від радіотраси досягала 30-130 км для періоду 100-120 хв. Середня вертикальна швидкість руху області відбиття радіохвилі змінювалася від  $\sim 10$  м/с

до ~60 м/с. Короткочасні (~10-25 хв) аперіодичні варіації цієї висоти становили 30–70 хв. При цьому – 50–100 м/с.

7. Квазіперіодичні збурення виявлялися як у геомагнітному полі, так і в атмосфері та іоносфері. Це свідчить про синергетичну взаємодію складових геокосмічної бурі.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Buonsanto, M. (1999). Ionospheric storms — A review. *Space Sci. Revs.*, 88(3–4), 563–601.
2. Chernogor, L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.*, 32, 2011. 3199–3218, <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
3. Chernogor, L. F. Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*, 27(1), 2021. 3–77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>
4. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Luo, Y., Rozumenko, V. T., & Zheng, Y. Ionospheric storm effects over the People’s Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Advances in Space Research*, 66(2), 2020. 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
5. Chernogor, L. F. Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*, 27(1), 2021. 3–77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>
6. Chernogor, L. F., & Domnin, I. F. Physics of geospace storms. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University. 2014. Publ.
7. Luo, Y., Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Rozumenko, V. T., & Zheng, Y. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August–2 September 2019 geospace storm: influence on high frequency radio wave characteristics. *Ann. Geophys.*, 39, 2021a. 657–685. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
8. Luo, Y., Guo, Q., Zheng, Y., Garmash, K. P., Chernogor, L. F., & Shulga, S. N. Geospace storm effects on August 5—6, 2019 (in Ukrainian). *Space Science and Technology*, 27(2), 2021c. 45–69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
9. Danilov, A. D., & Laštovička, J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomag. Aeron.*, 2, 2001. 209–224.
10. Laštovička, J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 1996. 831–843. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00106-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00106-9)

11. Yakovchouk, O. S., Mursula, K., Holappa, L., Veselovsky, I. S., & Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.*, 117(A3). 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JA017093>
12. Oikonomou, C., Haralambous, H., Paul, A., Ray, S., Alfonsi, L., Cesaroni, C., & Sur, D. Investigation of the negative ionospheric response of the 8 September 2017 geomagnetic storm over the European sector. *Advances in Space Research*, 70(4), 2022. 1104–1120. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.035>
13. Qian, L., Wang, W., Burns, A. G., Chamberlin, P. C., Coster, A., Zhang, S.-R., & Solomon, S. C. Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11 September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 2019. 2298–2311. <https://doi.org/10.1029/2018JA026175>
14. Wen, D., & Mei, D. Ionospheric TEC disturbances over China during the strong geomagnetic storm in September 2017. *Adv. Space Res.*, 65(11). 2020. 2529–2539. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.002>
15. Al Shidi, Q., Pulkkinen, T., Toth, G., Brenner, A., Zou, S., & Gjerloev, J. A large simulation set of geomagnetic storms—Can simulations predict ground magnetometer station observations of magnetic field perturbations? *Space Weather*, 20, 2022. e2022SW003049. <https://doi.org/10.1029/2022SW003049>
16. Hsu, C.-T., & Pedatella, N. M. Effects of forcing uncertainties on the thermospheric and ionospheric states during geomagnetic storm and quiet periods. *Space Weather*, 21, 2023. e2022SW003216. <https://doi.org/10.1029/2022SW003216>
17. Prölss, G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere. *Magnetic storms*. Eds. Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Kamide, Y., Arballo, J. K. *Geoph. Monog. Series*, 98, 1998. 249–290. <https://doi.org/10.1029/GM098p0227>
18. Schunk, R. W., & Sojka, J. J. Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58(14), 1996. 1527–1574. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(96\)00029-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(96)00029-3)
19. Abe, O. E., Fakomiti, M. O., Igboama, W. N., Akinola, O. O., Ogunmodimu, O., & Migoya-Orué, Y. O. Statistical analysis of the occurrence rate of geomagnetic

- storms during solar cycles 20–24. *Advances in Space Research*, 71(5), 2023. 2240–2251. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.033>
20. Guo, Q., Zheng, Y., Chernogor, L. F., Garmash, K. P., & Rozumenko, V. T. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Radio Physics and Electronics»*, 31, 2019b. 87–105.
21. Verhulst, T., Altadill, D., Mielich, J., Reinisch, B., Galkin, I., Mouzakis, A., et al. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. *Adv. Space Res.*, 60(8), 2017. 1644–1656. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>
22. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Zheng, Y., Podnos, V. A., Rozumenko V. T., et al. The coherent multi-frequency multipath radio diagnostic system for radiophysical monitoring of dynamic processes at ionosphere (in Russian). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Radio Physics and Electronics»*, 28, 2018. 88–93.
23. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Luo, Y., Rozumenko, V. T., & Zheng, Y. Some Features of the Ionospheric Radio Wave Characteristics Over China Observed During the Solar Eclipse of 21 June 2020. *Radio Science*, 57(10), 2022a. e2022RS007492. <https://doi.org/10.1029/2022RS007492>
24. Guo, Q., Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Rozumenko, V. T., & Zheng, Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 186(5), 2019a. 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
25. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Rozumenko, V. T., & Zheng, Y. Effects of the super-powerful tropospheric western Pacific phenomenon of September–October 2018 on the ionosphere over China: results from oblique sounding. *Annales Geophysicae*, 41(1), 2023. 173–195. <https://doi.org/10.5194/angeo-41-173-2023>
26. Zheng, Y., Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Rozumenko, V. T., & Luo, Y. Disturbances in the ionosphere and distortion of radio wave characteristics that accompanied the super typhoon Lekima event of 4–12 August 2019. *Journal of*

- Geophysical Research: Space Physics, 127, 2022. e2022JA030553.  
<https://doi.org/10.1029/2022JA030553>
27. Marple, S. L. (1987). Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
28. Chernogor, L. F. (2008). Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomagnetism and Aeronomy*, 48(5), 2008. 652–673.
29. Laštovička, J., & Chum, J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Adv. Space Res.*, 60(8), 2017. 1629–1643.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>