Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЖДАНКО Євген Геннадійович

УДК 550.388

ДИСЕРТАЦІЯ

«ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ІОНОСФЕРНОМУ РАДІОКАНАЛІ: РЕЗУЛЬТАТИ ДИСТАНЦІЙНОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ»

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(Галузь знань 10 Природничі науки)
Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело.
_____ Є. Г. Жданко

Науковий керівник:
Чорногор Леонід Феоктистович, доктор фізико-математичних наук, професор

Харків-2025

АНОТАЦІЯ

Жданко Є. Г. Динамічні процеси в іоносферному радіоканалі: результати дистанційного радіозондування іоносфери. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної задачі – експериментальному та теоретичному дослідженню впливу високоенергетичних джерел енерговиділення природного та штучного походження на параметри радіохвиль і каналів їхнього поширення, що використовуються для телекомунікації, радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування, радіоастрономії тощо.

Метою дисертаційної роботи є експериментальні дослідження характеристик радіосигналів і параметрів динамічних процесів в іоносферному радіоканалі, викликаних природними та техногенними джерелами.

Перший розділ присвячено історії відкриття та дослідження земної іоносфери, сучасним уявленням про її морфологію, опису космічної погоди за допомогою цілої низки індексів, а також впливу на іонізовану частину атмосфери нашої планети різноманітних високоенергетичних джерел. Останнє є важливим для розробки практичних рекомендацій, спрямованих на послаблення впливу таких джерел на іоносферний радіоканал і функціонування засобів, що використовують радіозв'язок.

У зв'язку з цим у другому розділі розвинуто теоретичні основи допплерівського радіозондування іоносфери на похилих радіотрасах і отримано прості аналітичні співвідношення для допплерівського зміщення частоти (ДЗЧ). Для цього використовувалася сферично-шарувата модель

незбуреної іоносфери, періодична та аперіодична моделі збурень в іоносфері. Було отримано скоригований закон секанса, що описує умову відбиття ВЧ радіохвилі від ізотропної іоносфери без втрат. Встановлено просте аналітичне співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти на похилих ВЧ радіотрасах за відомим значенням максимальної плазмової частоти. Для умов похилого ВЧ зондування іоносфери отримано прості аналітичні співвідношення для оцінки відносної амплітуди квазіперіодичних збурень і величини аперіодичних збурень концентрації електронів у іоносфері. Продемонстрована застосовність отриманих співвідношень при використанні на практиці.

У третьому розділі розглядається вплив на іоносферу та характеристики радіохвиль сонячних затемнень (СЗ). Встановлено, що варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих радіотрасах були подібними. На похилих радіотрасах помітніше позначалася багатомодовість. СЗ 10 червня 2021 р. супроводжувалося посиленням хвильової активності в іоносфері. Період $T \approx 5–12$ хв і відносні амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів $\delta_N \approx 0.3–0.6\%$ свідчили про генерацію хвильових збурень атмосферними гравітаційними хвилями (АГХ). Також вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію повного електронного вмісту (ПЕВ) на СЗ, що мало місце перед проходженням та в період проходження вечірнього термінатора. Встановлено, що СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ), які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі. Тривалість реакції сягала 120–180 хв. Величина дефіциту в цілому відстежувала зменшення фази СЗ та A_{max}. Таким чином, є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія сонячного затемнення та термінатора.

У четвертому розділі наведено результати іоносферних спостережень за стартами та польотами важких ракет (СР) з космодрому Байконур за 2009–2021 рр., що приблизно збігається з періодом 24-го циклу сонячної активності.

Виконано статистичний аналіз 134 випадків СР (81 старт ракети *Союз* та 53 старти ракети *Протон*). Підтверджено існування декількох груп часів запізнювання можливої реакції іоносфери на старт і політ ракет. Значення цих часів змінювалися в межах від ~10 до ~300 хв. Цим групам відповідають наступні групи удаваних горизонтальних швидкостей поширення збурень: ~100–200 м/с; 390 ± 23 м/с; 0.97 ± 0.10 км/с; 1.28 ± 0.13 км/с; 1.68 ± 0.13 км/с; 2.07 ± 0.13 км/с, а також ~8 км/с. Такі швидкості мають повільні АГХ, АГХ техногенного походження, ударні хвилі густини, повільні та звичайні МГД хвилі. Виникаючі збурення (крім ударно-хвильових), як правило, були квазіперіодичними з періодом від ~5 до ~20 хв та амплітудою ДЗЧ від 0.1 до 0.3 Гц. Відносна амплітуда δ_N зазвичай становила ~1–10%, рідше досягала ~20%. Також досліджено реакцію іоносфери на СР під час геокосмічних бур різної інтенсивності. Виявлення цієї реакції на віддалений на ~2000 км старт і політ важкої ракети на фоні бурі допплерівським методом зазвичай можливе за індексу $K_{p\max} \leq 5$, а за більших його значень дуже ускладнено або взагалі неможливе. У ряді випадків навіть за індексу $K_{p\max} = 4$ визначення реакції ускладнено. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети допплерівський радар повинен одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5–2 до 4–6 МГц. Підтверджено існування декількох груп горизонтальних удаваних швидкостей поширення збурень: 1.7–3 км/с і більше, 700–1000, 300–700, 150–260 м/с.

П’ятий розділ присвячено взаємодії потужного імпульсного та періодичного радіовипромінювання з іоносферною плазмою. Спостереження велися за 960 км від нагрівного стенда. В результаті вперше було показано, що в період мінімуму сонячної активності реєстровані збурення в іоносфері на даній відстані можуть виникати при ефективній потужності, рівній 25 МВт. За моноімпульсного випромінювання тривалість реакції іоносфери співпадала з тривалістю моноімпульсу. При цьому квазіперіодичні варіації ДЗЧ тільки починали генеруватися. Встановлено вдавану горизонтальну швидкість поширення збурень (від ~300 до ~420 м/с). Тут є важливим те, що зі

збільшенням висоти ця швидкість збільшувалася. Періодичний режим випромінювання нагрівного стенда супроводжувався генерацією квазіперіодичних збурень концентрації електронів з відносною амплітудою ~1% і періодом, близьким до періоду Брента–Вяйсяля.

У шостому розділі досліджуються часові варіації характеристик ВЧ радіохвиль та іоносферних збурень протягом однієї з найсильніших бур у 25-му сонячному циклі – геокосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. У збурені дні 23 та 24 квітня 2023 р. виявлено суттєве (до ±1.5 Гц) уширення ДС, посилення багатопроменевості та розсіяння радіохвиль. Значно збільшилася хвильова активність в іоносфері. ДЗЧ зазнавало коливань у широкому діапазоні періодів (від ~8–10 хв до 100–120 хв) з амплітудою від 0.04 Гц до 0.3–0.4 Гц. Іоносферна буря супроводжувалася тривалими (до 10 годин) квазіперіодичними варіаціями висоти відбиття 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 ~10 м/с до ~60 м/с. Короткочасні (~10–25 хв) аперіодичні варіації цієї висоти становили 30–70 км. При цьому швидкість дорівнює 50–100 м/с. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів становила 1.6–3.5% для періоду 8–15 хв. Якщо період був близький до 40 хв, то ця величина наближалася до 29–39%.

Ключові слова: іоносфера, атмосферно-іоносферний радіоканал, високоенергетичне джерело, атмосферна гравітаційна хвиля, іоносферне збурення, сонячне затемнення, старти ракет, геокосмічна буря, характеристики радіохвилі, допплерівське зміщення частоти, концентрація електронів, аперіодичні та квазіперіодичні збурення, похиле радіозондування, удавана швидкість, час запізнювання.

ABSTRACT

Zhdanko Y. H. Dynamic Processes in the Ionospheric Propagation Channel: Results of Remote Radiowave Sounding of the Ionosphere. – Qualifying scientific paper: a manuscript.

Thesis for a Philosophy Doctor Degree in Physics and Mathematics: Speciality 105 Applied Physics and Nanomaterials. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to the solution of an urgency task: the experimental and theoretical study of the impact of high-energy sources of energy release of natural and man-made origin on the parameters of radio waves and their propagation channels used by means of telecommunications, radio communications, radar, radio navigation, radio remote sensing, radio astronomy, etc.

The purpose of the dissertation work is an experimental study of the characteristics of radio signals and the parameters of dynamic processes in the ionospheric radio channel caused by sources of natural and man-made origin.

The first chapter is devoted to the history of the discovery and study of the Earth’s ionosphere, modern concepts of its morphology, the description of space weather using a range of indices, as well as the impact of various high-energy sources on the ionized part of our planet’s atmosphere. The latter is important for developing practical recommendations aimed at mitigating the impact of such sources on the ionospheric radio channel and the operation of radio communication systems.

In this regard, the second chapter develops the theoretical foundations of Doppler radio sounding of the ionosphere along oblique radio paths and derives simple analytical relationships for Doppler shift (DS). For this purpose, a spherically concentric model of the undisturbed ionosphere, periodic and aperiodic models of disturbances in the ionosphere were used. A corrected secant law was obtained, describing the condition for the reflection of HF radio waves from an isotropic ionosphere without losses. A simple analytical relationship was established for

estimating the maximum usable frequency on oblique HF radio paths based on the known value of the maximum plasma frequency. For oblique HF sounding of the ionosphere, simple analytical relationships were obtained for estimating the relative amplitude of quasi-periodic disturbances and the magnitude of aperiodic disturbances in electron density in the ionosphere. The applicability of these relationships in practical use was demonstrated.

In the third chapter, the impact of solar eclipses (SEs) on the ionosphere and characteristics of radio waves is examined. It has been established that variations in the Doppler shift (DS) on vertical and oblique radio paths were similar. On oblique paths, multipath propagation had a more pronounced effect. The SE of June 10, 2021, was accompanied by an enhancement of wave activity in the ionosphere. The period $T \approx 5$–12 minutes and relative amplitudes of quasi-periodic variations in the electron density $\delta_N \approx 0.3$–0.6% indicated the generation of wave-like disturbances by atmospheric gravity waves (AGWs). Additionally, for the first time, the response of the total electron content (TEC) to an SE was investigated using GNSS technologies, both before and during the passage of the evening terminator. It was found that SE triggers physicochemical and dynamic processes in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere (EAIM) system, ensuring the continuation of ionospheric response even after the end of the eclipse and sunset on Earth's surface. The duration of the response reached 120–180 min. The magnitude of the depletion generally tracked the decrease in the SE magnitude and $A_{\max}$. Thus, there are grounds to believe that a synergistic interaction between the SE and the terminator occurred.

The fourth chapter presents the results of ionospheric observations during the launches and flights of heavy rockets (RLs) from the Baikonur Cosmodrome for the 2009–2021 period, which roughly coincides with the period of 24th solar activity cycle. A statistical analysis was performed on 134 cases of RLs (81 launches of Soyuz rockets and 53 launches of Proton rockets). The existence of several groups of the ionospheric potential response time delays to rocket launches and flights was confirmed. These delays ranged from ~10 to ~300 min. The following groups of

apparent horizontal propagation speeds of disturbances correspond to these groups: ~100–200 m/s; 390 ± 23 m/s; 0.97 ± 0.10 km/s; 1.28 ± 0.13 km/s; 1.68 ± 0.13 km/s; 2.07 ± 0.13 km/s, and ~8 km/s. Such speeds are characteristic of slow AGWs, AGWs of man-made origin, density shock waves, and slow and ordinary MHD waves. The disturbances generated (excluding shock waves) were generally quasi-periodic, with periods ranging from ~5 to ~20 min and DS amplitudes between 0.1 and 0.3 Hz. The relative amplitude δ_N of electron density variations typically ranged within ~1–10%, occasionally reaching ~20%. The ionospheric response to RLs during geospace storms of various intensities was also investigated. Detection of this response for a distant (~2000 km) launch and flight of a heavy rocket against the background of a storm using the Doppler method was generally possible when $K_{p\max} \leq 5$; at higher values, detection is very difficult or even impossible. In some cases, even at $K_{p\max} = 4$, the response identification was difficult. It was substantiated that to enhance the reliability of detecting responses to rocket launches and flights, Doppler radar should operate simultaneously at a number of frequencies in the range from 1.5–2 MHz to 4–6 MHz. The existence of several groups of horizontal apparent propagation speeds was confirmed: 1.7–3 km/s and higher, 700–1000 m/s, 300–700 m/s, and 150–260 m/s.

The fifth chapter is devoted to the interaction of powerful pulsed and periodic radio emission with ionospheric plasma. Observations were conducted 960 km away from the heating facility. As a result, it was shown for the first time that during the minimum of solar activity, the disturbances recorded in the ionosphere at this distance can occur at an effective power of 25 MW. With monopulse radiation, the duration of the ionospheric response coincided with the duration of the monopulse, while quasi-periodic variations of the HF signal only began to be generated. An apparent horizontal propagation speed of disturbances was established (from ~300 to ~420 m/s). It is important to note that this speed increased with altitude. The periodic mode of radiation from the heating facility was accompanied by the generation of quasi-periodic disturbances in electron density with a relative amplitude of ~1% and a period close to the Brunt-Väisälä period.

Chapter six examines the temporal variations in the characteristics of HF radio waves and ionospheric disturbances during one of the strongest storms of the 25th solar cycle, the geospace storm of April 23–24, 2023. On the disturbed days of April 23 and 24, 2023, significant (up to ±1.5 Hz) broadening of Doppler spectra, enhanced multipath propagation, and increased radio wave scattering were observed. Wave activity in the ionosphere increased substantially. The Doppler shift exhibited oscillations within a wide range of periods (from ~8–10 min to 100–120 min) with amplitudes ranging from 0.04 Hz to 0.3–0.4 Hz. The ionospheric storm was accompanied by long-term (up to 10 hours) quasi-periodic variations in the height of radio wave reflection, with amplitudes depending on the radio path and reaching 30–130 km for a period of 100–120 min. The average vertical motion speed of the radio wave reflection region varied from ~10 m/s to ~60 m/s. Short-term (~10–25 min) aperiodic variations in this height ranged from 30 to 70 km, with speeds of 50–100 m/s. The relative amplitude of quasi-periodic variations in electron density was 1.6–3.5% for periods of 8–15 min. For periods close to 40 min, this value approached 29–39%

Keywords: ionosphere, atmospheric and ionospheric radio channel, high-energy source, atmospheric gravity wave, ionospheric disturbance, solar eclipse, rocket launches, geospace storm, radio wave characteristics, Doppler shift, electron density, aperiodic and quasi-periodic disturbances, oblique radio-wave sounding, apparent speed, time delay.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в фахових виданнях:

1. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., **Жданко Є. Г.**, Пушин В. Ф., Цимбал А. М., Zheng Yu. Параметри рухомих іоносферних збурень: результати просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 37. С. 47-59. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-04.

(Особистий внесок здобувача: Участь в обробці експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Розрахунок основних параметрів рухомих іоносферних збурень. Участь у фізичній інтерпретації отриманих результатів.

Особистий внесок Чорногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та основних результатів, їх аналіз.

Особистий внесок Гармаша К.П.: Розробка комплексу. Проведення випробувань його працездатності.

Особистий внесок Guo Q.: Здійснення вимірювань.

Особистий внесок Zheng Yu.: Здійснення вимірювань.

Особистий внесок Пушина В.Ф.: Розробка математичної моделі.

Особистий внесок Цимбала А.М.: Участь в обробці експериментальних даних.)

2. Чорногор Л. Ф., **Жданко Є. Г.** Допплерівське зміщення частоти ВЧ радіохвиль у іоносфері на похилих радіотрасах. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 39. С. 60-68. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-05.

(Особистий внесок здобувача: Виконання аналітичних обчислень та розрахунків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.

Особистий внесок Чорногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та заключних висновків.)

3. Чорногор Л. Ф., Дорохов В. Л., **Жданко Є. Г.**, Милованов Ю. Б., Цимбал А. М. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. поблизу вечірнього термінатора. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 39. С. 69-78. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-06.

(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів. Аналіз часових варіацій ПЕВ. Участь у фізичному тлумаченні отриманих результатів.

Особистий внесок Чорногора Л.Ф.: Постановка задачі. Фізичне тлумачення. Написання обговорення та основних результатів.

Особистий внесок Дорохова В.Л.: Збір експериментальних даних.

Особистий внесок Милованова Ю.Б.: Обробка експериментальних даних.

Особистий внесок Цимбала А.М.: Обробка експериментальних даних.)

Наукові праці в наукових виданнях, які індексуються в науковометричній базі SCOPUS:

4. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., **Zhdanko Y. H.** Response of total electron content to the October 25, 2022 partial solar eclipse from high to low latitudes in the Euro-Asian region. Advances in Space Research. Vol. 74, No. 4. P. 1793-1809. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.020.

5. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., **Жданко Є. Г.**, Леус С. Г., Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. Радіофізика і радіоастрономія. 2021. Т. 26, № 4. С. 326-343. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326.

6. Luo Y., Чорногор Л. Ф., **Жданко Є. Г.** Іоносферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28, № 3 (136). С. 62-85. DOI: https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062.

7. Чорногор Л. Ф., **Жданко Є. Г.**, Luo Y. Особливості генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного стенда. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. Т. 27, № 3. С. 188-202. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra27.03.188.

8. Luo Y., Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Geospace perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome. Kinematics and physics of celestial bodies. 2022. Vol. 38, No. 6. P. 287-299. DOI: https://doi.org/10.3103/S0884591322060046.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Analytical theory of the Doppler shift of HF radio waves along oblique propagation paths in the isotropic ionosphere. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18–21, 2022, Kyiv. P. 86-87.

2. Chernogor L. F., Garmash K. P., Leus S. G., Podnos V. A., Tsymbal A. M., **Zhdanko Y. H.** Multifrequency Doppler Software-Controlled Receiving System for Space Weather Monitoring. Proceedings of the 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). October 10–14, 2022, Kyiv. P. 606-611. DOI: https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927064.

3. Chernogor L. F., Rozumenko V. T., **Zhdanko Y. H.** Doppler (HF) Radar Facility for Monitoring Dynamic Processes in Geospace. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). October 10–14, 2022, Kyiv. P. 600-605. DOI: https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927090.

4. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., **Zhdanko Y. H.**, Zheng Yu. Features of the ionospheric radio wave characteristics over China observed during the solar eclipse of June 21, 2020. Proceedings of the International

Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022. October 18–22, 2022, Kyiv. P. 132-133.

5. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Pushin V. F., Tsymbal A. M., **Zhdanko Y. H.**, Zheng Yu. Parameters of traveling ionospheric disturbances: from spaced oblique HF sounding data. Proceedings of the International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022. October 18–22, 2022, Kyiv. P. 128-129.

6. Chernogor L. F., Pushin V. F., **Zhdanko Y. H.** Methodology and results of the study of traveling ionospheric disturbances parameters from spaced oblique HF sounding data. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18–21, 2022, Kyiv. P. 87-88.

7. Chernogor L. F., Garmash K. P., **Zhdanko Y. H.** Features of ionospheric effects from the partial solar eclipse over the city of Kharkiv on 10 June 2021. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 23–26, 2023, Kyiv. P. 127-128.

8. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Ionospheric perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome during solar cycle 24. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 23–26, 2023, Kyiv. P. 128-130.

9. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Effects of rocket launches in the ionosphere during geospace storms. Proceedings of the XIX International Scientific Conference Electronics and Applied Physics APHYS 2023. October 17–21, 2023, Kyiv. P. 105-107.

10. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.**, Guo Q., Zheng Y., Wang J. Effects from the 23–24 April 2023 geospace storm over the People’s Republic of China. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the

Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 28–31, 2024, Kyiv. P. 70-72.

11. Chernogor L. F., Pushin V. F., **Zhdanko Y. H.** The impact of ionospheric disturbances on decameter radio wave trajectories. Proceedings of the XX International Scientific Conference Electronics and Applied Physics APHYS 2024. October 22–25, 2024, Kyiv. P. 212-213.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ГОЛОВНИХ УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ.....19
ВСТУП.....21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....29
1.1. Земна іоносфера.....29
1.2. Космічна погода.....31
1.3. Джерела збурень геокосмосу.....32
1.3.1. Сонячні затемнення.....33
1.3.2. Сонячний термінатор.....35
1.3.3. Геокосмічні бурі.....36
1.3.4. Старти ракет.....37
1.3.5. Потужне радіовипромінювання.....38
1.4. Радіофізичні методи дослідження іоносфери.....40
1.4.1. Іоносферні станції (іонозонди).....40
1.4.2. Вертикальне допплерівське радіозондування.....41
1.4.3. Похиле допплерівське радіозондування.....43
1.4.4. Некогерентне розсіяння.....45
1.4.5. Супутникові методи.....45
1.5. Висновки до розділу 1.....47
РОЗДІЛ 2. ПОХИЛЕ РАДІОЗОНДУВАННЯ. ТЕОРІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ.....49
2.1. Допплерівське зміщення частоти ВЧ радіохвиль в іоносфері на похилих радіотрасах.....49
2.1.1. Постановка задачі. Вихідні співвідношення.....49
2.1.2. Відбиття радіохвиль при похилому зондуванні.....51
2.1.3. Моделі збурень.....52
2.1.4. Періодичні варіації ДЗЧ.....52
2.1.5. Аперіодичні варіації ДЗЧ.....54
2.1.6. Обговорення.....55

2.2. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери.....56
2.2.1. Методи обробки сигналів.....64
2.2.2. Приклади реєстрацій впливу високоенергетичних джерел.....66
2.2.3. Обговорення.....73
2.3. Параметри рухомих іоносферних збурень: результати просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування.....73
2.3.1. Результати спостережень.....77
2.3.2. Обговорення.....82
2.4. Висновки до розділу 2.....83
РОЗДІЛ 3. ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ.....85
3.1. Кільцеподібне сонячне затемнення 10 червня 2021 р.....85
3.1.1. Загальні відомості.....85
3.1.2. Стан космічної погоди.....86
3.1.3. Дані іонозонда.....88
3.1.4. Результати вертикального зондування.....88
3.1.5. Результати похилого зондування.....92
3.1.6. Квазіперіодичні збурення.....96
3.1.7. Аперіодичні збурення.....97
3.2. Часткове сонячне затемнення 25 жовтня 2022 р.....98
3.2.1. Загальні відомості.....98
3.2.2. Аналіз стану космічної погоди.....98
3.2.3. Засоби та методи.....102
3.2.4. Результати супутникових спостережень.....104
3.2.5. Результати статистичного аналізу.....113
3.2.6. Обговорення.....120
3.3. Висновки до розділу 3.....122
РОЗДІЛ 4. ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ СТАРТІВ ВАЖКИХ РАКЕТ.....124
4.1. Загальні відомості.....124

4.2. Засоби та методи.....126
4.3. Ефекти стартів ракет за спокійних геофізичних умов.....126
4.3.1. Стан космічної погоди.....126
4.3.2. Результати вертикального зондування.....126
4.3.3. Статистичний аналіз.....135
4.3.4. Обговорення.....140
4.4. Ефекти стартів ракет на фоні геокосмічних бур.....142
4.4.1. Стан космічної погоди.....142
4.4.2. Результати спостережень ефектів старту ракети *Протон*.....144
4.4.3. Результати спостережень ефектів старту ракети *Союз*.....152
4.4.4. Обговорення.....158
4.5. Висновки до розділу 4.....162
РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ НА ІОНОСФЕРУ ПОТУЖНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ.....164
5.1. Нагрівний стенд «Сура».....164
5.2. Методи обробки даних.....164
5.3. Стан космічної погоди.....165
5.4. Результати аналізу даних вертикального зондування.....167
5.5. Обговорення.....170
5.6. Висновки до розділу 5.....172
РОЗДІЛ 6. ВАРІАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ВЧ РАДІОХВИЛЬ ПІД ЧАС ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 23–24 КВІТНЯ 2023 РОКУ НАД КИТАЄМ.....173
6.1. Засоби та методи.....173
6.2. Космічна погода.....174
6.3. Результати багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери.....177
6.3.1. Радіотраса Hwaseong–Harbin.....177

6.3.2. Радіотраса Goyang–Harbin.....179
6.4. Коливання рівня відбиття.....181
6.5. Квазіперіодичні процеси.....182
6.6. Варіації характеристик радіохвиль.....184
6.7. Висновки до розділу 6.....184
ВИСНОВКИ.....186
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....190
ДОДАТОК А 214

ПЕРЕЛІК ГОЛОВНИХ УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

АГХ – атмосферна гравітаційна хвиля

ГНСС – Глобальна навігаційна супутникова система

ДЗЧ – допплерівське зміщення частоти

ДС – допплерівський спектр

ЗАІМ – Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера

ІБ – іоносферна буря

МБ – магнітна буря

ПЕВ – повний електронний вміст

РІЗ – рухоме іоносферне збурення

СЗ – сонячне затемнення

СМСМІАЗ – Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля

СР – старт ракети

ХНУ – Харківський національний університет

LT – Local Time, місцевий час

UT – Universal Time, всесвітній час

A – відносна затінена площа диска Сонця, амплітуда радіохвилі

c – швидкість світла у вакуумі

e – заряд електрона

f – частота радіохвилі

f_D – допплерівське зміщення частоти

f_p – плазмова частота електронів

H – висота однорідної атмосфери

K – множник, що враховує кривизну Землі і залежить від траєкторії хвилі

L – характерний масштаб зміни N поблизу висоти відбиття радіохвилі

М – фаза затемнення

m – маса електрона

N – концентрація електронів

n – показник заломлення

R, r – відстань від джерела до місця реєстрації

s – шлях радіохвилі

T – період

v – швидкість

v' – удавана швидкість

ΔT – тривалість сигналу

Δt – час запізнювання

δ_N – відносна зміна концентрації електронів

ε_0 – електрична стала

λ – довжина хвилі

φ – фаза хвилі

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Іоносфера дотепер залишається основним каналом поширення радіохвиль різних діапазонів (від вкрай низьких до надвисоких частот). Особливістю цього каналу є залежність його параметрів від стану космічної погоди. Космічна погода формується, перш за все, процесами на Сонці та, в меншій мірі, процесами на Землі. Певний внесок у стан космічної погоди можуть давати й високоенергетичні процеси техногенного походження [1, 2]. Вплив джерел енерговиділення різної фізичної природи на іоносферу зумовлює її динаміку. Вивчення динамічних процесів у іоносфері є важливим, як для радіофізики геокосмоса, прогнозування параметрів каналу поширення, так і для отримання відомостей про джерела енерговиділення. В цьому полягає актуальність досліджень.

Динамічні процеси в іоносфері досліджуються багатьма наземними та супутниковими методами. Супутникові методи проводять вимірювання як in situ, так і шляхом просвічування іоносфери. Останнім часом набула значного розвитку GPS-технологія вивчення динаміки іоносфери [3, 4]. Серед наземних методів найбільш інформативним є метод некогерентного розсіяння [5, 6]. Через високу вартість радари некогерентного розсіяння не можуть вести безперервний моніторинг іоносфери. Найбільший обсяг інформації про іоносферу (принаймні до максимуму шару F2) отримано за допомогою мережі іонозондів, які використовують вертикальне зондування іоносфери [7]. Іонозонди розташовані на земній кулі вкрай нерівномірно. Крім того, вони дають інформацію про динамічні процеси в іоносфері переважно над місцем розташування іонозонда.

Більше можливостей для дослідження в галузі радіофізики геокосмоса, вивчення каналу поширення радіохвиль і динамічних процесів в іоносфері мають засоби похилого зондування [8–12]. В цьому випадку можуть використовуватися як власні радіопередавальні пристрої [12–15], так і мережа радіомовних станцій [8–12]. За допомогою похилого зондування вдається

охопити значні регіони Земної кулі (аж до глобальних), і тим самим вивчати динамічні процеси в геокосмосі над цими регіонами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

У дисертації наведено результати досліджень, виконаних автором з його науковим керівником протягом 2021–2024 рр. відповідно до перелічених нижче науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

1. Дистанційний вплив електромагнітного випромінювання на електронні, радіотехнічні засоби та канали телекомунікацій (2021–2023 рр.), номер держреєстрації 0121U109881 (виконавець напрямку).

2. Великомасштабні та глобальні фізичні процеси в системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера природного та техногенного походження (2022–2024 рр.), номер держреєстрації 0122U001476 (виконавець напрямку).

3. Проєкт Національного фонду досліджень України 2020.02/0015 "Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля – атмосфера – іоносфера" (2020–2021 рр.) (виконавець напрямку).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є експериментальні дослідження характеристик радіосигналів та параметрів динамічних процесів на прикладі природних (сонячні затемнення, сонячний термінатор, геокосмічні бурі) та техногенних (старти ракет і потужне радіовипромінювання) джерел.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються наступні задачі:

– Експериментальні дослідження та отримання кількісних варіацій характеристик радіохвиль та параметрів іоносфери, викликаних сонячними затемненнями.

– Експериментальні дослідження та отримання кількісних варіацій характеристик радіохвиль і параметрів іоносферних процесів, викликаних стартами та польотами важких ракет у спокійних і збурених умовах.

– Експериментальні дослідження та отримання кількісних варіацій характеристик радіохвиль та параметрів великомасштабних збурень в іоносфері під впливом потужного радіовипромінювання.

– Експериментальні дослідження параметрів іоносферних процесів, викликаних геокосмічною бурею та їх впливу на варіації характеристик радіохвиль.

– Фізична інтерпретація отриманих результатів та уточнення механізмів поширення іоносферних збурень від високоенергетичних джерел.

Об'єкт дослідження – динамічні процеси в іоносферному радіоканалі.

Предмет дослідження – характеристики радіосигналів і збурень іоносферного радіоканалу, визначення основних параметрів динамічних процесів.

Методи досліджень. У дисертації використовуються відомі методи статистичної радіофізики та математичної статистики, експериментальний метод вертикального та похилого радіозондування, статистичний аналіз, числові методи комп'ютерної математики, а також фізичне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Для похилого ВЧ зондування іоносфери отримано скоригований закон секанса, а також співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти, відносної амплітуди квазіперіодичних збурень і величини аперіодичних збурень концентрації електронів у іоносфері. Продемонстровано застосовність співвідношень при використанні на практиці.

2. З застосуванням багаточастотного багатотрасового когерентного радіотехнічного комплексу ВЧ діапазону для просторово рознесеного похилого радіозондування іоносфери розроблено методику визначення параметрів рухомих іоносферних збурень: періоду, горизонтальної довжини хвилі, горизонтальної швидкості й азимуту приходу. Підтверджено, що рухомі іоносферні збурення з відповідними періодами викликаються генерацією та поширенням АГХ. Визначено відносну амплітуду збурень концентрації електронів у хвилі та напрямок переміщення. Успішне функціонування розробленого багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу похилого зондування іоносфери продемонстровано під час дослідження динамічних процесів, викликаних різними джерелами енерговиділення.

3. Комплекс потенційно здатний виявляти відносне ДЗЧ ~10^{-10}, зсув фази в НЧ діапазоні ~0.1°, варіації сигналу не менше 2–3%, збурення концентрації електронів з відносною амплітудою не менше, ніж ~10^{-2} % та динамічні процеси, які супроводжуються вертикальним рухом зі швидкістю не меншою ~0.02–0.05 м/с.

4. Проаналізовано параметри іоносферних збурень, що послідували за стартами 81 ракети *Союз* та 53 ракет *Протон* з космодрому Байконур у 2009–2021 рр. Підтверджено існування декількох груп часів запізнювання можливої реакції іоносфери на старт і політ ракет. Значення цих часів змінювалися від ~10 до ~300 хв. Їм відповідає декілька груп удаваних горизонтальних швидкостей поширення збурень (~100–200 м/с; 390 ± 23 м/с; 0.97 ± 0.10 км/с; 1.28 ± 0.13 км/с; 1.68 ± 0.13 км/с; 2.07 ± 0.13 км/с, а також ~8 км/с). Такі швидкості мають повільні АГХ, АГХ техногенного походження, ударні хвилі густини, повільні та звичайні МГД хвилі. Виникаючі збурення, як правило, були квазіперіодичними. Період становив від ~5 до ~20 хв, а амплітуда ДЗЧ – 0.1–0.3 Гц. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів зазвичай становила ~1–10%, рідше досягала ~20%. Встановлено,

що виявлення реакції іоносфери на віддалений на ~ 2000 км старт і політ великої ракети на фоні геокосмічної бурі допплерівським методом зазвичай можливе за індексу $K_{p\max} \leq 5$, а за більших його значень дуже ускладнено або взагалі неможливе. У ряді випадків навіть за індексу $K_{p\max} = 4$ визначення реакції ускладнено. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети допплерівський радар повинен одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5–2 до 4–6 МГц. Підтверджено існування декількох груп горизонтальних удаваних швидкостей поширення збурень: 1.7–3 км/с і більше, 700–1000, 300–700, 150–260 м/с.

5. Виконано радіофізичні спостереження за динамічними процесами в іоносфері протягом СЗ 10 червня 2021 р. і в контрольні дні. Встановлено, що часові варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих радіотрасах в цілому були подібними. На похилих радіотрасах помітніше позначалася багатомодовість. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності в атмосфері й іоносфері. Спостерігалося не менше трьох хвильових цугів. Значення періодів ($T \approx 5$–12 хв) і відносних амплітуд ($\delta_N \approx 0.3$–0.6%) свідчили про те, що хвильові збурення викликані атмосферними гравітаційними хвилями. Аперіодичний ефект СЗ виявився занадто малим (менше 0.01 Гц), аби його можна було впевнено спостерігати. Малість ефекту зумовлена незначною фазою часткового затемнення над Харковом (не більше 0.11).

6. Вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію ПЕВ на сонячне затемнення 25 жовтня 2022 р., що мало місце перед проходженням та в період проходження вечірнього термінатора. Встановлено, що реакція іоносфери на СЗ спостерігалася у глобальних масштабах (від станції Рейк’явік до станції Новосибірськ), а саме СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі. Вперше отримано статистичні характеристики збурень ПЕВ, викликаних затемненням на різних широтах та довготах. Своєрідною була поведінка варіацій ПЕВ під час та після заходу сонця. Зменшення ПЕВ досягало 1.0–19.0 TECU, а

максимальне відносне зменшення приблизно –0.32. Зміни всіх параметрів збурення ПЕВ складним чином залежали від відносної площі покриття диску Сонця. Це може пояснюватися немонотонними змінами концентрації електронів у денний час, активізацією іоносферно-плазмосферної взаємодії протягом СЗ, збуренням системи іоносферних струмів, вертикальним дрейфом плазми, а також впливом великомасштабних збурень концентрації електронів, що генеруються затемненням. Час запізнювання максимальної реакції іоносфери відносно максимальної фази затемнення становив 15–25 хв. Тривалість реакції іоносфери на СЗ дещо перевищувала тривалість дії збурюючого джерела і сягала 120–180 хв. Є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія сонячного затемнення та термінатора.

7. Вперше показано, що в період мінімуму сонячної активності реєстровані збурення в іоносфері на відстані близько 960 км від нагрівного стенда можуть виникати при ефективній потужності, рівній 25 МВт. Під впливом моноімпульсу на іоносферну плазму тривалість реакції іоносфери співпадала з тривалістю моноімпульсу. При цьому квазіперіодичні варіації ДЗЧ тільки починали генеруватися. Удавана горизонтальна швидкість поширення збурень становила від ~ 300 до ~ 420 м/с. Важливо, що зі збільшенням висоти від ~ 110 до ~ 170 км ця швидкість збільшувалася від 296 до 320 м/с. Таку швидкість мають рухомі іоносферні збурення, пов’язані з АГХ. Періодичний режим випромінювання нагрівного стенда супроводжувався генерацією квазіперіодичних збурень концентрації електронів з відносною амплітудою ~ 1 % і періодом, близьким до періоду Брента–Вяйсяля.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримано кількісні оцінки збурень параметрів іоносферного радіоканалу та характеристик радіосигналів ВЧ діапазону, викликаних дією високоенергетичних джерел різної фізичної природи. Розроблено практичні рекомендації, спрямовані на послаблення впливу високоенергетичних джерел

на іоносферний радіоканал та функціонування засобів радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії, дистанційного радіозондування тощо.

Значна частина результатів дисертації увійшла в підсумкові звіти за науково-дослідними роботам кафедри космічної радіофізики, для яких отримані акти про впровадження результатів досліджень.

Особистий внесок здобувача полягає в обробці значного масиву експериментальних даних похилого та вертикального допплерівського радіозондування (2009–2021 рр.), їхньому аналізі, проведенні розрахунків, написанні розділів статей і тез, безпосередній участі в обговоренні та фізичному тлумаченні отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Представлені в роботі результати доповідалися на 3 міжнародних конференціях:

– 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Kyiv, Ukraine, 10–14 October 2022).

– Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 18–21 October 2022; 23–26 May 2023, 28–31 May 2024).

– XVIII International Conference "Electronics and Applied Physics" (APHYS) (Kyiv, Ukraine, 18–22 October 2022; 17–21 October 2023).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані у 21 науковій праці, серед яких 8 статей у наукових фахових виданнях України (4 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 2 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (входять до наукометричної бази Scopus), 11 – матеріали доповідей на конференціях (зокрема 2 тези, що входять до наукометричної бази Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, Вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку.

Загальний обсяг роботи складає 218 сторінок, основного тексту – 134 сторінки. Робота ілюстрована 85 рисунками, 19 таблицями. Список використаних джерел містить 193 найменування.

Автор дисертаційної роботи висловлює подяку співавторам та співробітникам кафедри космічної радіофізики, які внесли вагомий вклад в результати досліджень, наведених в дисертації. Окрема подяка К. П. Гармашу, за надання експериментальних даних, допомогу у використанні комп'ютерних програм та корисні поради, а також В. Ф. Пушину за регулярне консультування та роз'яснення низки методів і алгоритмів наданих комп'ютерних засобів і детальні інструкції до них.

Особлива подяка науковому керівнику, завідувачу кафедри, доктору фізико-математичних наук, професору, член-кореспонденту НАН України, Чорногору Леоніду Феоктистовичу за розробку нових концепцій до взаємодії підсистем в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера під час впливу високоенергетичних джерел, за допомогою яких у цій роботі проведено дослідження параметрів сигналів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Земна іоносфера

Існування провідного шару атмосфери, який тепер називають іоносферою, у 1902 р. припустили американський інженер А. Кеннелі та незалежно від нього англійський фізик О. Хевісайд. Перші дослідження іоносфери та розвиток методів для цього почалися вже у 1920–1930-х рр., але найбільша активізація у цій області відбулася після закінчення Другої світової війни.

З точки зору поширення радіохвиль, іоносфера є найважливішою частиною атмосфери Землі. Вона широко використовується в якості каналу в радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційному зондуванні Землі з космосу, а також в радіоастрономії. Важливим є те, іоносфера рідко буває спокійною. Її характеристики збурюються низкою природних і техногенних потужних джерел енерговиділення, впливаючи таким чином на параметри радіохвиль усіх діапазонів, але найбільше на хвилі декаметрового діапазону.

Зараз відомо, що іоносфера простягається від 50–60 км до 1000 км над земною поверхнею. Оскільки іоносфера є плазмою, хоча й слабкоіонізованою, головною характеристикою за якою її поділяють на висотні області є концентрація електронів (рис. 1.1) або похідна від неї величина – плазмова частота. Залежно від неї, в іоносфері виділяють *D* (55–90 км), *E* (від 90 до 120–150 км) та *F* (від 120–150 до 1000 км) області. Область *F* також розділяють на F_1 (від 120–150 до 250 км) і F_2 (250–1000 км). Завдяки області *F* є можливою передача декаметрових радіосигналів на значні відстані. Також, на висотах 100–120 км може спостерігатися тонкий (декілька кілометрів) спорадичний шар E_S. Він характеризується незвичайно високою для шару *E* концентрацією електронів ($N \geq 10^{11}$ м$^{-3}$), що сильно впливає на поширення радіохвиль.

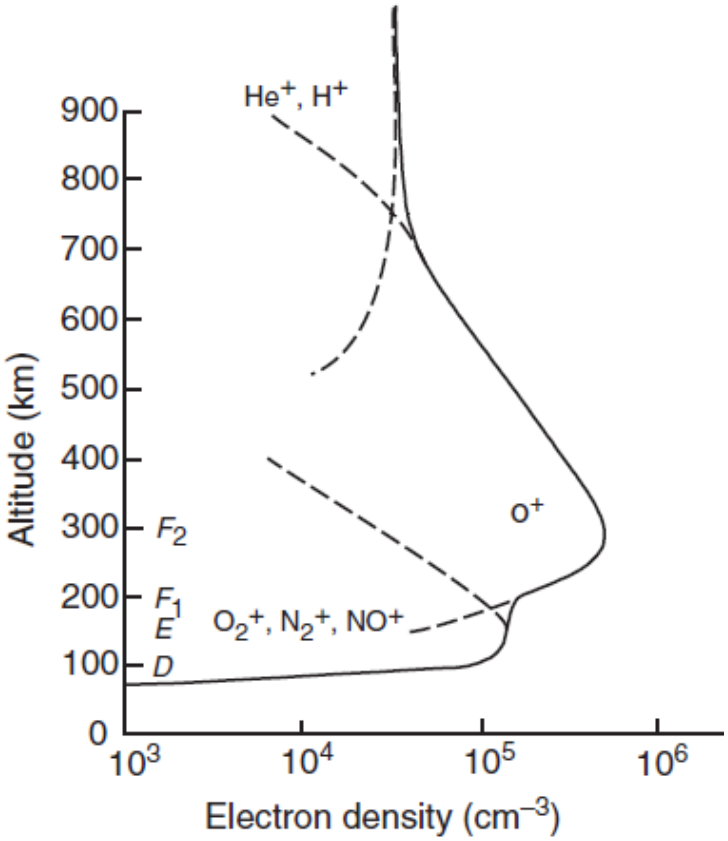


Рис. 1.1. Типові профілі концентрації електронів та іонів для денної іоносфери середніх широт [16]

Вночі концентрація в *F* області приблизно на порядок менше за денну, у шарі *E* приблизно на півтора порядки, а шар *D* зникає повністю.

Умовно іоносферу також можна поділити на нижню (50–100 км), середню (100–300 км) та зовнішню (300–1000 км) [17].

Джерелами іонізації високих шарів атмосфери є короткохвильове випромінювання Сонця, зокрема рентгенівське, галактичні космічні промені, а також потоки корпускул.

Що стосується хімічного складу, то нижня іоносфера Землі складається в основному з нейтралів (переважно атоми та молекули азоту N і кисню O). Середня іоносфера містить більш легкі іони кисню та азоту, а зовнішня складається з протонів та іонів гелію (див. рис. 1.1).

1.2. Космічна погода

Так само як звичайна погода описує стан приземної атмосфери, космічна погода описує стан навколоземного середовища та існуючих у ньому електричних та магнітних полів.

Космічна погода – фізичний і феноменологічний стан природного космічного оточення, що включає Сонце, сонячний вітер і геокосмос (магнітосферу, іоносферу і термосферу), а також їхню взаємодію з Землею, біосферою і техносферою. Характерний час варіацій космічної погоди змінюється від кількох хвилин до декількох діб [18].

Для її кількісного опису було запроваджено низку геомагнітних індексів, яких існує близько 20 різновидів, але в даній роботі будуть використовуватися лише два: K_p і D_{st}.

K_p-індекс є тригодинним планетарним індексом введеним у 1949 р. Юліусом Бартельсом. Він характеризує глобальну збуреність геомагнітного поля спричинену нестаціонарними високоенергетичними процесами на Сонці. K_p-індекс є середнім значенням двох горизонтальних компонент магнітного поля Землі і обчислюється з даних K-індексу, який визначається у 13 спеціальних обсерваторіях, що розміщені між 48° північної та 63° південної геомагнітними широтами. Індекс може приймати 28 значень від 0 до 9: 0, 0+, 1–, 1, …, 8+, 9–, 9. Умовно значення від 0 до 2–3 відповідають спокійному стану магнітного поля, від 3 до 4–5 – збуреному стану, а значення від 5 до 9 однозначно свідчать про настання магнітної бурі. Останнім присвоєно рівні від G1 (K_p = 5) до G5 (K_p = 9) за класифікацією NOAA [https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation]: слабка, середня, сильна, дуже сильна та екстремальна бурі.

У 1964 р. М. Сугіура ввів індекс низькоширотної геомагнітної активності D_{st} (Disturbance storm-time) [19, 20]. Цей індекс характеризує зміну геомагнітного поля через вплив кільцевих струмів, що виникають під час бур у магнітосфері. Вона є найбільшою саме у низьких широтах. У смузі

приблизно ±30° геомагнітної широти, розташовані 4 рівномірно розподілені за довготою магнітні обсерваторії. На базі даних цих обсерваторій і розраховується середній за годину D_{st}-індекс.

За спокійних геофізичних умов значення індексу лежать у межах ±30 нТл, а під час магнітних бур він приймає від'ємні значення порядку сотень нТл. Найменше від'ємне зареєстроване значення за відомої події Керрінгтона становило ~1000 нТл [21].

Для оцінки сонячної активності застосовуються індекс $F_{10.7}$ та число Вольфа W.

Число Вольфа (відносна кількість сонячних плям) було запропоновано у 1849 р. швейцарським астрономом Рудольфом Вольфом. Воно характеризує сонячну активність і розраховується за формулою

$$W = k\cdot(f + 10g), \tag{1.1}$$

де f – кількість спостережуваних плям на сонячному диску, g – кількість спостережуваних груп плям, k – нормувальний коефіцієнт, що приводить до єдиного стандарту результати, отримані на різних телескопах.

Ще один індекс сонячної активності було введено у 1947 р., невдовзі після відкриття радіовипромінювання від Сонця. Ним є потік радіовипромінювання $F_{10.7}$ на частоті 2.8 ГГц (λ = 10.7 см), що вимірюється у сонячних одиницях потоку (1 с.о.п. = 10^{-22} Вт/(м^2·Гц)). Варіації $F_{10.7}$ добре корелюють з варіаціями числа Вольфа W, а також з інтенсивністю УФ випромінювання Сонця, і тому є зручною характеристикою його активності.

1.3. Джерела збурень геокосмосу

Джерела збурень навколоземного середовища поділяють на природні та штучні (або техногенні). Звісно, що найбільший вплив на газову оболонку нашої планети чинять природні джерела. Першопричиною значної кількості таких джерел є Сонце. Вони включають в себе сонячні спалахи, корональні викиди мас, високошвидкісні потоки гарячої плазми, сонячні затемнення,

сонячний термінатор, геокосмічні бурі та суббурі, які збурюють низку електричних та магнітних параметрів атмосфери та геокосмосу. Серед природних джерел першопричиною яких не є безпосередньо Сонце виділяють падіння метеороїдів, тропічні циклони (тайфуни), урагани, землетруси, цунамі, виверження вулканів, грозові розряди і т. п. Останні в даній дисертаційній роботі розглядатися не будуть.

Що стосується техногенних джерел, які як випливає з їх назви беруть свій початок від людської діяльності, то їх не можна ігнорувати. До них належать вибухи різних типів (хімічні або ядерні), інжекція в атмосферу хімічних речовин, запуски ракет, польоти великих літаків, вплив потужного радіовипромінювання тощо. Хоча їхня енергетика зазвичай є меншою, ніж природних джерел, нерідко вона є сумірною, а іноді навіть переважає природні, і може викликати суттєві зміни атмосферних та іоносферних параметрів, що у свою чергу спричинить варіації характеристик радіосигналів, які взаємодіють зі збуреними областями.

Далі розглянемо високоенергетичні джерела, іоносферні ефекти яких досліджуються в основній частині цієї роботи або які прямим чином впливають на результати спостереження.

1.3.1. Сонячні затемнення

Сонячне затемнення (СЗ) є високоенергетичним джерелом, що здатне викликати значні збурення у всіх підсистемах систем Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) [22, 23]. СЗ активує взаємодію підсистем у цих системах, збурює параметри динамічних процесів. Помітно збурюються всі геофізичні поля: магнітне, електричне та баричне. Якісно ефекти під час СЗ подібні ефектам, що спостерігаються під час сходу і заходу Сонця та протягом ночі, але суттєво відрізняються за часовими та просторовими масштабами. Незважаючи на сторічну історію вивчення

іоносферних ефектів СЗ, залишається невирішеною низка питань. До них, наприклад, належить питання про особливості ефектів СЗ у вечірній час, під час заходу Сонця та поблизу цієї події.

Затемнення характеризують фазою М, що дорівнює відносному зменшенню діаметра диска Сонця. При повному СЗ М = 1. Окрім фази, затемнення характеризують відносною затіненою площею *A* диска Сонця. Між *A* і М існує відомий функціональний зв'язок [24]:

$$A = \frac{2}{\pi}(\arcsin\sqrt{2\mathrm{M} - \mathrm{M}^2} - (1-\mathrm{M})\sqrt{2\mathrm{M} - \mathrm{M}^2}) . \qquad (1.2)$$

Графік цієї залежності приведено на рис. 1.2.

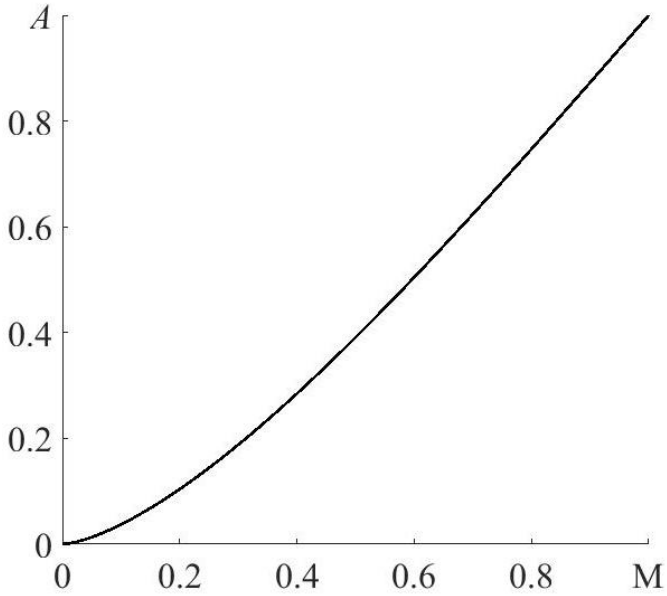


Рис. 1.2. Залежність відносної площі *A* покриття сонячного диска від магнітуди затемнення М [25]

Фізичні ефекти СЗ вивчаються більше 100 років. Протягом цього часу встановлено загальні закономірності в поведінці підсистем і геофізичних полів. До загальних закономірностей іоносферних ефектів СЗ слід віднести зменшення електронної концентрації, зміну швидкостей хімічних реакцій, зниження температури електронів та іонів, порушення зв'язку іоносфера – плазмосфера, появу динамічних процесів, генерацію РІЗ та інші ефекти. Піонерськими у цій області є роботи [24, 26–28]. Ще у 1950-ті рр. з'явився

перший збірник статей, присвячених дослідженню ефектів СЗ в іоносфері [29]. В XXI столітті видано першу монографію, присвячену ефектам СЗ в атмосфері та геокосмосі [23].

У космічну еру вивчення ефектів СЗ значно активізувалося. Відтоді опубліковано сотні наукових праць. У них вивчалися ефекти в усіх областях іоносфери, застосовувалися різні методи діагностики іоносфери, досліджувався вплив СЗ на поширення радіохвиль здебільшого ВЧ і ДНЧ/НЧ діапазонів.

Тільки за останні роки було опубліковано велику кількість робіт, присвячених іоносферним ефектам СЗ [4, 30–64], що підтверджує тезу про те, що кожне нове СЗ додає нові відомості про ефекти в системі ЗАІМ.

З аналітичного огляду іоносферних ефектів СЗ, що мали місце в XX–XXI століттях, випливає, що ефекти, викликані різними затемненнями суттєво відрізняються. Це пояснюється тим, що реакція іоносфери на СЗ залежить від фази сонячного затемнення, геометрії місячної тіні, сонячної активності, пори року, часу доби, місця спостереження, стану космічної погоди тощо. Тому дослідження впливу на іоносферу кожного нового СЗ залишається актуальною геофізичною та радіофізичною задачею.

1.3.2. Сонячний термінатор

Доцільно розглянути ще одне глобальне високоенергетичне джерело, яке найбільш регулярно діє на Земну атмосферу та іоносферу. Ним є сонячний термінатор (СТ). Дослідження впливу всіх джерел у даній роботі тією чи іншою мірою супроводжувалося втручанням СТ. Він являє собою рухому смугу, що відділяє освітлений повним диском Сонця бік Землі від неосвітленого, і помітно впливає на динаміку атмосфери. Швидкість руху СТ на екваторі становить близько 450 м/с, а ширина може сягати більше 500 км. СТ є джерелом хвильових збурень, зокрема, акустико-гравітаційних хвиль у нижній атмосфері, а також МГД хвиль у зовнішній іоносфері [65, 66]. Оскільки

СТ впливає на всю товщу атмосфери, він збурює й струмову систему динамо-області, результатом чого є спостережувані варіації геомагнітного поля. Поруч зі звичайним термінатором, на іншій півкулі Землі існує також магнітоспряжений термінатор, який формується при переносі енергії з області СТ магнітними силовими лініями. Періоди збурень від СТ зазвичай лежать у межах від декількох хвилин до декількох годин і це може ускладнювати виявлення квазіперіодичних збурень іншої природи, а їхні масштаби визначаються масштабами неоднорідностей в області СТ [67].

1.3.3. Геокосмічні бурі

Геокосмічна буря (ГБ) – це сильні збурення геомагнітного поля, динамічних процесів радіаційних поясів, іоносфери, верхньої атмосфери, геоелектричного поля магнітосферно-іоносферного походження і навіть тропосфери, а також земних струмів. Геокосмічна буря є сукупністю магнітної, іоносферної, атмосферної і електричної бур, які синергетично взаємодіють між собою [68–71].

Відгук іоносфери на різні геомагнітні бурі може значно відрізнятися, і навіть для поточної бурі її реакція може сильно відрізнятися залежно від широти і довготи.

Геомагнітні бурі виникають, коли має місце велика раптова зміна динамічного тиску сонячного вітру в магнітопаузі, що зазвичай відбувається під час впливу коронального викиду маси. Бурі можуть бути особливо сильними, коли підвищений тиск сонячного вітру пов’язаний із великою південнонапрямленою складовою міжпланетного магнітного поля.

У магнітних бур виділяють три фази: початкову, головну та відновлювальну. Під час початкової фази конвекція плазми та область висипання частинок збільшуються, на порядок збільшується електричне поле іоносферно-магнітосферного походження (у середніх широтах від 0.1–0.3 до 1–5 мВ/м), у радіаційному поясі накопичуються високоенергійні (порядку 1–

100 кеВ) електрони, які потім висипаються в іоносферу. Це супроводжується посиленням нагріву частинок та збільшенням струмів електроджету. Надходження енергії у верхні шари атмосфери максимальне під час головної фази. Потужні бурі можуть суттєво змінити густину, склад і циркуляцію у верхніх шарах атмосфери в глобальному масштабі, і такі зміни можуть зберігатися протягом декількох днів після закінчення бурі.

Геокосмічні бурі також є джерелами атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ). Вони генеруються у високих широтах і поширюються у бік екватора, що призводить до появи рухомих іоносферних збурень (РІЗ).

Прояви бур досліджують досить давно (див., наприклад, [72–81]).

Слід зазначити, що важливим є дослідження не тільки дуже сильних геокосмічних бур, але й слабких і помірних, під час яких також спостерігається посилення взаємодії підсистем системи ЗАІМ [1, 2, 82–85].

1.3.4. Старти ракет

Іоносферні ефекти, що супроводжують старти та польоти важких ракет вивчаються близько 60 років. Опубліковано десятки наукових статей та монографії [86–122]. Автори робіт [87–90] протягом багатьох років вивчають великомасштабні (~1–10 Мм) збурення, що виникають після стартів ракет. Як виявилося, у процесі старту та польоту важкої ракети виникають збурення в підстилаючій поверхні, атмосфері, іоносфері та навіть у магнітосфері. Краще інших досліджено ефекти поблизу траєкторії ракети, а саме області зниженої концентрації (іоносферні «діри»), а також генерацію інфразвукових та атмосферних гравітаційних хвиль (хвиль густини) [87–92, 95, 96, 110–114]. Параметри ефектів суттєво залежать від стану системи СМСМІАЗ, атмосферно-космічної погоди, географічних координат космодромів і засобів спостереження, типу ракет, їх траєкторії та виду палива, а також низки інших факторів.

Стартуюча ракета має енергетику, сумірну з енергетикою багатьох природних процесів. Енерговиділення для великих ракет досягає 10–100 ТДж, а потужність двигунів – 0.1–1 ТВт. Енерговиділення в одиниці об'єму набагато перевищує питомий енерговміст і енерговиділення всіх природних процесів. Навіть при старті двох однакових ракет збурення можуть сильно відрізнятися.

Для досліджень застосовувалися методи ефекту Допплера [92], Фарадея [97], некогерентного розсіяння [87–92, 119], іонозонди, магнітометричний метод [87, 91] та інші [86].

Ефекти, що супроводжують старти та польоти ракет, активно досліджуються і в даний час [98, 100, 101, 106, 108, 109, 116–118, 120, 121].

Практична значущість досліджень полягає у впливі збурень від стартів і польотів ракет на середовище, екологічну обстановку в системі ЗАІМ, характеристики радіохвиль різних діапазонів і, зрештою, на працездатність засобів телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування.

В даний час відсутні достатньо повні й адекватні моделі генерації та поширення збурень у системі ЗАІМ в цілому, що викликаються стартами та польотами великих ракет. Їхнє вивчення дозволяє краще зрозуміти механізми генерації та поширення збурень від ракети на глобальні відстані, взаємодію підсистем у системі ЗАІМ, екологічні наслідки стартів і польотів ракет із працюючими двигунами. Тому вивчення реакції підсистем на старти та польоти ракет залишається актуальною задачею.

1.3.5. Потужне радіовипромінювання

Взаємодії потужного радіовипромінювання з іоносферою в кінці XX і на початку XXI століть приділялося багато уваги [123–138]. Було детально досліджено велику кількість фізичних ефектів, що виникають у межах або поблизу діаграми спрямованості антени нагрівного стенда. Такі дослідження залишаються актуальними і на сьогодні.

Вплив потужним радіовипромінюванням на іоносферну плазму також є зручним інструментом для дослідження взаємодії підсистем у системі ЗАІМ, генерації та поширення збурень далеко за межі діаграми спрямованості випромінюючої антени. Такі збурення вважають великомасштабними. Що стосується квазіперіодичних великомасштабних збурень, то найбільш ефективним механізмом генерації є модуляція іоносферних струмів в області верхнього гібридного резонансу, посилена ефектом магнітного зеніту, менш ефективним – нагрів нейтралів на висотах 250–350 км. Періодична модуляція іоносферних струмів на всіх висотах радіохвилею, що проходить, виявилася неефективною. Модуляція іоносферних струмів у результаті ефекту магнітного зеніту та нагрів електронів під дією періодичного радіовипромінювання призводить до слабкого нагріву іонів і нейтралів на висотах, більших за 250 км, генерації акустико-гравітаційних хвиль у нейтральній атмосфері, модуляції цими хвилями концентрації електронів і поширення РІЗ приблизно на 1–2 тис. км [127–132, 136, 137]. Так проявляється взаємодія підсистем «іоносфера – атмосфера – іоносфера». Важливо, що збурення можуть поширюватися не тільки в горизонтальному, але і у вертикальному напрямках. До останніх відносяться, наприклад, потоки тепла та плазми вздовж магнітних силових ліній. Особливий інтерес становить можливість генерації досить низькочастотних електромагнітних хвиль, що проникають у магнітосферу та здатні викликати висипання високоенергійних електронів з радіаційного поясу і, як наслідок цього, додаткову іонізацію атмосфери [132, 138, 139]. Так може реалізовуватися взаємодія підсистем за схемою зі зворотним зв’язком: іоносфера → магнітосфера → радіаційний пояс → атмосфера → іоносфера [132, 139].

У роботі [136] описано результати перших, ранніх і нецілеспрямованих експериментальних досліджень великомасштабних (~1000 км) аперіодичних і квазіперіодичних збурень у нижній і середній іоносфері, а також викладено основні результати сучасних експериментів.

Взаємодія підсистем у системі ЗАІМ носить складний характер і на цей час вивчена ще недостатньо повно. Особливий інтерес представляє вивчення взаємодії підсистем у середніх широтах, де в природних умовах вона не так явно виражена, як у високих широтах.

1.4. Радіофізичні методи дослідження іоносфери

Розглянемо дистанційні методи дослідження іоносфери, які розвиваються вже багато років. Кожен з методів має свої недоліки і переваги, від яких залежить прояв досліджуваних процесів, оскільки різні методи реєструють різні параметри сигналу та досліджують різні іоносферні області.

1.4.1. Іоносферні станції (іонозонди)

Найбільший обсяг інформації про іоносферу (принаймні до максимуму шару F2) отримано за допомогою мережі іонозондів, які використовують вертикальне зондування іоносфери (див., наприклад, [3, 7, 8, 26–28, 140, 141]). Сутність методу полягає у відправці зондувальних сигналів на низці частот у вертикальному напрямку і подальшій реєстрації часів запізнювання приходу відбитих сигналів від відповідного іоносферного шару. Відбиття радіохвилі звичайної поляризації відбувається на рівні, де

$$f = f_p, \tag{1.3}$$

де f_p – плазмова частота. Знаючи час запізнювання t розраховують діючу висоту відбиття за простою формулою:

$$h = ct/2, \tag{1.4}$$

де c – швидкість світла у вакуумі.

В результаті отримують висотно-частотну характеристику, тобто іонограму.

Недоліком методу є те, що іонозонди чисельністю понад 200 штук розташовані на Земній кулі вкрай нерівномірно. До того ж, вони дають

інформацію про динамічні процеси в іоносфері переважно над місцем розташування іонозонда і лише нижче іоносферного максимуму.

1.4.2. Вертикальне допплерівське радіозондування

Тут, так само як і в іонозондовому методі, радіохвиля випромінюється вертикально вгору або близько до вертикалі, але в основу покладено вимірювання допплерівського зміщення частоти (ДЗЧ)

$$f_d = -\frac{f}{c}\frac{d}{dt}\int_s n ds, \tag{1.5}$$

де f – частота радіохвилі, n – показник заломлення, s – шлях радіохвилі, або в загальному випадку – допплерівських спектрів (ДС), а також амплітуди відбитого сигналу.

При вертикальному русі відбиваючого шару іоносфери

$$f_d = -2 f \frac{v}{c}, \tag{1.6}$$

де v – швидкість руху плазми.

Перевагою цього методу є висока чутливість до змін параметрів середовища [30, 142].

Для комплексного спостереження іоносферних процесів за допомогою низки методів у 1980 р. у ХНУ імені В. Н. Каразіна введено в дію Радіофізичну обсерваторію (49°38′ пн. ш., 36°20′ сх. д.). Основні параметри допплерівського радара наведено у табл. 1.1.

Радар спряжено з персональним комп’ютером, утворюючи програмно-апаратний комплекс для вимірювання та попередньої обробки відбитого від іоносфери сигналу в реальному часі.

Таблиця 1.1.

Основні параметри допплерівського радара

Діапазон частот	1–24 МГц
Потужність радіопередавального пристрою	1 кВт
Тривалість зондувального імпульсу	0.5 мс
Частота повторення імпульсів	100 Гц
Смуга пропускання прикінцевого фільтру	10 Гц
Дизайн антени	Вертикальні схрещені ромби
Коефіцієнт підсилення	1–10
Відношення сигнал/шум: Вдень Вночі	 10^3–10^4 10^5–10^6
Розрізнення за ДЗЧ	17 мГц

Комплексна амплітуда биттів коливань опорного генератора та відбитого сигналу записується в цифровому вигляді (частота опитування 10 Гц) на носій інформації, потім за допомогою перетворення Фур'є обчислюються ДС у діапазоні можливих допплерівських зміщень від –1 до +1 Гц на інтервалі часу 60 с.

Висотна протяжність відбитого зондувального сигналу близька до 150 км, тому використовується стробування за висотою з дискретністю $\Delta z' = 75$ км у діапазоні діючих висот $z' = 75$–450 км (діапазон істинних ~75–225 км у денний і ~75–325 км у нічний час), а дискретність відліків висоти $\Delta z \approx 30$–35 км. При цьому виділяються основні канали, в яких амплітуда сигналу має максимальні значення.

В численних роботах (див., наприклад, [1, 23, 91, 141]) виконано оцінки параметрів збурень N, отриманих за допомогою даного радару. Для цього використано прості аналітичні співвідношення, які пов'язують виміряні числові ряди ДЗЧ на вертикальних трасах з параметрами іоносфери (збуреннями ΔN концентрації електронів N, їхньою тривалістю ΔT, відносною амплітудою збурень концентрації електронів δ_{Na}, періодами РІЗ T тощо).

1.4.3. Похиле допплерівське зондування

Даний тип зондування відрізняється від попереднього тим, що радіохвиля випромінюється під кутом до горизонту (~5–70°). У цьому випадку приймач може знаходитися на відстані у декілька тисяч кілометрів від передавача. На практиці часто в якості зондувальних радіосигналів використовують світову мережу радіомовних і службових станцій і приймання сигналів в одному пункті (пункті спостереження) [8–12]. При цьому метод радіозондування є пасивним. Відсутність мережі власних радіопередавальних пристроїв при похилому зондуванні (ПЗ) іоносфери дозволяє зберегти завадову обстановку на початковому рівні.

Засоби ПЗ іоносфери досить давно й успішно використовуються для вивчення динамічних процесів [12, 143–145]. За допомогою ПЗ вдається охопити значні регіони Земної кулі (аж до глобальних), і тим самим вивчати динамічні процеси в геокосмосі над цими регіонами. Для диференціації цих процесів за висотою доцільно застосовувати різні частоти радіохвиль при незмінному розташуванні радіопередавального та радіоприймального пристроїв.

Для моніторингу динамічних процесів в іоносфері в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна функціонує когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс високочастотного (ВЧ) та низькочастотного (НЧ) діапазонів радіохвиль [144, 145]. Комплекс розташовано в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Можливості комплексу значно збільшилися після введення у 2018 р. в експлуатацію багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу ПЗ іоносфери, розробленого спільно фахівцями ХНУ імені В. Н. Каразіна та Харбінського інженерного університету. Комплекс описано у роботах [49, 146, 147]. Цей комплекс розміщено на території Харбінського інженерного університету (45.78°пн. ш., 126.68°сх. д.). Апаратно він складається з активної магнітної рамкової антени (діапазон частот 0.01–30 МГц),

широкодіапазонного програмно визначаємого радіоприймального пристрою (Software Defined Radio або SDR) дисциплінуємим за сигналами супутників GPS високостабільним опорним генератором, а також персонального комп'ютера. Система здійснює безперервний моніторинг стану іоносфери на радіотрасах різної орієнтації у кількості до 14 штук, довжина яких змінюється від тисячі до 2.5 тис. км. Діапазон робочих частот становить 5–10 МГц, при цьому застосування авторегресійного спектрального аналізу [8] дає роздільну здатність 0.02 Гц, а розрізнення за часом – 7.5 с. Для кожного шляху поширення будуються часові залежності допплерівських спектрів і піддаються подальшому аналізу. Для головного (найпотужнішого) променя обробка допплерівського зміщення та часових залежностей амплітуди сигналу дає тренди $\overline{f_d}(t), \bar{A}(t)$, флуктуації $\delta f_d(t) = f_d(t) - \overline{f_d}(t)$, $\delta A(t) = A(t) - \bar{A}(t)$ сигналу $f_d(t)$ та амлітуди $A(t)$, відповідно. Спектри в діапазоні періодів 1–120 хв оцінюються за допомогою системного спектрального аналізу [9].

При використанні ВЧ радіохвиль і похилого зондування відносна зміна концентрації електронів N у полі АГХ з періодом T дається співвідношенням [5, 49, 69, 70, 150]:

$$\delta_N = \frac{K}{4\pi}\frac{cT}{L}\delta_{fd}, \tag{1.7}$$

де K – множник, який залежить від траєкторії хвилі та враховує кривизну Землі, c – швидкість світла, L – характерний масштаб зміни N поблизу висоти відбиття радіохвилі.

Швидкість вертикального руху плазми в іоносфері пов'язана з ДЗЧ наступним співвідношенням:

$$f_d = -2\frac{f}{c}v\cos\theta, \tag{1.8}$$

де θ – кут між траєкторією хвилі і вертикаллю.

Синхронний моніторинг динамічних іоносферних процесів двома комплексами розширює можливості глобальної діагностики.

У низці робіт автори з ХНУ імені В. Н. Каразіна та Харбінського університету дослідили динамічні процеси в іоносфері, які супроводжували помірні землетруси [146, 147], геокосмічні бурі [69, 70], сонячні затемнення [49, 151], падіння метеороїдів [150], дію тайфунів [152–155] тощо.

1.4.4. Некогерентне розсіяння

Серед наземних методів дослідження динамічних іоносферних процесів найбільш інформативним є метод некогерентного розсіяння (НР) [4, 5, 29, 32, 156–158]. Тоді як іонозонди дають інформацію лише про концентрацію електронів (і лише нижче рівня максимуму), метод НР дозволяє досліджувати температуру електронів та іонів, іонний склад і швидкості дрейфу у діапазоні висот приблизно від 80 до 2000 км. При цьому значна потужність радіохвилі проходить іоносферу наскрізь, а аналізується дуже слабкий розсіяний частинками плазми сигнал.

Основний недолік цього методу полягає у тому, що у світі є всього близько десяти таких радарів і більшість з них розташована у Західній півкулі. Тільки по два радари є в Європі (м. Tromsø, Норвегія; м. Харків, Україна) й Азії (поблизу м. Іркутськ, Росія; Qujing, КНР). На жаль, через високу вартість радари некогерентного розсіяння не можуть вести безперервний моніторинг іоносфери.

1.4.5. Супутникові методи

Для діагностики іоносферних процесів супутниковими методами давно й успішно використовуються технології з використанням Глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) [3, 36–39, 43, 159–169]. Такий метод називається трансіоносферним радіозондуванням або радіопросвічуванням. Він використовує численні супутники та тисячі наземних станцій для прийому сигналів.

Для виявлення реакції іоносфери на вплив якого-небудь джерела реєструються псевдодальності за кодом і фазою на двочастотному GPS-приймачі. За цими реєстраціями розраховується похилий ПЕВ вздовж променя супутник-приймач за методикою, викладеною у [169]. ПЕВ є інтегральною характеристикою, але її основна частина формується у F2-шарі іоносфери, тому використовують модель тонкої іоносфери, де цей шар є сферичним шаром нульової товщини, розташований на фіксованій висоті. Точку перетину променя супутник-приймач з таким шаром F2 називають точкою вимірювання або іоносферною точкою. Проекція іоносферної точки на поверхню Землі визначає підіоносферну точку.

При обробці сигналів супутників оцінюється час поширення сигналу від супутника до приймача, обчислюється внесок іоносфери у затримку сигналу, розраховується похилий ПЕВ, а потім виконується перетворення похилого ПЕВ на еквівалентний вертикальний.

Основні похибки оцінки ПЕВ при 2-х частотному прийомі закладені у відмінностях носійних частот. Поправки для врахування частотної похибки, Differential Code Biases (DCB), визначаються за оцінками профільних інститутів або оцінюються за допомогою глобальних іоносферних карт ПЕВ на день вимірювання. Похибка даного ПЕВ не перевищує 0.1 TECU (1 Total Electron Content Unit = 10^{16} електронів/м^2) [170–172].

Розрахунок ПЕВ проводиться за формулою

$$N_V = \frac{L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2 + \overline{\alpha} + c\left(DCB^T + DCB^R\right)}{40.35\left(f_2^{-2} - f_1^{-2}\right)}\cos\psi, \qquad (1.9)$$

де λ_1, λ_2 – довжини хвиль у метрах для двух частот f_1 та f_2, відповідно, L_1 і L_2 – псевдодальності за фазою у циклах, c – швидкість світла, $\overline{\alpha}$ – фазова поправка у метрах, ψ – кут у точці вимірювання на F2 сфері променю «супутник – станція», DCB^R, DCB^T – Differential Code Biases, поправки для приймача та передавача.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Іоносфера є відкритою динамічною нелінійною підсистемою у системах ЗАІМ і СМСМІАЗ.

2. Іоносфера знаходиться під впливом нестаціонарних процесів на Сонці, а також під дією цілої низки високоенергетичних джерел в літосфері, на поверхні Землі та в атмосфері. До природних джерел належать землетруси, виверження вулканів, потужні погодні фронти, блискавки, сонячний термінатор тощо. Крім природних джерел на іоносферу діють техногенні джерела, такі як старти ракет, польоти космічних апаратів, потужне радіо- та акустичне випромінювання, потужні вибухи, інжекція хімічних реагентів тощо.

3. Для дослідження динаміки іоносфери розроблено низку методів наземного та космічного базування. Найбільш поширеними з них є методи вертикального та похилого зондування, допплерівський, некогерентного розсіяння, трансіоносферного радіозондування з використанням супутникових радіосигналів тощо.

4. Незважаючи на те, що за майже столітню історію дослідження іоносфери про неї отримано великий обсяг експериментальних і теоретичних результатів, залишається низка наукових задач, що потребують розв’язання. До них належать наступні задачі.

1) Розробка та вдосконалення існуючих методів дистанційного радіозондування іоносфери.

2) Отримання нових знань про глобальні особливості збурень в іоносфері, викликаних сонячними затемненнями.

3) Отримання нових знань про особливості великомасштабних збурень в іоносфері від стартів великих ракет та їхні екологічні наслідки.

4) Отримання нових знань про особливості великомасштабних збурень в іоносфері та їхніх екологічних наслідків, викликаних дією потужних радіосистем цивільного та військового призначення.

5) Отримання нових знань про особливості глобальних збурень в іоносфері, викликаних потужними сонячними бурями.

Розв’язанню перерахованих задач присвячена ця дисертація.

РОЗДІЛ 2. ПОХИЛЕ РАДІОЗОНДУВАННЯ. ТЕОРІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ

Метою цього розділу є розвиток теоретичних основ похилого допплерівського ВЧ радіозондування іоносфери як основного простого та дешевого методу моніторингу іоносферного радіоканалу і отримання простих аналітичних співвідношень для ДЗЧ, максимальної застосовної частоти та аперіодичних збурень, опис когерентного багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу ПЗ іоносфери, розташованого в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, й ілюстрація його працездатності на прикладі вивчення динамічних процесів в іоносфері.

Результати розділу опубліковано в роботах [173–175].

2.1. Допплерівське зміщення частоти ВЧ радіохвиль в іоносфері на похилих радіотрасах

2.1.1. Постановка задачі. Вихідні співвідношення

Якщо вважати іоносферу ізотропною та без втрат, то показник заломлення n для ВЧ радіохвиль дається наступним співвідношенням [145]:

$$n^2 = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \tag{2.1}$$

$$f_p^2 = \frac{e^2 N}{4\pi^2 \varepsilon_0 m}, \tag{2.2}$$

де f_p – плазмова частота електронів, f – частота радіохвилі, e та m – заряд і маса електрона, ε_0 – електрична стала.

Для сферично-шаруватої іоносфери є справедливим закон заломлення Снелліуса:

$$n(r)r\sin\vartheta(r)=n_0 r_i\sin\theta, \tag{2.3}$$

$r = r_0 + z$, r_0 – радіус Землі, z – поточна висота, $r_i = r_0 + z_0$, z_0 – висота початку іоносфери, n_0 – показник заломлення на границі іоносфери, θ – кут падіння радіохвилі на іоносферу, який відраховується від вертикалі, ϑ – кут між траєкторією радіохвилі в іоносфері та вертикаллю.

На висоті відбиття радіохвилі z_r кут $\vartheta = 90°$ і $\sin\vartheta(z_r) = 1$. Крім того, при $z = z_0$ показник $n_0 = 1$. Тоді з (2.3) маємо

$$n(z_r)=\frac{r_i}{r}\sin\theta=\frac{r_0+z_0}{r_0+z_r}\sin\theta=\frac{1+\zeta_i}{1+\zeta_r}\sin\theta, \tag{2.4}$$

Оскільки $\zeta_i = z_0/r_0 \ll 1$, $\zeta_r = z_r/r_0 \ll 1$, співвідношення (4) набуває вигляду

$$n(z_r)\approx(1+\zeta_i-\zeta_r)\sin\theta. \tag{2.5}$$

На довільній висоті z маємо:

$$n(z)\approx(1-\zeta)\frac{\sin\theta}{\sin\vartheta},\qquad \zeta=\frac{z-z_0}{r_0}. \tag{2.6}$$

За визначенням, ДЗЧ при поширенні радіохвилі вздовж траєкторії s дається наступним співвідношенням:

$$f_D=-\frac{f}{c}\frac{d}{dt}\int_s n\,ds, \tag{2.7}$$

де c – швидкість світла в вакуумі, t – час. Врахуємо, що радіохвиля поширюється від початку іоносфери до висоти відбиття, а потім від цієї висоти до висоти початку іоносфери. Крім того, перейдемо від ds до $dz/\cos\vartheta$. Тоді замість (2.7) маємо

$$f_D=-2\frac{f}{c}\frac{d}{dt}\int_{z_0}^{z_r} n\frac{dz}{\cos\vartheta}=-2\frac{f}{c}\int_{z_0}^{z_r}\frac{dn}{dt}\frac{dz}{\cos\vartheta}. \tag{2.8}$$

Із співвідношення (2.1) випливає, що

$$\frac{dn}{dt}=-\frac{1}{2n}\frac{f_{p0}^2}{f^2}\frac{d}{dt}\delta_N. \tag{2.9}$$

де $\delta_N = \Delta N/N_0$, N_0 – незбурене значення N, f_{p0} – незбурене значення f_p. При цьому N_0 і f_{p0} від часу не залежать.

2.1.2. Відбиття радіохвиль при похилому зондуванні

Із (2.1) та (2.5) маємо наступне співвідношення:

$$1-\frac{f_p^2(z_r)}{f^2}=(1+\zeta_i-\zeta_r)^2\sin^2\theta\approx(1+2\zeta_i-2\zeta_r)\sin^2\theta\,. \qquad (2.10)$$

Звідси

$$\frac{f_p^2(z_r)}{f^2}=(1+2\zeta_{ir}\mathrm{tg}^2\theta)\cos^2\theta, \qquad \zeta_{ir}=\zeta_r-\zeta_i\,. \qquad (2.11)$$

Тоді умова відбиття радіохвилі набуває вигляду:

$$f=kf_p(z_r)\sec\theta, \qquad (2.12)$$

де

$$k=\frac{1}{(1+2\zeta_{ir}\mathrm{tg}^2\theta)^{1/2}}\,. \qquad (2.13)$$

Для плоскошаруватого середовища $r_0 \to \infty$, $\zeta_{ir} \to 0$, а $k \approx 1$. При цьому співвідношення (2.11) переходить у відомий закон секансу (див., наприклад, [145]):

$$f = f_p(z_r)\sec\theta\,. \qquad (2.14)$$

Закон (2.12) будемо іменувати скоригованим на сферичність законом секанса.

Із (2.10) оцінимо максимальну застосовну частоту при похилому зондуванні іоносфери:

$$f=\frac{f_p}{(1-(1-2\zeta_{ir})\sin^2\theta)^{1/2}}\,. \qquad (2.15)$$

За $\theta = \theta_{max} = 90°$ та $f_p = f_{p\max}$ маємо

$$f_{\max}=\frac{f_{p\max}}{(2\zeta_{ir})^{1/2}}\,. \qquad (2.16)$$

Вдень $N_{\max} = 1.2\cdot10^{12}$ м$^{-3}$, $f_{p\max} \approx 10$ МГц, $z_{r\max} \approx 300$ км, $z_0 \approx 100$ км. Тоді для $r_0 \approx 6400$ км маємо $f_{\max} \approx 4f_{p\max} \approx 40$ МГц. Вночі $N_{\max} = 0.2\cdot10^{12}$ м$^{-3}$, $f_{p\max} \approx 4$ МГц, $z_{r\max} \approx 400$ км. За цих умов $f_{\max} \approx 3.3f_{p\max} \approx 13.2$ МГц.

2.1.3. Моделі збурень

Розглянемо дві моделі збурень концентрації електронів: періодичну та аперіодичну.

При поширенні в іоносфері РІЗ відносна амплітуда збурень N описується наступною моделлю:

$$\delta_N(t,z) = \delta_{Na}(z_r)e^{(z-z_r)/2H}\sin\frac{2\pi}{T}t\,, \tag{2.17}$$

де δ_{Na} – амплітуда, H – висота однорідної атмосфери поблизу z_r. В (2.17) враховано, що до $z_{cr} \approx$ 200–250 км відносна амплітуда δ_N зростає через експоненційне зменшення атмосферного тиску. Вище z_r значення δ_N, навпаки, поступово зменшуються.

За аперіодичного збурення концентрація електронів збільшується або зменшується на ΔN впродовж часу ΔT.

2.1.4. Періодичні варіації ДЗЧ

Із (2.17) маємо

$$\frac{d\delta_N}{dt} = \frac{2\pi}{T}\delta_{Na}(z_r)e^{(z-z_r)/2H}\cos\frac{2\pi t}{T}\,. \tag{2.18}$$

З урахуванням (2.9) і (2.18) із (2.8) для ДЗЧ отримуємо:

$$f_D = \frac{2\pi f}{cT}\frac{f_{p0}^2(z_r)}{f^2}\delta_{Na}(z_r)\cos\frac{2\pi t}{T}\int_{z_0}^{z_r} e^{(z-z_r)/2H}\frac{dz}{n\cos\vartheta}\,. \tag{2.19}$$

Оскільки $n\cos\vartheta$ з висотою змінюється значно менше, ніж експоненційна функція, амплітуда ДЗЧ приймає вигляд:

$$f_{Da} \approx \frac{2\pi f}{cT}\frac{f_{p0}^2(z_r)}{f^2}\frac{\delta_{Na}(z_r)}{\overline{n\cos\vartheta}}\int_{z_0}^{z_r} e^{(z-z_r)/2H}dz = \frac{4\pi H f}{cT}\frac{f_{p0}^2(z_r)}{f^2}\frac{\delta_{Na}(z_r)}{\overline{n\cos\vartheta}}(1-e^{(z_0-z_r)/2H})\,. \tag{2.20}$$

Тут риска над $n\cos\vartheta$ означає середнє за висотою значення виразу. Підставивши в (2.20) вираз (2.11), отримаємо

$$f_{Da} = \frac{4\pi H}{cT} \frac{f \cos^2 \theta}{k^2} \frac{\delta_{Na}(z_r)}{\overline{n \cos \vartheta}} (1 - e^{(z_0 - z_r)/2H}). \quad (2.21)$$

Далі врахуємо, що

$$e^{(z_0 - z_r)/2H} \ll 1, \quad (2.22)$$

та оцінимо $\overline{n \cos \vartheta}$. Із (2.6) отримаємо $n \approx \sin\theta/\sin\vartheta$. Тоді середнє за висотою значення

$$B = \overline{n \cos \vartheta} \approx \left(\frac{\overline{\sin \theta \cdot \cos \vartheta}}{\sin \vartheta} \right).$$

За $z = z_0$ маємо $\vartheta = \theta$, $B(z_0) = \cos\theta$. Якщо $z = z_r$, то $\vartheta = 90°$, $B(z_r) = 0$. Тоді

$$\overline{n \cos \vartheta} = \frac{1 + \cos \theta}{2}. \quad (2.23)$$

Із (2.21) та (2.23) з врахуванням (2.22) випливає, що

$$f_D = \frac{4\pi H}{KcT} f \delta_{Na}(z_r), \quad (2.24)$$

де

$$K = k^2 \frac{1 + \cos \theta}{2 \cos^2 \theta} = \frac{1 + \cos \theta}{2(1 + 2\zeta_{ir} \mathrm{tg}^2 \theta) \cos^2 \theta}. \quad (2.25)$$

При вертикальному зондуванні $\theta = 0°$, $K = 1$ і формула (2.24) набуває вигляду

$$f_D = \frac{4\pi H}{cT} f \delta_{Na}(z_r). \quad (2.26)$$

Зі співвідношення (2.24) отримуємо:

$$\delta_{Na} = \frac{KcT}{4\pi H} \frac{f_D}{f}. \quad (2.27)$$

Формула (2.27) співпадає з формулою для вертикального зондування, якщо вважати, що основний внесок у ДЗЧ дає діапазон висот $L \approx H$ [91].

Результати розрахунків залежності $K(\theta, \zeta_{ir})$ для низки значень ζ_{ir} наведено на рис. 2.1. Із рисунку можна бачити, що K змінюється від 1 до 5–32 в залежності від значення параметра ζ_{ir}.

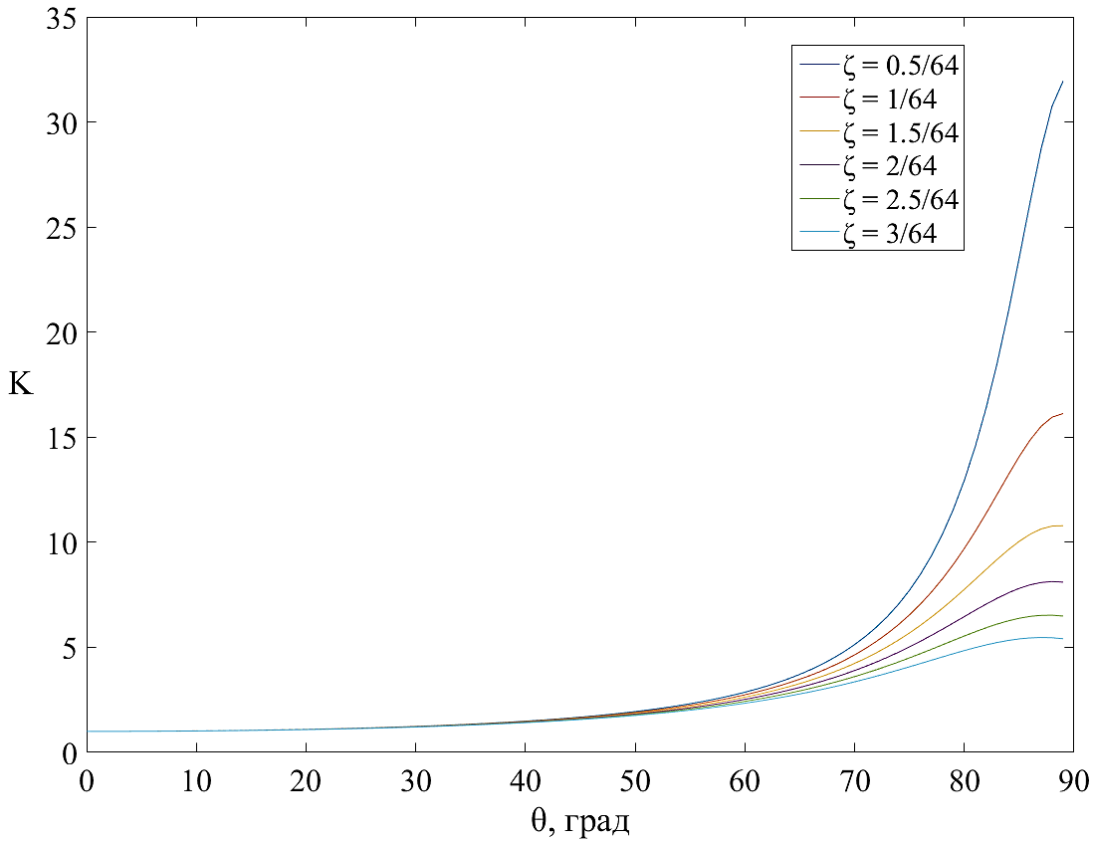


Рис. 2.1. Залежність коефіцієнту *K* від кута падіння та висоти відбиття радіохвилі

2.1.5. Аперіодичні варіації ДЗЧ

Нехай

$$N(t) = N_0 + \Delta N(t), \qquad n(t) = n_0 + \Delta n(t). \tag{2.28}$$

причому ΔN і Δn не залежать від висоти у шарі іоносфери товщиною L. Тоді

$$f_D = -2\frac{f}{c}\frac{d}{dt}\int_{z_0}^{z_r} n\frac{dz}{\cos\vartheta} = -2\frac{f}{c}\frac{d}{dt}\int_{z_0}^{z_r} \Delta n(t)\frac{dz}{\cos\vartheta}, \tag{2.29}$$

де $\Delta n \approx -\frac{1}{2n_0}\frac{f_{p0}^2}{f^2}\delta_N$, $\delta_N = \frac{\Delta N}{N_0}$.

Оскільки з (2.6) і (2.11) випливає, що

$$n \approx \frac{\sin\theta}{\sin\vartheta}, \qquad \frac{f_{p0}^2}{f^2} = \frac{\cos^2\theta}{k^2}, \tag{2.30}$$

із (2.29) отримаємо

$$f_D \approx \frac{f}{c}\frac{\cos^2\theta}{k^2}\delta_N \frac{d}{dt}\int_{z_0}^{z_r}\frac{dz}{n\cos\vartheta}. \qquad (2.31)$$

Звідси

$$\int_0^{\Delta T} f_D dt \approx \frac{f}{c}\frac{\cos^2\theta}{k^2}\delta_N \frac{L}{n\cos\vartheta} \approx 2\frac{f}{c}\frac{L}{k^2}\delta_N \frac{\cos^2\theta}{1+\cos\theta} = \frac{f}{c}\frac{\delta_N}{K}L. \qquad (2.32)$$

За оцінкою

$$\int_0^{\Delta T} f_D dt \approx \frac{1}{2} f_{Dm}\Delta T, \qquad (2.33)$$

де f_{Dm} – екстремальне значення f_D на інтервалі часу ΔT. Тоді

$$\frac{1}{2} f_{Dm}\Delta T \approx \frac{f}{c}\frac{L}{K}\delta_N, \qquad (2.34)$$

а

$$\delta_N = \frac{Kc\Delta T}{2L}\frac{f_{Dm}}{f}. \qquad (2.35)$$

2.1.6. Обговорення

Співвідношення (2.27) і (2.35) справедливі для однострибкового поширення радіохвилі. Для радіотрас із $R \geq 1000$ км частіше спостерігається дво- та тристрибкове поширення. Для m-го стрибка замість (2.27) і (2.35) необхідно використовувати наступні співвідношення:

$$\delta_{Na} = \frac{K_m cT}{4\pi mH}\frac{f_{Da}}{f}, \qquad (2.36)$$

$$\delta_N = \frac{K_m c\Delta T}{2mL}\frac{f_{Da}}{f}, \qquad (2.37)$$

де $K_m = K(\theta_m)$, $\mathrm{tg}\theta_m = \dfrac{R}{2mz_r}$.

Проілюструємо застосовність формул (2.27) і (2.35) на практиці.

Нехай на трасі довжиною R = 1600 км амплітуда квазіперіодичного збурення з T = 15 хв складає 0.3 Гц. Частота радіохвилі f = 10 МГц. Кут θ знаходиться зі співвідношення

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{R}{2z_r}. \tag{2.38}$$

За z_r = 200 км маємо θ ≈ 76°, K ≈ 7. Тоді з (2.27) для $H(z_r)$ ≈ 40 км отримуємо δ_{Na} ≈ 11.3%. Якщо m = 2, z_r = 240 км, $H(z_r)$ ≈ 50 км, то K_2 ≈ 2.59, а δ_{Na} ≈ 1.7%.

Під час сонячного затемнення f_D за $\Delta T \approx 60$ хв спочатку зменшилося на 0.05 Гц, а потім збільшилося на 0.05 Гц. Довжина радіотраси R = 1600 км, f = 10 МГц, L ≈ 100 км. Тоді δ_N ≈ 19%. Отримане значення δ_N видається завеликим. Зробимо оцінки для m = 2. При цьому z_r = 240 км, L ≈ 100 км, θ_2 ≈ 59°, K_2 ≈ 2.59, а δ_N ≈ 3.5%.

Отримані оцінки δ_{Na} та δ_N цілком узгоджуються з відомими результатами (див., наприклад, [49, 66, 68, 69, 91, 153–155, 176]).

Додамо, що параметр H суттєво залежить від висоти. Для оцінки $H(z)$ на висоті z можна використовувати наступну формулу:

$$H = 7\left(1 + 9\frac{z-100}{200}\right), \tag{2.39}$$

де H і z вимірюються в кілометрах.

2.2. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери

Комплекс призначено для моніторингу динамічних процесів в іоносфері над територією України та за її межами, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження. Приймальна частина комплексу знаходиться в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (поблизу с. Гракове, Харківська обл., 49.65°пн. ш., 36.9°сх. д.).

Дослідження варіацій характеристик ВЧ радіохвиль, відбитих від іоносфери, здійснюється за допомогою системи допплерівського радіозондування з використанням радіосигналів, що поширюються на похилих трасах. Джерелом ВЧ сигналів є станції радіомовлення, радіонавігації, служби точного часу, або ж радіовипромінювання спеціалізованого радіопередавального пристрою. Дослідження характеристик НЧ радіохвиль можливе як із застосуванням допплерівських вимірювань, так і за результатами вимірювань фази радіосигналу. Для такого моніторингу придатні сигнали неспеціалізованих для іоносферних досліджень систем навігації та служб еталонних частот і часу, які працюють в НЧ та ДНЧ діапазонах (частоти 10–100 кГц). Зокрема, ми використовуємо вимірювання фазових і амплітудних варіацій сигналу станції РБУ служби еталонних сигналів частоти та часу (f = 66.(6) кГц), розташованої поблизу м. Москва, а також варіацій допплерівського зміщення частоти і амплітуди сигналу станції DCF77 з частотою 77.5 кГц. Радіопередавальний пристрій знаходиться в ФРН. Значення $|f_d|$ порядку 10^{-4}–10^{-3} Гц.

Апаратну частину ВЧ діапазону (f = 1.5–30 МГц) складають широкодіапазонні радіоприймальні пристрої типу Р-399А, до яких підключені активні рамкові антени. В НЧ діапазоні (f = 50 кГц – 2 МГц) працюють радіоприймачі типу Р-391В2 і ПК-66 із підключеними до них рамковими антенами.

Для функціонування комплексу в режимі безперервного моніторингу розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке залежить від кола розв’язуваних задач. Програмне забезпечення системи пасивного похилого радіозондування іоносфери включає набір тестових програм для перевірки та ремонту окремих вузлів плат керування радіоприймальними пристроями й антенами, вимірювальні програми, а також програми для обробки й аналізу експериментальних даних.

Система допплерівського радіозондування. Конструктивно система реалізована на базі персонального комп’ютера з підключеним до нього

блоком, який забезпечує керування радіоприймачами синтезаторного типу Р-399А (для прийому радіосигналів у діапазоні 1–32 МГц) та Р-391В2 (для прийому радіосигналів у діапазоні частот 50 кГц – 2 МГц), отримання цифрових відліків комплексної амплітуди прийнятих сигналів і передачу їх до персонального комп'ютера. В цьому блоці знаходяться треті змішувачі частоти з фільтрами нижніх частот і генератор прямого цифрового синтезу у якості загального 3-го гетеродину. Сигнал частотою 10 МГц від рубідієвого стандарту частоти FE-5680 є загальним опорним сигналом для всіх приймачів, а також для програмованого дільника частоти генератора прямого цифрового синтезу. Використання рубідієвого стандарту частоти забезпечує сумарну довготривалу відносну нестабільність частотно-часових параметрів приймальної системи не гірше 10^{-10}. Для інтервалів часу близько 10^3 с її значення майже на порядок менше.

Структурна схема системи наведена на рис. 2.2. Мікроконтролер (МК) приймає від комп'ютера через USB-інтерфейс і зберігає у внутрішніх реєстрах плат керування приймачем (ПКП) бінарні коди інформації, які визначають частоту налаштування відповідного радіоприймального пристрою, рід його роботи, ширину смуги пропускання підсилювача проміжної частоти (ППЧ), коефіцієнт підсилення ППЧ та значення ослаблення вхідного атенюатора.

Радіоприймальні пристрої Р-399А і Р-391В2 працюють у режимі повного дистанційного керування, що дозволило нам за допомогою одного радіоприймального пристрою циклічно проводити вимірювання на декількох (до чотирьох) радіотрасах зі своїми унікальними значеннями підсилення для кожної траси. При цьому вдалось зберегти задану роздільну здатність як за частотою, так і за часом.

На антенні входи радіоприймальних пристроїв Р-399А сигнал надходить із активних рамкових антен (АРА), які настроюються МК на частоту радіосигналу в діапазоні $f = 1.5–30$ МГц через плату керування антенами (ПКА). На антенний вхід приймача Р-391В2 сигнал надходить з рамкової антени (РА). З виходів підсилювачів 2-ої проміжної частоти приймачів

радіосигнали частотою 215 кГц і шириною смуги 300 Гц надходять до блоку третіх змішувачів частоти та фільтрів нижніх частот (3-ій ЗМ і ФНЧ). На виході фільтрів нижніх частот присутні аналогові сигнали в смузі частот 0–300 Гц. Вони перетворюються за допомогою 12-розрядного АЦП, інтегрованого до МК, в цифровий вигляд із частотою дискретизації 600 Гц. Потік цифрових даних із АЦП передається по USB-шині до комп'ютера, що працює під керуванням вимірювальної програми, та проводиться його подальша програмна обробка в реальному масштабі часу. В процесі цієї обробки послідовно проводиться фільтрація даних вузькосмуговим цифровим фільтром і децимація з коефіцієнтом 15.

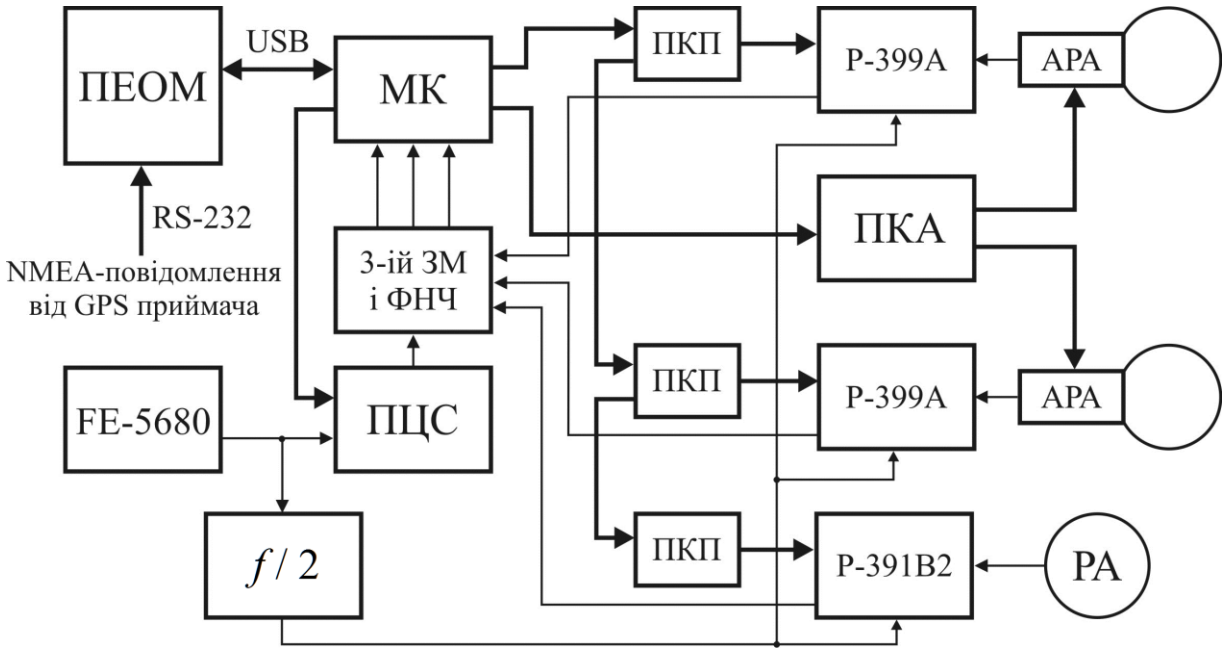


Рис. 2.2. Структурна схема програмно-апаратної системи пасивного зондування іоносфери. ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина, Р-399А – приймач радіосигналів декаметрового діапазону, Р-391В2 – приймач радіосигналів гектометрового діапазону, 3-ій ЗМ і ФНЧ – блок 3-іх змішувачів частоти та фільтрів нижніх частот, FE-5680 – рубідієвий стандарт частоти, ПЦС – генератор прямого цифрового синтезу, МК – мікроконтролер, ПКП – плата керування приймачем, АРА – активна рамкова антена, РА – рамкова антена, ПКА – плата керування антенами, *f*/2 – подільник частоти

Для цифрової фільтрації синтезований оптимальний смуговий фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою. Цьому типу фільтрів властива абсолютна стійкість до різного роду похибок даних, вони мають лінійну фазову характеристику та досить просто синтезуються за таких заданих параметрів, як довжина фільтру, ширина смуги на рівнях пропускання та затримки, а також співвідношення нерівномірностей амплітудно-частотних характеристик у смугах пропускання та затримки. Тут оптимальність смугового фільтра розуміється в сенсі максимального придушення в смузі затримання при заданих параметрах. Синтезований цифровий фільтр довжиною 120 точок має ширину смуги пропускання $0.04f_N$ на рівні 0.1 (тут f_N – частота дискретизації), центральна частота дорівнює $0.25f_N$, а коефіцієнт придушення позасмугових складових перевищує 40 дБ. У нашому випадку f_N = 600 Гц, тому на виході такого фільтра залишається сигнал з центральною частотою 150 Гц і шириною смуги приблизно 20 Гц. Наступна децимація з коефіцієнтом 15 перетворює його в сигнал зі смугою від 0 до 20 Гц при частоті дискретизації 40 Гц. Власне, ці дані, блоками по 512 точок (тривалістю 12.8 с по часу вимірювання) з описовим заголовком, зберігаються в єдиному добовому файлі експериментальних даних на комп'ютері. У заголовку кожного блоку даних фіксується час початку реєстрації даного блоку та частота прийнятого при цьому радіосигналу.

Основна прив'язка блоків даних по часу здійснюється за допомогою NMEA-повідомлень від GPS-приймача, які надходять до основного комп'ютера через інтерфейс RS-232.

Система фазових вимірювань. З метою безперервного моніторингу нижньої іоносфери реалізовано пасивний метод вимірювання варіацій амплітуди та фази НЧ радіосигналу, який поширюється в природному хвилеводі, утвореному земною поверхнею та нижньою іоносферою. Тому вивчення варіацій амплітудно-фазових параметрів радіосигналів НЧ діапазону дозволяє отримати відомості про процеси, які протікають саме в нижній іоносфері. Похибка вимірювання фази не перевищує 0.1°, а амплітуди – 2–3 %.

Блок-схема системи, створеної для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ, наведена на рис. 2.3, а її зовнішній вигляд – на рис. 2.4.

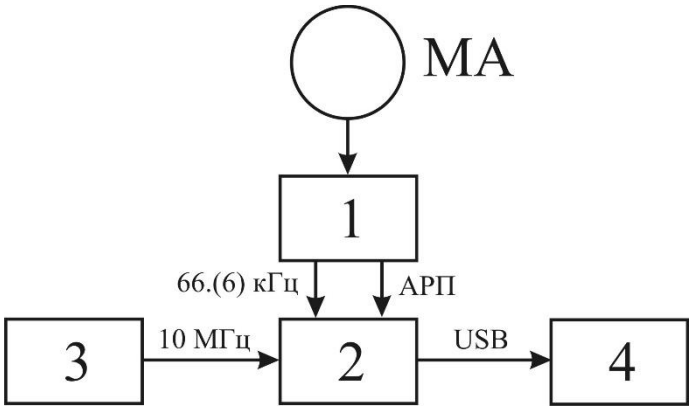


Рис. 2.3. Блок-схема системи для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ. МА – рамкова магнітна антена; 1 – допрацьований приймач-компаратор ПК-66; 2 – вимірювально-реєструючий блок; 3 – рубідієвий стандарт частоти Ч1-69; 4 – USB флеш-накопичувач

Рис. 2.4. Зовнішній вигляд системи для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ служби еталонних сигналів частоти та часу. Верхній прилад – приймач ПК-66 з магнітною антеною (зліва) та мікроконтролерним вимірювачем фази; нижній – рубідієвий стандарт частоти Ч1-69

Система створена на базі допрацьованого приймача-компаратора ПК-66. Його вихідні сигнали радіочастоти (66.(6) кГц) та кола автоматичного регулювання підсилення (АРП) надходять до розробленого вимірювально-реєструючого блоку, в якому здійснюється первинна обробка та реєстрація фазо-амплітудних даних. Відліки фази радіочастоти, усереднені на секундних інтервалах часу, раз на секунду зберігаються в файлах на зовнішньому USB флеш-накопичувачі. Сигнал із виходу схеми АРП приймача ПК-66, який несе інформацію про амплітуду сигналу, також перетворюється в цифровий вигляд і зберігається на зовнішньому носії разом з відліками фази.

Якісні характеристики частотно-часових параметрів системи (значення відносної нестабільності частоти зразкового сигналу порядку $(1–2)\cdot10^{-11}$ та відносна похибка установки його частоти не гірше 10^{-10}) забезпечує внутрішній (FE-5680A) для вимірювально-реєструючого блоку, або зовнішній (Ч1-69) рубідієвий стандарт частот.

Розглянемо далі найпростішу ситуацію, коли шуми відсутні, сигнал одномодовий і період хвилі значно більше інтервалу обробки. Такі можливості методу діагностики назвемо потенційними.

При використовуваній довжині радіотрас $R \approx 675$ км значення $K \approx 5.1–2.3$ при висоті відбиття $z_r \approx 100–300$ км відповідно. За середнього значення $K = 3.7\pm1.4$, $L \approx 30$ км і $\delta_{fd\min} \approx 10^{-10}$, із (1.7) отримаємо

$$\delta_{N\min} \approx 3\cdot10^{-5}T, \qquad (2.40)$$

де період T дається в с. Результати оцінок $\delta_{N\min}$ за співвідношенням (2.40) наведені у другому рядку табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Залежність $\delta_{N\min}$ від періода АГХ

T, с	10^2	$2\cdot10^2$	$5\cdot10^2$	10^3	$2\cdot10^3$	$5\cdot10^3$	10^4
$\delta_{N\min}$, %	$3\cdot10^{-3}$	$6\cdot10^{-3}$	$1.5\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-2}$	$6\cdot10^{-2}$	0.15	0.3
$\delta_{N\min}$, %	$6.3\cdot10^{-2}$	0.1	0.31	0.6	1.3	3.1	6.3

ДЗЧ пов’язано зі швидкістю вертикального руху плазми в іоносфері співвідношенням (1.8). При зазначених R і z_r маємо $\cos\theta \approx 0.3$–0.7. Тоді при $\delta_{fd} \approx 10^{-10}$ маємо $v_{\min} \approx 0.02$–0.05 м/с.

При використанні НЧ радіохвиль, що відбиваються в нижній іоносфері, співвідношення для δ_N має інший вигляд. Фазовий зсув $\Delta\varphi$ при зміні висоти відбиття на Δz_r дається виразом [177]

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi f}{c}\Delta z_r \cos\theta \approx \frac{8\pi f}{c}\frac{z_r}{R}\Delta z_r . \qquad (2.41)$$

При поширенні АГХ Δz_r і $\Delta\varphi$ змінюються за періодичним законом з періодом T. Амплітуда $\Delta\varphi_a$ пов’язана з амплітудою ДЗЧ наступним співвідношенням:

$$f_{da} = \frac{\Delta\varphi_a}{T} \approx \frac{8\pi}{T}\frac{f}{c}\frac{z_r}{R}\Delta z_{ra} . \qquad (2.42)$$

Тут z_{ra} – амплітуда коливань висоти відбиття. Врахуємо, що

$$\delta_{N\min} \approx \frac{\Delta z_{ra\min}}{L} . \qquad (2.43)$$

Тоді з (2.42) і (2.43) маємо

$$\delta_{N\min} \approx \frac{cT}{8\pi L}\frac{R}{z_r}\delta_{fd\min} . \qquad (2.44)$$

При $R \approx 2000$ км, $z_r \approx 80$ км, $L \approx 5$ км і $\delta_{fd\min} \approx 10^{-10}$ отримаємо, що

$$\delta_{N\min} \approx 6.3\cdot 10^{-6} T . \qquad (2.45)$$

Залежність $\delta_{N\min}$ від T також наведена в табл. 2.1 (третій рядок).

При фазових вимірюваннях у НЧ діапазоні похибка $\Delta\varphi \approx 0.1°$. Тоді

$$\delta_{N\min} = \frac{\lambda}{8\pi L}\frac{R}{z_r}\Delta\varphi_{a\min} . \qquad (2.46)$$

При $\lambda = 3.75$ км, $L \approx 5$ км, $z_r \approx 80$ км, $R \approx 2000$ км і $\Delta\varphi_{a\min} \approx 2\cdot 10^{-3}$ отримаємо, що $\delta_{N\min} \approx 0.15\%$.

У реальній ситуації чутливість розглянутих методів погіршується в порівнянні з потенційною чутливістю.

При $f_{d\min} = 0.01$ Гц і застосуванні при спектральному аналізі перетворення Фур'є часове розрізнення методу становить 100 с. Використання сучасних методів спектрального оцінювання (наприклад, авторегресійного аналізу [149]), дозволяє на порядок підвищити роздільну здатність за часом (наприклад, до $\delta t \approx 10$ с). За цей час область відбиття зміщується за висотою на $\Delta z_{\min} = v_{\min}\delta t \approx 0.2–0.5$ м. Отримані оцінки $\delta_{N\min}$, $v_{\min}$ і $\Delta z_{\min}$ свідчать про високу чутливість методів допплерівського та фазового зондувань.

2.2.1. Методи обробки сигналів

Обробка даних допплерівського зондування полягає у виділенні з добового файлу блоків даних вимірювання на конкретній радіочастоті, отриманні спектральних оцінок з заданою точністю та частотним розрізненням, виявленні на них основних мод радіосигналу (цими модами можуть бути як різні магніто-іонні компоненти, так і промені, які відбиваються від різних іоносферних шарів), а також дослідженні динаміки цих мод.

Застосований у комплексі метод спектрального аналізу ґрунтується на параметричному описі випадкового процесу, який породжується сумою відбитих від іоносфери та прийнятих приймачем радіосигналів, а конкретніше – на моделі авторегресійного (АР) процесу. Ця модель добре описує дані вимірювань при обмеженій кількості сильних мод і відношенні сигнал/завада порядку та більше 10 дБ.

Для розрахунку коефіцієнтів АР моделі реалізовано метод спільної мінімізації квадратичних похибок прямого та зворотного лінійного передбачення (модифікований коваріаційний метод). Обчислені за цими коефіцієнтами АР спектри дозволяють для блоку даних тривалістю 12.8 с визначати частоту моди з точністю до 10–20 мГц, а розрізнення за частотою досягає 60–80 мГц.

Таблиця 2.2.

Відомості про радіотраси, які використовуються для ПЗ іоносфери

Частота, кГц	Місце розташування	Відстань від приймача, км	Азимут відносно приймача	Потуж-ність, кВт	Час роботи, UT
66.(6)	Росія, Московська обл., м. Талдом 56.7333° пн. ш. 37.6633° сх. д.	782	4°	10	00:00–24:00
77.5	Німеччина, Mainflingen, 50.0156° пн. ш. 9.0108° сх. д.	1981	282°	50	00:00–24:00
3200	Україна, Харківська обл., с. Гайдари 49.6327° пн. ш. 36.3238° сх. д.	44	267°	1	Епізо-дично
4201	Те ж саме	44	267°	1	Епізо-дично
4996	Росія, Московська обл., м. Електроуглі 55.7378° пн. ш. 38.1539° сх. д.	675	7°	5	00:00–24:00
9996	Те саме	675	7°	8	00:00–24:00
14996	Те саме	675	7°	8	00:00–24:00

У разі обробки більш низькочастотних (менше 150–200 кГц) радіосигналів перед АР аналізом необхідна додаткова цифрова обробка когерентної послідовності фрагментів із загальною тривалістю 192 с. Вона включає вузькосмугову (зі смугою ~1.33 Гц відносно центральної частоти 10 Гц) фільтрацію даних і перенесення виділеного фрагмента спектра в область 0–1.33 Гц. В результаті вдається визначати частоту моди радіосигналу з точністю не гірше 0.1 мГц, а розрізнення за частотою може досягати 3 мГц. Результати числового моделювання свідчать, що варіації частот гармонік з

урахуванням точності методики відновлюються практично без помилок, а варіації амплітуд можуть набути паразитної інтермодуляції в межах 5–10%, синфазної з девіацією частоти гармонік. Однак співвідношення між амплітудами відновлених гармонік близьке до істинного.

Для цілей автоматизованого вимірювання варіацій характеристик фази сигналів при їх поширенні в природному хвилеводі «Земля – іоносфера» обрано апаратний метод синхронного детектування усереднених на чвертьперіодних інтервалах часу квадратурних компонент сигналу з мікропрограмною реалізацією визначення за ними фази й усунення неоднозначності зворотних тригонометричних функцій в інтервалі кутів 0–360°. Цей метод задовільно працює з зашумленими сигналами та має порівняно просту апаратну реалізацію на сучасних мікроелектронних елементах.

2.2.2. Приклади реєстрацій впливу високоенергетичних джерел

Приклад спостережень варіацій ДЗЧ представлено на рис. 2.5, з якого видно, що рух термінатора призвів до появи аперіодичних збурень ДЗЧ на частотах 3.2, 4.2, 4.996 і 9.996 МГц та генерації квазіперіодичних збурень ДЗЧ з амплітудою від 0.05 до 0.25 Гц і періодом від 5 до 30 хв.

Перед заходом Сонця на поверхні Землі спостерігалося від’ємне зміщення частоти. Найкраще це спостерігалося на частоті 4.2 МГц. За час близько 60 хв постійна складова f_d зменшилася від 0 до –0.3 Гц. Це означає, що швидкість руху області відбиття поступово збільшувалася від 0 до 14 м/с. За 60 хв вона змістилася на 25 км вгору.

Квазіперіодичні варіації ДЗЧ спостерігалися протягом усього часу вимірювання.

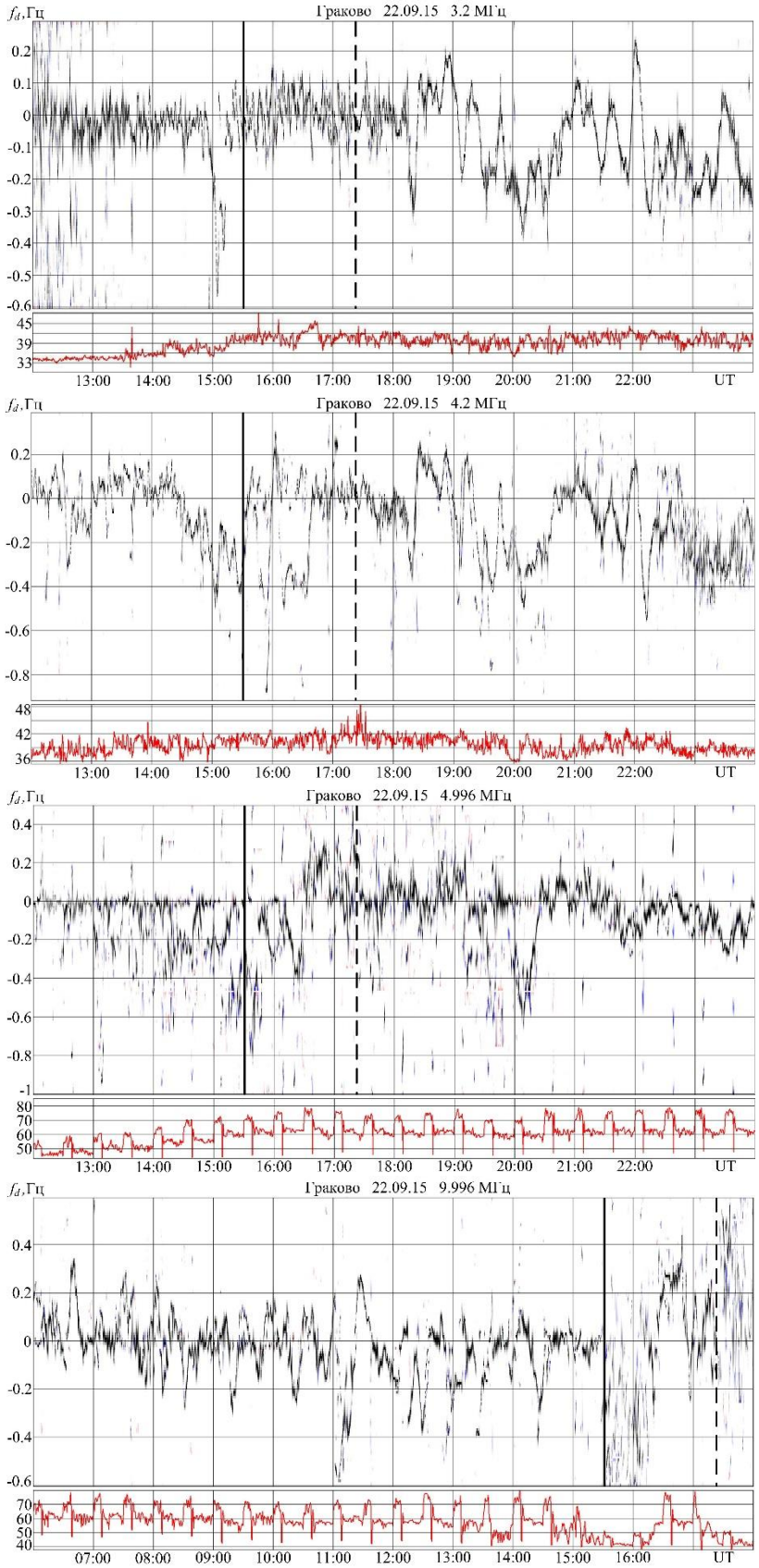


Рис. 2.5. Варіації допплерівського зміщення частоти 22 вересня 2015 р. на частотах 3.2, 4.2, 4.996 та 9.996 МГц. Суцільною та пунктирною лініями позначено захід сонця на висотах 0 та 300 км відповідно

Радіохвиля з частотою 3.2 МГц днем відбивалася в *E*-області іоносфери. При цьому спостерігалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодами *T* від 5 до 10 хв. Приблизно такі ж періоди відмічалися і з 15:30 до 17:30, тобто протягом руху сонячного термінатора в іоносфері. Приблизно з 18:00 до 19:00 $T \approx 15$ хв, а амплітуда $f_{da} \approx 0.1–0.2$ Гц. В інтервалі часу 19:00–22:00 $T \approx 30$ хв, а $f_{da} \approx 0.15–0.25$ Гц. Далі спостерігалися коливання з *T* від 20 до 40 хв.

Варіації f_d на частоті 4.2 МГц були схожими на варіації ДЗЧ на частоті 3.2 МГц. Відмінність частот у тому, що в денний час $T \approx 9–15$ хв.

Радіохвиля з частотою 4.996 МГц, довжина радіотраси якої значно більше довжини радіотраси для радіохвиль з частотами 3.2 і 4.2 МГц, вдень відбивалася на висоті близько 100 км, а вночі – трохи вище (~110–120 км). Після заходу Сонця відмічалися варіації з $T \approx 15$ хв. Допплерівські спектри були більш розмитими, ніж спектри на частотах 3.2 і 4.2 МГц.

На частоті 9.996 МГц у денний час реєструвались квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 15–20$ хв і $f_{da} \approx 0.2$ Гц, а перед заходом Сонця – варіації ДЗЧ з $T \approx 30$ хв і $f_{da} \approx 0.15–0.20$ Гц.

В інтервалі часу 19:00–21:00 на всіх трасах мало місце зменшення f_d від 0 до –(0.4–0.6) Гц, а потім його збільшення від –(0.4–0.6) до 0 Гц. При цьому область відбиття радіохвиль змістилася вгору приблизно на 70 км.

Таким чином експериментально підтверджено, що сонячний термінатор дійсно є причиною квазіперіодичних коливань іоносфери.

Розглянемо реакцію на сонячні спалахи. Результати моніторингу космічної погоди представлено на рис. 2.6. Тут наведено варіації середньої фази й амплітуди відбитого від іоносфери радіосигналу станції РБУ, зареєстровані в м. Харків (відстань до пункту випромінювання близько 675 км в північному напрямку) в період 11–14 січня 2013 р. у час доби поблизу опівдня з 08:00 LT до 16:00 LT.

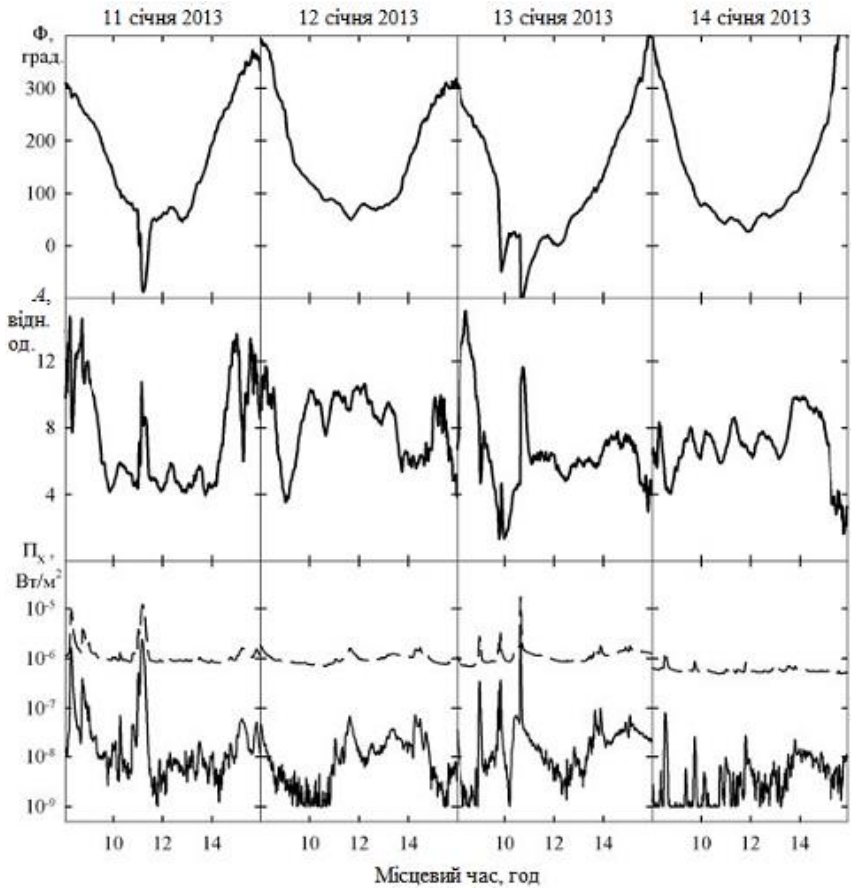


Рис. 2.6. Варіації середньої фази й амплітуди відбитого від іоносфери сигналу станції РБУ (м. Москва), зареєстровані в м. Харків у час доби поблизу опівдня з 11 до 14 січня 2013 р., а також реєстрації потоку сонячного рентгенівського випромінювання в діапазонах 0.05–0.4 нм (суцільні лінії) і 0.1–0.8 нм (штрихові) на супутнику GOES-15

Геомагнітне поле характеризувалося як спокійне з середньодобовим індексом $K_{p\max} = 1$ для 11–12 січня і $K_{p\max} = 3$ для 13–14 січня. В інтервали реєстрацій потрапили два сонячні рентгенівські спалахи класу М1, які мали місце о 09:11 UT 11 січня і 08:38 UT 13 січня 2013 р. На рис. 2.6 також наведено записи варіацій потоку сонячного рентгенівського випромінювання в смугах 0.05–0.4 нм (суцільні лінії) та 0.1–0.8 нм (штрих-пунктир), зареєстровані супутником GOES-15 у цей же час.

З рис. 2.6 поряд із добовим ходом фази й амплітуди радіохвилі видно чітку реакцію сигнальних параметрів на спалахи: короткочасні зменшення

фази на 100–150° та збільшення амплітуди до двох разів. Висока чутливість даного засобу моніторингу демонструється реакцією й на більш слабкий спалах С класу, який мав місце 13 січня 2013 р. перед основним. Така поведінка параметрів радіохвилі характерна при утворенні шару іонізації з різким градієнтом електронної концентрації нижче висоти відбиття в незбуреній іоносфері.

Опишемо коротко добові варіації $f_d(t)$ і $A(t)$ (рис. 2.7). До сходу Сонця мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 10$ хв і $f_{da} \approx 0.5$ мГц, а $\delta_N \approx 3\%$. При цьому $A(t)$ змінювалася в 2–3 рази. У денний час варіації ДЗЧ були близько ±0.1 мГц, а амплітуда сигналу була менше нічних значень у 4–6 разів.

Після заходу Сонця ДЗЧ збільшилася до 10–20 мГц, а амплітуда збільшилася в 5–7 разів у порівнянні з денними значеннями.

Відмінність денних значень f_d і A від нічних пояснюється головним чином тим, що в нічний час радіохвиля відбивається на більших висотах.

Розглянемо вплив спалаху С класу на допплерівське зміщення частоти й амплітуду сигналу на частоті 77.5 кГц (див. рис. 2.7). Збільшення сонячного випромінювання приблизно о 09:00 і 11:00 призвело до максимального значення ДЗЧ f_{dm}, рівному 0.61 і 0.35 мГц і тривалості ΔT близько 34 і 20 хв відповідно. Зсув фази сигналу

$$\Delta\varphi = 2\pi \int_0^{\Delta T} f_d(t)\,dt \approx \pi f_{dm} \Delta T\,. \qquad (2.47)$$

Для цих випадків значення $\Delta\varphi$ дорівнюють 3.9 і 1.3. Зі співвідношення (2.41) знаходимо, що зміщення області відбиття становило близько 15 і 5 км. При цьому для $L \approx 5$ км з (2.43) маємо $\delta_N \approx 3$ і 1, тобто за рахунок спалахів у D-області N збільшилася на 300 і 100% відповідно.

Перший спалах призвів до зменшення амплітуди A сигналу, а другий – до її збільшення. Ці ефекти пояснюються зміною зсуву фази між інтерферуючими модами.

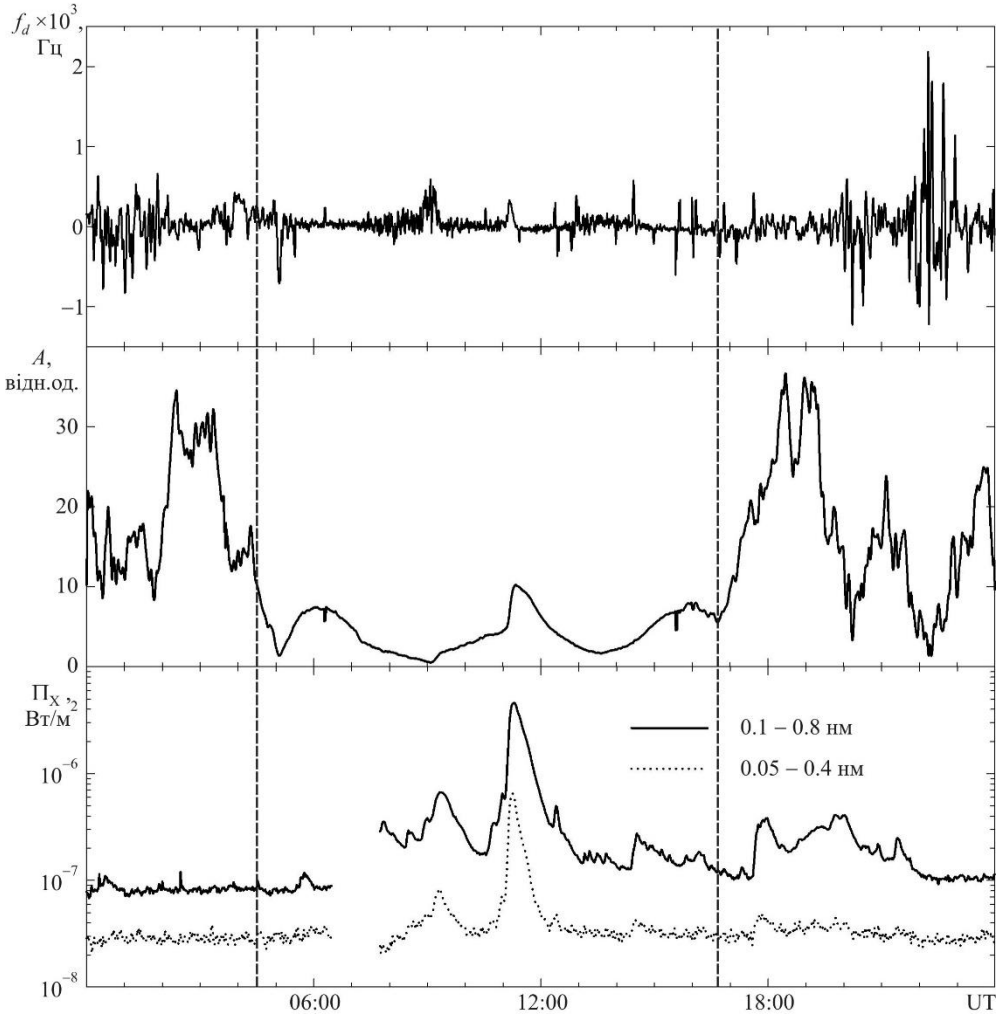


Рис. 2.7. Часові варіації допплерівського зміщення частоти й амплітуди сигналу станції DCF77 (траса Mainflingen, ФРН – Гракове, 77.5 кГц) і потоку енергії 20 березня 2019 р. під час рентгенівського спалаху С класу на Сонці. Вертикальними лініями показані моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі в точці з координатами 50°пн. ш., 23°сх. д., які відповідають середині радіотраси

Розглянемо реакцію на слабку магнітну бурю. У ранковий час 19 грудня 2019 р. спостерігалася слабка магнітна буря з $K_{p\max} = 4$. Часові варіації ДЗЧ й амплітуда сигналу наведені на рис. 2.8. Приблизно через $\Delta t \approx 5$ год після сплеску K_p-індексу спостерігалися квазіперіодичні варіації як ДЗЧ, так і амплітуди. Для ДЗЧ $f_{da} \approx 1.4$ мГц, а $T \approx 20$ хв, для амплітуди $T \approx 40$ хв. При $\Delta t \approx 5$ год і відстані від авроральної області до середини радіотраси

$R_1 \approx 2400$ км маємо вдавану швидкість поширення $v \approx 133$ м/с. Таку швидкість і відносну амплітуду мають атмосферні гравітаційні хвилі, які генеруються під час геокосмічних бур у полярній області [178].

Після заходу Сонця мало місце спочатку зменшення амплітуди сигналу в 2–3 рази, а потім її збільшення в 3–4 рази. Оскільки згадане зменшення не спостерігалося в сусідні дні, можна припустити, що воно пов'язане з іоносферною бурею і, зокрема, зі збільшенням поглинання радіохвилі в результаті збільшення N за рахунок висипання в нижню іоносферу високоенергійних (енергія ~10 кеВ) електронів з магнітосфери.

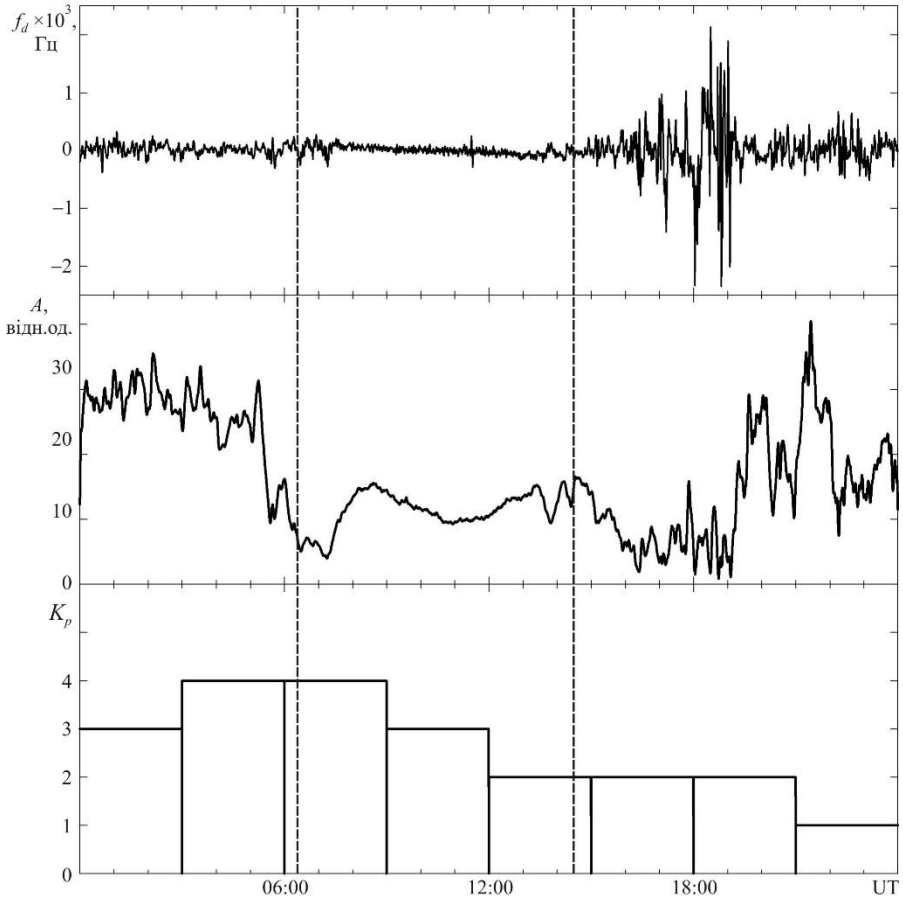


Рис. 2.8. Часові варіації допплерівського зміщення частоти й амплітуди сигналу станції DCF77 (траса Mainflingen, ФРН – Гракове, 77.5 кГц) і K_p-індексу 19 грудня 2019 р. після геомагнітного збурення. Вертикальними лініями показані моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі в точці з координатами 50°пн. ш., 23°сх. д., які відповідають середині радіотраси

2.2.3. Обговорення

Комплекс багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери протягом багатьох років забезпечував експериментальними даними про динамічні процеси в геокосмосі, викликані джерелами різної фізичної природи [146, 147]. Було продемонстровано його ефективність і інформативність. Комплекс безперервно модернізується, оновлюється програмне забезпечення. Цінність вимірювань на комплексі підвищилася після введення фахівцями Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та Харбінського інженерного університету (КНР) комплексу з аналогічним призначенням [66, 67, 49, 148, 151, 152, 171]. З'явилася можливість синхронних вимірювань на двох подібних комплексах.

Працездатність комплексу продемонстрована на прикладі ефектів сонячного термінатора (у середній іоносфері), сонячного спалаху та магнітного збурення (в нижній іоносфері).

Підтверджено, що рух сонячного термінатора супроводжується як аперіодичними, так і квазіперіодичними процесами в іоносфері. У нижній іоносфері (висота ~100 км) спостерігаються процеси з T від 5 хв і більше, а вище – з T від ~10 хв і більше. Очевидно, що квазіперіодичні коливання викликані атмосферними гравітаційними хвилями, для яких $T_{\min} \approx 5$ хв в нижній іоносфері, а вище $T_{\min} \approx 10$–15 хв [178].

Доведено, що комплекс дозволяє реєструвати реакцію іоносфери навіть на слабкі спалахи на Сонці та невеликі магнітні збурення.

2.3. Параметри рухомих іоносферних збурень: результати просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування

Для просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування іоносфери використано багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний

комплекс, розміщений на території Харбінського інженерного університету (див. п.1.4.4).

Для моніторингу використовувалося 14 радіотрас різної протяжності та орієнтації (рис. 2.9). Перелік радіопередавальних радіостанцій наведено в табл. 2.3.

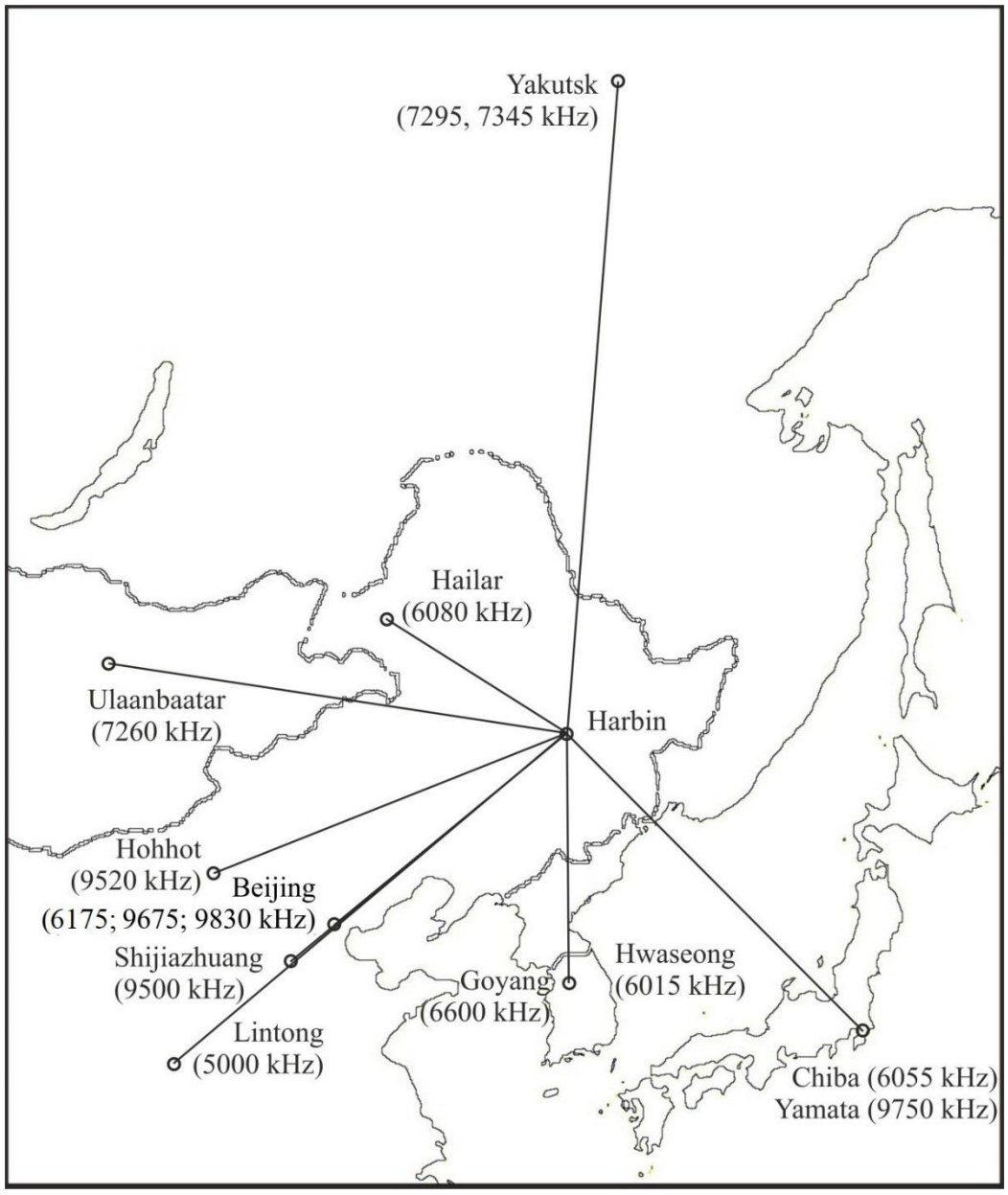


Рис. 2.9. Схема розташування радіопередавальних пристроїв та радіоприймального пристрою (Харбін)

Таблиця 2.3.

Основні відомості про радіотраси (https://fmscan.org/index.php)

Частота, кГц	Координати передавача	Розташування (країна)	Відстань до Харбіна, км	Координати середини траси
5000	34.95 пн.ш. 109.56 сх.д.	Lintong/Pucheng (Китай)	1875	40.37 пн.ш. 118.12 сх.д.
6015	37.21 пн.ш. 126.78 сх.д.	Hwaseong (Корея)	950	41.50 пн.ш. 126.73 сх.д.
6055	35.47 пн.ш. 140.21 сх.д.	Chiba/Nagara (Японія)	1610	40.63 пн.ш. 133.45 сх.д.
6080	49.18 пн.ш. 119.72 сх.д.	Hailar/Nanmen (Китай)	645	47.48 пн.ш. 123.2 сх.д.
6175	39.75 пн.ш. 116.81 сх.д.	Beijing (Китай)	1050	42.77 пн.ш. 121.75 сх.д.
6600	37.60 пн.ш. 126.85 сх.д.	Goyang (Корея)	910	41.69 пн.ш. 126.77 сх.д.
7260	47.80 пн.ш. 107.17 сх.д.	Ulaanbaatar/ Khonkhor (Монголія)	1496	46.79 пн.ш. 116.93 сх.д.
7295	62.24 пн.ш. 129.81 сх.д.	Yakutsk (Росія)	1845	54.01 пн.ш. 128.25 сх.д.
7345	62.24 пн.ш. 129.81 сх.д.	Yakutsk (Росія)	1845	54.01 пн.ш. 128.25 сх.д.
9500	38.47 пн.ш. 114.13 сх.д.	Shijiazhuang (Китай)	1310	42.13 пн.ш. 120.41 сх.д.
9520	40.72 пн.ш. 111.55 сх.д.	Hohhot (Китай)	1340	43.25 пн.ш. 119.12 сх.д.
9675	39.75 пн.ш. 116.81 сх.д.	Beijing (Китай)	1050	42.77 пн.ш. 121.75 сх.д.
9750	36.17 пн.ш. 139.82 сх.д.	Yamata (Японія)	1570	40.98 пн.ш. 133.25 сх.д.
9830	39.75 пн.ш. 116.81 сх.д.	Beijing (Китай)	1050	42.77 пн.ш. 121.75 сх.д.

Отриманню параметрів РІЗ передувало розв'язання низки задач. По-перше, для однострибкових радіотрас для китайського регіону числовими методами розв'язана нелінійна крайова задача для променевих рівнянь у наближенні плоско-шаруватої магнітоактивної іоносфери з квазістаціонарним 3D-збуренням концентрації електронів і урахуванням сферичності Землі. По-друге, розроблено методику синтезу допплерограм на похилих ВЧ радіотрасах різної орієнтації відносно вектору напруженості геомагнітного поля. Виявлено головні особливості допплерограм для РІЗ з параметрами, що змінюються в широких межах. По-третє, для гармонічної моделі РІЗ з використанням трьох радіотрас визначалися фазові зсуви $\Delta\Phi_{12,13}$ у часових варіаціях ДЗЧ на двох інших радіотрасах (з умовними номерами 2 та 3) відносно опорної радіотраси (з умовним номером 1). Цей зсув дорівнює добутку хвильового вектору $\vec{k}$ на відому базу $\vec{d}_{12}$, що визначається відстанню та орієнтацією між серединами радіотрас:

$$\Delta\Phi_{12} = -\vec{k}\vec{d}_{12}, \tag{2.48}$$

$$\Delta\Phi_{13} = -\vec{k}\vec{d}_{13}. \tag{2.49}$$

З (2.48) і (2.49) маємо проєкції

$$k_x = \frac{d_{12y}\Delta\Phi_{13} - d_{13y}\Delta\Phi_{12}}{d_{12y}d_{13x} - d_{13y}d_{12x}}, \tag{2.50}$$

$$k_y = \frac{\Delta\Phi_{13} - k_x d_{13x}}{d_{13y}}. \tag{2.51}$$

Звідси кут α між $\vec{k}$ та віссю OX, що визначає азимут джерела РІЗ, дається співвідношеннями:

$$\sin\alpha = \frac{k_y}{k}, \qquad \cos\alpha = \frac{k_x}{k}, \qquad k^2 = k_x^2 + k_y^2. \tag{2.52}$$

Знаючи k_x і k_y знаходимо довжину хвилі РІЗ.

В загальному випадку є не одне РІЗ, а суперпозиція низки РІЗ різних масштабів і напрямків руху. Для визначення параметрів цих РІЗ спочатку знаходяться крос-спектри S_{12} і S_{13} (індекси відповідають парі номерів радіотрас, для часових варіацій ДЗЧ яких розраховується крос-спектр), з яких

обчислюються періоди та фази крос-спектрів. Єдиний розв'язок існує в тому випадку, коли проєкція довжини хвилі РІЗ на вектор бази більше розміру бази.

2.3.1. Результати спостережень

Опишемо результати спостережень для 25 січня 2019 р. і 7 лютого 2019.

Дослідженню відгуку іоносфери на будь-яке збурення повинен передувати ретельний аналіз стану космічної погоди. Обмежимося аналізом стану магнітного поля Землі. В табл. 2.4 і 2.5 наведено значення індексів K_p та D_{st}. З них видно, що магнітне поле Землі залишалося майже незбуреним.

Таблиця 2.4.

Значення індексу K_p [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]

Інтервал часу доби, UT	24 січня 2019 р.	25 січня 2019 р.	26 січня 2019 р.	6 лютого 2019 р.	7 лютого 2019 р.	8 лютого 2019 р.
00:00–03:00	3.7	2	1.7	1	1.7	2
03:00–06:00	3.3	2.7	1.7	2	1.3	1.7
06:00–09:00	3.7	3.3	1.3	2	1	1.7
09:00–12:00	1.3	2.7	1	2.7	0	1.3
12:00–15:00	1.3	3.3	3	2.7	0.3	0.7
15:00–18:00	2.7	3	2.7	1.3	0.7	1.3
18:00–21:00	3.7	2.3	0.7	2.3	1	2.3
21:00–00:00	4.3	1.7	0.7	2.3	2	3.7

Наведемо результати спостережень за часовими варіаціями ДЗЧ на трьох радіотрасах: Hohhot–Harbin, Beijing–Harbin та Shijiazhuang–Harbin (див. рис. 2.9). Залежності ДЗЧ $f_d(t)$ для 25 січня 2019 р. і 7 лютого 2019 р. показано на рис. 2.10 і 2.11. З рисунків можна бачити, що варіації ДЗЧ є квазіперіодичними. Така поведінка викликана поширенням РІЗ у іоносфері. Наприклад, 25 січня 2019 р. в інтервалі часу 07:00–09:00 (тут і далі час UT) спостерігалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодом близько 35 та 12 хв (див. рис. 2.10). 7 лютого 2019 р. також мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодом біля 40, 20 та 13 хв (див. рис. 2.11).

Таблиця 2.5.

Значення індексу D_{st} [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]

Час доби, UT	24 січня 2019 р.	25 січня 2019 р.	26 січня 2019 р.	6 лютого 2019 р.	7 лютого 2019 р.	8 лютого 2019 р.
00:00	10	1	–4	–5	–13	–16
01:00	10	2	–3	–2	–13	–11
02:00	11	–3	–5	–3	–13	–11
03:00	4	–6	–6	–8	–14	–14
04:00	–7	–11	–6	–9	–15	–14
05:00	–14	–15	–2	–6	–14	–13
06:00	–17	–15	–1	–3	–12	–12
07:00	–14	–11	–1	–7	–12	–16
08:00	–9	–12	–1	–12	–12	–17
09:00	–7	–5	1	–11	–12	–24
10:00	–3	–5	–1	–13	–12	–22
11:00	–1	–6	–2	–17	–11	–16
12:00	0	–10	–4	–24	–7	–11
13:00	1	–10	–6	–20	–7	–9
14:00	0	–12	–7	–15	–8	–9
15:00	4	–10	–6	–12	–8	–10
16:00	4	–5	–5	–9	–10	–12
17:00	0	–7	–5	–12	–9	–12
18:00	–15	–10	–8	–16	–7	–10
19:00	–17	–7	–8	–13	–7	–10
20:00	–1	–4	–7	–17	–12	–13
21:00	–8	–5	–6	–15	–20	–17
22:00	–7	–3	–2	–14	–25	–18
23:00	–2	–2	1	–15	–23	–15

У якості опорної вибрано радіотрасу Beijing–Harbin. Розраховано крос-спектри часових варіацій ДЗЧ на трасах Hohhot–Harbin та Shijiazhuang–Harbin відносно опорної траси. Нормовані крос-спектри S/S_{max} та їхні фази Ф показано на рис. 2.12 для 25 січня 2019 р. та на рис. 2.13 для 7 лютого 2019 р. Уточнені значення частоти F, періоду T, горизонтальної довжини хвилі, швидкості РІЗ та азимуту приходу хвилі наведено у табл. 2.6.

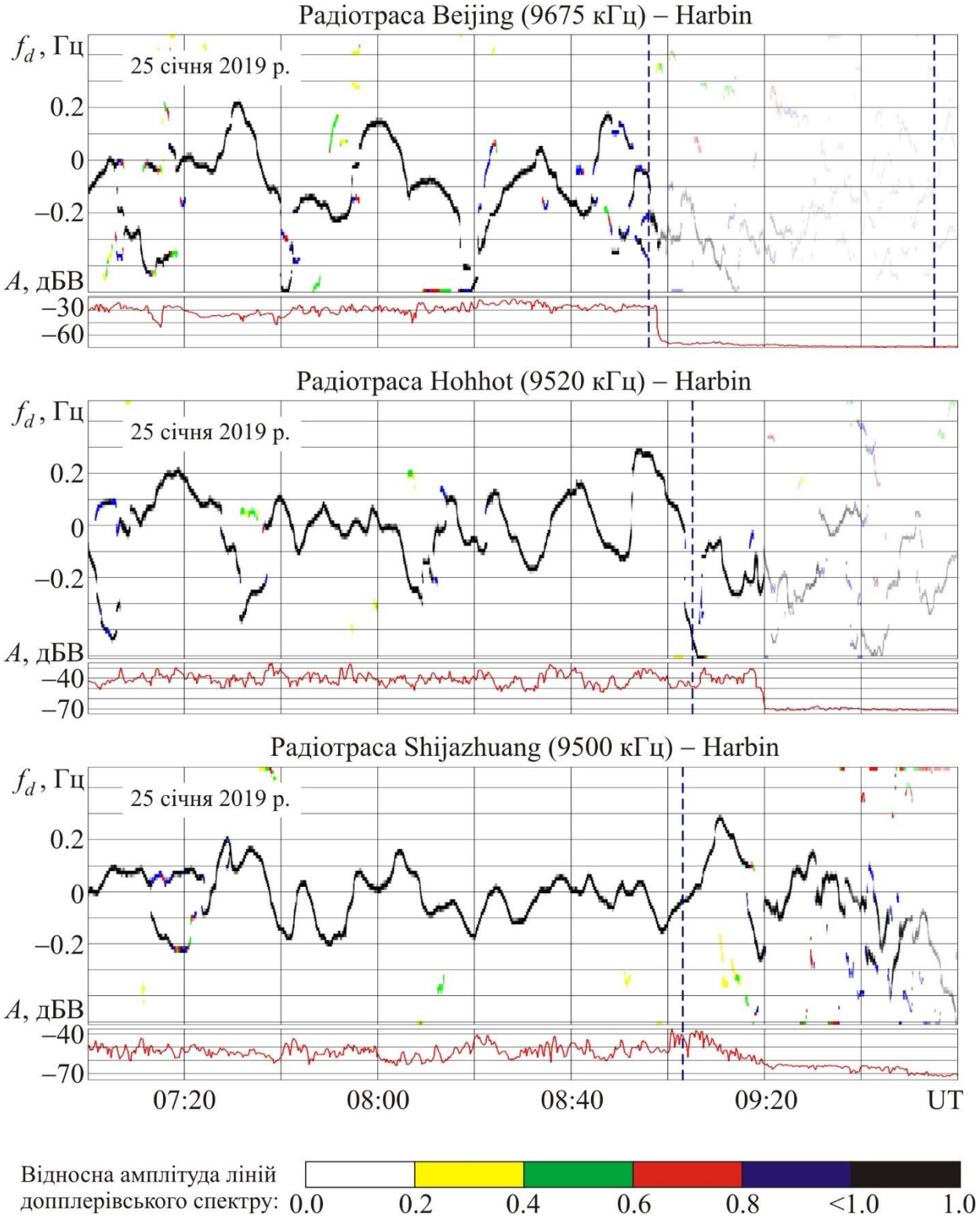


Рис. 2.10. Часові варіації ДЗЧ 25 січня 2019 р. на радіотрасах Beijing–Harbin, Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin. Вертикальними пунктирними лініями показано моменти заходу Сонця на висотах 0 і 100 км

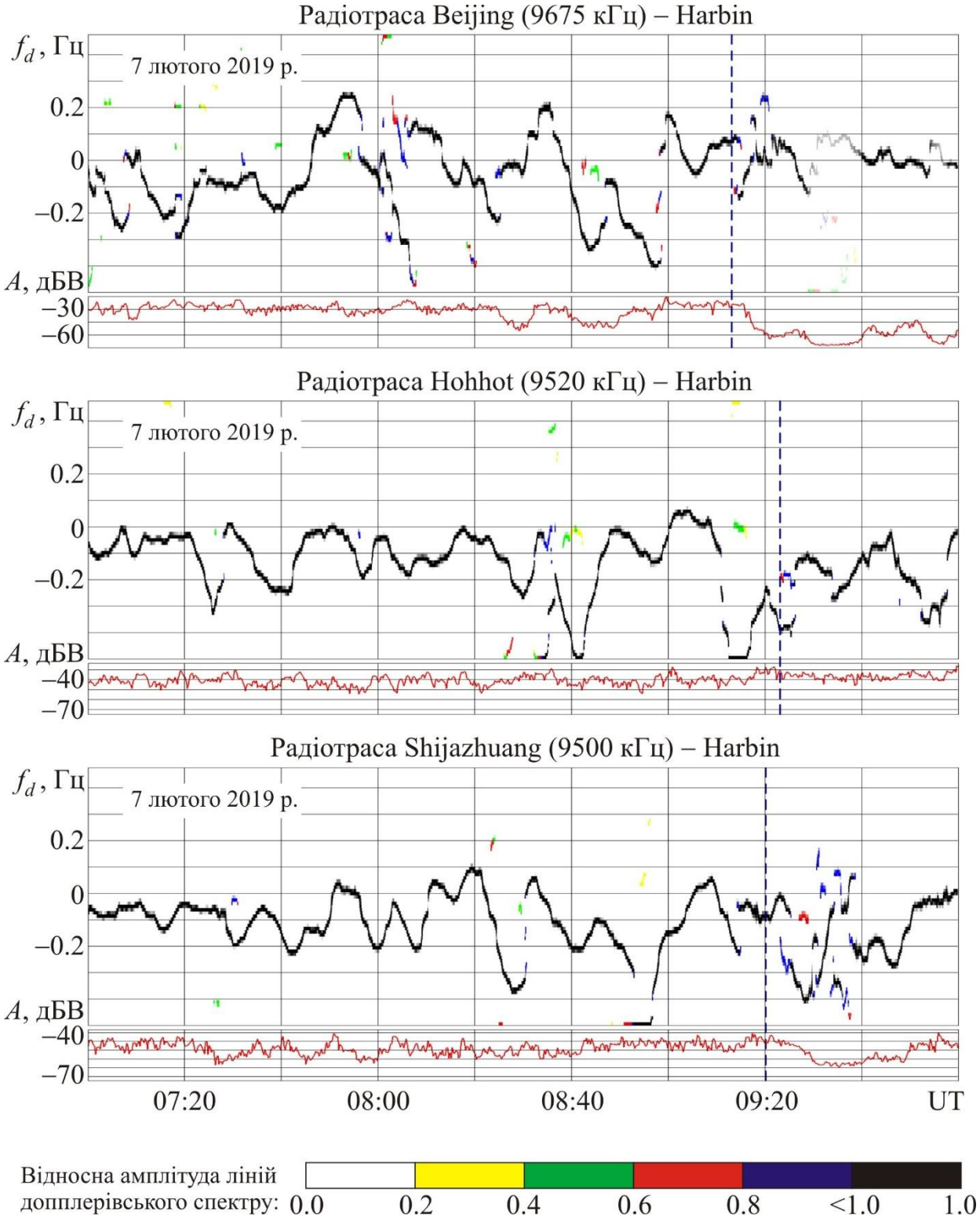


Рис. 2.11. Часові варіації ДЗЧ 7 лютого 2019 р. на радіотрасах Beijing–Harbin, Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin. Вертикальною пунктирною лінією показано момент заходу Сонця на поверхні Землі

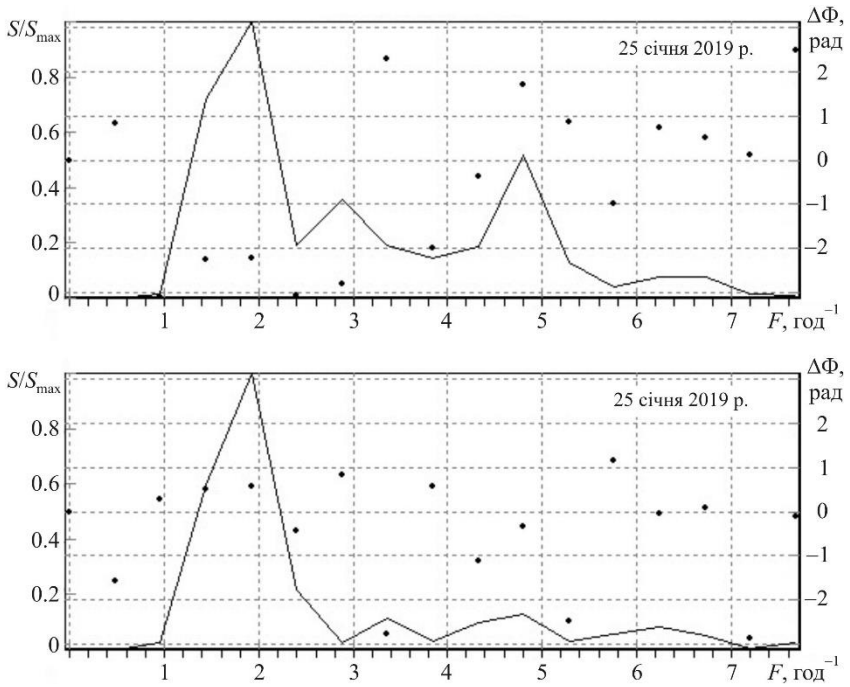


Рис. 2.12. Нормовані крос-спектри (суцільна лінія) та фази крос-спектрів (точки) варіацій ДЗЧ 25 січня 2019 р. на радіотрасах Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin по відношенню до радіотраси Beijing–Harbin (панелі зверху вниз)

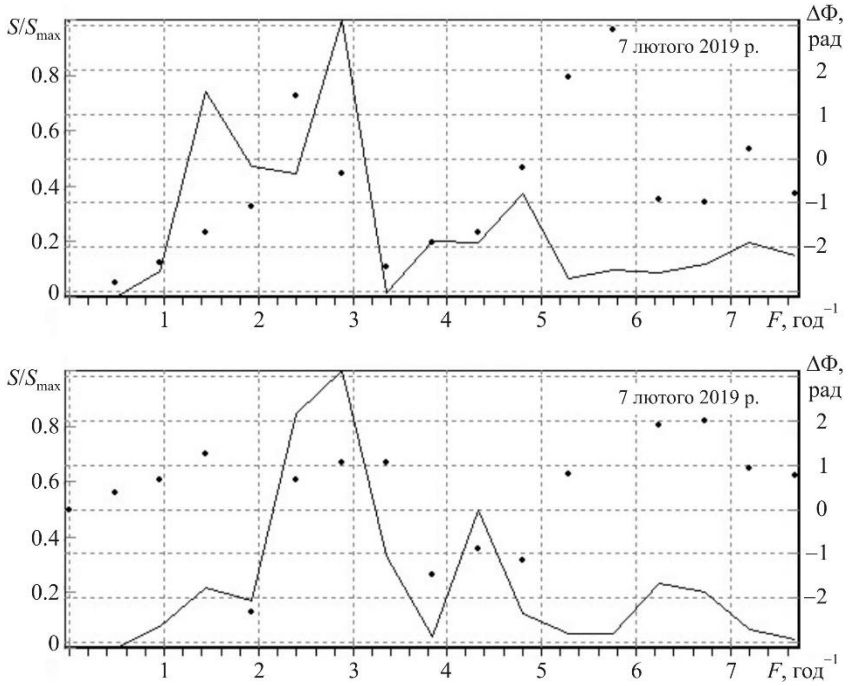


Рис. 2.13. Нормовані крос-спектри (суцільна лінія) та фази крос-спектрів (точки) варіацій ДЗЧ 7 лютого 2019 р. на радіотрасах Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin по відношенню до радіотраси Beijing–Harbin (панелі зверху вниз)

Таблиця 2.6.

Основні параметри РІЗ

Дата	Частота, год$^{-1}$	Період, хв	Довжина хвилі, км	Швидкість, м/с	Азимут, град	Переважний напрям руху
25 січня 2019 р.	1.4–2.2	35.1±7.8	245±54	117±52	8	Від екватору
	4.4–5.2	12.5±1	327±26	436±70	188	До екватору
1 лютого 2019 р.	2.1–3.0	24±4	343±57	238±79	343	Від екватору
	3.6–4.2	15.5±1.2	240±19	258±40	172	До екватору
	5.4–6.2	10.3±1.1	359±38	581±124	4.3	Від екватору
7 лютого 2019 р.	1.2–2.0	40±10				
	2.2–3.2	23±4	271±47	196±68	4	Від екватору
	4.4–4.8	13.0±0.5	693±27	888±68	350	Від екватору
19 жовтня 2019 р.	2.1–2.8	25.0±3.6	366±53	244±70	200	До екватору

2.3.2. Обговорення

Розроблену методику визначення параметрів РІЗ застосовано для обробки даних просторово рознесеного похилого радіозондування. Із крос-спектрів отримано діапазони частот, періоди, горизонтальні довжини хвиль, горизонтальні швидкості та азимути (див. табл. 2.6). Немає сумніву, що ці РІЗ були викликані генерацією та поширенням АГХ [178]. Переважним напрямком руху хвилі був рух від екватору та до екватору. Короткоперіодні ($T \approx 10$–13 хв) РІЗ мали швидкість 436–888 м/с. Такі хвилі, швидше за все, мають електромагнітну природу [179].

Для оцінки відносної амплітуди збурень N у полі РІЗ скористаємося співвідношенням (2.27). Наприклад, на радіотрасі Hohhot–Harbin в інтервалі часу 08:20–09:00 амплітуда $f_{da} \approx 0.18$ Гц, а $T \approx 20$ хв. За висоти відбиття 175–200 км маємо $K \approx 4.3$–4.8, а $\delta_{Na} \approx 7.5$–6.7% відповідно.

На радіотрасі Shijiazhuang–Harbin з 07:40 до 08:40 маємо $f_{da} \approx 0.12$ Гц, а $T \approx 10$ хв. Тоді за $z_r \approx 175$–200 км отримаємо $K \approx 4.3$–4.8, а $\delta_{Na} \approx 2.5$–2.2%.

Для інших періодів часу та інших радіотрас значення $\delta_{Na} \approx 1$–10%.

2.4. Висновки до розділу 2

1. Для сферично-шаруватої іоносфери отримано скоригований закон секанса, який описує умову відбиття ВЧ радіохвилі від ізотропної іоносфери без втрат.

2. Встановлено просте аналітичне співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти на похилих радіотрасах ВЧ діапазону за відомим значенням максимальної плазмової частоти.

3. Для умов похилого ВЧ зондування іоносфери отримано прості аналітичні співвідношення для оцінки відносної амплітуди квазіперіодичних збурень та величини аперіодичних збурень концентрації електронів у іоносфері.

4. Продемонстрована застосовність отриманих співвідношень при використанні на практиці.

5. У ХНУ імені В. Н. Каразіна розроблено та функціонує багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, призначений для радіофізичного моніторингу динамічних процесів у геокосмосі, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження.

6. Комплекс потенційно здатний виявляти відносне ДЗЧ $\sim 10^{-10}$, зсув фази в НЧ діапазоні ~0.1°, варіації сигналу не менше 2–3%, збурення концентрації електронів з відносною амплітудою не менше, ніж $\sim 10^{-2}$ % та динамічні процеси, які супроводжуються вертикальним рухом зі швидкістю не меншою ~0.02–0.05 м/с.

7. Успішне функціонування комплексу продемонстровано на прикладі дослідження динамічних процесів у геокосмосі, викликаних дією різних джерел енерговиділення.

8. Стосовно просторово рознесеного похилого радіозондування іоносфери з застосуванням багаточастотного багатотрасового когерентного

радіотехнічного комплексу ВЧ діапазону розроблено методику визначення періодів, горизонтальних довжин хвиль і азимуту приходу РІЗ.

9. За допомогою крос-спектрального аналізу визначено періоди, горизонтальні довжини хвиль, горизонтальну швидкість і азимути переважаючих за амплітудою РІЗ.

10. Підтверджено, що РІЗ із періодами ~16–40 хв та швидкостями в декілька сотень метрів за секунду викликані генерацією та поширенням АГХ. Збурення з періодом ~10–13 хв мають електромагнітну природу.

11. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів у хвилі зазвичай складала ~1–10%.

12. Як правило, РІЗ переміщувалися вздовж магнітного меридіану, причому частіше за все з півночі на південь.

13. Успішне функціонування комплексу та працездатність запропонованих методик продемонстровано на прикладі визначення основних параметрів РІЗ.

РОЗДІЛ 3. ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ

У даному розділі розглядаються два сонячних затемнення (СЗ): кільцеподібне СЗ 10 червня 2021 р. над м. Харків та часткове затемнення 25 жовтня 2022 р. Метою розділу є дослідження впливу СЗ на характеристики радіохвиль і параметри іоносфери, а також статистичний аналіз особливостей поведінки ПЕВ іоносфери від високих до низьких широт в Євро-Азійському регіоні під час спільного впливу СЗ та вечірнього сонячного термінатора.

Результати цього розділу опубліковано в роботах [180–182].

3.1. Кільцеподібне сонячне затемнення 10 червня 2021 р.

3.1.1. Загальні відомості

Особливість СЗ 10 червня 2021 р. полягала в тому, що воно було кільцеподібним [https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEdecade/SEdecade2021.html] (рис. 3.1).

Затемнення почалося 10 червня 2021 р. о 08:12:20 UT, а закінчилося о 13:11:19 UT. Кільцеве СЗ спостерігалося з 09:49:50 UT до 11:33:43 UT. Фаза максимального покриття диска Сонця мала місце з 10:33:16 UT до 10:36:56 UT. СЗ почалося над територією Канади. Місячна тінь рухалась через Гренландію (де відмічалася найбільша фаза), Північний Льодовитий океан, Північний полюс, острів Нова Сибір і Росію (Якутію, Чукотку, Магаданську область, Камчатський край). Часткове СЗ спостерігалося в північній і середній частинах Європи, крім півдня Апеннін і Балкан. Воно не спостерігалося в Криму, на Кавказі, у південних районах Середньої Азії, Приморському краї, на Сахаліні, півдні Чукотки. Часткове СЗ відмічалося в Монголії, на більшій частині Китаю, на північному сході США, півночі Аляски, у всьому Північному Льодовитому океані, в північній частині Атлантики.

Також часткове СЗ спостерігалося і на більшій частині України. Винятком були лише найпівденніші області.

Протягом СЗ 10 червня 2021 р. в Харкові $M_{max} \approx 0.112$, а $A_{max} \approx 4.4\%$. Затемнення почалося о 10:42 UT (13:42 LT, LT – місцевий час), а закінчилося о 12:12 UT (15:12 LT). Максимальна фаза мала місце об 11:28 UT (14:28 LT).

Рис. 3.1. Приклад кільцеподібного СЗ

3.1.2. Стан космічної погоди

Сплески концентрації частинок у сонячному вітрі від $5 \cdot 10^6$ до $(25–30) \cdot 10^6$ м$^{-3}$ спостерігались 7 та 12 червня 2021 р. (рис. 3.2). Збільшення швидкості частинок від 350 до 500–550 км/с відмічалося 7 і 8 червня 2021 р. Різкий сплеск температури частинок від $0.2 \cdot 10^5$ до $4.5 \cdot 10^5$ К зареєстровано о другій половині доби 7 червня 2021 р. Сплески тиску частинок від 1 до 5–6 нПа спостерігались у тих самих інтервалах часу, що й концентрації частинок. Компоненти B_y і B_z міжпланетного магнітного поля флуктуювали в межах ±5 нТл. 7, 11 і 12 червня 2021 р. компонента B_z ставала від'ємною. Це призводило до геомагнітних збурень і слабкої бурі. Сплески функції Акасофу ε_A від 1 до 8–13 ГДж/с мали місце 7, 11 і 12 червня 2021 р. Водночас із цим індекс K_p збільшувався від 0–1 до 3–4. З 6 на 7, з 10 на 11 та з 11 на 12 червня 2021 р. спостерігалось зменшення D_{st}-індексу до –(10–33) нТл.

Поблизу момента СЗ та у відповідні моменти часу 6 та 9 червня 2021 р. стан космічної погоди був спокійним ($K_p \approx 0.3$), що дозволило виявити досить слабку реакцію іоносфери на СЗ.

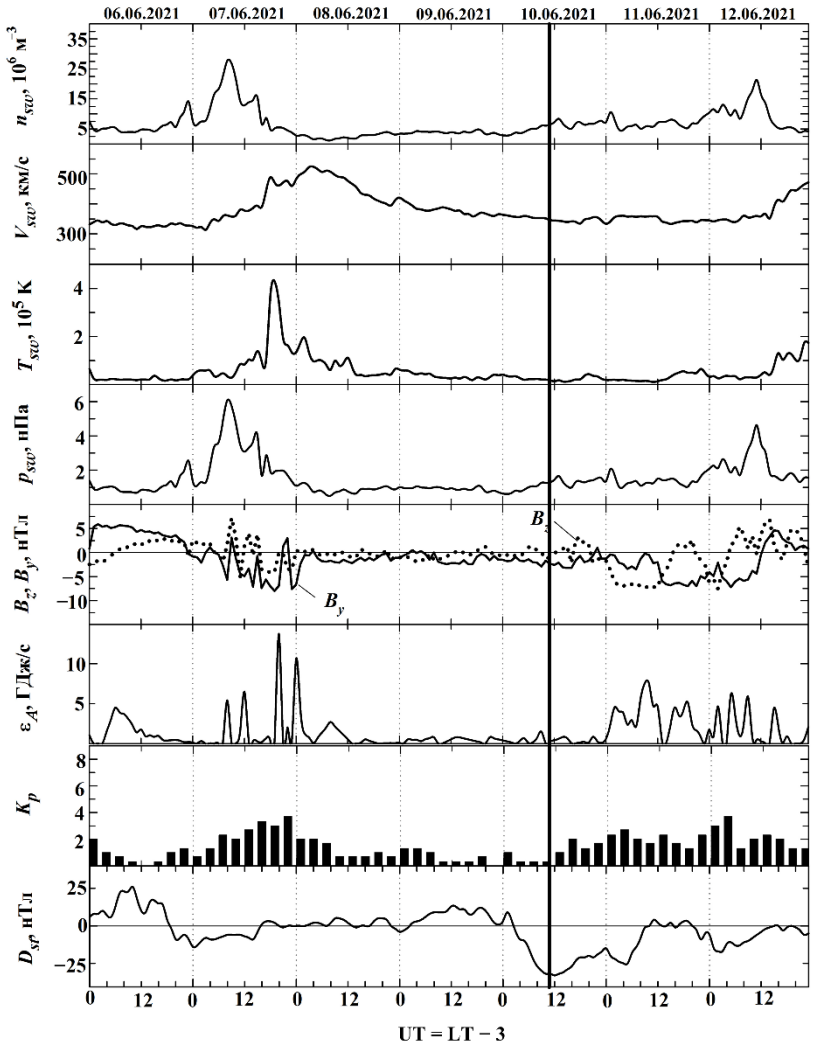


Рис. 3.2. Часові варіації основних параметрів, що описують стан космічної погоди (панелі зверху вниз): параметрів сонячного вітру – концентрації n_{sw}, радіальної швидкості V_{sw}, температури T_{sw} і розрахованих значень динамічного тиску p_{sw}, а також B_y-компоненти (лінія) і B_z-компоненти (точки) міжпланетного магнітного поля, розрахованих значень енергії ε_A, що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу, K_p- і D_{st}-індексу, – протягом 6–12 червня 2021 р. Вертикальна лінія вказує на момент настання максимальної фази СЗ. Для аналізу використано дані сайтів [https://omniweb.gsfc.nasa.gov] та [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]

3.1.3. Дані іонозонда

Загальний контроль за станом іоносфери здійснювався за допомогою цифрового іонозонда. Крок зміни частоти – 11–12 кГц, похибка вимірювання частоти – 20 кГц. Крок за часом становив 1 хв.

Спостереження на іонозонді показали, що критична частота шару $F2$ іоносфери впродовж СЗ зменшувалася від 5.1 до 4.7 МГц. Водночас радіохвилі з частотою f = 3.2; 4.2 МГц, відбивалися на висотах близько 150 і 200 км відповідно.

Протягом СЗ і невдовзі після нього відмічалися квазіперіодичні варіації f_oF2 з періодом $T \approx 14$ хв і амплітудою $\delta f_a \approx 30$ кГц, чому відповідала відносна амплітуда коливань концентрації електронів $\delta_{Na} \approx 1.25\%$.

3.1.4. Результати вертикального зондування

Вимірювання методом вертикального радіозондування проводилися за допомогою радара, описаного у п.1.4.3.

Часові залежності ДС на частоті f = 3.2 МГц, отримані для 9, 10 і 11 червня 2021 р., наведено на рис. 3.3, 3.4 і 3.5. З рис. 3.3 видно, що в контрольний день 9 червня 2021 р. значну частину часу мало місце уширення ДС. Їхня ширина змінювалася від 0.1 до 0.5 Гц. В інтервалах часу 09:40–10:38 і 12:58–15:00 (тут і надалі всесвітній час, UT) мали місце нечітко виражені квазіперіодичні варіації ДЗЧ. Значення квазіперіоду T змінювалася від 5 до 10 хв, а амплітуда ДЗЧ $f_{da} \approx 0.1$–0.2 Гц.

У контрольний день 11 червня 2021 р. уширення ДС до 0.5 Гц спостерігалося в інтервалах часу 09:06–09:38, 12:08–13:08 (див. рис. 4). В інших інтервалах часу варіації ДЗЧ були незначними. Квазіперіодичні варіації відмічалися з 12:26 до 13:20.

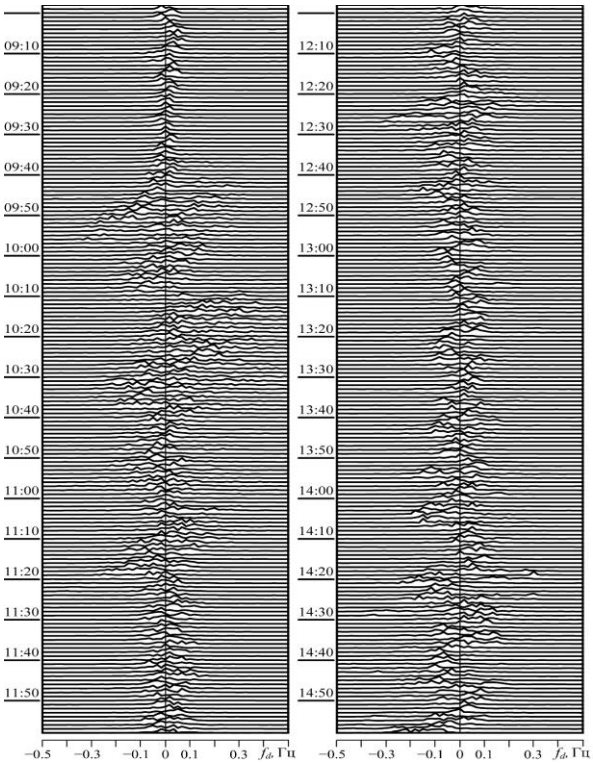


Рис. 3.3. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 3.2 МГц 9 червня 2021 р.

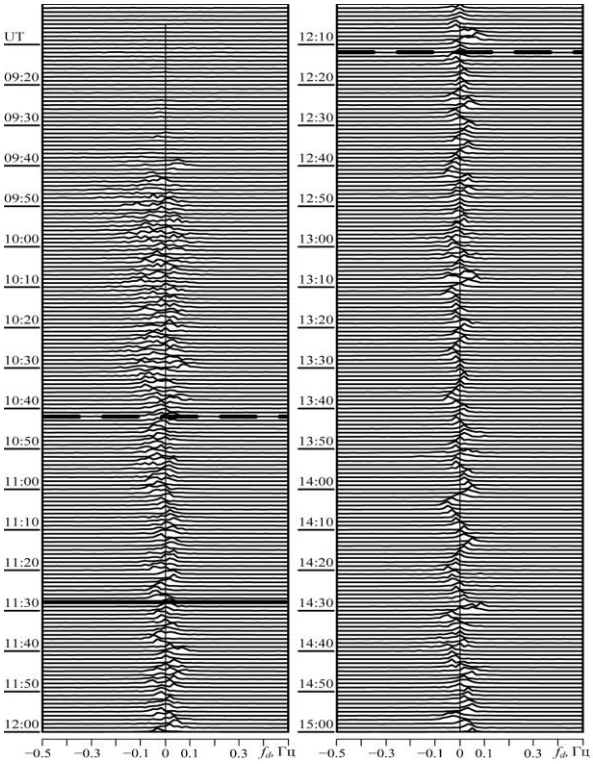


Рис. 3.4. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 3.2 МГц 10 червня 2021 р. Горизонтальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

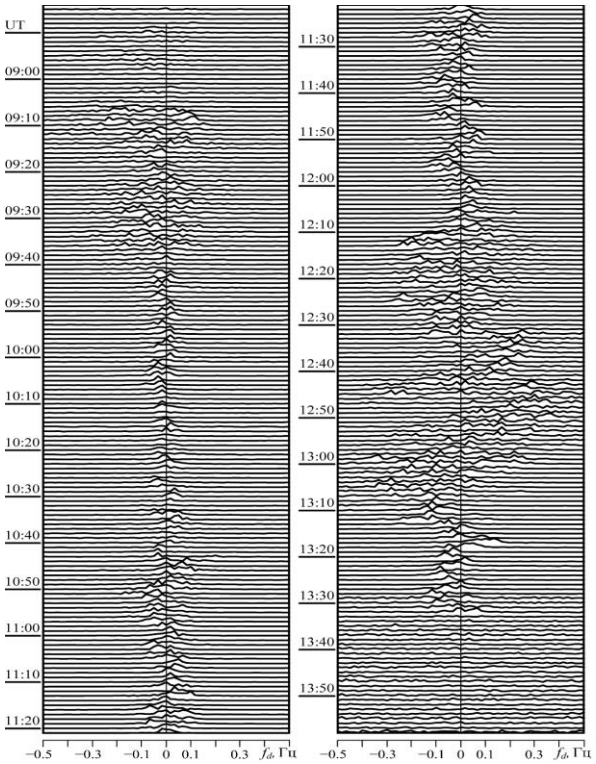


Рис. 3.5. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 3.2 МГц 11 червня 2021 р.

У день СЗ, 10 червня 2021 р., ДС були впорядкованими і вузькосмуговими (див. рис. 3.4). З 09:50 до 10:38 їхня ширина не перевищувала 0.20–0.25 Гц. У середньому ДЗЧ $f_d \approx 0$ Гц. З 11:19 до 12:01, тобто поблизу максимальної фази СЗ, варіації ДЗЧ стали квазіперіодичними. При цьому $T \approx 6$–7 хв і $f_{da} \approx 0.03$–0.06 Гц. З 12:07 до 12:10 спостерігався нетривалий позитивний сплеск ДЗЧ (до 0.1 Гц). Нове квазіперіодичне збурення ДЗЧ відмічалося в інтервалі часу 12:25–13:12. Водночас $T \approx 5$ хв, а $f_{da} \approx 0.03$–0.06 Гц. Наступне коливання ДЗЧ з $T \approx 12$–15 хв реєструвалося з 13:35 до 14:32.

Розглянемо часові варіації ДЗЧ на частоті 4.2 МГц (рис. 3.6, 3.7 і 3.8). З рис. 3.6 видно, що за день до затемнення ДС уширювалися до 0.5–0.6 Гц. В інтервалах часу 09:20–09:52, 10:17–11:07 і 13:00–14:40 варіації ДЗЧ були квазіперіодичними. Значення квазіперіоду змінювалося від 12 до 13 хв, амплітуди – від 0.15 до 0.21 Гц.

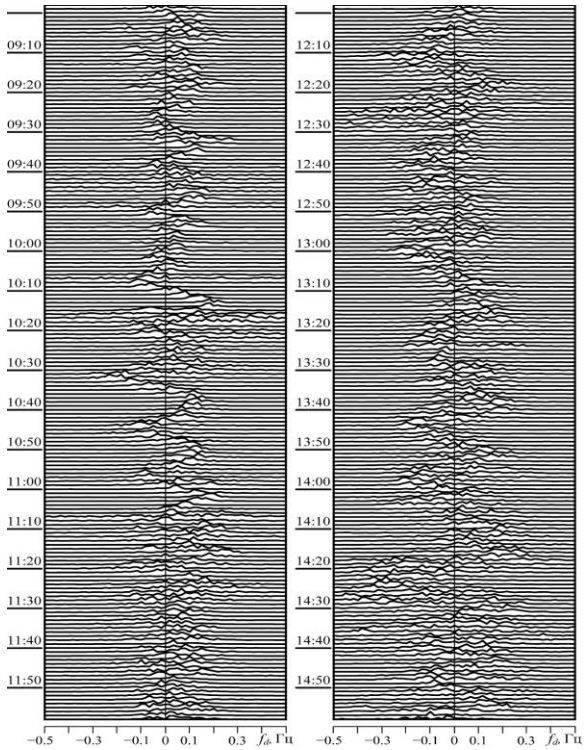


Рис. 3.6. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 4.2 МГц 9 червня 2021 р.

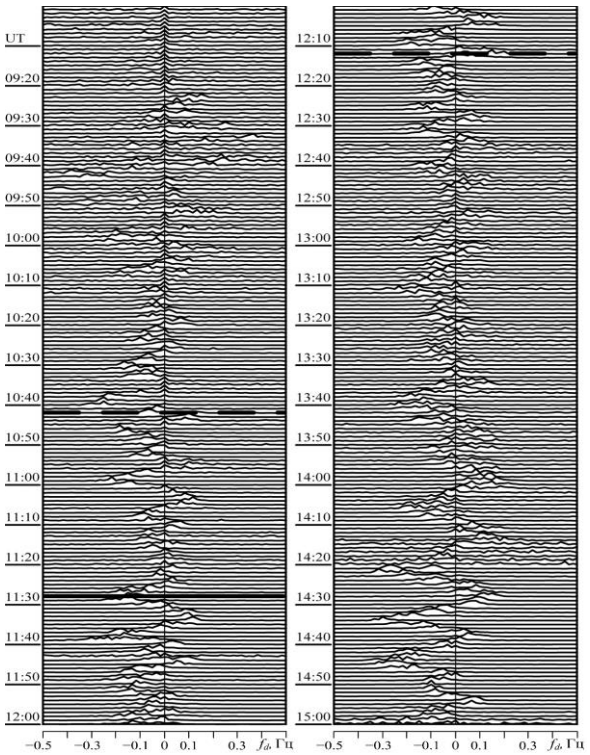


Рис. 3.7. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 4.2 МГц 10 червня 2021 р. Горизонтальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

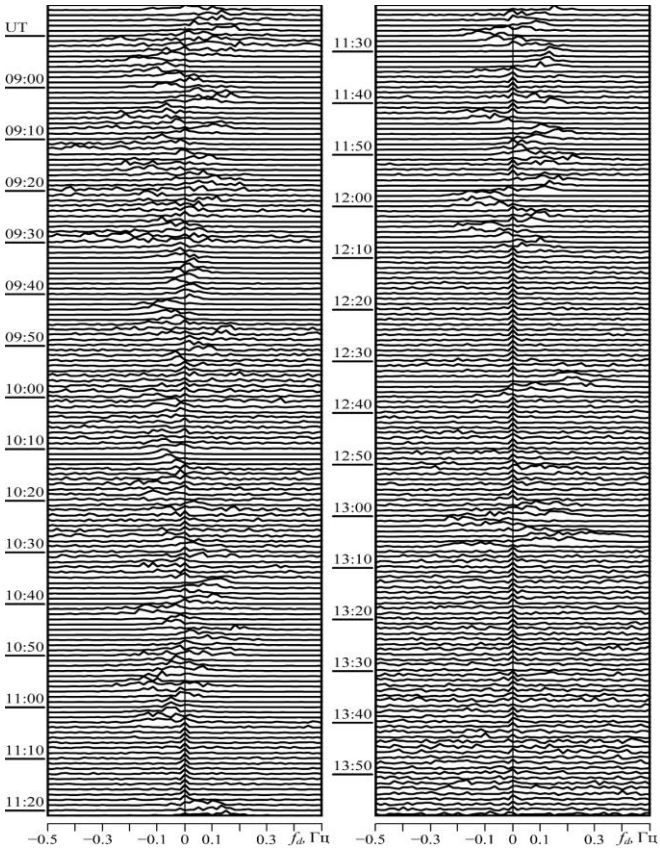


Рис. 3.8. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 4.2 МГц 11 червня 2021 р.

У контрольний день 11 червня 2021 р. варіації ДС були скоріше аперіодичними (див. рис. 3.8). Винятком був інтервал часу 11:28–12:08, коли $T \approx 5$ хв, а $f_{da} \approx 0.20$ Гц. Більшу частину часу відбитий від іоносфери сигнал був відсутній.

У день СЗ квазіперіодичні варіації ДЗЧ мали місце в інтервалах часу 10:26–11:13, 11:22–11:50, 12:27–13:20 та 13:34–15:00 (див. рис. 3.7). Протягом СЗ і невдовзі після нього $T \approx 7$–10 хв, а $f_{da} \approx 0.10$–0.20 Гц.

3.1.5. Результати похилого зондування

Комплекс похилого зондування описано у п.2.2.

Розглянемо часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц (рис. 3.9, 3.10 і 3.11). У контрольний день 9 червня 2021 р. уширення ДС рідко перевищувало

0.1 Гц (див. рис. 3.9). В інтервалах часу 09:40–10:30 та 13:00–15:00 мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ. Значення $T \approx 5$–10 хв і $f_{da} \approx 0.05$–0.10 Гц.

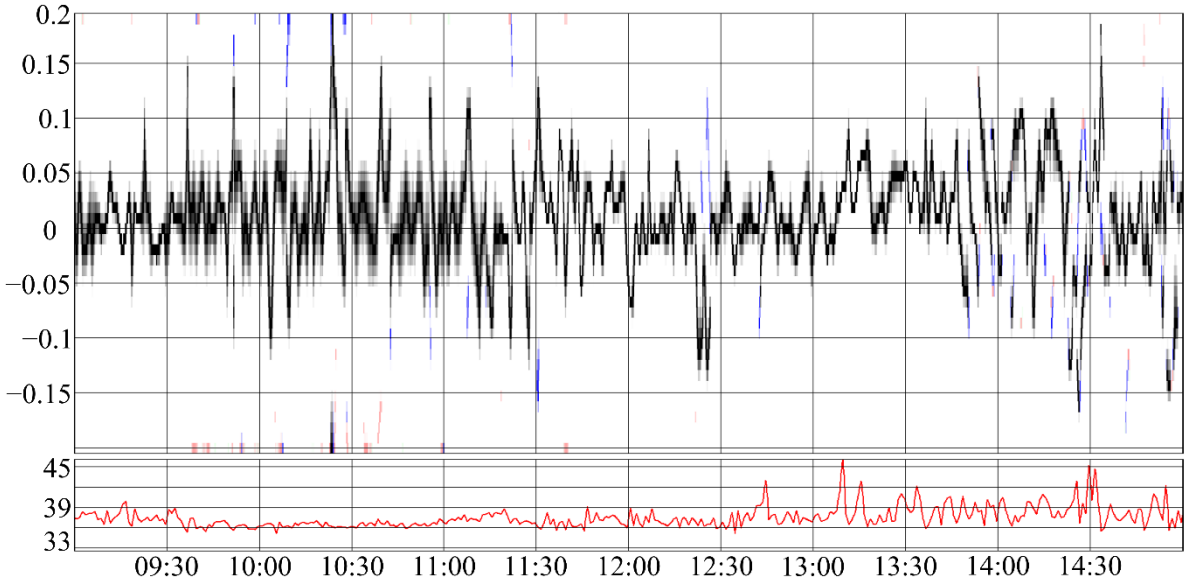


Рис. 3.9. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 3.2 МГц 9 червня 2021 р.

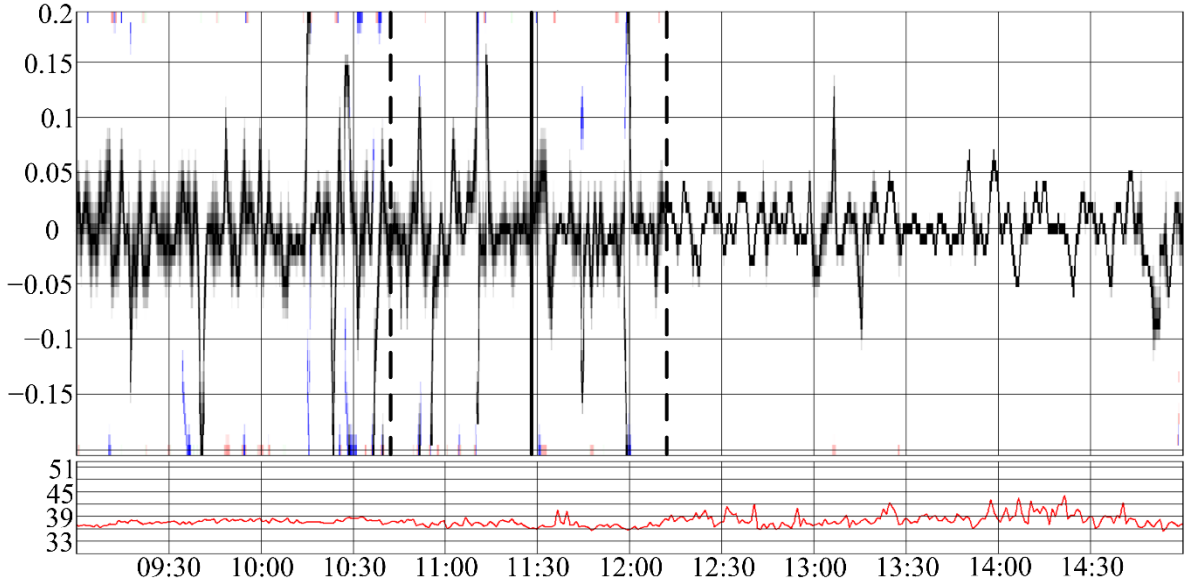


Рис. 3.10. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 3.2 МГц 10 червня 2021 р. Вертикальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

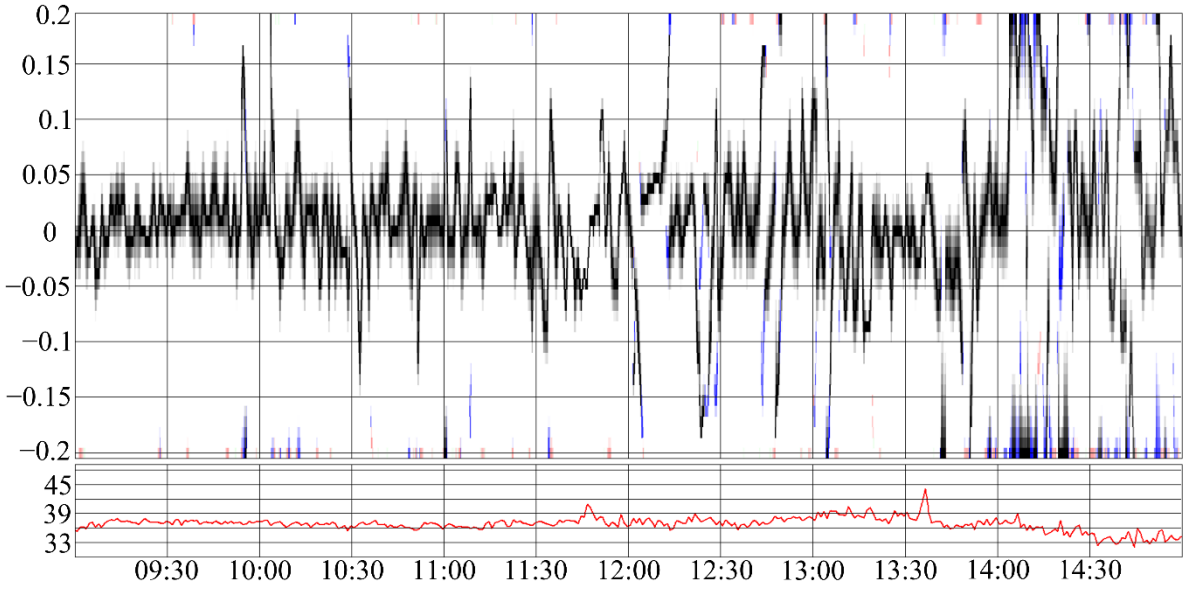


Рис. 3.11. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 3.2 МГц 11 червня 2021 р.

У контрольний день 11 червня 2021 р. варіації ДЗЧ в основному були хаотичними (див. рис. 3.11). Лише в інтервалі часу 12:20–13:40 спостерігалося квазіперіодичне збурення ДЗЧ з $T \approx$ 5–6 хв і $f_{da} \approx$ 0.05–0.10 Гц.

У день СЗ до 11:20 ДЗЧ змінювалося хаотично (див. рис. 3.10). З 11:20 до 12:00 спостерігалися квазіперіодичні варіації з $T \approx 5$ хв і $f_{da} \approx 0.05$ Гц. З 12:10 до 14:45 також мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ. Для першого цуга $T \approx$ 6–7 хв і $f_{da} \approx$ 0.03–0.06 Гц, для другого – $T \approx$ 12–15 хв і $f_{da} \approx$ 0.03–0.04 Гц.

Тепер розглянемо ДС на частоті 4.2 МГц (рис. 3.12–14). За день до СЗ, тобто 9 червня 2021 р., в інтервалах часу 09:20–09:50, 10:10–11:10 та 13:00–14:40 варіації ДС були скоріше квазіперіодичними, ніж хаотичними (див. рис. 3.12) зі значеннями квазіперіоду та амплітуди ДЗЧ відповідно 12–14 хв та $f_{da} \approx$ 0.10 Гц.

Наступного дня після СЗ, тобто 11 червня 2021 р., рівень флуктуацій ДЗЧ збільшився до 0.15–0.20 Гц (див. рис. 3.14). Квазіперіодичний характер варіацій відмічався в інтервалах часу 10:30–11:00 та 11:30–12:05 з $T \approx 5$ хв, а $f_{da} \approx$ 0.10 Гц.

10 червня 2021 р., в день затемнення, варіації ДС були відносно впорядкованими (див. рис. 3.13). Квазіперіодичні варіації ДЗЧ спостерігалися в наступних інтервалах часу: 10:30–11:10, 11:20–11:50, 12:30–13:20 та 13:35–15:00. При цьому $T \approx 6$–10 хв, а $f_{da} \approx 0.05$–0.10 Гц.

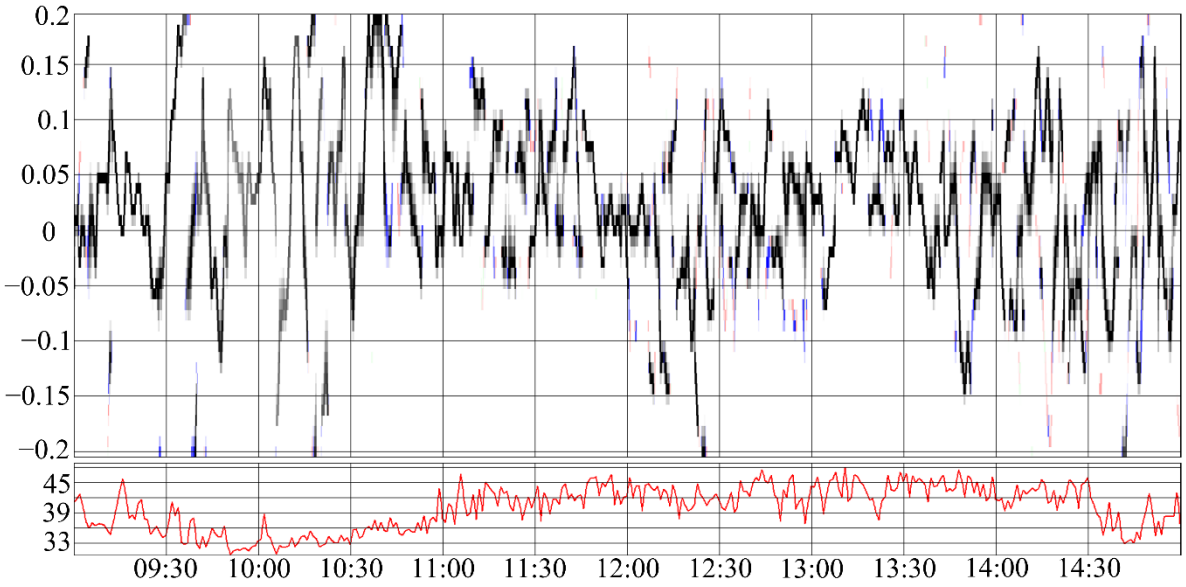


Рис. 3.12. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 4.2 МГц 9 червня 2021 р.

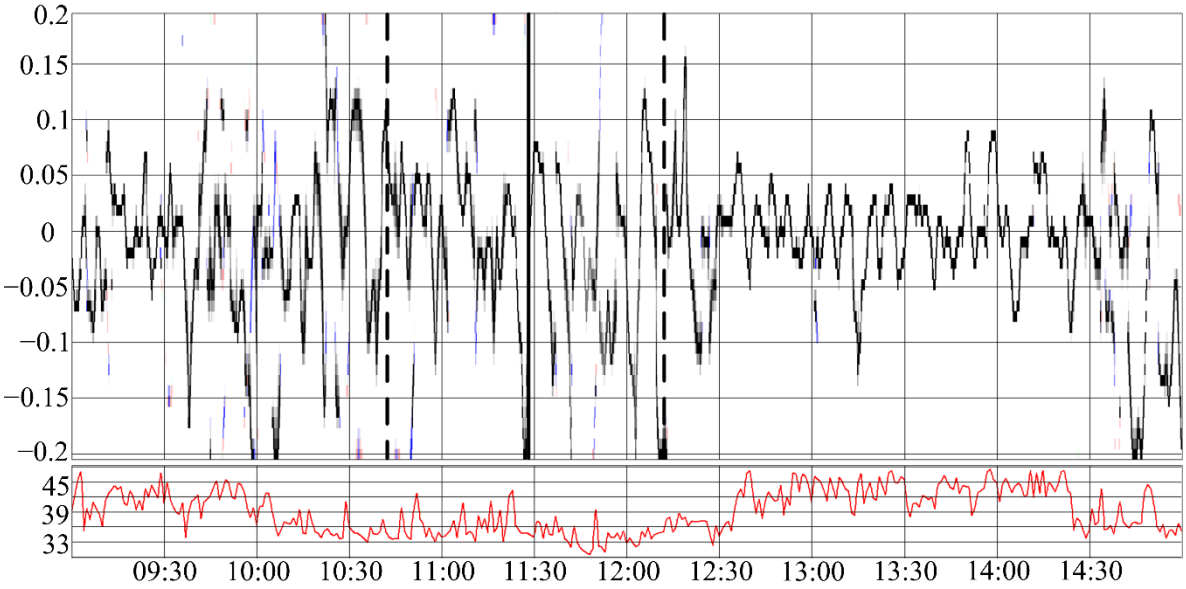


Рис. 3.13. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 4.2 МГц 10 червня 2021 р. Вертикальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

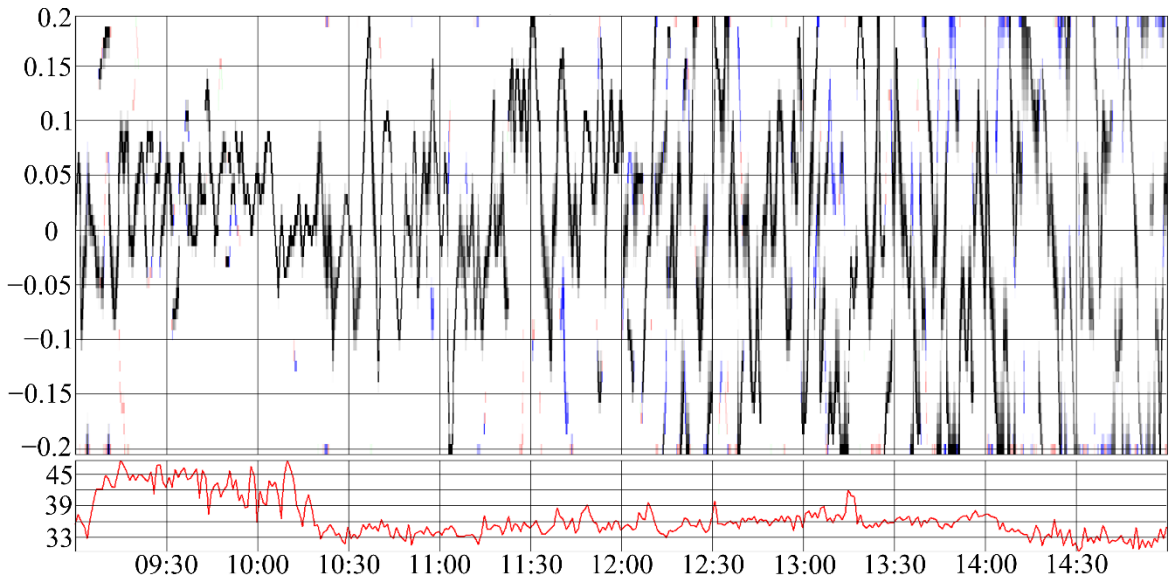


Рис. 3.14. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 4.2 МГц 11 червня 2021 р.

3.1.6. Квазіперіодичні збурення

Аналіз даних спостережень показав, що в день СЗ мала місце активізація хвильових збурень. Спостерігалося не менше трьох цугів коливань ДЗЧ. Перший з них відмічався протягом СЗ, а два інших починалися приблизно через 10 і 70 хв після закінчення затемнення. Подібні коливання у відповідні моменти часу були відсутні в контрольні дні. На цій підставі вважалося, що вони пов’язані з затемненням. Значення періоду 5–12 хв свідчать про те, що затемнення супроводжувалося генерацією АГХ [178].

Часові варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих трасах були подібними. Проте ДС, загалом кажучи, відрізнялися через різні методики спектрального оцінювання. Крім того, на похилих радіотрасах помітніше проявлялася багатомодовість.

Ступінь покриття диска Сонця була недостатньо значною (близько 4%), аби викликати хвильові збурення безпосередньо над місцем спостереження. Найімовірніше, квазіперіодичні цуги були згенеровані поблизу області, де

було максимальне покриття диска Сонця, тобто на відстані ~2000 км від радіотрас.

Знаючи $f_{da} \approx 0.03–0.06$ Гц при $f = 3.2$ МГц і $T \approx 7$ хв, можна оцінити амплітуду відносного збурення δ_N концентрації електронів N. Згідно з [22], при вертикальному зондуванні

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L}\frac{f_{da}}{f}, \tag{3.1}$$

де c – швидкість світла у вакуумі, L – діапазон висот, який дає основний внесок у ДЗЧ. Зі співвідношення (3.1) для $L \approx 30$ км випливає, що $\delta_N \approx 0.3–0.6\%$.

3.1.7. Аперіодичні збурення

СЗ призводить до поступового зменшення концентрації електронів. Близько момента часу t_m (час відраховується від початку затемнення) за максимальної фази затемнення досягається мінімальне значення $N_{\min}$. Потім настає поступове збільшення N. ДЗЧ відстежує залежність dN/dt. Виникає двополярна зміна ДЗЧ. Спочатку спостерігається негативний викид ДЗЧ з мінімальним значенням $f_{d\min}$ при $t \approx t_m/2$. При $t \approx t_m$ значення $f_d \approx 0$ Гц. Потім реєструється позитивний викид зі значенням $f_{d\max}$ при $t \approx 3t_m/2$. При $t \approx 2t_m$ маємо знов $f_d \approx 0$ Гц. На таку класичну поведінку накладаються природні варіації зенітного кута Сонця і $N(t)$.

Оцінимо аперіодичні варіації ДЗЧ протягом часткового СЗ над Харковом 10 червня 2021 р. Максимальна фаза затемнення становила 0.11, а відносна затінена площа диска $A \approx 4.4\%$. На висотах $z \approx 90–200$ км

$$\frac{N_{\min}}{N_0} \approx \sqrt{\frac{1-A+\xi}{1+\xi}}, \tag{3.2}$$

де N_0 – незбурене значення N, ξ описує внесок корони Сонця в процес іонізації атмосфери. За даними роботи [22] $\xi \approx 0.25$. При цьому з (3.2) отримуємо, що $N_{\min}/N_0 \approx 0.98$, а $\delta_N \approx 0.02$.

За даними $N_{\min}/N_0$ можна оцінити максимальне значення модуля $f_{d\max}$ [22]:

$$\left|f_{d\max}\right| \approx \frac{8}{3} f \delta_N \frac{L}{c\Delta t}, \tag{3.3}$$

де Δt – тривалість викиду ($\Delta t \approx t_m \approx 46$ хв). З (3.3) за $\delta_N \approx 0.02$, $f = 4.2$ МГц, $L \approx 30$ км маємо $|f_{d\max}| \approx 0.008$ Гц. Вимірювання значення 0.008 Гц є межею можливостей допплерівського радара. З цієї причини аперіодичний ефект СЗ не спостерігався.

3.2. Часткове сонячне затемнення 25 жовтня 2022 р.

3.2.1. Загальні відомості

Часткове СЗ 25 жовтня 2022 р. спостерігалося в Європі, на Близькому Сході, на Північному Сході Африки та в більшій частині Азії. Воно розпочалося над територією Ісландії о 08:59:20 у місцевості з географічними координатами 66°28′ пн. ш., 18°57′ зх. д., а закінчилося о 13:02:16 в районі Аравійського моря з координатами 17°35′ пн. ш., 66°31′ сх. д. Найбільшу фазу СЗ зареєстровано в Югрі (61°36′ пн. ш., 77°24′ сх. д.).

Схему руху місячної тіні під час СЗ показано на рис. 3.15. Основну інформацію про СЗ для характерних прольотів наведено в табл. 3.1.

3.2.2. Аналіз стану космічної погоди

З 21 до 27 жовтня 2022 р. число Вольфа змінювалося в межах 51–86.

Як можна бачити з рис. 3.16, 21 та 22 жовтня 2022 р. концентрація частинок n_{sw} сонячного вітру, флуктуюючи, збільшувалася від $5\cdot10^6$ до $22.4\cdot10^6$ м$^{-3}$. Після 17:00 22 жовтня 2022 р. n_{sw} різко зменшувалась. Деяке (до $11\cdot10^6$ м$^{-3}$) зростання n_{sw} спостерігалося у другій половині доби 23 жовтня

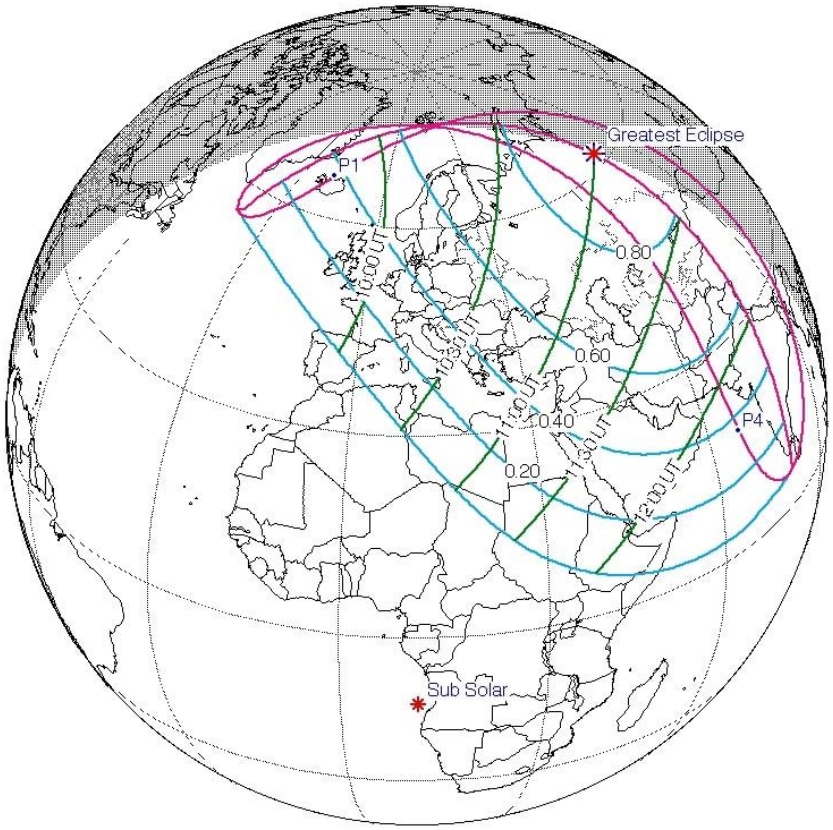


Рис. 3.15. Схема часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. Лінії вказують на області часткового затемнення [https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEplot/SEplot2001/SE2022Oct25P.GIF]

Таблиця 3.1.

Основна інформація про СЗ для характерних прольотів

Станція	**Супутник**	**Час початку, UT**	**Час максимальної фази, UT**	**Час закінчення, UT**	**Максимальна фаза**	**Тривалість, хв**
HOFN	G06	08:56	09:43	10:39	0.395	103
HOFN	G09	08:56	09:46	10:45	0.386	109
REYK	G06	08:56	09:40	10:32	0.349	96
KIR0	G04	09:01	10:14	11:30	0.745	149
KIR0	G09	08:56	10:10	11:23	0.698	147
KIR0	G11	08:56	10:04	11:13	0.683	137
SOD3	G11	08:57	10:08	11:18	0.715	141
BFN1	G03	09:25	10:57	Дані відсутні	0.748	Дані відсутні
POLV	G04	09:19	10:44	12:10	0.749	171
POL2	G04	10:22	11:38	12:47	0.845	145
TASH	G04	10:19	11:38	12:49	0.838	150
NVSK	G04	10:05	11:18	12:26	0.931	141
NVSK	G26	10:12	11:16	12:16	0.929	124

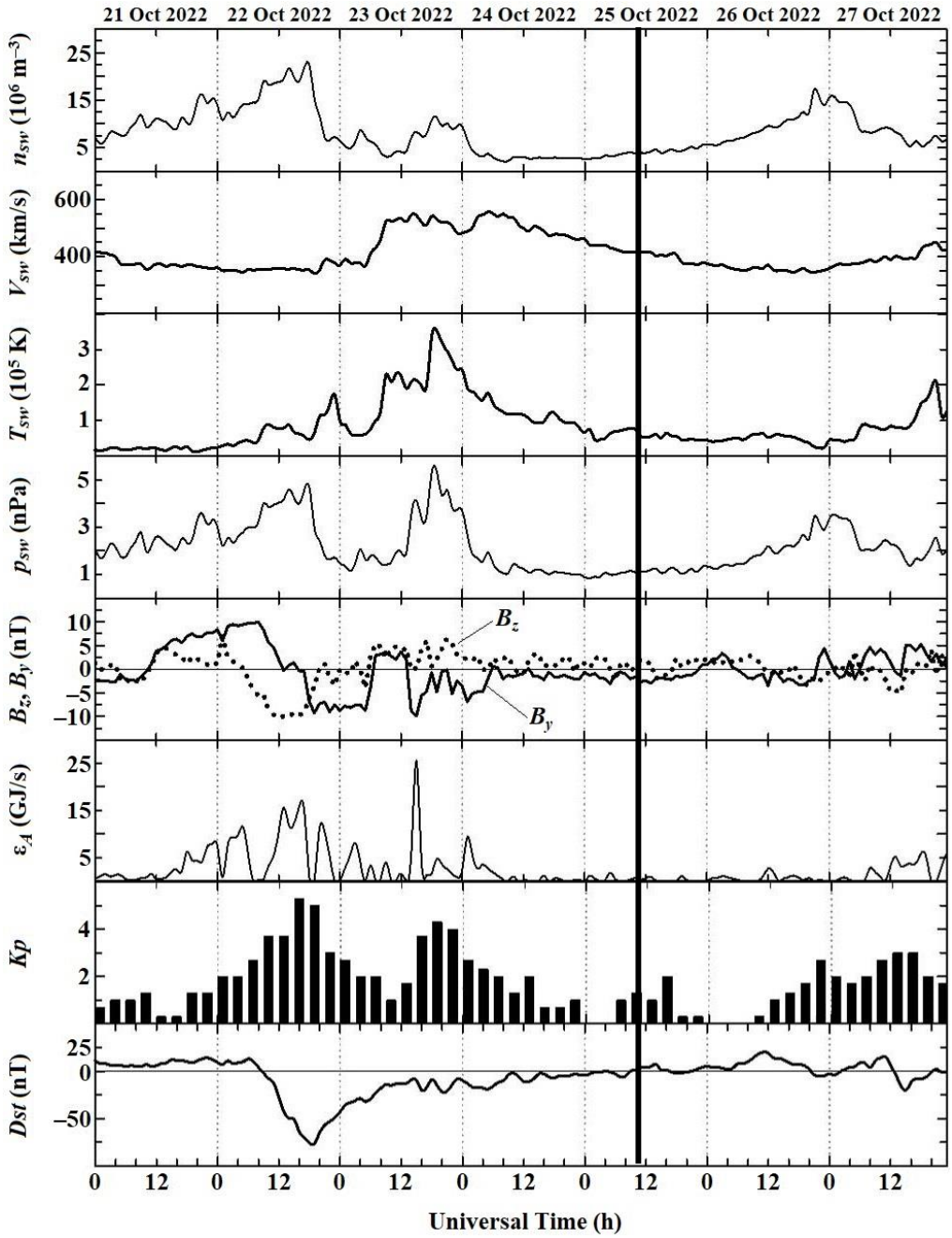


Рис. 3.16. Часові варіації параметрів космічної погоди з 21 по 27 жовтня 2022 р. Концентрація частинок сонячного вітру n_{sw}, швидкість сонячного вітру V_{sw}, температура електронів сонячного вітру T_{sw}, розрахунковий динамічний тиск сонячного вітру p_{sw}, компоненти B_z та B_y міжпланетного магнітного поля, розрахована функція Акасофу ε_A, індекси магнітної активності K_p і D_{st}. Вертикальна лінія вказує на момент настання максимальної фази СЗ.

2022 р. З 24 до 26 жовтня 2022 р. мало місце зростання n_{sw} від $4 \cdot 10^6$ до $16 \cdot 10^6$ м$^{-3}$, а потім знову його зменшення. У день СЗ $n_{sw} \approx (4–5) \cdot 10^6$ м$^{-3}$. Швидкість

V_{sw} частинок сонячного вітру 21 та 22 жовтня 2022 р. варіювала у межах 350–400 км/с. 23 та 24 жовтня 2022 р. вона зростала до 550–560 км/с. Потім V_{sw} спадала приблизно до 350 км/с. 25 жовтня 2022 р. $V_{sw} \approx$ 350–450 км/с. Температура T_{sw} частинок сонячного вітру різко зростала до $2 \cdot 10^5$ К приблизно о 23:00 22 жовтня 2022 р. та до $3.5 \cdot 10^5$ К 23 жовтня 2022 р. Після цього вона спадала до $(0.5–1) \cdot 10^5$ К 24–26 жовтня 2022 р. У день СЗ $T_{sw} \approx 0.5 \cdot 10^5$ К. Сплески тиску p_{sw} частинок сонячного вітру до 5 нПа спостерігалися 22 жовтня 2022 р. та до 5.3 нПа 23 жовтня 2022 р. У день затемнення $p_{sw} \approx 1$ нПа. Компонент B_y міжпланетного магнітного поля зростав до 5–10 нТл 21 та 22 жовтня 2022 р. У другій половині доби 22 жовтня 2022 р. та епізодично 23 жовтня 2022 р. його рівень спадав до –9.9 нТл. Значення рівня B_z-компоненту міжпланетного магнітного поля зменшувалися до –10.2 нТл 22 жовтня 2022 р. Додатні значення B_z не перевищували 6.9 нТл. 25 жовтня 2022 р. значення B_z-компоненту флуктуювали у межах ±(1–2) нТл. Сплески функції Акасофу ε_A сягали 16 та 25 ГДж/с 22 та 23 жовтня 2022 р. У день СЗ $\varepsilon_A \approx$ 1–2 ГДж/с. Від'ємні значення B_z-компоненту та сплески ε_A 22 та 23 жовтня 2022 р. свідчили про настання магнітної бурі. Максимальні значення K_p-індексу мали місце 22 жовтня 2022 р. ($K_{p\max} \approx 5.3$) та 23 жовтня 2022 р. ($K_{p\max} \approx 4.3$) Спостерігалося дві бурі, перша з них – помірна, а друга – слабка. У день СЗ значення індексу K_p не перевищували 2. Падіння D_{st}-індексу від 10 до –76 нТл також свідчило про настання магнітної бурі. Її головна фаза продовжувалася з 06:00 до 18:30 22 жовтня 2022 р. Фаза відновлення тривала до кінця доби 24 жовтня 2022 р. 25 жовтня 2022 р. значення D_{st}-індекса флуктуювали у межах ± 5 нТл.

Таким чином, у день СЗ стан космічної погоди був сприятливим для спостереження ефектів затемнення. У якості контрольних днів обрано 24 та 26 жовтня 2022 р., причому день 26 жовтня 2022 р. був більш спокійним. Корисними були й результати спостережень 27 жовтня 2022 р.

3.2.3. Засоби та методи

Для вивчення впливу СЗ на іоносферу було використано дані вимірювань сигналів навігаційних супутників, отримані на 16 станціях (рис. 3.17). Аналізувалися дані часових варіацій вертикального ПЕВ. Дані спостережень сигналів і параметри орбіт супутників запозичені з ресурсу [https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS].

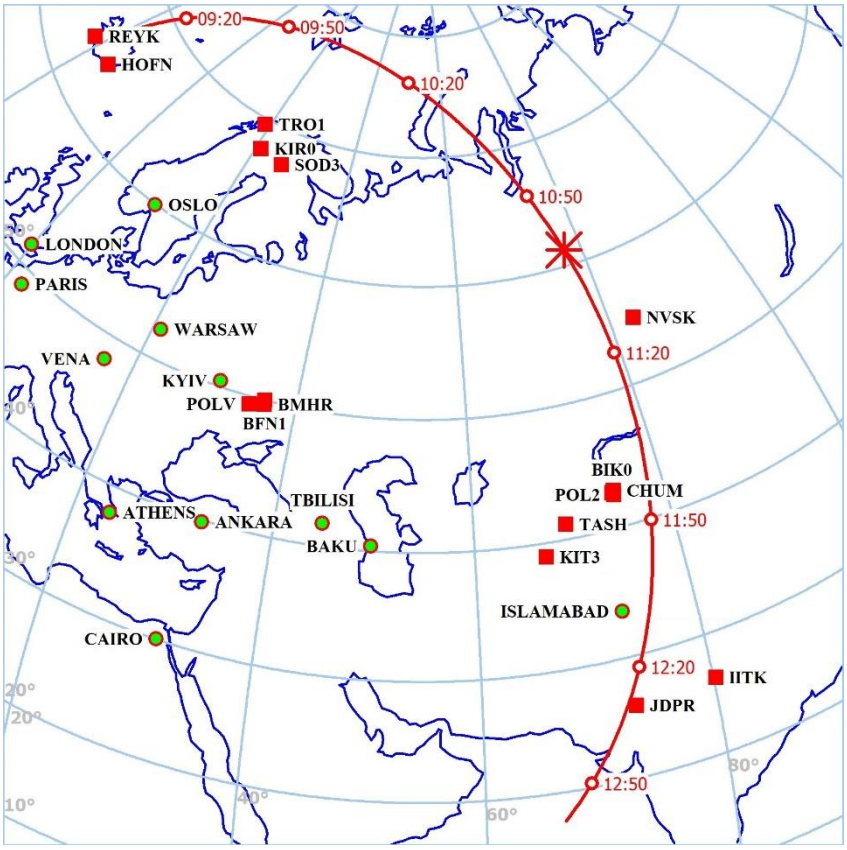


Рис. 3.17. Карта шляху місячної тіні (червона крива) і станцій спостереження (червоні квадрати). Зелені кружечки позначають розташування великих міст. Зірочкою позначена максимальна фаза СЗ

Траєкторію точок вимірювання у F_2-шарі для стислості назвемо прольотом. Для відображення точок вимірювання ПЕВ у F_2-шарі іоносфери скористаємося контурними картами. Для кожного супутника в інтервалі часу 02:30–06:00 нанесені траєкторії підіоносферних точок (прольоти). На

рисунках кожен проліт починається з імені супутника та часу початку радіовидимості або початку розрахункового періоду. Вздовж прольоту нанесено шкалу часу з кроком 10 хв та 1 год (короткі та довгі риски) з позначкою вибраного моменту вимірювання у вигляді кола. Відображено лише ті супутники поточного угруповання, для яких підіоносферні точки перебувають поблизу траєкторії місячної тіні та були обрані для розрахунків. На карті зображено також фрагмент сліду місячної тіні у вигляді відрізка лінії з відмітками часу.

Слід місячної тіні, фаза затемнення M, частка площі A диску Сонця, покритої диском Місяця, відносна освітленість E та відносна освітленість з урахуванням СЗ

$$E_m = E\left(1 - \frac{A}{100\%}\right) = E\left(1 - a\right) \tag{3.4}$$

отримані за допомогою методики Ф. Бесселя [183]. При цьому вважалося, що $E = \cos\chi$, де χ – зенітний кут падіння сонячного випромінювання. На густину електронів впливає різниця, що дорівнює $\Delta E_m = E - E_m$. Відносна освітленість нормувалася на освітленість у підсонячній точці, яка знаходилася найближче від Сонця.

Аналізу підлягали ПЕВ N_V, очікуване значення ПЕВ N_{V0}, яке було б за відсутності СЗ, дефіцит ПЕВ $\Delta N_V = N_V - N_{V0}$, відносне значення дефіциту ПЕВ $\delta_V = \Delta N_V / N_{V0}$, різниця освітленості ΔE_m, час запізнювання Δt реакції ПЕВ по відношенню до фази СЗ з $M_{\max}$ або мінімуму E (для вечірнього часу), тривалість реакції ΔT.

Параметри M, A та E обчислювалися для висоти 350 км для кожної точки вимірювань вздовж траєкторії польоту супутника, а тому вони залежали від координат. Висота 350 км є середньою за добу висотою шару F_2, що дає найбільший внесок у ПЕВ. Відомо, що під час руху супутника, що міг тривати декілька годин, охоплювалась територія розміром 1–2 тис. км.

Додамо, що обертання Землі навколо своєї осі суттєво впливало на часові залежності параметрів *M*, *A* та *E*.

3.2.4. Результати супутникових спостережень

Проаналізуємо типові результати для характерних часових інтервалів та глобальних масштабів. Основна інформація про станції, що використовуються, наведена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

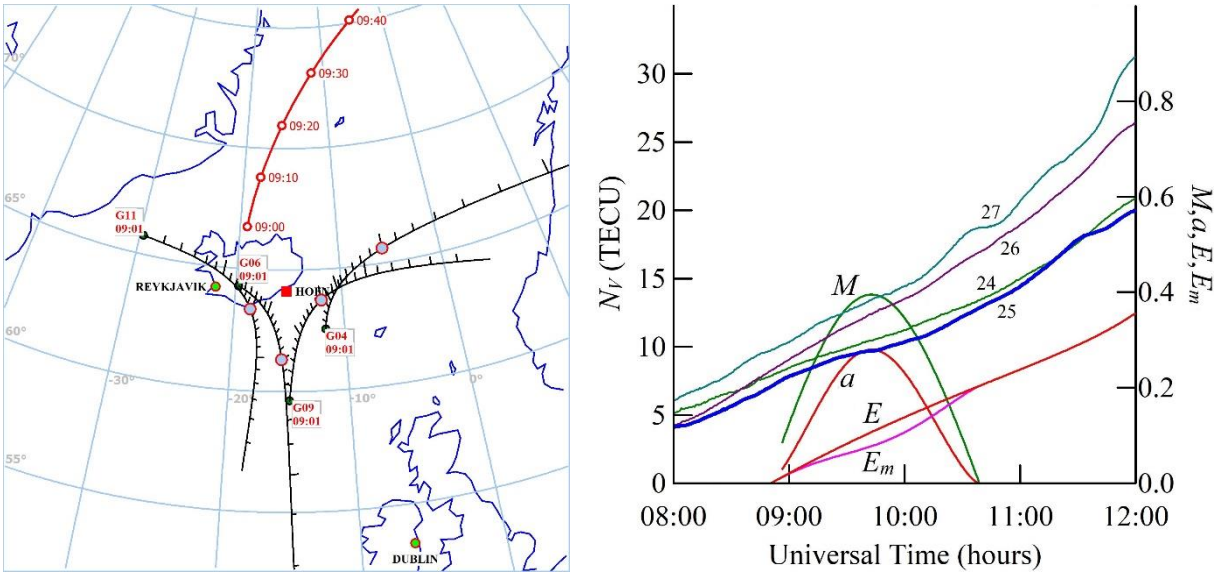
Перелік використаних станцій

Станція	**Широта**	**Довгота**	**Місцезнаходження**
BFN1	50°00′N	36°10′E	Kharkiv, Ukraine
HOFN	64°16′N	15°11′W	Höfn, Iceland
KIR0	67°53′N	21°10′E	Kiruna, Sweden
NVSK	54°50′N	83°14′E	Novosibirsk, Russia
POL2	42°41′N	74°41′E	Poligan/Bishkek, Kyrgyzstan
POLV	49°36′N	34°32′E	Poltava, Ukraine
REYK	64°08′N	21°58′W	Reykjavik, Iceland
SOD3	67°25′N	26°23′E	Sodankylä, Finland
TASH	41°18′N	69°17′E	Tashkent, Uzbekistan
CHUM	42°59′N	74°45′E	Chumysh, Kazakhstan
BIK0	42°53′N	74°35′E	Bishkek, Kyrgyzstan
KIT3	39°08′N	66°53′E	Kitab, Uzbekistan
TRO1	69°40′N	18°56′E	Tromsø, Norway
IITK	26°22′N	80°14′E	Kanpur, India
BMHR	49°38′N	36°19′E	Gaidary, Ukraine
JDPR	26°03′N	73°01′E	Jodhpur, India

Період сходу Сонця. Траєкторія підіоносферної точки для супутника G06, сигнали з якого приймали на станції HOFN, а також часові залежності ПЕВ $N_V(t)$ для дня з СЗ та контрольних днів показано на рис. 3.18. У всі дні ПЕВ

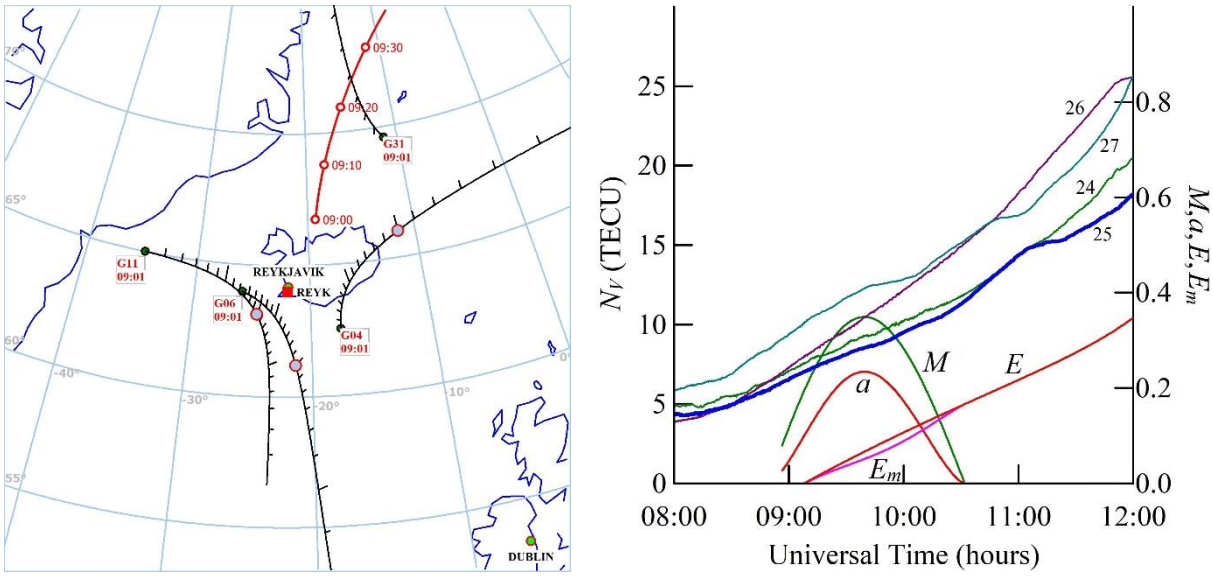
поступово збільшувалося від 4–6 TECU до 20–31.5 TECU. Починаючи приблизно з 09:00 у день СЗ, швидкість збільшення ПЕВ дещо сповільнилася. Якщо 25 жовтня 2022 р. приблизно о 10:10 $N_V \approx 10.8$ TECU, а $N_{V0} \approx 12.5$ TECU, то $\Delta N_V = N_V - N_{V0} \approx -1.7$ TECU, $\delta_V \approx -0.14$. Час запізнювання ПЕВ відносно максимальної фази СЗ $\Delta t \approx 28$ хв, а тривалість падіння ПЭВ від $\Delta T > 180$ хв.

Для того ж супутника G06, сигнал якого реєструвався на станції REYK, варіації ПЕВ наведено на рис. 3.19. Видно, що після сходу сонця значення ПЕВ зростали від 4–6 TECU до 18–26 TECU. Протягом СЗ швидкість збільшення ПЕВ сповільнилася. Якщо $N_V \approx 9.1$ TECU, тоді за відсутності СЗ $N_{V0} \approx 10.6$ TECU. Тоді $\Delta N_V \approx -1.5$ TECU, $\delta_V \approx -0.14$, $\Delta t \approx 14$ хв, а $\Delta T \approx 140$ хв.



(*а*) (*б*)

Рис. 3.18. Карта прольотів використовуваних супутників відносно станції HOFN (*а*). Номер супутника і час початку прольоту вказано в прямокутниках. Сірі кола позначають точки вимірювання. Позначки на лініях траєкторій показують час з кроком 10 хв. Часові варіації ПЕВ вздовж прольоту супутника G06 (*б*). Цифри біля кривих ПЕВ позначають дні жовтня 2022 р. M, a, E та E_m – фаза затемнення, площа затінення, відносна освітленість і відносна освітленість з урахуванням затемнення відповідно



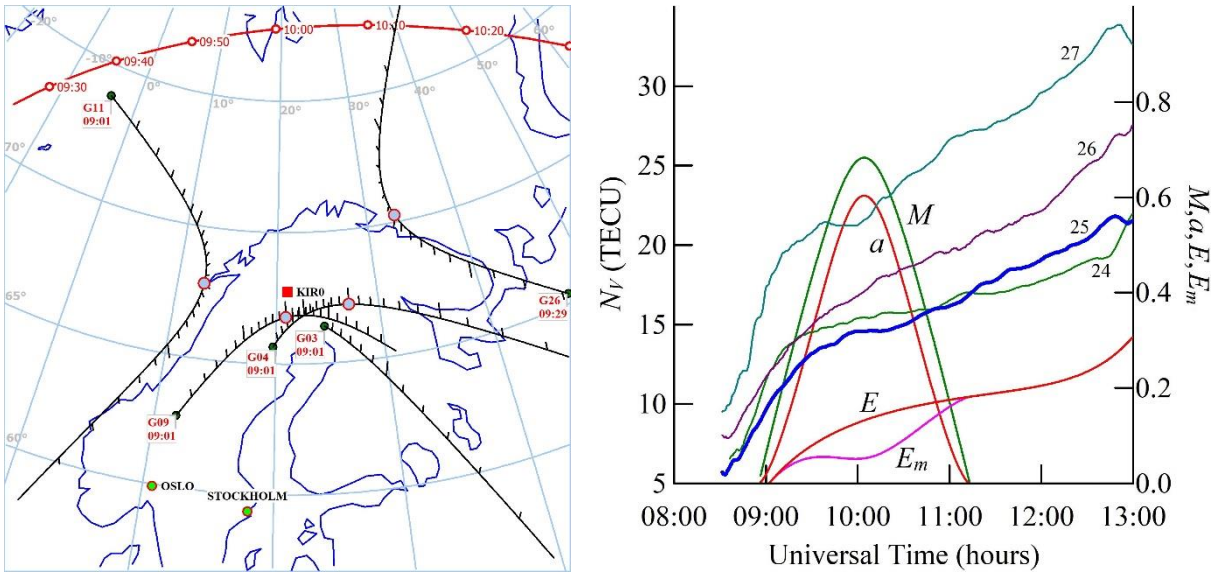
(*а*) (*б*)

Рис. 3.19. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції REYK, супутник G06

Ранковий час. Часові залежності ПЕВ, отримані на станції KIR0 за допомогою сигналів супутника G11, наведено на рис. 3.20. Значення ПЕВ після 08:30 зростали від 6–10 TECU до 22–34 TECU. 25 жовтня 2022 р. в інтервалі часу 09:10–11:30 зростання ПЕВ сповільнилося. За відсутності СЗ $N_{V0} \approx 17$ TECU, а 25 жовтня 2022 близько 10:20 $N_V \approx 14.5$ TECU. Тоді $\Delta N_V \approx -2.5$ TECU, $\delta_V \approx -0.15$, $\Delta t \approx 15$ хв, $\Delta T > 180$ хв.

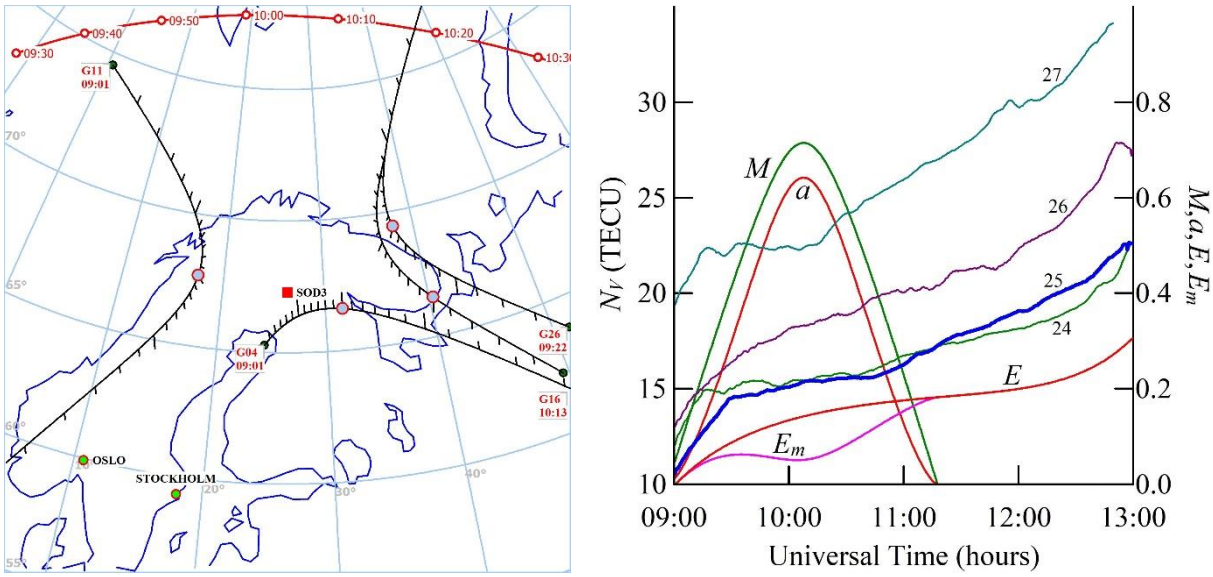
Часові варіації $N_V(t)$ для того ж супутника G11 отримані на станції SOD3 наведені на рис. 3.21. Швидкість збільшення ПЕВ у всі дні до 09:30 була приблизно однаковою, а з 09:30 до 10:45 25 жовтня 2022 р. вона суттєво сповільнилася. Якщо $N_{V0} \approx 18.2$ TECU, $N_V \approx 15.6$ TECU, тоді $\Delta N_V \approx -2.6$ TECU, $\delta_V \approx -0.14$, $\Delta t \approx 36$ хв, $\Delta T \approx 180$ хв.

Дополудневий час. Часові залежності ПЕВ на станції HOFN, зареєстровані за допомогою сигналів супутника G09, показано на рис. 3.22. У день СЗ швидкість зростання ПЕВ в інтервалі часу 09:30–11:35 сповільнилася. Якщо о 10:10 $N_{V0} \approx 13.3$ TECU, а 25 жовтня 2022 р. $N_V \approx 11.3$ TECU, тоді $\Delta N_V \approx -2$ TECU, $\delta_V \approx -0.15$, $\Delta t \approx 23$ хв, $\Delta T \approx 125$ хв.



(*а*) (*б*)

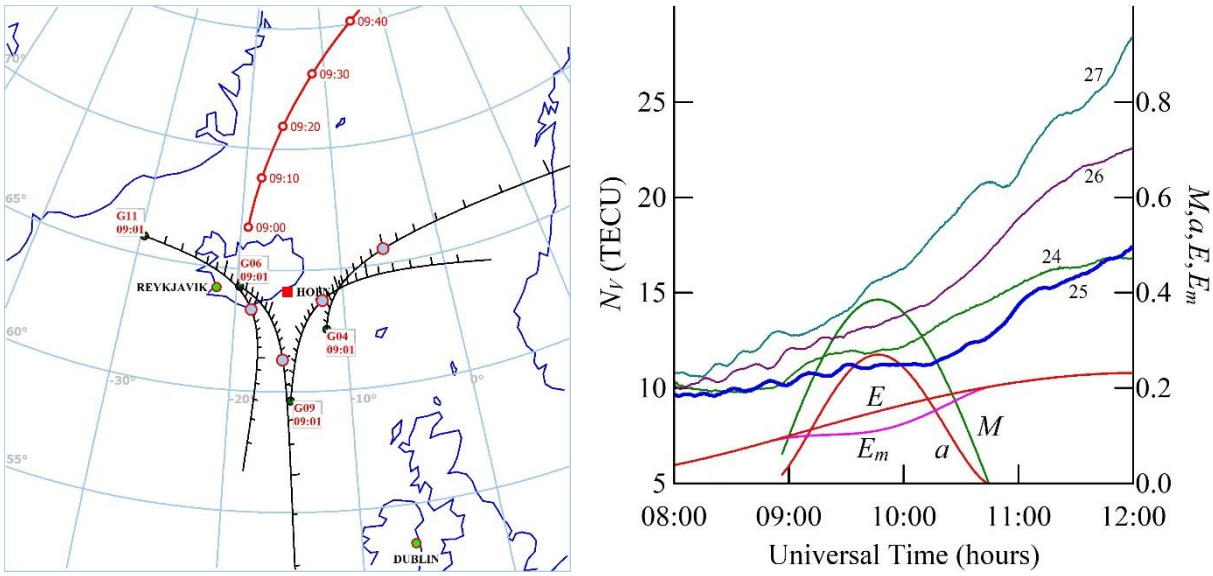
Рис. 3.20. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції KIR0, супутник G11



(*а*) (*б*)

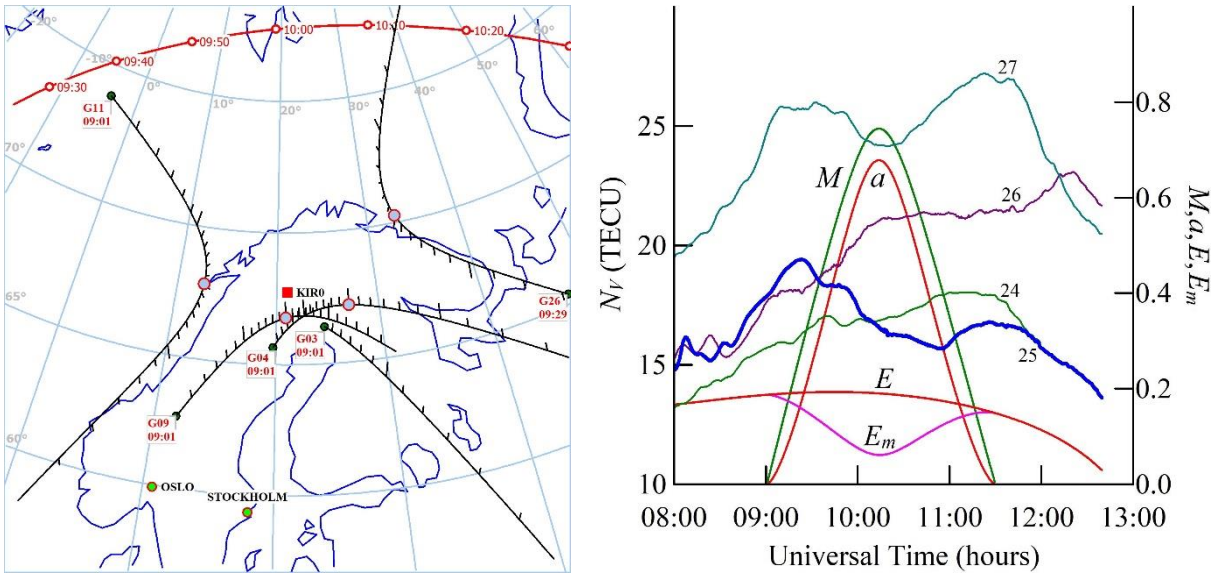
Рис. 3.21. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції SOD3, супутник G11.

Полудневий час. Часові варіації ПЕВ у день СЗ та контрольні дні, отримані на станції KIR0, супутник G04, наведено на рис. 3.23. Можна бачити, що приблизно о 10:55 26 жовтня 2022 р. $N_{V0} \approx 21.3$ TECU, тоді як в цей же час 25 жовтня $N_V \approx 15.7$ TECU. При цьому $\Delta N_V \approx -5.6$ TECU, $\delta_V \approx -0.26$, $\Delta t \approx 41$ хв, $\Delta T > 150$ хв.



(*а*) (*б*)

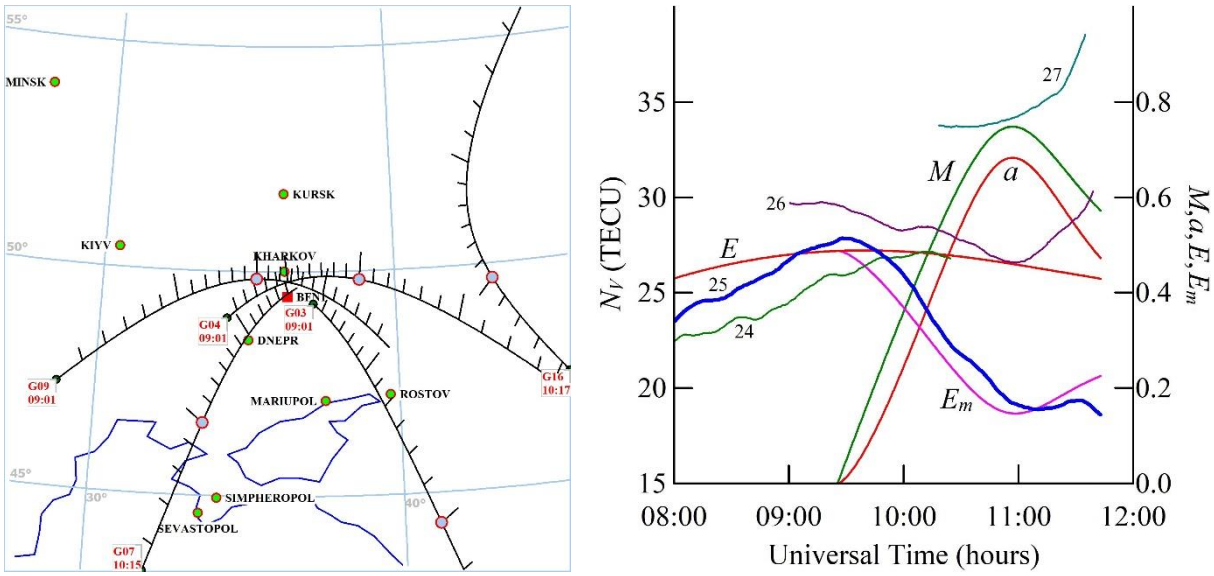
Рис. 3.22. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції HOFN, супутник G09



(*а*) (*б*)

Рис. 3.23. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції KIR0, супутник G04

Часові залежності ПЕВ, зареєстровані на станції BFN1, супутник G03, показано на рис. 3.24. Якщо об 11:00 прийняти, що $N_{V0} \approx 22$ TECU, а 25 жовтня 2022 р. $N_V \approx 19.5$ TECU, тоді $\Delta N_V \approx -2.5$ TECU, $\delta_V \approx -0.11$, $\Delta t \approx 1$ хв, $\Delta T \geq 115$ хв.



(*а*) (*б*)

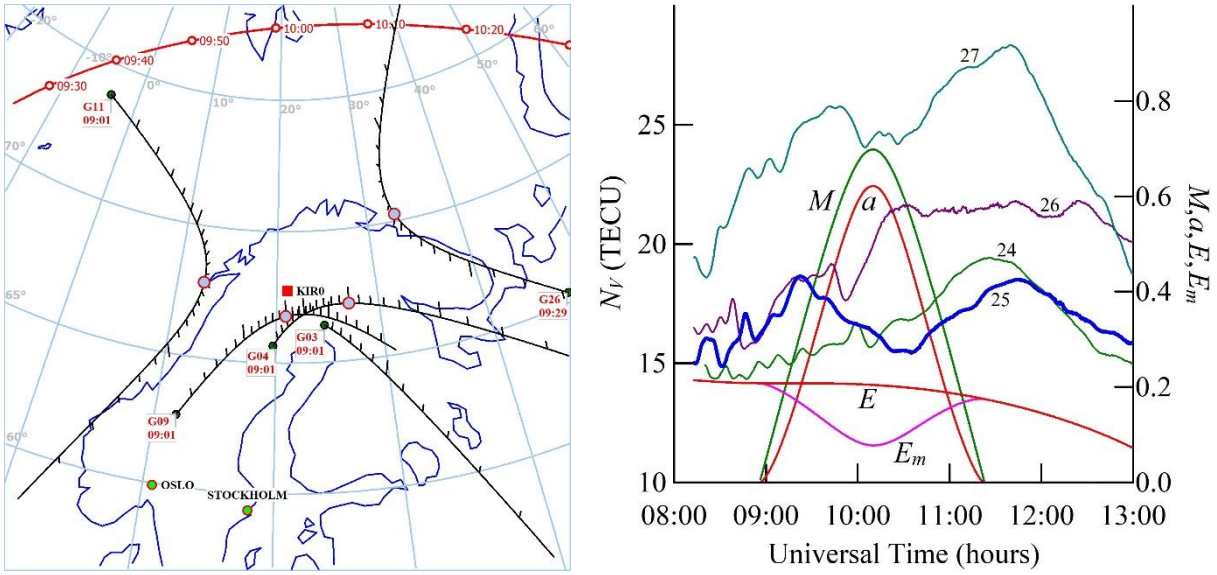
Рис. 3.24. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції BFN1, супутник G03

Післяполудневий час. Максимальна фаза СЗ спостерігалася приблизно о 10:10. Приблизно о 10:25 25 жовтня 2022 р. у залежності ПЕВ, отриманій на станції KIR0, супутник G09, $N_V \approx 15.5$ TECU (рис. 3.25). За відсутності СЗ $N_{V0} \approx 20.3$ TECU. У цьому випадку маємо $\Delta N_V \approx -4.8$ TECU, $\delta_V \approx -0.24$, $\Delta t \approx 15$ хв, $\Delta T \approx 145$ хв.

Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції POLV, супутник G04, показано на рис. 3.26. Видно, що приблизно через $\Delta t \approx 26$ хв після досягнення максимальної фази затемнення $N_V \approx 16.6$ TECU, а за відсутності СЗ $N_{V0} \approx 23.2$ TECU. Тоді $\Delta N_V \approx -6.6$ TECU, $\delta_V \approx -0.28$, $\Delta t \approx 26$ хв, $\Delta T \approx 180$ хв.

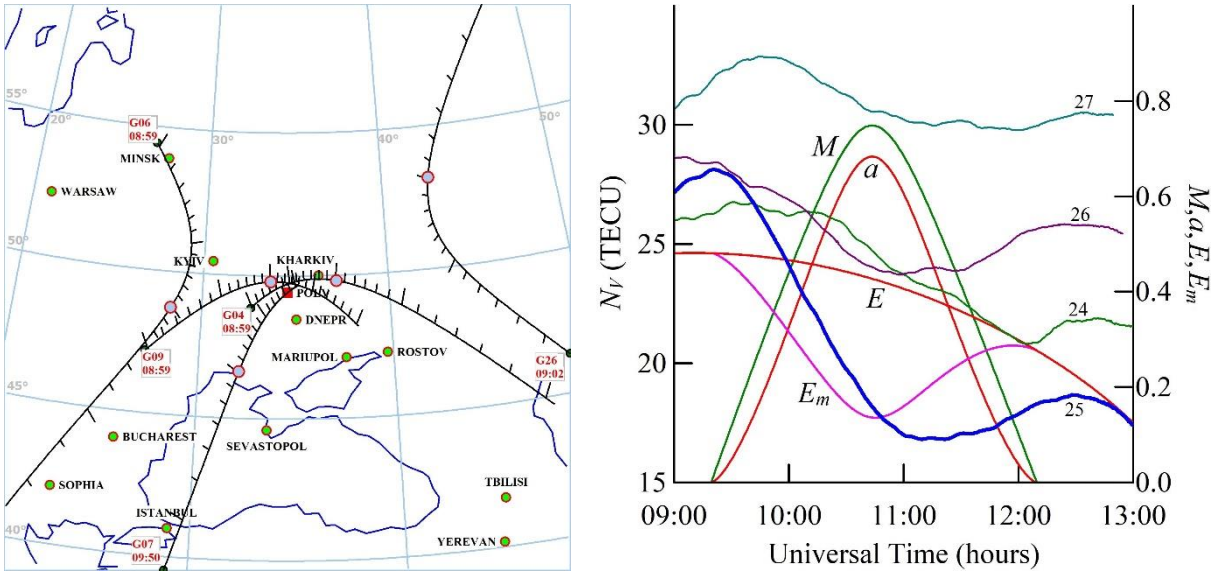
Передзахідний час. Часові залежності ПЕВ, отримані на станції POL2, супутник G04, показано на рис. 3.27. Максимальна фаза СЗ спостерігалася близько 11:40. 25 жовтня 2022 р. близько 12:00 $N_V \approx 15.6$ TECU, тоді як $N_{V0} \approx 18.7$ TECU. Тоді $\Delta N_V \approx -3.1$ TECU, $\delta_V \approx -0.17$, $\Delta t \approx 23$ хв, $\Delta T > 150$ хв.

Часові варіації ПЕВ у контрольні дні та в день СЗ, що спостерігалися на станції TASH, супутник G04, наведено на рис. 3.28. Близько 11:50 $N_{V0} \approx 19.3$ TECU за відсутності СЗ та $N_V \approx 16.9$ TECU 25 жовтня 2022 р. При цьому маємо $\Delta N_V \approx -2.4$ TECU, $\delta_V \approx -0.12$, $\Delta t \approx 22$ хв, $\Delta T > 160$ хв.



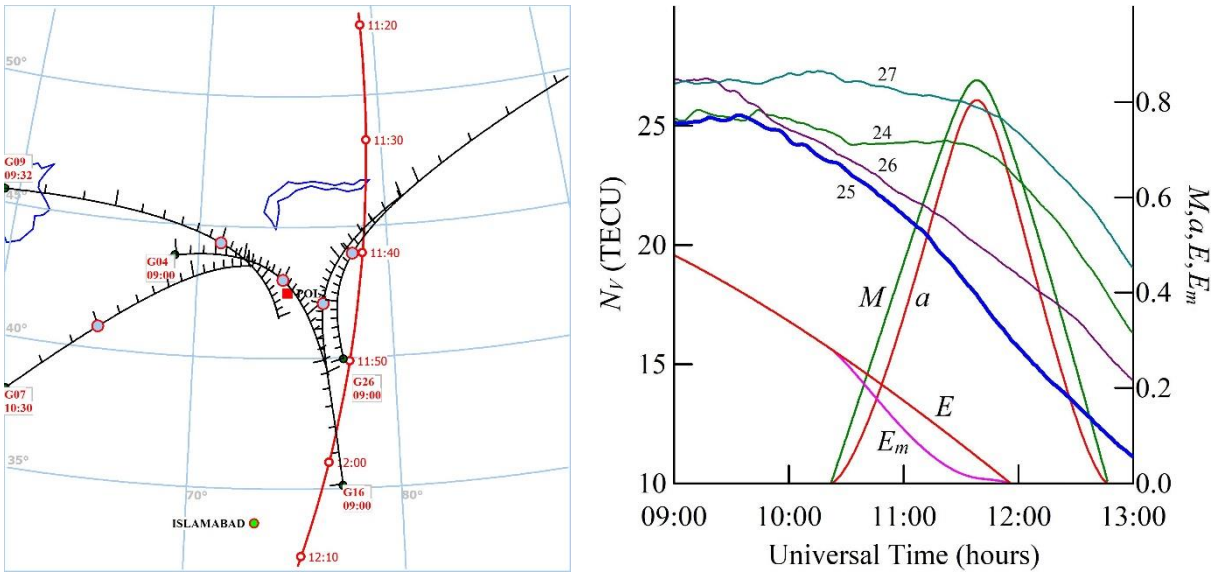
(*а*) (*б*)

Рис. 3.25. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції KIR0, супутник G09



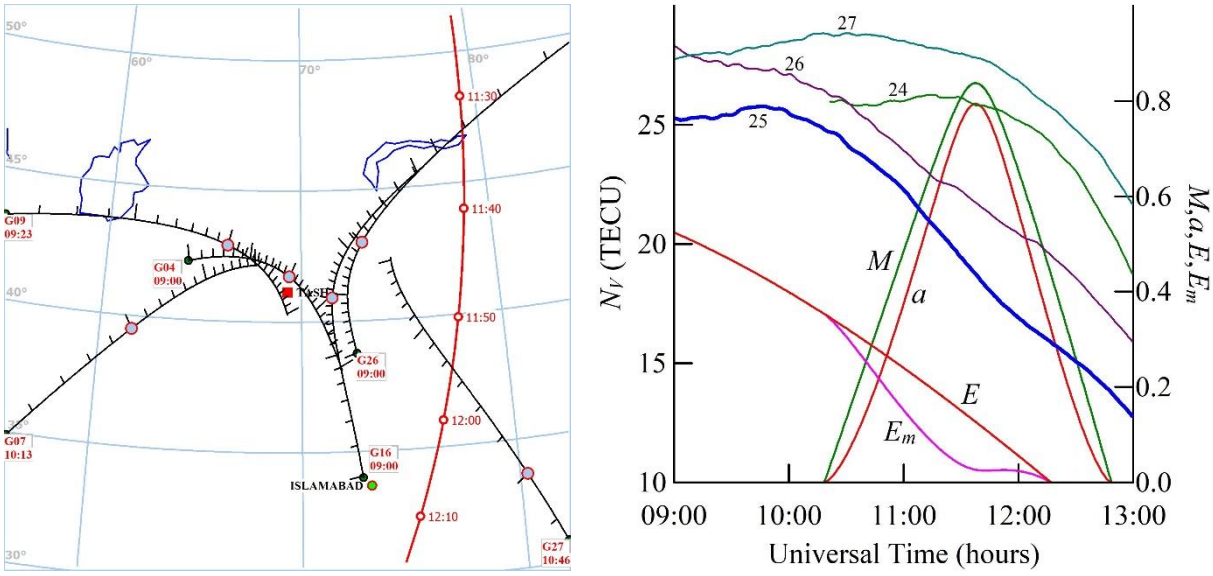
(*а*) (*б*)

Рис. 3.26. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції POLV, супутник G04



(*а*) (*б*)

Рис. 3.27. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції POL2, супутник G04

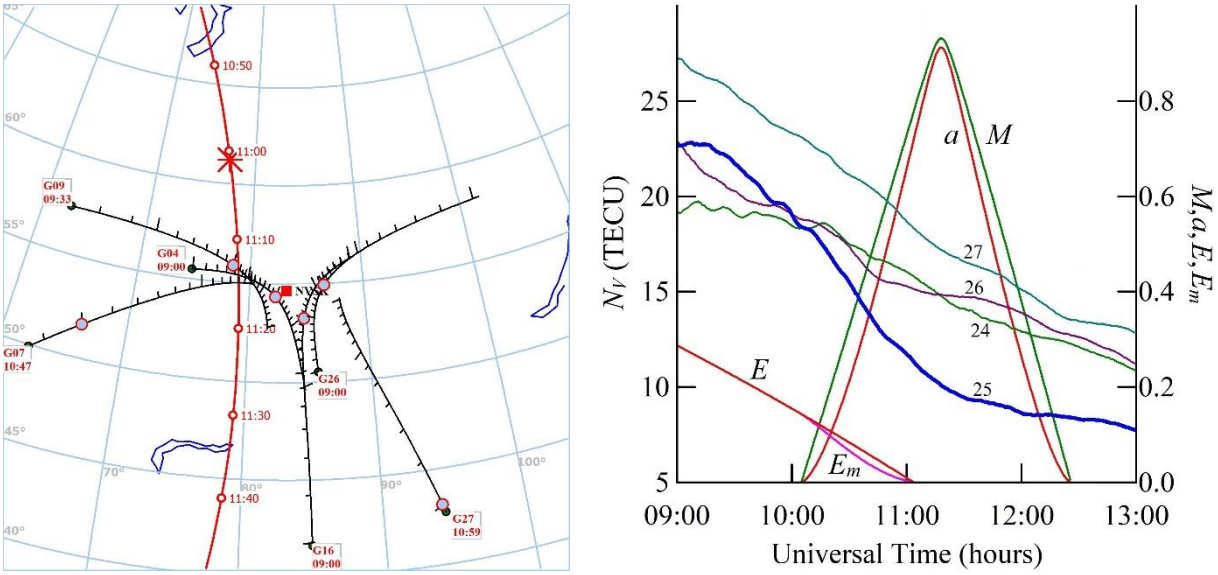


(*а*) (*б*)

Рис. 3.28. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції TASH, супутник G04

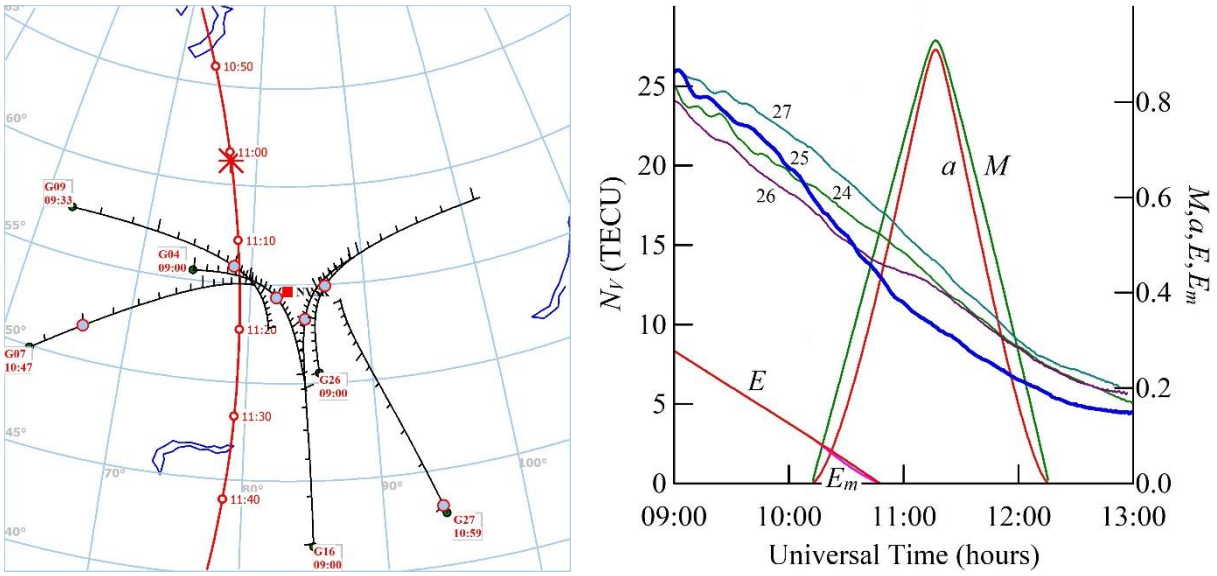
Період заходу Сонця. Часові залежності ПЕВ у день затемнення та у контрольні дні, отримані на станції NVSK, супутник G04, наведено на рис. 3.29. У день СЗ, $N_V \approx 9.3$ TECU, тоді як $N_{V0} \approx 13.7$ TECU. Тоді $\Delta N_V \approx -4.4$ TECU, $\delta_V \approx -0.32$. Час запізнювання Δt становив приблизно 32 хв. Тривалість реакції щонайменше 120 хв.

Часові варіації ПЕВ зареєстровані на станції NVSK, супутник G26, представлено на рис. 3.30. Об 11:10 у контрольний день 26 жовтня 2022 р. N_{V0} ≈ 12.8 TECU, в день затемнення N_V ≈ 10 TECU. При таких значеннях $\Delta N_V \approx -2.8$ TECU, $\delta_V \approx -0.22$, $\Delta t \approx 26$ хв, $\Delta T \approx 160$ хв.



(*а*) (*б*)

Рис. 3.29. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції NVSK, супутник G04



(*а*) (*б*)

Рис. 3.30. Те саме, що на рис. 3.18, але для станції NVSK, супутник G26

3.2.5. Результати статистичного аналізу

Результати аналізу, виконаного для 16 станцій, представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Основні відомості про параметри СЗ та збурення ПЕВ

Станція	**Супутник**	$\|\Delta N_V\|$, **TECU**	N_{V0}, **TECU**	δ_V	$M_{\max}$	$A_{\max}$, **%**	E	E_m	Δt, **хв**	ΔT, **хв**	**Час доби**
BFN1	G03	2.5	22.0	0.114	0.748	68.3	0.460	0.147	1	115	Після опівдня
BFN1	G04	7.8	24.2	0.322	0.765	70.4	0.373	0.192	30	196	Після опівдня
BFN1	G07	7.7	26.1	0.295	0.678	59.7	0.470	0.213	11	180	Вечір
BFN1	G09	6.0	24.0	0.25	0.729	65.9	0.418	0.178	17	183	Після опівдня
BFN1	G16	4.8	21.3	0.225	0.809	75.8	0.335	0.178	28	158	Вечір
BIK0	G03	6.5	25.0	0.26	0.726	65.5	0.100	0.036	4	138	Вечір
BIK0	G04	2.3	18.0	0.128	0.848	80.7	0	0	23	160	Вечір
BIK0	G07	3.0	18.0	0.167	0.855	81.7	0.047	0.025	27	163	Вечір
BIK0	G09	2.4	17.8	0.135	0.867	83.1	0.018	0.009	23	157	Вечір
BIK0	G16	4.0	15.1	0.265	0.855	81.6	0	0	33	150	Вечір
BIK0	G27	3.1	15.3	0.203	0.802	74.9	0	0	41	118	Вечір
BMHR	G04	6.0	22.5	0.267	0.765	70.4	0.370	0.200	32	192	Після опівдня
BMHR	G07	7.3	26.0	0.281	0.678	59.7	0.465	0.217	13	159	Після опівдня
BMHR	G09	6.2	24.2	0.256	0.729	65.9	0.420	0.170	14	200	Після опівдня
CHUM	G04	3.3	17.6	0.188	0.849	80.8	0	0	43	197	Вечір
CHUM	G07	4.0	19.0	0.211	0.857	81.8	0.060	0.029	22	144	Вечір
CHUM	G08	2.9	19.4	0.150	0.746	68.0	0	0	10	90	Вечір
CHUM	G09	2.6	18.0	0.144	0.868	83.3	0.023	0.010	23	158	Вечір
CHUM	G16	3.6	15.4	0.234	0.856	81.7	0	0	27	147	Вечір
CHUM	G26	3.2	13.1	0.244	0.872	83.8	0	0	26	150	Вечір
CHUM	G27	2.2	14.0	0.157	0.803	75.1	0	0	45	109	Вечір
HOFN	G04	2.2	13.8	0.159	0.451	33.7	0.166	0.123	22	166	До опівдня
HOFN	G06	1.7	12.5	0.136	0.395	28.0	0.153	0.128	28	180	Ранок
HOFN	G09	2.0	13.3	0.150	0.386	27.0	0.178	0.148	23	125	До опівдня
HOFN	G11	1.5	10.4	0.144	0.389	27.4	0.090	0.069	16	135	Ранок
IITK	G04	3.3	51.0	0.065	0.564	46.3	0	0	20	121	Вечір
IITK	G07	10.0	36.5	0.274	0.635	54.6	0	0	12	115	Вечір
IITK	G08	9.4	55.7	0.169	0.501	39.2	0	0	35	92	Вечір
IITK	G09	1.8	40.4	0.045	0.609	51.5	0	0	20	150	Вечір
IITK	G16	8.0	25.0	0.320	0.610	51.7	0	0	29	106	Вечір
IITK	G26	3.0	19.5	0.154	0.654	56.8	0	0	30	85	Вечір
IITK	G27	19.0	42.0	0.452	0.542	43.8	0	0	48	92	Вечір
JDPR	G03	4.0	77.0	0.052	0.453	34.1	0.060	0.040	13	120	Вечір
JDPR	G07	12.5	38.5	0.325	0.638	54.9	0.079	0.042	15	120	Вечір

Таблиця 3.3. (продовження)

JDPR	G09	3.6	43.1	0.084	0.628	53.7	0.007	0.004	23	134	Вечір
JDPR	G16	7.5	29.0	0.259	0.641	55.3	0	0	7	110	Вечір
JDPR	G27	10.0	48.0	0.208	0.571	47.1	0	0	16	102	Вечір
KIR0	G03	8.8	24.3	0.362	0.791	73.6	0.286	0.091	19	104	До опівдня
KIR0	G04	5.6	21.3	0.263	0.745	67.9	0.174	0.120	41	150	Після опівдня
KIR0	G09	4.8	20.3	0.237	0.698	62.2	0.200	0.088	15	146	Після опівдня
KIR0	G11	2.5	17.0	0.147	0.683	60.4	0.146	0.068	16	185	Ранок
KIR0	G26	3.1	18.0	0.172	0.825	77.9	0.128	0.055	20	180	Вечір
KIT3	G03	8.0	31.5	0.254	0.700	62.4	0.200	0.076	0	111	Вечір
KIT3	G04	2.5	21.5	0.116	0.814	76.4	0.115	0.040	15	145	Вечір
KIT3	G07	2.1	21.5	0.098	0.809	75.9	0.190	0.067	15	159	Вечір
KIT3	G09	1.5	18.0	0.083	0.829	78.3	0.010	0.010	58	146	Вечір
KIT3	G26	4.3	14.5	0.297	0.858	82.0	0	0	33	98	Вечір
NVSK	G04	4.4	13.7	0.321	0.931	91.3	0	0	32	120	Вечір
NVSK	G07	4.3	14.2	0.303	0.934	91.5	0	0	33	180	Вечір
NVSK	G09	2.8	12.5	0.224	0.944	92.8	0	0	30	180	Вечір
NVSK	G16	2.3	12.8	0.180	0.926	90.6	0	0	28	180	Вечір
NVSK	G26	2.8	12.8	0.219	0.929	91.0	0	0	26	160	Вечір
NVSK	G27	2.4	13.2	0.182	0.867	83.1	0	0	30	83	Вечір
POL2	G04	3.1	18.7	0.166	0.845	80.4	0	0	23	150	Вечір
POL2	G07	3.0	18.0	0.167	0.854	81.5	0.049	0.025	25	130	Вечір
POL2	G09	2.5	18.0	0.139	0.865	82.9	0.024	0.010	22	156	Вечір
POL2	G16	3.8	14.3	0.266	0.853	81.4	0	0	37	152	Вечір
POL2	G26	3.2	13	0.246	0.870	83.5	0	0	26	128	Вечір
POLV	G04	6.6	23.2	0.285	0.749	68.3	0.392	0.190	26	180	Опівдні
POLV	G06	5.0	23.5	0.213	0.67	58.8	0.457	0.273	31	160	Опівдні
POLV	G07	5.2	23.8	0.219	0.658	57.4	0.466	0.247	17	180	Після опівдня
POLV	G09	4.5	22.5	0.200	0.710	63.6	0.427	0.188	18	183	Опівдні
POLV	G26	6.8	22.5	0.302	0.820	77.2	0.321	0.118	17	150	Після опівдня
REYK	G04	1.7	11.5	0.148	0.405	28.9	0.111	0.080	1	157	Ранок
REYK	G06	1.5	10.6	0.142	0.349	23.4	0.092	0.072	14	140	Ранок
REYK	G11	1.0	8.0	0.125	0.342	22.8	0.044	0.035	11	180	Ранок
REYK	G31	1.0	11.3	0.089	0.585	48.8	0	0	19	94	Вечір
SOD3	G04	5.3	21.5	0.247	0.776	71.7	0.181	0.096	30	140	Після опівдня
SOD3	G11	2.6	18.2	0.143	0.715	64.2	0.168	0.115	36	180	Ранок
SOD3	G16	2.0	18.0	0.111	0.868	83.2	0.155	0.075	22	187	Вечір
SOD3	G26	2.4	18.0	0.133	0.844	80.2	0.127	0.055	14	135	Вечір
TASH	G04	2.4	19.3	0.124	0.838	79.4	0.059	0.025	22	160	Вечір
TASH	G07	2.4	20.0	0.120	0.835	79.1	0.143	0.057	20	150	Вечір
TASH	G09	3.5	20.5	0.171	0.853	81.3	0.103	0.036	19	180	Вечір
TASH	G16	3.2	17.6	0.182	0.848	80.7	0.290	0.120	23	154	Вечір
TASH	G26	4.1	14.7	0.279	0.871	83.7	0	0	27	142	Вечір
TASH	G27	2.1	17.0	0.124	0.797	74.3	0	0	22	120	Вечір
TRO1	G03	6.5	22.5	0.289	0.794	73.9	0.258	0.078	28	92	Опівдні
TRO1	G04	3.4	19.4	0.175	0.741	67.4	0.158	0.064	14	180	До опівдня
TRO1	G06	2.8	17.4	0.161	0.681	60.1	0.168	0.086	18	139	Ранок
TRO1	G11	1.2	15.1	0.080	0.679	59.8	0.111	0.047	10	180	Ранок
TRO1	G26	1.5	15.7	0.096	0.823	77.6	0.107	0.036	13	180	Вечір

Залежності абсолютного значення дефіциту ПЕВ від зміни відносної освітленості ΔE_m та максимальної відносної площі $A_{\max}$ затінення сонячного диску наведено на рис. 3.31 та рис. 3.32.

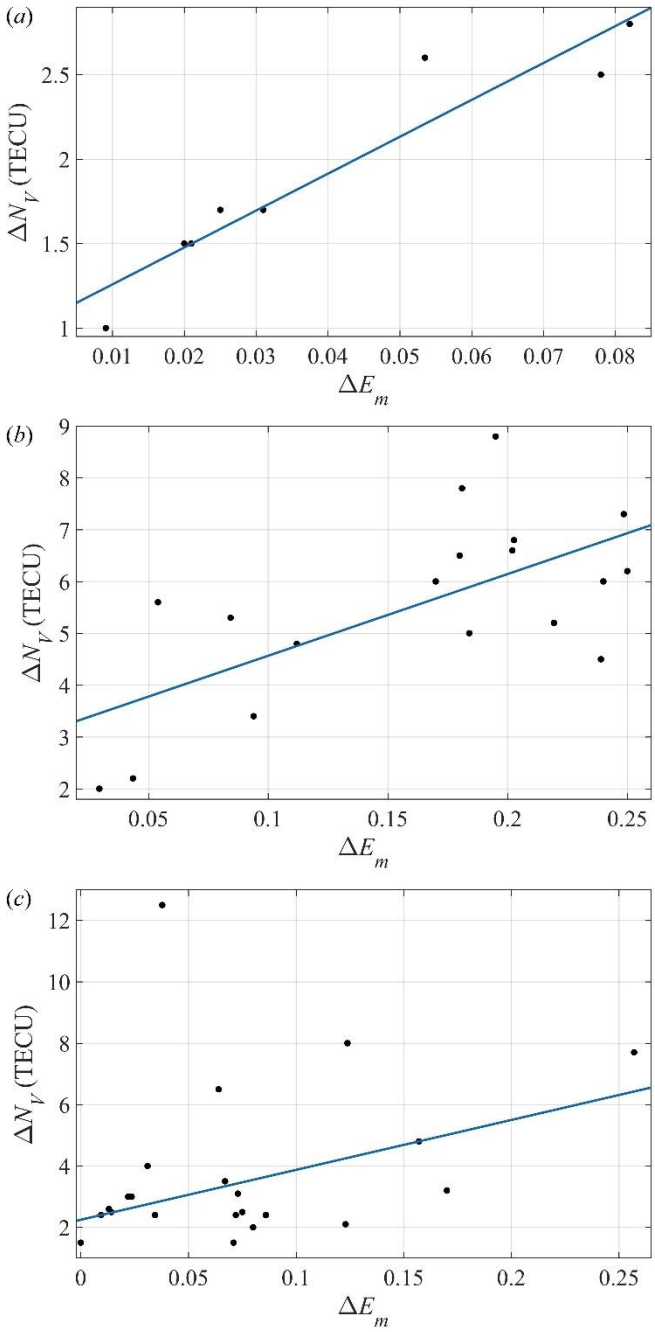


Рис. 3.31. Залежність дефіциту абсолютної величини ПЕВ від зміни відносної освітленості іоносфери: *a* – ранок, *b* – день, *c* – вечір. Відповідні регресії мають наступний вигляд: *a* – $\Delta N_V(\Delta E_m) = 21.85\Delta E_m + 1.04$, $R^2 = 0.9009$, $\sigma = 0.218$ TECU; *b* – $\Delta N_V(\Delta E_m) = 15.77\Delta E_m + 2.989$, $R^2 = 0.4286$, $\sigma = 1.385$ TECU; *c* – $\Delta N_V(\Delta E_m) = 16.25\Delta E_m + 2.248$, $R^2 = 0.8600$, $\sigma = 1.019$ TECU

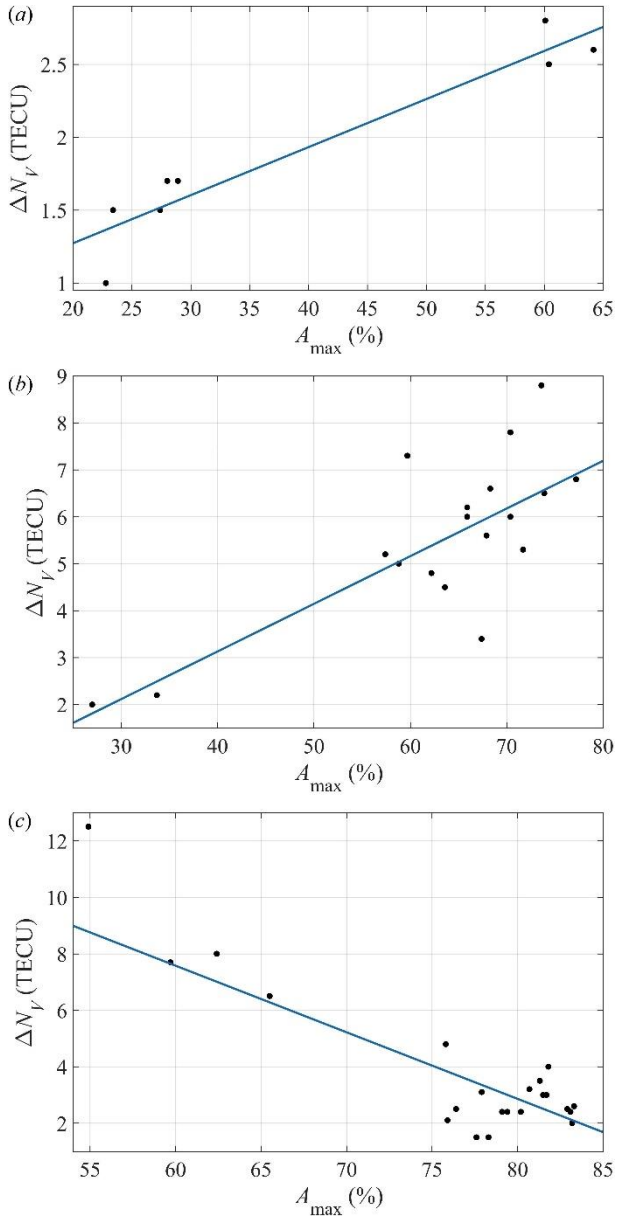


Рис. 3.32. Залежність дефіциту абсолютної величини ПЕВ від максимальної відносної площі затінення сонячного диску: *a* – ранок, *b* – день, *c* – вечір. Відповідні регресії мають наступний вигляд: *a* – $\Delta N_V(A_{max}) = 0.03296A_{max} + 0.6139$, $R^2 = 0.9089$, σ = 0.209 TECU; *b* – $\Delta N_V(A_{max}) = 0.1015A_{max} – 0.9299$, $R^2 = 0.6601$, σ = 1.068 TECU; *c* – $\Delta N_V(A_{max}) = –0.2359A_{max} + 21.73$, $R^2 = 0.8283$, σ = 1.129 TECU

З цих рисунків видно, що існує тенденція до збільшення ΔN_V зі збільшенням ΔE_m. У залежності дефіциту ПЕВ від A_{max} у ранковий та денний часи також спостерігається тенденція до зростання дефіциту ПЕВ зі збільшенням A_{max}. У вечірній час має місце зворотна тенденція.

На рис. 3.33 і 3.34 наведено залежності відносного дефіциту δ_V від ΔE_m та від $A_{\max}$. Як видно, збільшення ΔE_m супроводжувалося помітним зростанням δ_V. Залежності δ_V від ΔE_m та $A_{\max}$ характеризуються доволі великим розкидом точок даних.

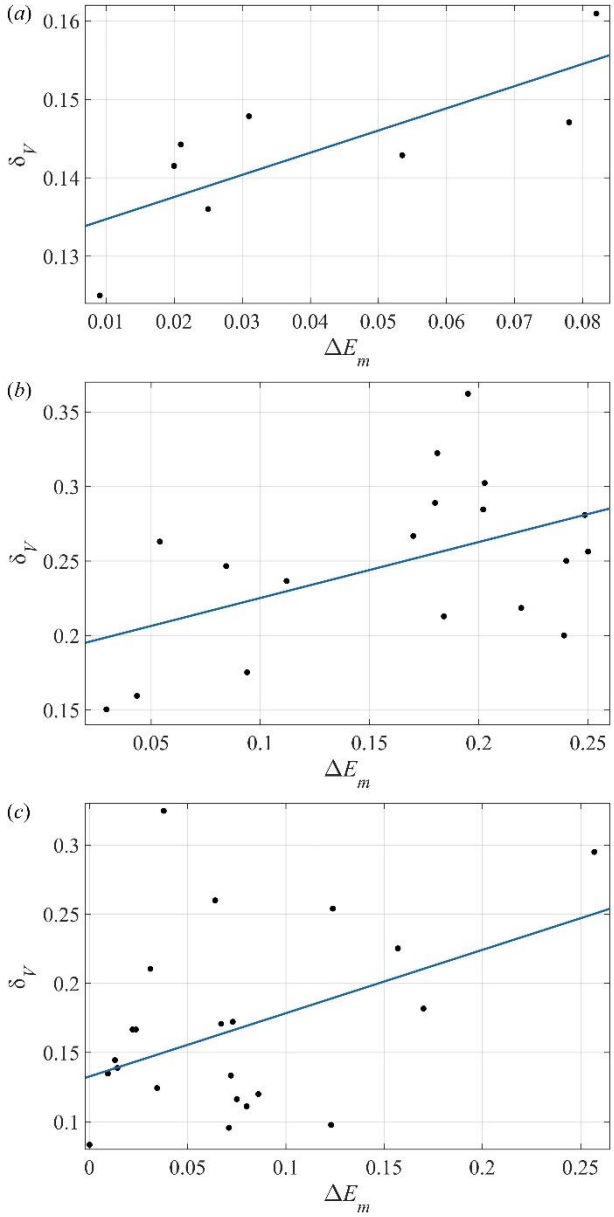


Рис. 3.33. Залежність абсолютного значення відносного дефіциту ПЕВ від зміни відносної освітленості іоносфери: *a* – ранок, *b* – день, *c* – вечір. Відповідні регресії мають наступний вигляд: *a* – $\delta_V(\Delta E_m) = 0.2826\Delta E_m + 0.1319$, $R^2 = 0.5860$, $\sigma = 0.007$; *b* – $\delta_V(\Delta E_m) = 0.3754\Delta E_m + 0.1876$, $R^2 = 0.2439$, $\sigma = 0.050$; *c* – $\delta_V(\Delta E_m) = 0.4574\Delta E_m - 0.1327$, $R^2 = 0.1996$, $\sigma = 0.061$

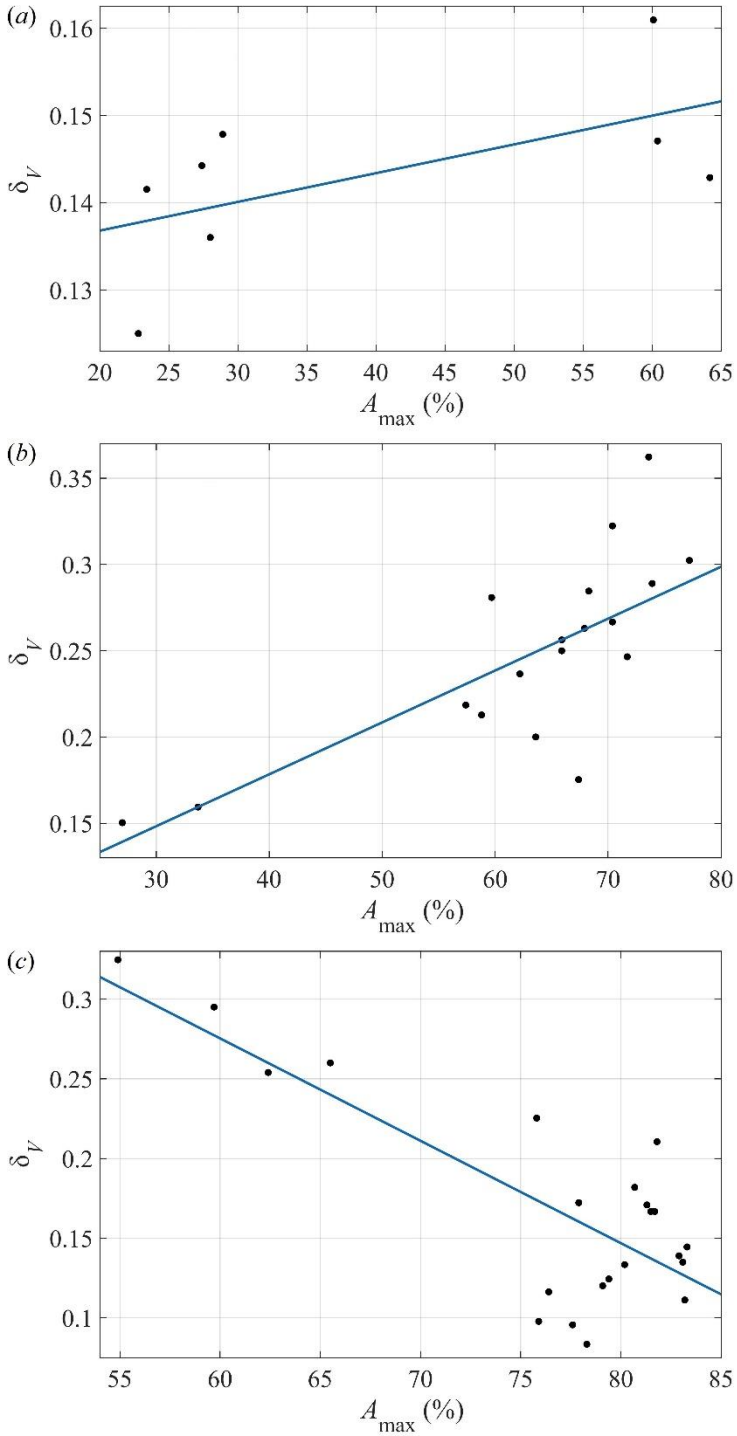


Рис. 3.34. Залежність абсолютного значення відносного дефіциту ПЕВ від максимальної відносної площі затінення сонячного диску: *a* – ранок, *b* – день, *c* – вечір. Відповідні регресії мають наступний вигляд: *a* – $\delta_V(A_{max}) = 0.000329A_{max} + 0.1302$, $R^2 = 0.3523$, $\sigma = 0.009$; *b* – $\delta_V(A_{max}) = 0.003A_{max} + 0.058$, $R^2 = 0.9205$, $\sigma = 0.016$; *c* – $\delta_V(A_{max}) = -0.0064A_{max} + 0.6609$, $R^2 = 0.6222$, $\sigma = 0.042$

Гістограми часу запізнювання Δt мінімального значення ПЕВ відносно моменту максимальної фази СЗ та тривалості зменшення ПЕВ наведено на рис. 3.35 і 3.36 відповідно. Видно, що найчастіше $\Delta t \approx 20 \pm 5$ хв, а $\Delta T \approx 135$–185 хв.

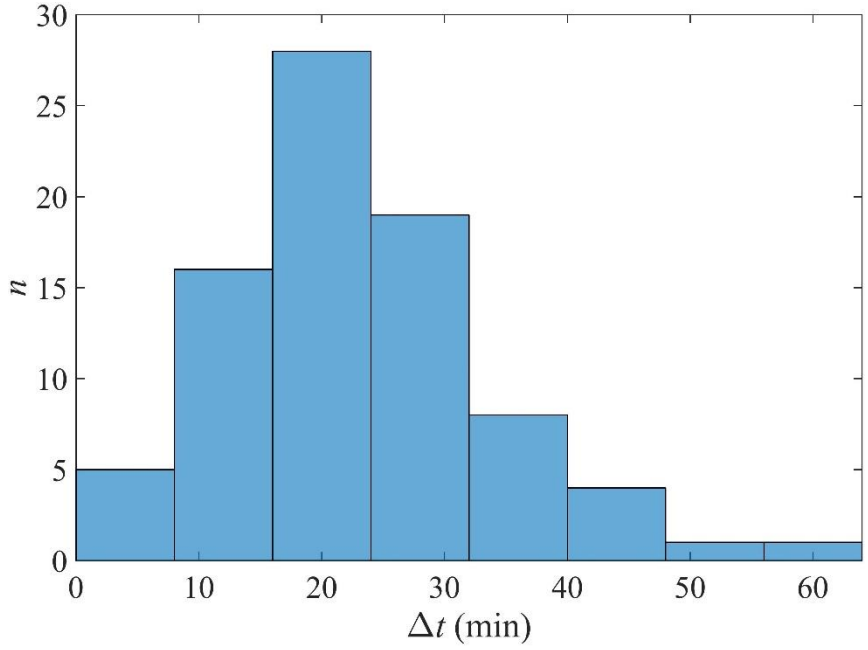


Рис. 3.35. Гістограма часу затримки мінімального значення ПЕВ

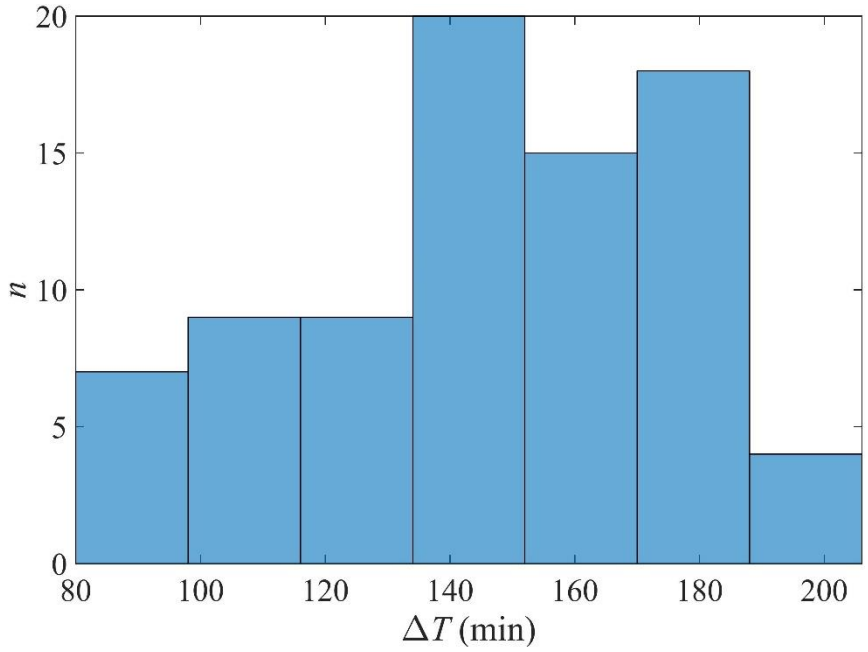


Рис. 3.36. Гістограма тривалості іоносферної реакції

3.2.6. Обговорення

Основні параметри збурень ПЕВ, викликаних СЗ, представлено в табл. 3.3. Аналіз збурень у глобальних масштабах, що спостерігалися в різний час доби, показав складну поведінку варіацій ПЕВ під час затемнення. Це пояснюється, з одного боку, інтегральною природою ПЕВ, а, з іншого – різноманіттям ефектів, що супроводжують СЗ. У період сходу сонця зменшення ПЕВ більш-менш слідувало зменшенню освітленості іоносфери. При $A_{\max} \approx 23–64\%$ маємо $\delta_V \approx –(0.08–0.16)$. Згідно з оцінками, розрахункове значення $\delta_{Vc} \approx –(0.09–0.26)$, тобто несуттєво відрізняється від спостережуваного. При оцінці δ_{Vc} ми виходили з того факту, що у F-області, яка дає найбільший внесок у ПЕВ,

$$\delta_N = \frac{N - N_0}{N_0} = \frac{\Delta N}{N_0} = -A_{\max}, \tag{3.5}$$

де N та N_0 – збурені та незбурені значення концентрації електронів, а

$$\delta_{Vc} = \frac{\Delta N_V}{N_{V0}} \approx \frac{\Delta N}{N_0}\frac{\Delta z_2}{\Delta z_1}, \tag{3.6}$$

де Δz_1 – товщина іоносферного шару, що дає основний внесок у N_V, Δz_2 – товщина збуреного СЗ шару іоносфери, який дає основний внесок у ΔN_V.

Для $\Delta z_1 \approx 200$ км, $\Delta z_2 \approx 80$ км та $\delta_N \approx –(0.23–0.64)$ маємо $\delta_{Vc} \approx –(0.09–0.26)$.

У всі наступні періоди доби розрахункові значення ПЕВ також суттєво не відрізнялися від спостережених. Ця відмінність, швидше за все, пов’язана з процесами переносу та надходженням плазми з плазмосфери в іоносферу під час СЗ. При цьому зменшення ПЕВ частково компенсувалося надходженням плазми в область тіні [184]. Іонізація іоносфери випромінюванням сонячної корони також сприяла деякому зменшенню ефекту сонячного затемнення [23, 185]. Іншими причинами можуть бути збурення системи іоносферних струмів, вертикальний дрейф плазми в схрещених електричних і магнітних полях, а

також вплив великомасштабних хвильових збурень, згенерованих СЗ. Ці та інші процеси згадуються у [34, 60, 62–64, 186].

Як показав аналіз іонограм, денні варіації частоти *fo*F2, а отже, і концентрації електронів $N(t)$, не були монотонними [184]. У цій же роботі оцінено й потік плазми з плазмосфери в іоносферу. Усе це пояснює складну поведінку ПЕВ як у часі, так і в різних частинах земної кулі. Зменшення ПЕВ у вечірній час найчастіше становило приблизно –(0.1–0.3) при $A_{\max} \approx 50$–90%. Значення ΔN_V та δ_V при цьому зменшувалися внаслідок збільшення $A_{\max}$. При цьому зменшення N через зменшення ролі фотоіонізації могло компенсуватися потоком плазми з плазмосфери.

Складна залежність ПЕВ від $A_{\max}$ підтверджується й результатами статистичного аналізу. Загалом спостерігається тенденція до зменшення ПЕВ зі збільшенням ΔE_m та $A_{\max}$ (див. рис. 3.31 і 3.32). Водночас ця тенденція порушується в період заходу сонця (див. рис. 3.32*c*). Те саме можна сказати й про залежність δ_V від $A_{\max}$ (рис. 3.34*c*). Це означає, що більш важливу роль відігравали ефекти заходу Сонця, включаючи активізацію іоносферо-плазмосферної взаємодії, а не СЗ. Для більшої впевненості необхідне проведення детального фізико-хімічного моделювання відповідних процесів. Необхідно продовжити вивчення особливостей ефектів СЗ після заходу Сонця.

Мінімальне значення ПЕВ запізнювалося відносно максимальної фази СЗ на $\Delta t \approx 15$–25 хв і більше. Цей час пов’язаний зі значенням коефіцієнта лінійної рекомбінації в області *F*: $\Delta t \approx \beta^{-1}$. Звідси маємо $\beta \approx (1.11–0.67)\cdot 10^{-3}$ с$^{-1}$. Таке значення β добре відповідає відомим даним [178].

Тривалість реакції іоносфери на СЗ зазвичай трохи перевищувала тривалість затемнення (див. табл. 3.1 і 3.3).

Таким чином, вперше визначено статистичні характеристики збурень ПЕВ у глобальних масштабах, спричинених СЗ. Показано складну залежність ефекту від затіненої площі диску Сонця, а також від широти і довготи.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Виконано радіофізичні спостереження за динамічними процесами в іоносфері протягом СЗ 10 червня 2021 р. і в контрольні дні. Для спостережень використовувалися методи вертикального і похилого допплерівського зондування. Встановлено, що часові варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих радіотрасах в цілому були подібними. ДС на цих радіотрасах, загалом кажучи, відрізнялися. На похилих радіотрасах помітніше позначалася багатомодовість.

2. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності в атмосфері й іоносфері. Спостерігалося не менше трьох хвильових цугів. Значення періодів ($T \approx 5$–12 хв) і відносних амплітуд ($\delta_N \approx 0.3$–0.6%) свідчили про те, що хвильові збурення викликані атмосферними гравітаційними хвилями.

3. Аперіодичний ефект СЗ виявився занадто малим (менше 0.01 Гц), аби його можна було впевнено спостерігати. Малість ефекту зумовлена незначною фазою часткового затемнення над Харковом (не більше 0.11).

4. Вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію ПЕВ на сонячне затемнення 25 жовтня 2022 р., що мало місце перед проходженням та в період проходження вечірнього термінатора.

5. Встановлено, що реакція іоносфери на СЗ спостерігалася у глобальних масштабах (від станції Рейк’явік до станції Новосибірськ), а саме СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі.

6. Вперше отримано статистичні характеристики збурень ПЕВ, викликаних затемненням на різних широтах та довготах. Своєрідною була поведінка варіацій ПЕВ під час та після заходу сонця. Зменшення ПЕВ досягало 1.0–19.0 TECU, а максимальне відносне зменшення приблизно –0.32. Зміни всіх параметрів збурення ПЕВ складним чином залежали від відносної площі покриття диску Сонця. Це може пояснюватися немонотонними змінами концентрації електронів у денний час, активізацією іоносферно-

плазмосферної взаємодії протягом СЗ, збуренням системи іоносферних струмів, вертикальним дрейфом плазми, а також впливом великомасштабних збурень концентрації електронів, що генеруються затемненням.

7. Час запізнювання максимальної реакції іоносфери відносно максимальної фази затемнення становив 15–25 хв. Тривалість реакції іоносфери на СЗ дещо перевищувала тривалість дії збурюючого джерела і сягала 120–180 хв.

8. Є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія сонячного затемнення та термінатора.

РОЗДІЛ 4. ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ СТАРТІВ ВАЖКИХ РАКЕТ

У цьому розділі описано результати багаторічних спостережень (2009–2021 рр.) іоносферних процесів, що супроводжували старти та польоти ракет типу *Союз* і *Протон* протягом 24-го циклу сонячної активності з космодрому Байконур за суттєво різних геофізичних умов: від K_p = 1+ до K_p = 7– .

Результати цього розділу опубліковано в роботах [187–189].

4.1. Загальні відомості

Як вже було зазначено у п.1.3.4, збурення, що виникають в атмосфері та геокосмосі, суттєво залежать від стану атмосферно-космічної погоди, часу доби, сезону та сонячної активності. З цієї причини навіть при старті двох однакових ракет збурення у згаданій системі можуть сильно відрізнятися. Оскільки й самі ракети також відрізняються за потужністю, траєкторіями та складом палива, доцільно прийняти до уваги основні відомості про них (табл. 4.1–4.3). Число стартів ракети Союз становить 81, ракети Протон – 53.

Таблиця 4.1.

Основні відомості про ракети

Параметр	Ракета	
	Союз	*Протон*
Тип ракети	Важка	Важка
Початкова маса, т	312	705–711
Довжина ракети, м	46.3	56.2–58.2
Максимальний діаметр, м	10.3	4.1 (7.4)
Тяга нульового ступеня, кН	818	–
Час роботи нульового ступеня, с	140	–
Тяга першого ступеня, кН	1019	10780
Час роботи першого ступеня, с	118	121
Тяга другого ступеня, кН	792	2400
Час роботи другого ступеня, с	320	211
Тяга третього ступеня, кН	–	31
Час роботи третього ступеня, с	–	240.5–258.3

Таблиця 4.2.

Циклограма польоту ракети Союз

Стадія польоту	Час, с	Висота, км	Відстань від космодрому, км	Швидкість, км/с
Вертикальний підйом	8	~1	0	~0.1
Відділення нульового ступеня	119	48	44	1.8
Скидання стулок головного обтічника	151	78	96	2.1
Вимикання двигуна першого ступеня	286	171	451	3.9
Вимикання двигуна другого ступеня	522	200	1680	7.7
Відділення космічного апарата	527	200	1715	7.8

Таблиця 4.3.

Циклограма польоту ракети Протон

Стадія польоту	Час, с	Висота, км	Відстань від космодрому, км	Швидкість, км/с
Вертикальний підйом	10	~1	0	~0.1
Максимальний швидкісний напір	65.5	11	15	0.465
Вмикання другого ступеня	119	40	63	1.626
Відділення першого ступеня	123.4	42	70	1.726
Вмикання другого ступеня	334.5	120	498	4.450
Розділення другого та третього ступенів	335.2	120	500	4.453
Вмикання третього ступеня	337.6	120	510	4.460
Скидання головного обтічника	348.2	123	560	4.497
Вимикання третього ступеня	588.3	150	2030	7.179
Відділення орбітального блоку	588.4	151	2031	7.182

4.2. Засоби та методи

Для аналізу вимірювань залучено дані спостережень за станом іоносфери до, під час та після стартів ракет впродовж 6–12 год. Ракети стартували в різний час доби за суттєво різної магнітної активності, а отже і різної збуреності іоносфери.

Для спостереження ефектів в іоносфері використовувався допплерівський радар вертикального зондування, описаний у п.1.4.3.

Час запізнювання Δt можливої реакції іоносфери на старт і політ ракети визначався за змінами характеру варіацій ДС. Потім будувався варіаційний ряд для часу запізнювання. Далі окремо для ракет *Союз* і *Протон* будувалися гістограми для Δt та вдаваної швидкості

$$v' = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}, \tag{4.1}$$

де R – відстань від області генерації збурення в іоносфері до обсерваторії (для Байконура $R \approx 2400$ км), $\Delta t_0 \approx 5$ хв – час руху ракети до області генерації збурень.

4.3. Ефекти стартів ракет за спокійних геофізичних умов

4.3.1. Стан космічної погоди

Усю необхідну інформацію для аналізу стану космічної погоди під час запусків ракет наведено в табл. 4.4, з якої видно, що геофізичні умови були цілком прийнятні для виявлення іоносферних ефектів.

4.3.2. Результати вертикального зондування

Ранкові спостереження ефектів старту та польоту ракети Союз. Приклад результатів спостереження збурень в іоносфері, що послідували за стартом ракети о 03:01:23 15 травня 2012 р. наведено на рис. 4.1. Можна

бачити, що в інтервалі часу 02:30–03:27 ДС змінювалися незначно. З 03:27 і до 03:45 відмічалося квазіперіодичне коливання ДЗЧ. В інтервалі часу 03:45–05:54 мали місце квазіперіодичні коливання з періодом $T \approx 8$–12 хв та амплітудою ДЗЧ $f_{da} \approx 0.15$–0.30 Гц. З 05:54 до 06:48 спостерігалися хаотичні варіації ДС. Після 06:48 та до 07:33 відмічалися квазіперіодичні варіації ДС.

Таблиця 4.4.

Стан космічної погоди

Дата	Час старту ракети (UT)	Тип ракети	$K_{p\max}$	D_{st}, нТл		$F_{10.7}$, с.о.п. (1 с.о.п. = 10^{-22} Вт·м$^{-2}$·Гц$^{-1}$)	W
				min	max		
15.05.2012	03:01:23	*Союз*	2	–10	4	131.9	122
19.10.2016	08:05:14	*Союз*	3–	–15	–5	75.8	30
31.03.2016	16:23:57	*Союз*	3	–14	–2	81.6	160
28.10.2021	00:00:32	*Союз*	1+	–2	16	110.3	100
28.06.2014	04:25	*Протон*	2+	–18	8	122.5	80
09.10.2019	10:17:56	*Протон*	4–	–15	7	67.9	0
06.08.2012	19:31	*Протон*	3	–22	–7	98	137.9
20.09.2011	22:47	*Протон*	3	–25	–12	145.5	123
21.09.2011			2	–19	–5	145.3	108

Денні спостереження ефектів старту та польоту ракети Союз. Приклад часових варіацій ДС, що спостерігались після старту ракети о 08:05:14 19 жовтня 2016 р., показано на рис. 4.2. Видно, що ще до старту ракети в іоносфері існувало квазіперіодичне коливання ДЗЧ. О 08:14 ДС став двомодовим. Це тривало близько 17 хв. З 08:30 до 08:50 ДС був одномодовим. Характер варіацій ДС змінювався в інтервалі часу 08:50–09:40. Період коливань ДЗЧ варіював від 9 до 5 хв. Амплітуда коливань була незначною (0.05–0.10 Гц). З 09:40 до 10:45 варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з $T \approx 10$–20 хв і $f_{da} \approx 0.1$ Гц. В інтервалі часу 10:45–11:30 ДС змінювалися незначно, а з 11:30 до 12:20 – скоріше хаотично. З 12:20 і до 14:30 варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з $T \approx 12$ хв і $f_{da} \approx 0.1$ Гц.

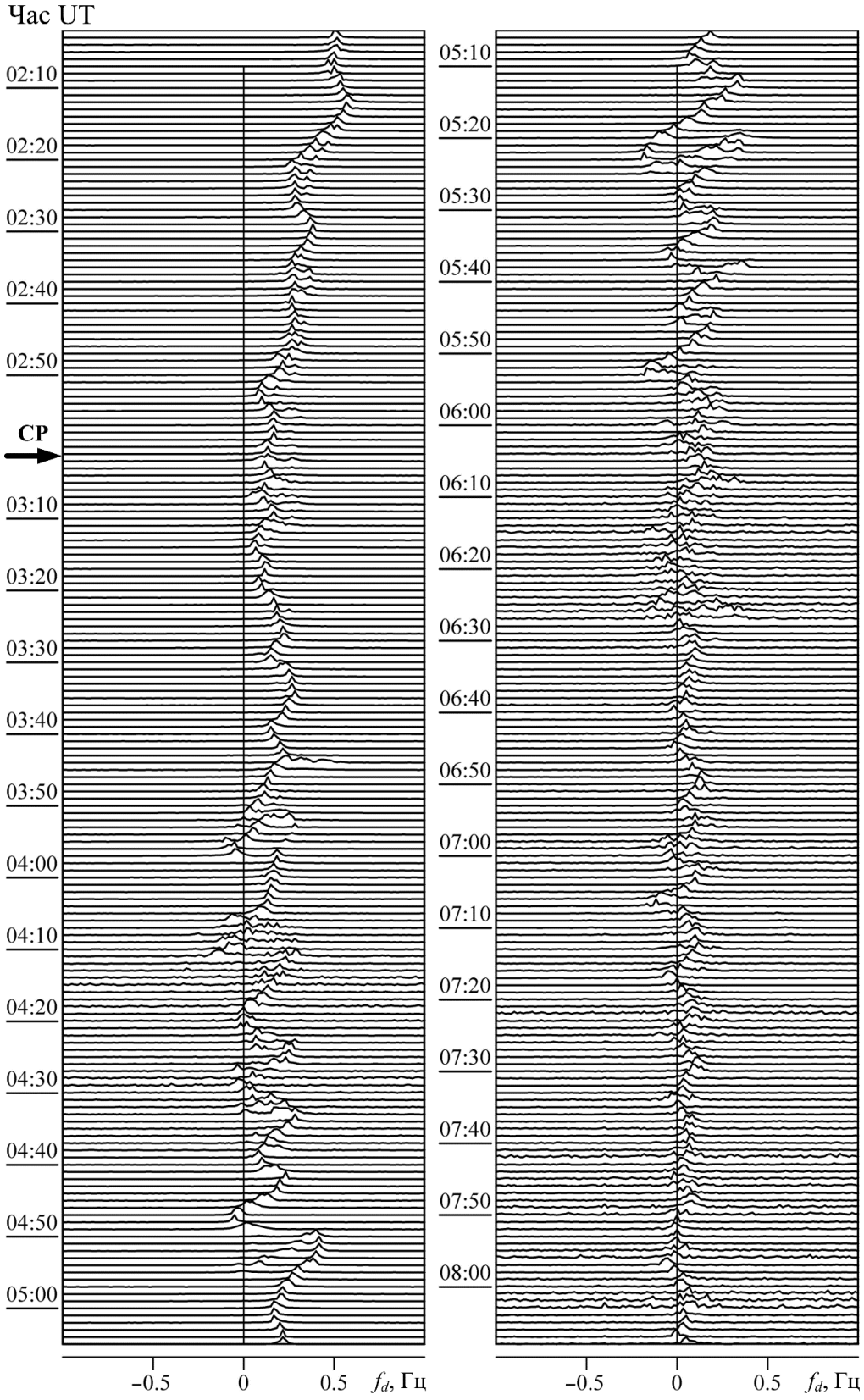


Рис. 4.1. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Союз* у ранковий час 15 травня 2012 р. Частота радіохвилі 4.2 МГц. Діюча висота 300–375 км. Тут і далі СР – момент старту ракети

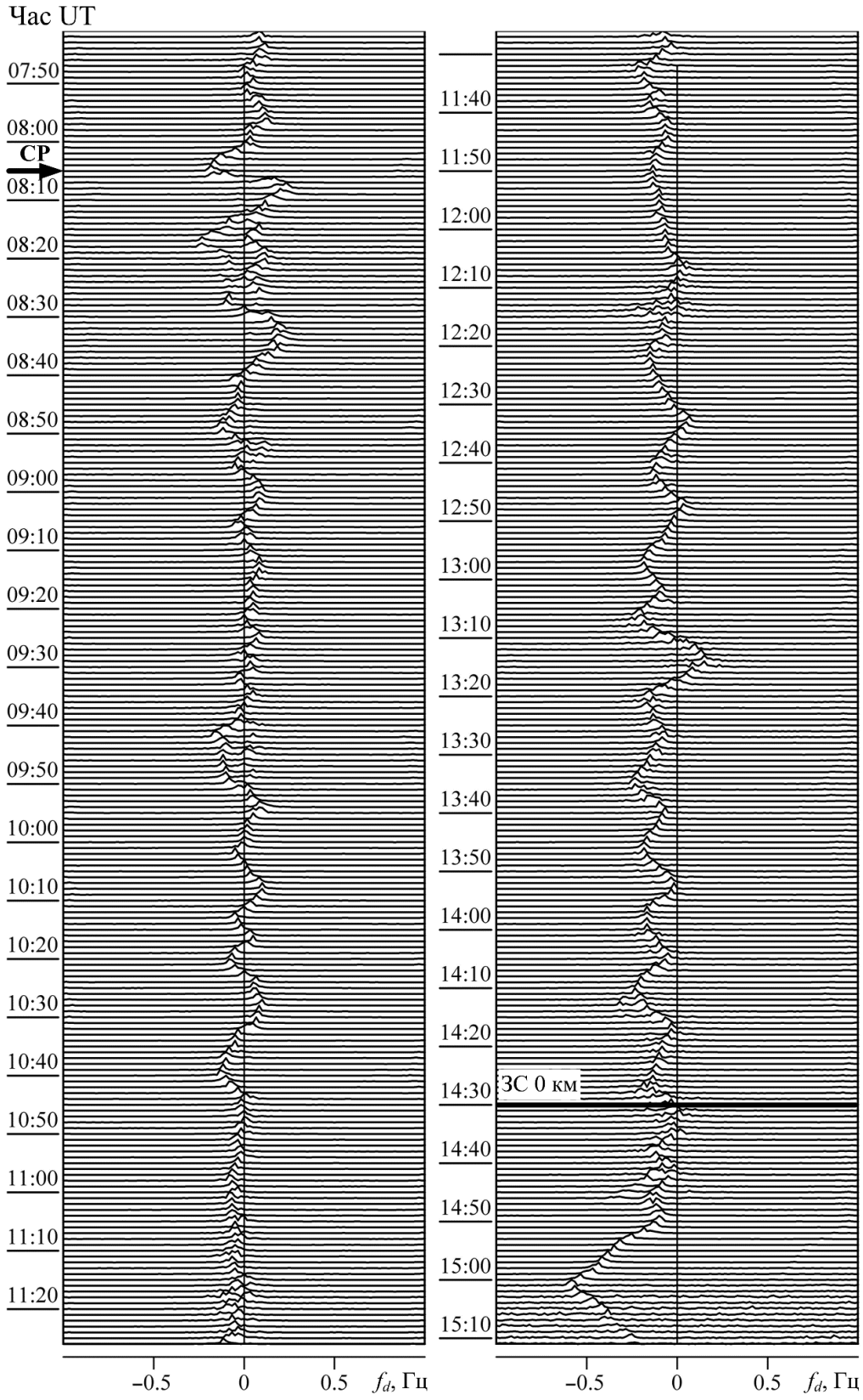


Рис. 4.2. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Союз* у денний час 19 жовтня 2016 р. Частота радіохвилі 4.2 МГц. Діюча висота 225–300 км. Тут і далі СС (або ЗС) – схід (захід) сонця на відповідній висоті

Вечірні спостереження ефектів старту та польоту ракети Союз. Приклад часових варіацій ДС, які послідували за стартом ракети о 16:23:57 31 березня 2016 р., наведено на рис. 4.3. Ще до старту ракети в іоносфері існувало квазіперіодичне збурення з $T \approx 23$ хв і $f_{da} \approx 0.2$ Гц. Близько 16:50 стався збій коливання. З 17:10 до 17:37 варіації ДС були скоріше аперіодичними. В інтервалі часу 17:43–18:37 вони стали квазіперіодичними з $T \approx 10$ хв і $f_{da} \approx 0.15$ Гц. З 18:37 та до 19:28 квазіперіодичність порушується. Далі спостерігалися слабкі коливання ДЗЧ із $f_{da} \approx 0.05$ Гц. В інтервалі часу 20:20–21:50 збурення знову стають квазіперіодичними ($T \approx$ 12–20 хв, $f_{da} \approx 0.12$ Гц). Після 21:50 варіації ДС були скоріше хаотичними.

Нічні спостереження ефектів старту та польоту ракети Союз. Як приклад наведемо результати спостережень часових варіацій ДС, що послідували за стартом ракети о 00:00:32 28 жовтня 2021 р. (рис. 4.4). До старту ракети в іоносфері спостерігався квазіперіодичний процес з $T \approx$ 20–22 хв і $f_{da} \approx$ 0.20–0.25 Гц. Поблизу момента старту ракети та відразу після нього ДС роздвоюється. В інтервалі часу 00:10–00:40 він залишається двомодовим із рознесенням за ДЗЧ близько 0.1 Гц. З 00:40 до 00:50 ДС змінюється слабко. В інтервалі часу 00:50–01:30 спостерігалися значні квазіперіодичні варіації ДС з $T \approx$ 20–22 хв і $f_{da} \approx$ 0.20–0.25 Гц. З 01:30 до 02:00 варіації ДС мали хаотичний характер. В інтервалі часу 02:00–03:10 вони були скоріше квазіперіодичними ($f_{da} \approx 0.1$ Гц, $T \approx$ 20–30 хв). З 03:10 до 04:10 зміни ДС стають квазіперіодичними ($f_{da} \approx$ 0.1–0.2 Гц, $T \approx$ 10–20 хв). Після 04:10 варіації не пов’язані зі стартом ракети.

Ранкові спостереження ефектів старту та польоту ракети Протон. Приклад результатів спостереження часових варіацій ДС, що послідували за стартом ракети *Протон* о 04:25 28 квітня 2014 р., наведено на рис. 4.5, з якого видно, що до старту ракети в іоносфері існувало квазіперіодичне збурення, для якого $T \approx 10$ хв і $f_{da} \approx$ 0.10–0.15 Гц. Приблизно о 04:05 стався збій коливання. В інтервалі 04:05–04:45 варіації ДС були незначними.

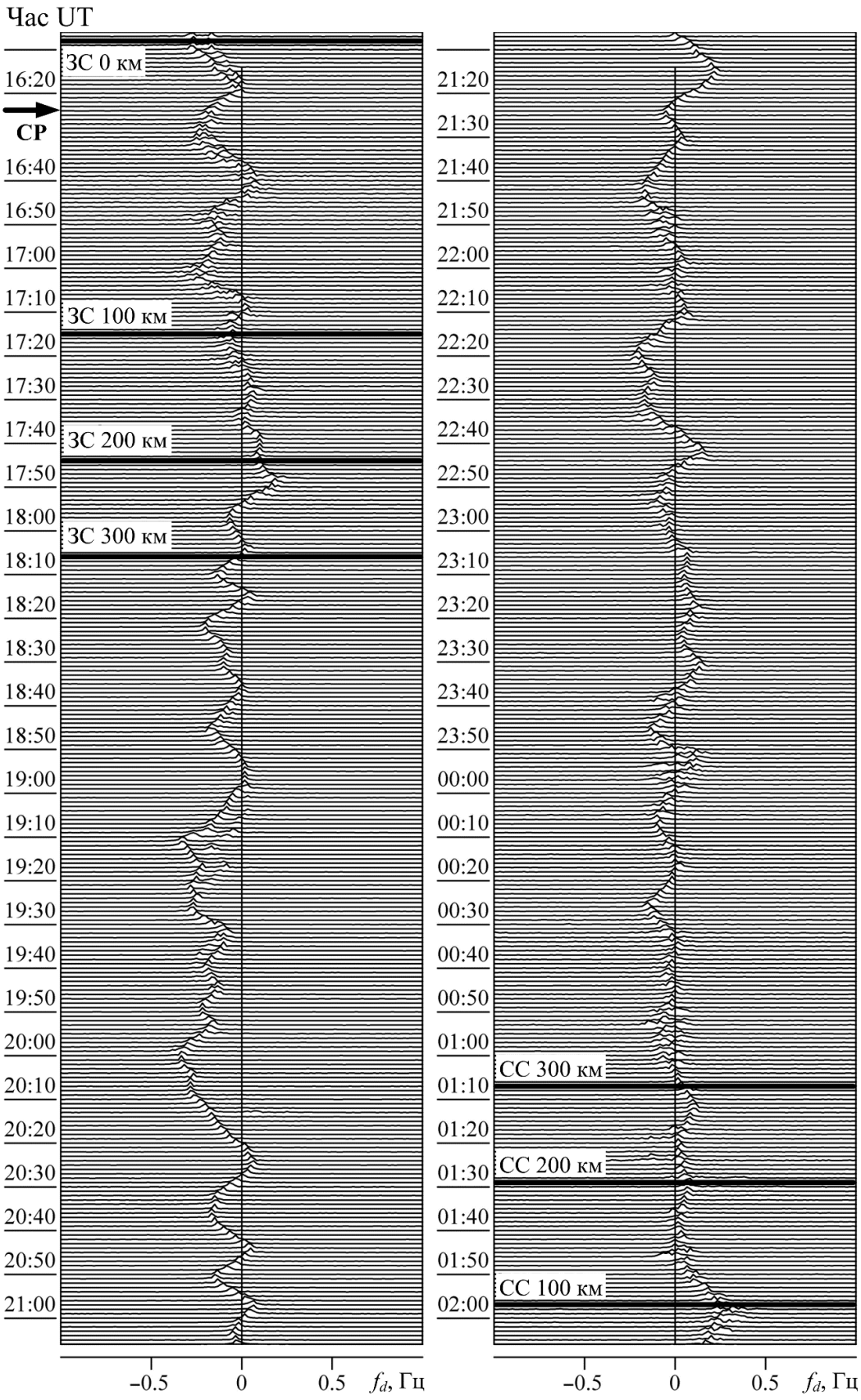


Рис. 4.3. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Союз* у вечірній час 31 березня 2016 р. Частота радіохвилі 3.2 МГц. Діюча висота 300–375 км

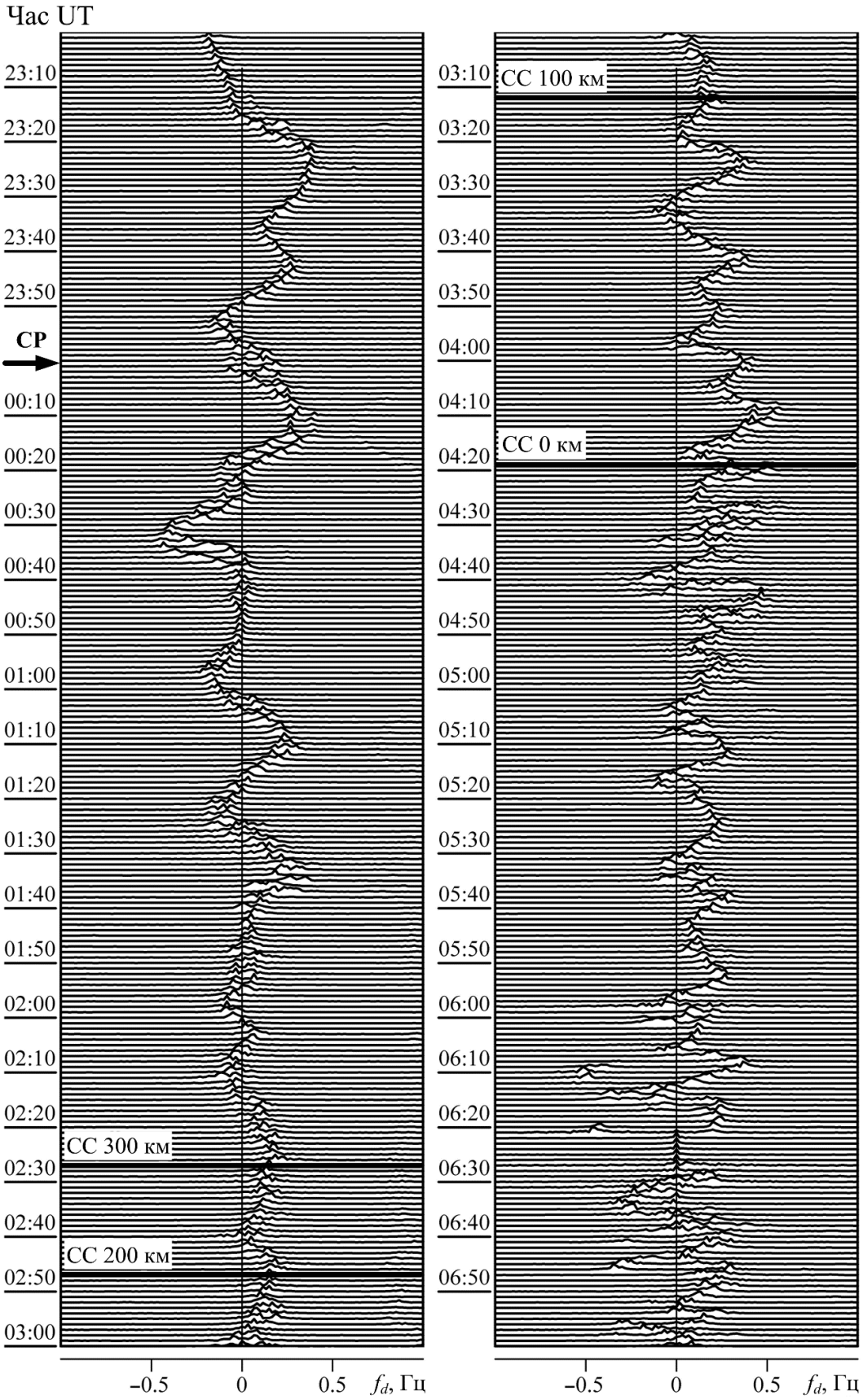


Рис. 4.4. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Союз* у нічний час 28 жовтня 2021 р. Частота радіохвилі 3.2 МГц. Діюча висота 300–375 км

О 04:46 спостерігався стрибок ДС приблизно на 0.2 Гц, після чого мало місце його короткочасне збурення з $T \approx 10$ хв. В інтервалі часу 05:28–05:34 $f_{da} \approx 0.15$ Гц. З 05:34 і до 06:57 відмічалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 5$–6 хв і $f_{da} \approx 0.20$–0.22 Гц.

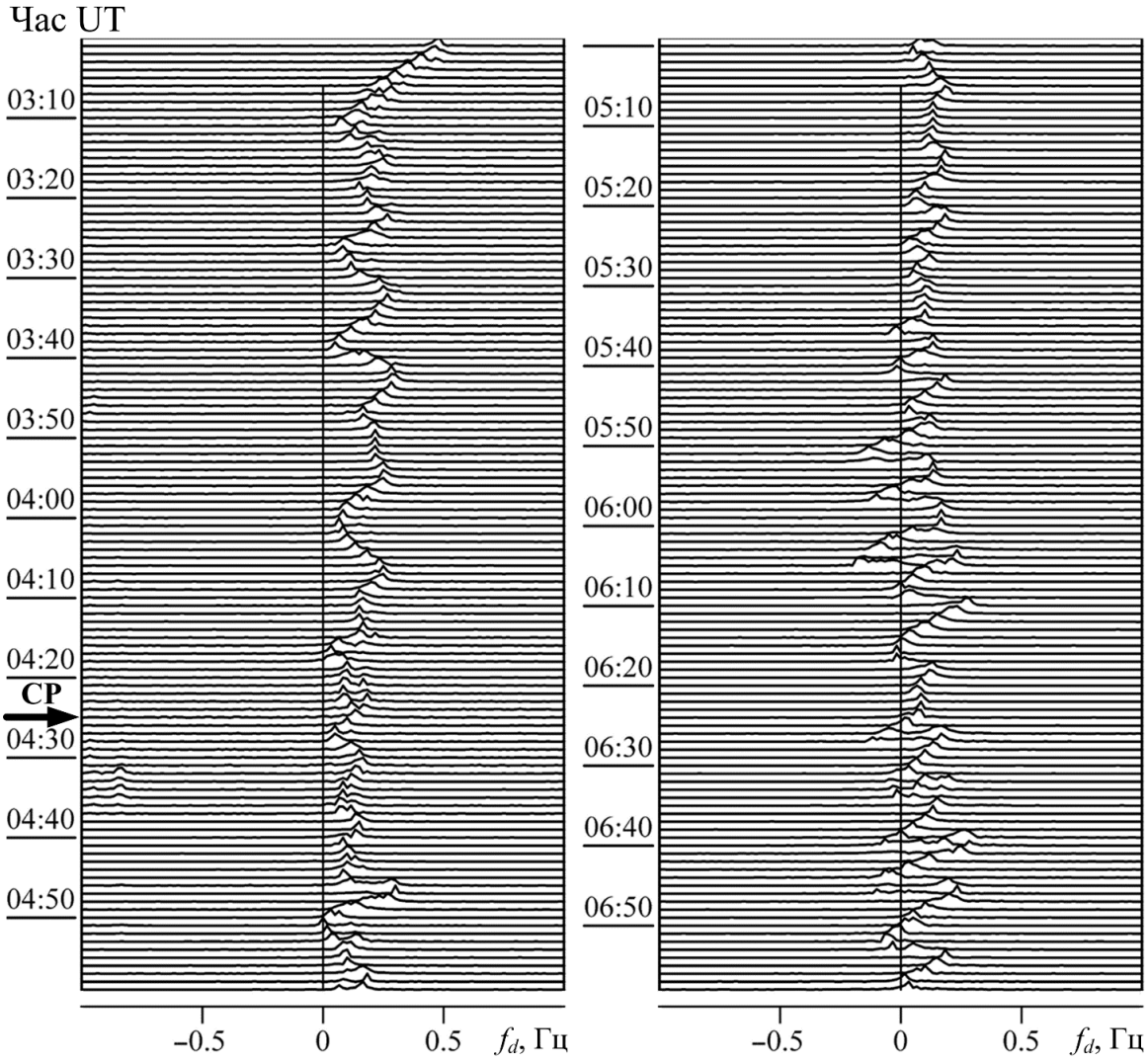


Рис. 4.5. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Протон* у ранковий час 28 квітня 2014 р. Частота радіохвилі 4.2 МГц. Діюча висота 225–300 км

Денні спостереження ефектів старту та польоту ракети Протон. Наведемо в якості прикладу результати реєстрації варіацій ДС, що супроводжували старт ракети о 10:17:56 9 жовтня 2019 р. (рис. 4.6). У цей

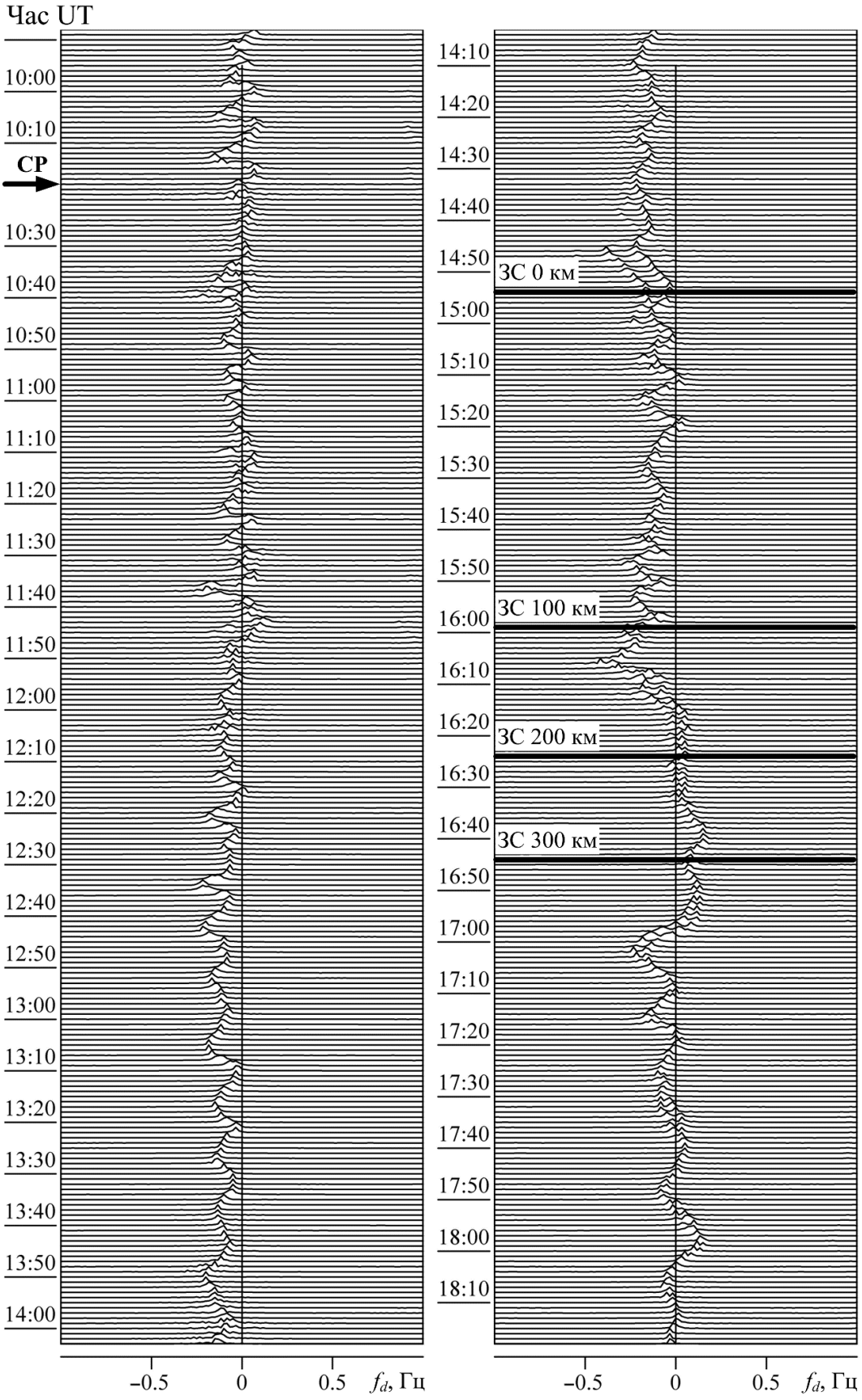


Рис. 4.6. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Протон* у денний час 9 жовтня 2019 р. Частота радіохвилі 3.2 МГц. Діюча висота 300–375 км

день хвильова активність реєструвалася протягом усього часу спостереження. Перша зміна характеру варіацій ДС відмічалася о 10:43 виникли коливання з $T \approx 5$ хв і $f_{da} \approx 0.1$ Гц. З 11:37 до 11:47 мало місце руйнування ДС. Приблизно до 12:35 спостерігалося попереднє коливання з $T \approx 5$ хв. Далі в інтервалі часу 12:35–13:55 реєструвалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 10$–12 хв і $f_{da} \approx 0.1$ Гц. З 13:55 до 14:45 квазіперіодичність частково зруйнувалася. В інтервалі часу 14:45–15:03 ДС ставав двомодовим. З 15:03 до 15:35 квазіперіодичне коливання відновилося. Добре виражені квазіперіодичні варіації ДЗЧ спостерігалися в інтервалі часу 17:05–18:10.

Вечірні спостереження ефектів старту та польоту ракети Протон. На рис. 4.7. наведено результати спостережень часових варіацій ДС, що послідували за стартом ракети о 19:31 6 серпня 2012 р. Видно, що квазіперіодичні коливання ДЗЧ виникли ще до старту ракети. Вже в момент старту ДС стають двомодовими. Помітні зміни характеру варіацій ДС відмічалися о 19:48, 20:25, 20:50 та 22:33. Величина квазіперіоду досягала 20 хв, а $f_{da} \approx 0.3$–0.6 Гц.

Нічні спостереження ефектів старту та польоту ракети Протон. Ракета стартувала о 22:47 20 вересня 2011 р. (рис. 4.8). До старту варіації ДС були швидше аперіодичними. Починаючи з 23:10 20 вересня 2011 р. та до 00:33 21 вересня 2011 р. відмічалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 20$ хв і $f_{da} \approx 0.15$ Гц. Наступні зміни характеру варіацій ДС мали місце о 00:33 та 01:58 21 вересня 2011 р. З 03:10 до 04:30 процеси були скоріше квазіперіодичними. В інтервалі часу 04:30–05:50 квазіперіодичність була добре вираженою.

4.3.3. Статистичний аналіз

Аналіз реакції іоносфери на старт і політ окремої ракети не може дати повної впевненості, що спостережувані збурення викликані цією подією. Для більшої впевненості потрібний статистичний аналіз параметрів збурень. Основними параметрами є часи запізнювання іоносферної реакції та швидкість поширення збурень.

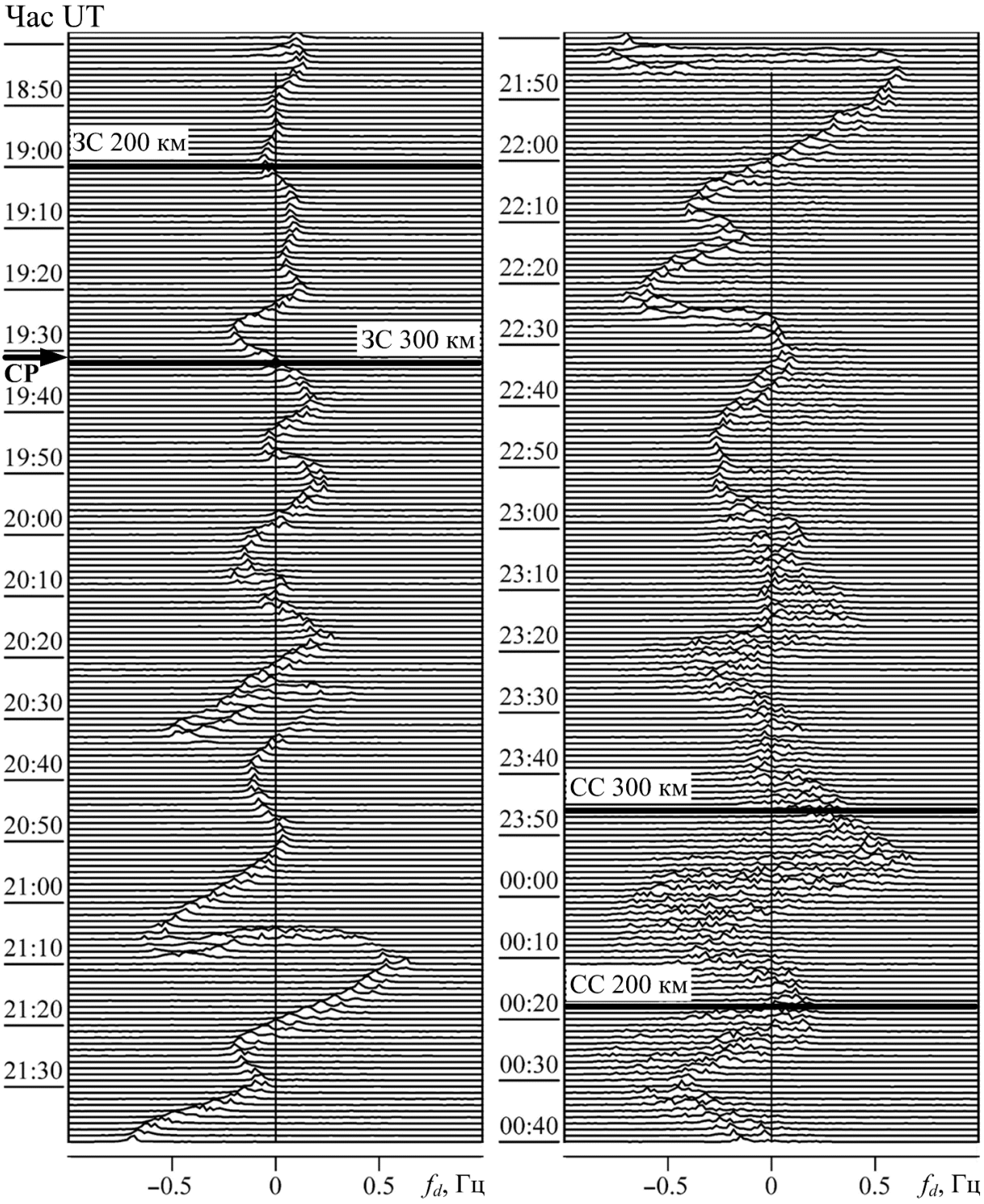


Рис. 4.7. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Протон* у вечірній час 6 серпня 2012 р. Частота радіохвилі 3.2 МГц. Діюча висота 300–375 км

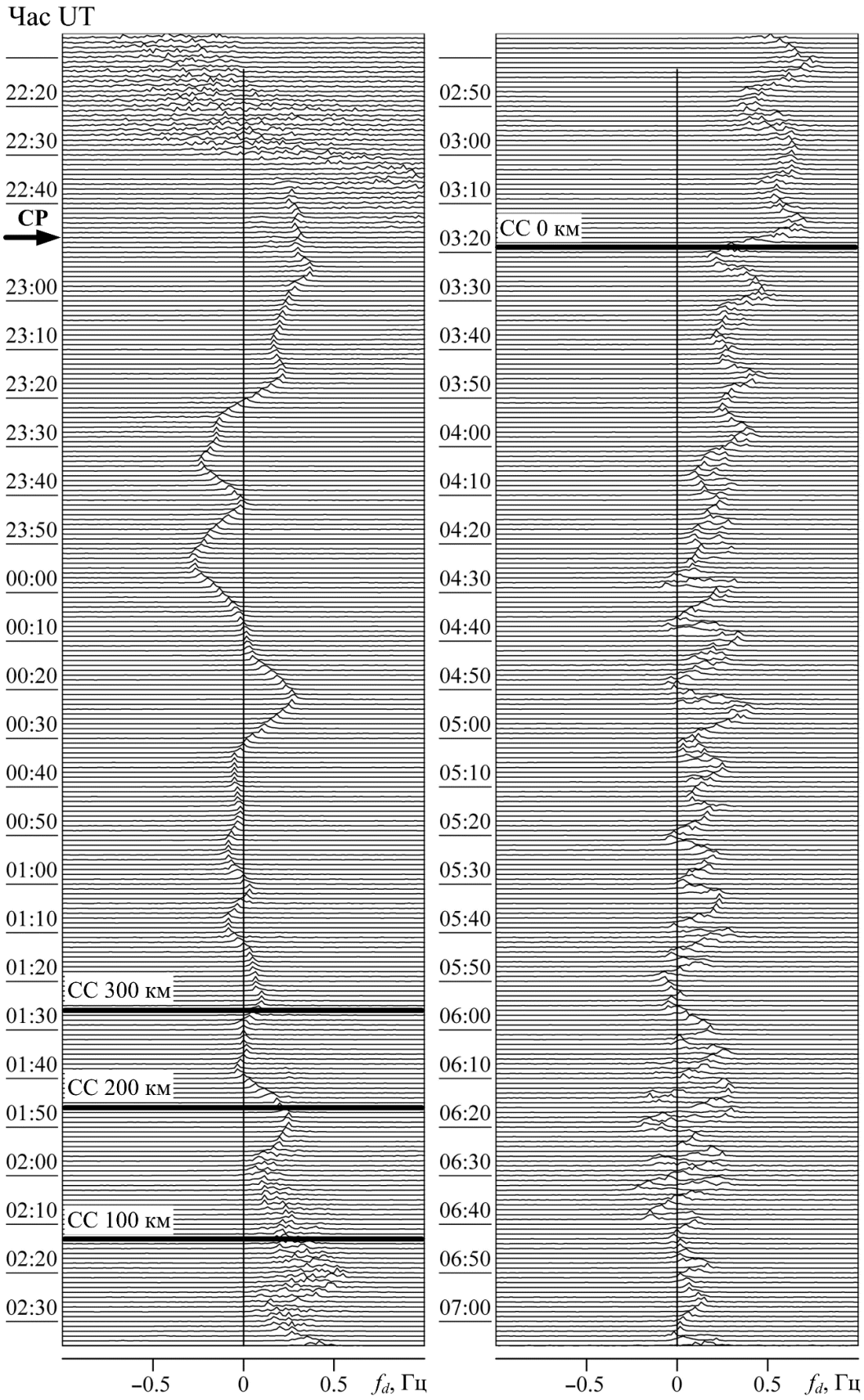


Рис. 4.8. Часові варіації ДС, що послідували за стартом ракети *Протон* у нічний час 20 вересня 2011 р. Частота радіохвилі 4.2 МГц. Діюча висота 300–375 км

Часи запізнювання реакції іоносфери. Гістограми часів запізнювання реакції іоносфери для ракет *Союз* і *Протон* показані на рис. 4.9 і 4.10 відповідно. З них видно, що є декілька груп часів запізнювання, які змінюються у широких межах приблизно від 10 до 300 хв. Ці групи дещо відрізняються для ракет *Союз* і *Протон*. Гістограму для Δt для обох типів ракет наведено на рис. 11. Також існують декілька груп часів запізнювання.

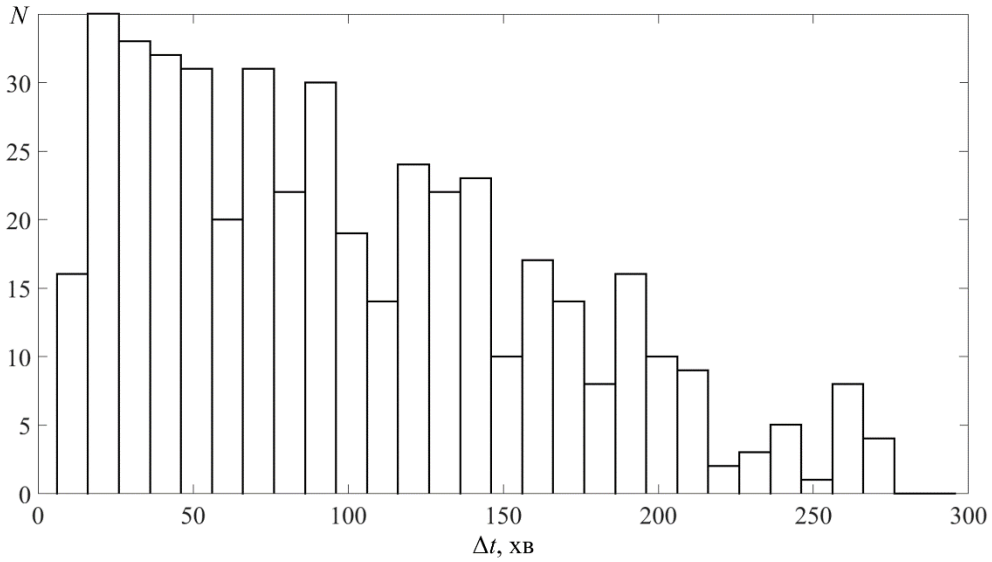


Рис. 4.9. Розподіл часів запізнювання приходу збурень, що супроводжували старти ракет *Союз*

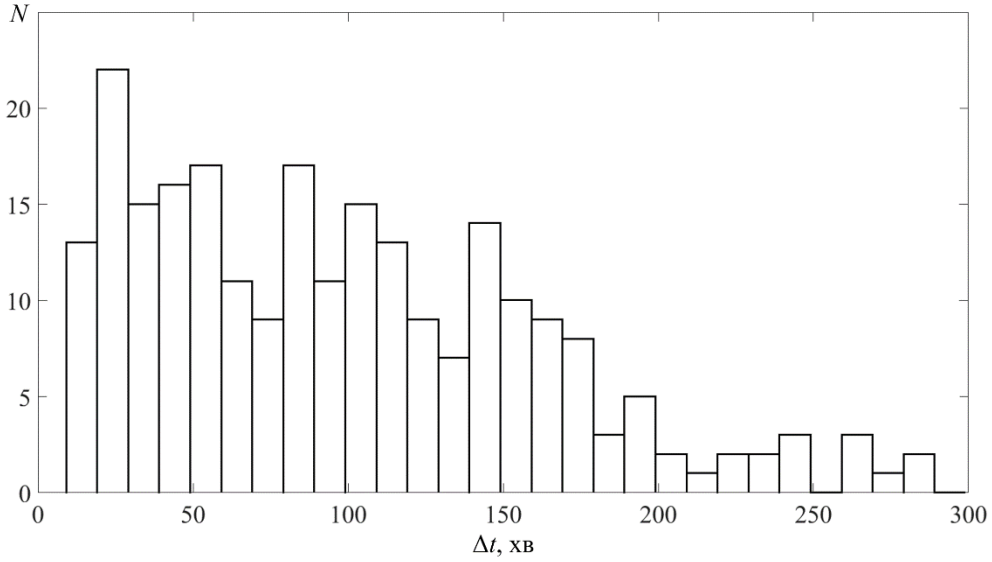


Рис. 4.10. Розподіл часів запізнювання приходу збурень, що супроводжували старти ракет *Протон*

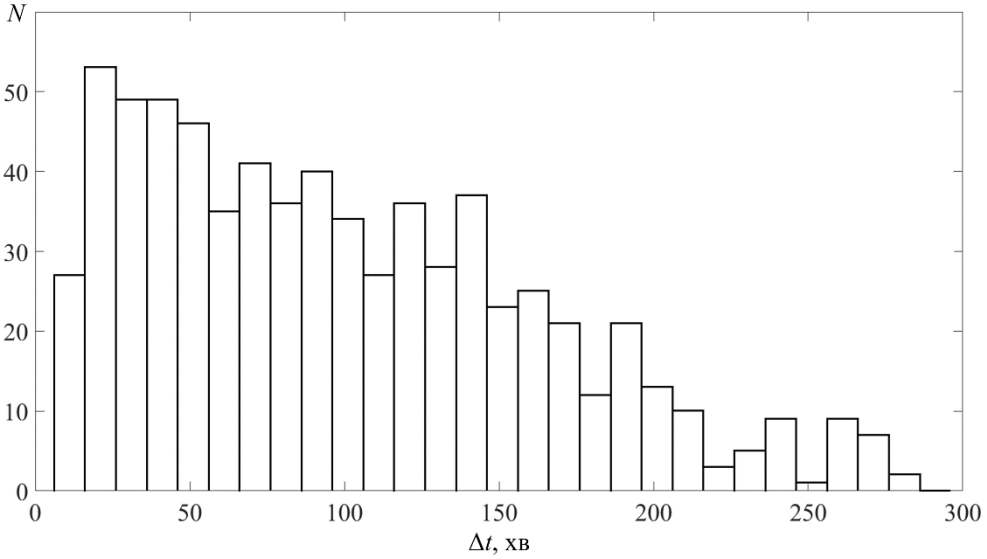


Рис. 4.11. Розподіл часів запізнювання приходу збурень, що супроводжували старти ракет обох типів

Швидкість поширення збурень. Гістограми для вдаваної горизонтальної швидкості поширення іоносферних збурень, що супроводжували старти та польоти ракет *Союз* і *Протон*, наведені відповідно на рис. 4.12 і 4.13. З цих рисунків видно, що мають місце декілька груп швидкостей: від ~100 до 800 м/с, від 0.8 до 1.1–1.3 км/с та від ~1.5 до 2.5–3 км/с. Гістограми для обох типів ракет близькі. Загальну гістограму представлено на рис. 4.14. На гістограмі можна виділити до 6 груп швидкостей.

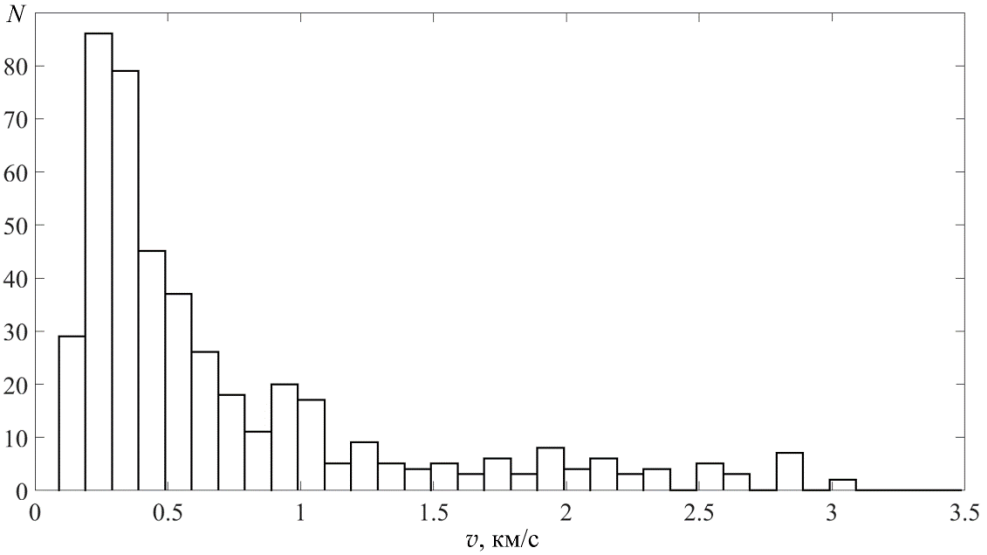


Рис. 4.12. Розподіл горизонтальних удаваних швидкостей збурень, що супроводжували старти ракет *Союз*

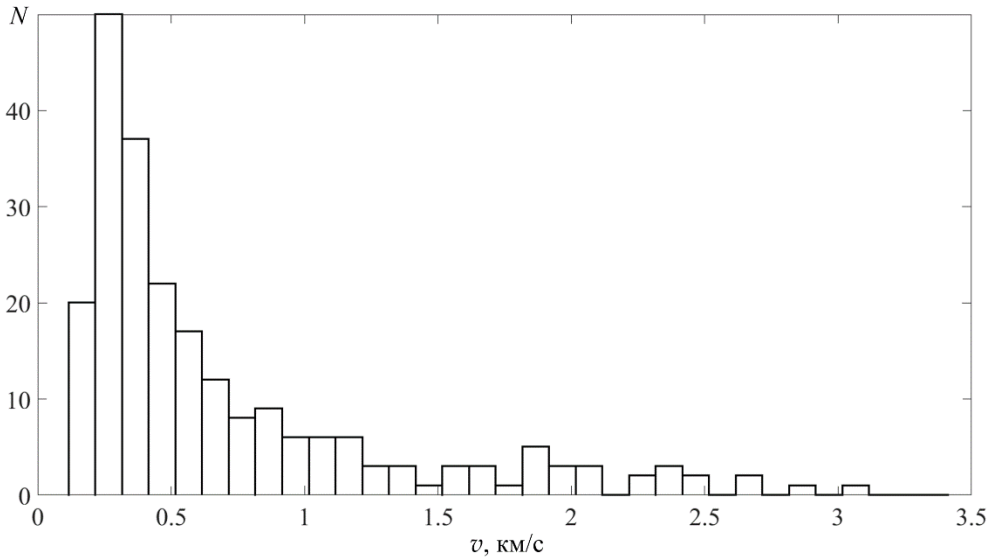


Рис. 4.13. Розподіл горизонтальних удаваних швидкостей збурень, що супроводжували старти ракет *Протон*

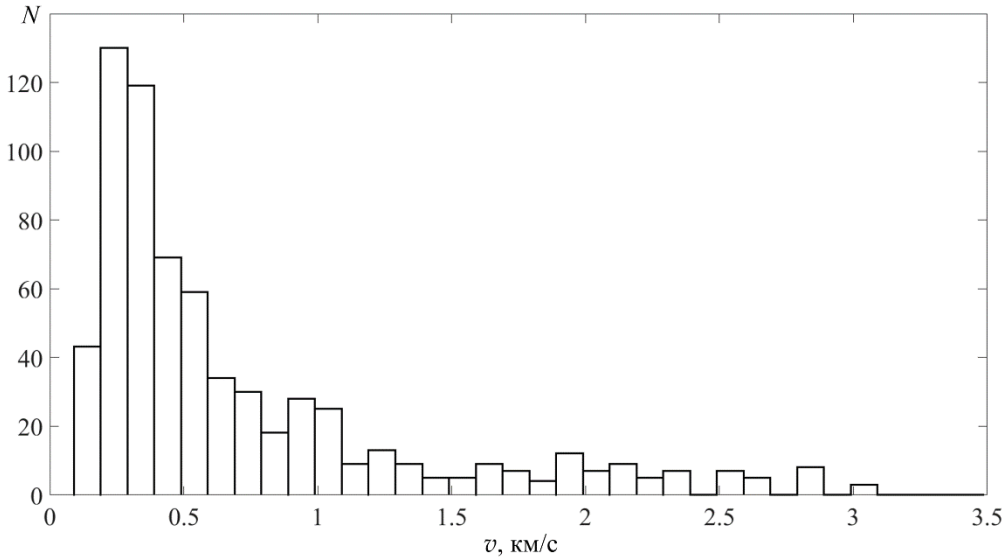


Рис. 4.14. Розподіл горизонтальних удаваних швидкостей збурень, що супроводжували старти ракет обох типів

4.3.4. Обговорення

Старти та польоти ракет, як правило, супроводжувалися значними змінами характеру варіацій ДС. Ці зміни залежали від стану атмосферно-космічної погоди, сезону, часу доби, висоти спостереження (частоти

радіохвилі, що застосовується для зондування) та типу ракети (її траєкторії та виду палива).

За даними гістограми, наведеної на рис. 4.14, можна виділити групи збурень з $v_0 \approx 100–200$ м/с; а також середні значення для більших швидкостей $v_1 \approx 390 \pm 23$ м/с; $v_2 \approx 0.97 \pm 0.10$ км/с; $v_3 \approx 1.28 \pm 0.13$ км/с; $v_4 \approx 1.68 \pm 0.13$ км/с та $v_5 \approx 2.07 \pm 0.13$ км/с.

Швидкість ~100–200 м/с мають повільні АГХ, які досить добре вивчені [178]. Швидкість v_1 змінюється в широких межах від ~200 до ~800 м/с та залежить від стану атмосферно-космічної погоди, сезону, часу доби, висоти спостереження, швидкості атмосферного вітру. У середньому $v_1 \approx 390 \pm 23$ м/с. Така швидкість описує АГХ техногенного походження [91].

Швидкості $v_2 \approx 0.97 \pm 0.10$ км/с та $v_3 \approx 1.28 \pm 0.13$ км/с, найчастіше, належать до аперіодичних збурень та пов’язані з поширенням ударно-хвильового збурення [91].

Наступна група збурень характеризується швидкостями поширення приблизно від 1.7 до 3 км/с. Очевидно, у цьому разі збурення переносяться за допомогою повільних МГД хвиль [91].

Найбільш швидкі збурення могли мати час запізнювання близько 10 хв, а $v \sim 8$ км/с. Швидше за все, такі збурення мають МГД природу.

Зазвичай усі збурення (крім ударно-хвильових) відносяться до квазіперіодичних. Період T становив ~5–20 хв, а амплітуда ДЗЧ $f_{da} \approx 0.1–0.3$ Гц. Результати оцінок δ_{Na} за формулою (3.1) наведено в табл. 4.5. Вважалося, що $L \approx 30$ км. З табл. 4.5 видно, що значення δ_N зазвичай лежали у межах 1–10% і рідко досягали значень ~20%.

До цього часу відома лише одна робота [190], де наведено статистичний аналіз реєстрацій 72 стартів ракет. У [190] знайдені наступні вдавані горизонтальні швидкості: 0.5–0.8 км/с, 1–6 км/с, 7–9 км/с та 15–20 км/с. Видно, що ці дані загалом близькі до даних, отриманих у цій роботі для 134 подій.

Таблиця 4.5.

Основні параметри сигналу й іоносфери

Дата	Час, UT	ДЗЧ, Гц	Період, хв	δ_{Na}, %
15 травня 2012 р.	03:45–05:54	0.15–0.30	8–12	1.5–4.5
19 жовтня 2016 р.	09:40–10:45	0.10	10–20	1.1–2.2
31 березня 2016 р.	17:43–18:37	0.15	10	2.2
28 жовтня 2021 р.	00:50–01:30	0.20–0.25	20–22	6–8.2
28 квітня 2014 р.	05:34–07:00	0.20–0.22	5–6	1.1–1.5
9 жовтня 2019 р.	12:35–13:55	0.10	10–12	1.5–1.8
6 серпня 2012 р.	19:50–21:20	0.30–0.60	20	9–18
20–21 вересня 2011 р.	23:10–00:33	0.15	10	1.7

4.4. Ефекти стартів ракет на фоні геокосмічних бур

Спроби виділити реакцію іоносфери на старти та польоти ракет на фоні геокосмічних бур робилися і раніше [99, 191]. Прояв збурень залежить від методу спостереження, оскільки різні радіофізичні методи реєструють різні параметри сигналу та досліджують різні іоносферні області. Встановлено, що реакція іоносфери на старти та польоти ракет суттєво залежить від стану атмосферно-космічної погоди. Можлива синергетична взаємодія ефектів стартів ракет та іоносферних бур, їхнє взаємне посилення. Як і слід було очікувати, ефекти іоносферних бур суттєво ускладнюють виділення ефектів стартів і польотів важких ракет. Ця проблема потребує досліджень. Для цього проведено багаторічні вимірювання та створено базу даних за 1991–2021 рр.

4.4.1. Стан космічної погоди

Перелік значень індексів, що описують стан космічної погоди для дня зі стартом ракети, а також у сусідні дні наведено у табл. 4.6. З неї видно, що K_p-індекс приймав значення 4–, 5–, 6 і 7–. Відповідно до класифікації [1, 2], таким значенням відповідають МБ наступних класів: вельми помірна, помірна, сильна та дуже сильна.

Таблиця 4.6.

Стан космічної погоди

Дата	Час СР, UT	Тип ракети	K_p	D_{st}		$F_{10.7}$	W
				min	max		
08.10.2019			1+ 1+ 1+ 1– 1– 1 2– 1	–10	4	67.0	0
09.10.2019	10:17:56	*Протон*	2– 2+ 2– 4– 1+ 2– 1 1+	–15	7	67.9	0
10.10.2019			1+ 4+ 4+ 2 1+ 3 1+ 2–	–27	7	67.3	0
02.06.2010			2 3– 1+ 1– 1+ 2– 1+ 2	–35	–17	76.1	18
03.06.2010	22:00:08	*Протон*	1+ 2– 2–3+ 2+ 2– 3– 3+	–28	–9	76.8	21
04.06.2010			5– 4 2 3+ 2– 1 1+ 2–	–53	–21	74.0	28
28.09.2011			4+ 5– 4+ 2+ 4– 3 2– 1+	–68	–32	134.0	109
29.09.2011	18:31:59	*Протон*	6– 5 4– 2 3 3– 3– 2–	–56	–29	137.0	128
30.09.2011			3 0+ 0 0+ 1– 1– 3 3	–35	1	138.5	116
07.12.2013			2 1 2– 0 0+ 0+ 2 3–	–8	17	152.3	89
08.12.2013	12:12	*Протон*	6 6– 4– 2 2 3+ 3 2–	–66	13	160.6	95
09.12.2013			1– 0 0 0+ 1+ 2 1+ 1+	–28	–14	163.1	142
08.07.2012			2– 2– 2– 3 2+ 3– 2+ 4+	–10	18	183.7	117
09.07.2012	18:38:30	*Протон*	5– 4– 4+ 4– 7– 5+ 3+ 4+	–78	–27	179.6	122
10.07.2012			4– 2 3– 4– 3– 2 2+ 2	–65	–23	179.2	107
27.09.2017			3 3– 5– 4 4– 4– 6– 6+	–44	41	91.3	37
28.09.2017	18:52	*Протон*	5+ 6+ 7– 5– 4– 4 4– 5–	–56	–24	91.2	42
29.09.2017			3 2+ 2+ 3– 3+ 2– 2 3–	–28	–4	90.0	42
01.04.2010			3+ 3 2 2– 3+ 3 1+ 3–	–24	–3	79.1	22

Таблиця 4.6. (продовження)

02.04.2010	04:04:33	*Союз*	3 3– 4– 3 2 2 3 3–	–33	–8	76.1	22
03.04.2010			3– 1+ 1+ 1 2 3+ 3– 2+	–23	–6	77.4	24
24.03.2014			2– 0 1– 1 1 1+ 1– 0	–10	5	157.7	137
25.03.2014	21:17:23	*Союз*	0+ 0+ 0+ 2– 2– 1+ 3 3+	–8	16	152.0	136
26.03.2014			4– 1+ 4– 1+ 1– 1– 2– 1	–23	–3	152.5	112
14.06.2010			1+ 1 1+ 1 1– 1– 1 1–	–14	4	75.1	14
15.06.2010	21:35:19	*Союз*	1– 1+ 2– 2+ 1+ 2+ 2+ 3	–10	17	72.3	0
16.06.2010			3+ 3+ 3 3+ 3 3+ 4– 3	–36	–13	73.9	0
24.09.2014			4– 4– 3– 4 4– 3+ 3 4	–40	–21	145.6	108
25.09.2014	20:25	*Союз*	4– 2+ 2+ 3– 2 2– 2+ 3	–30	–11	167.8	144
26.09.2014			3 3+ 3– 3– 4 3+ 2 3	–40	–13	171.0	165
14.12.2015			2 2 1– 1 3 4+ 5– 5+	–47	26	120.2	86
15.12.2015	11:03:09	*Союз*	5– 4– 2+ 2–3 3+ 1+ 3–	–38	–10	115.2	65
16.12.2015			4– 3 0+ 0+ 0 0+ 0+ 0+	–27	0	122.2	63
06.07.2016			0 0+ 0+ 1– 1– 1 1+ 3–	–3	21	79.7	13
07.07.2016	01:36:41	*Союз*	3– 3– 3– 3– 3+ 4+ 5– 4+	–17	21	86.1	25
08.07.2016			3+ 2+ 3+ 4– 4 4– 4 2+	–27	1	90.0	42

4.4.2. Результати спостережень ефектів старту ракети *Протон*

Вельми помірна МБ. Приклад часових варіацій ДС для денного старту ракети *Протон* 9 жовтня 2019 р. о 10:17:56 в умовах вельми помірної МБ ($K_{p\max}$ = 4–) наведено на рис. 4.15. Видно, що у день старту хвильова активність

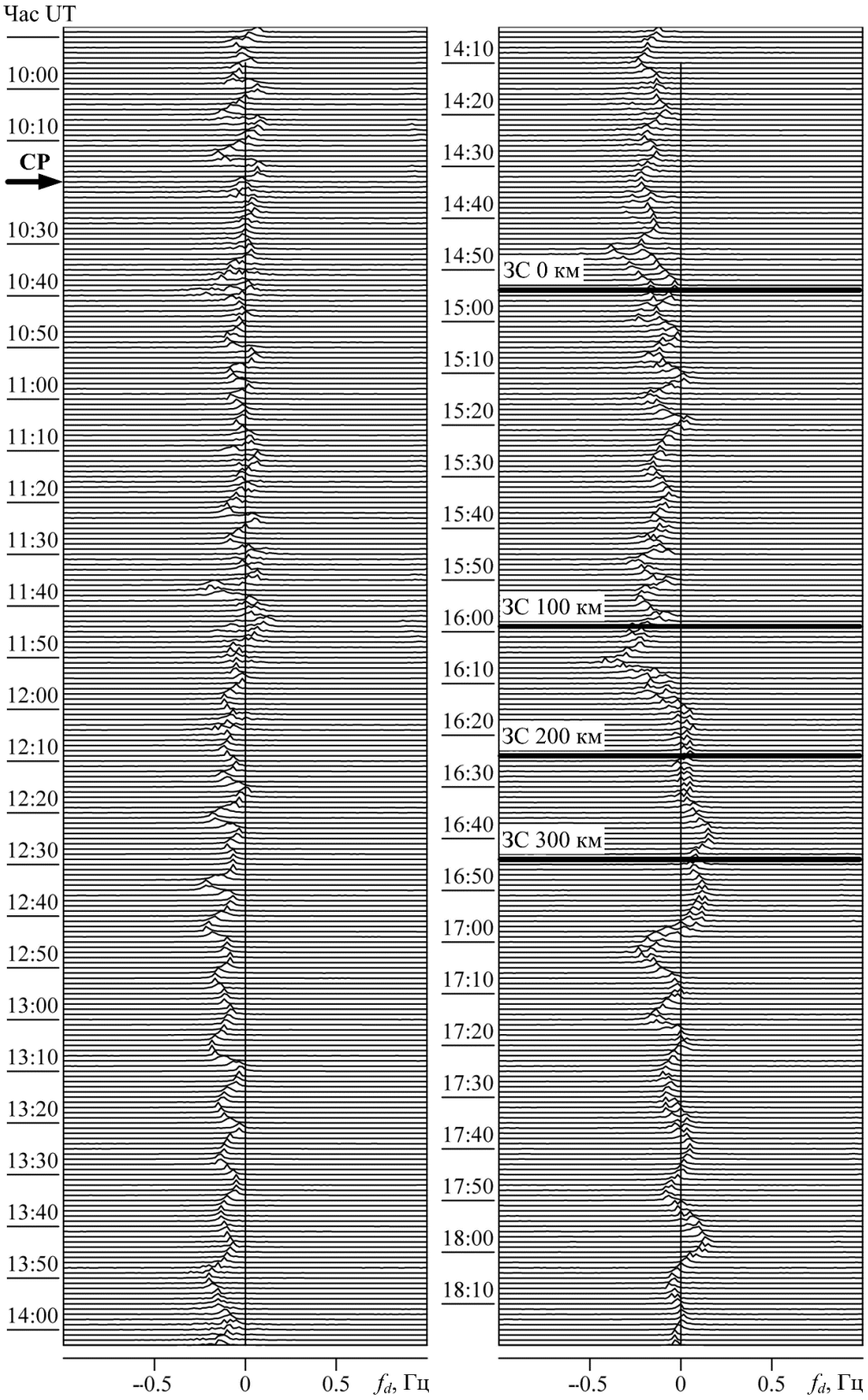


Рис. 4.15. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у денний час 9 жовтня 2019 р. о 10:17:56 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км. Тут і надалі ЗС – захід сонця

була досить високою і хвильові збурення спостерігалися безперервно. Їхня амплітуда f_{da} не перевищувала 0.15 Гц, період T становив 10–15 хв. Зміна характеру варіацій ДС спостерігалася з часом запізнювання Δt відносно момента старту ракети близько 22, 80, 137, 233 і 268 хв. Характер варіацій суттєво змінювався після заходу Сонця на висотах іоносфери (приблизно після 15:20).

Помірна МБ. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, що супроводжували нічний старт ракети *Протон* 3 червня 2010 р. о 22:00:08, наведено на рис. 4.16. Характер варіацій змінювався з наступними часами

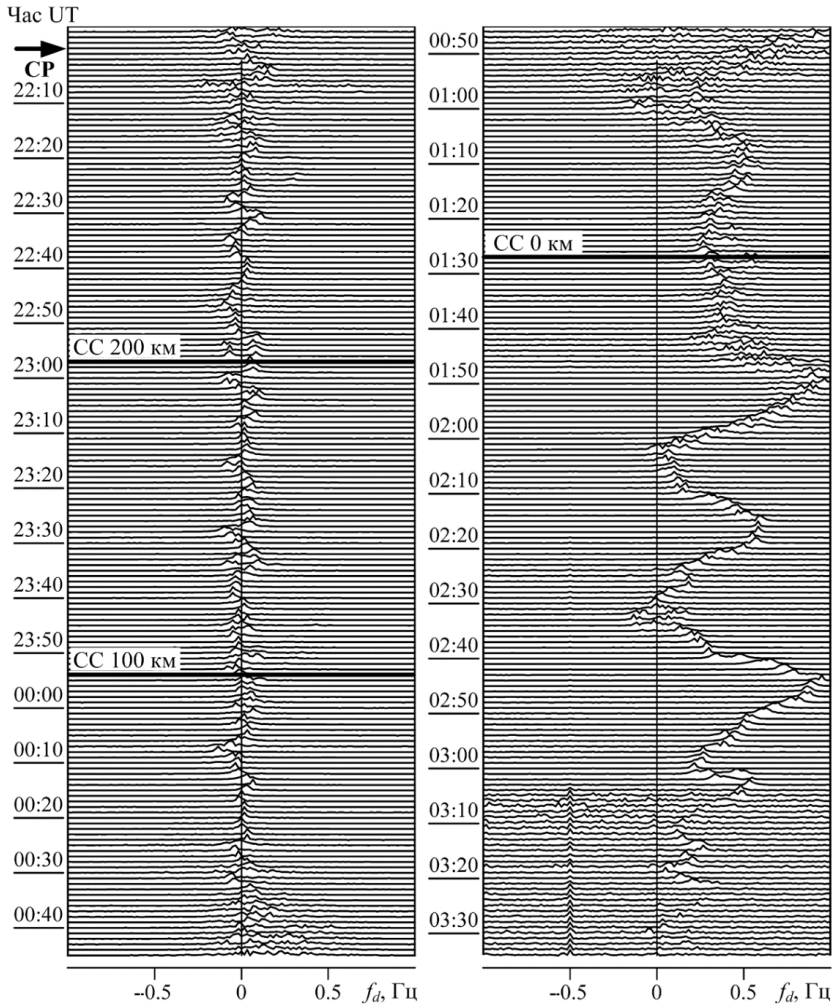


Рис. 4.16. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у нічний час 3 червня 2010 р. о 22:00:08 UT. Діапазон діючих висот 150–225 км (ліворуч) і 375–450 км (праворуч). Тут і надалі СС – схід сонця

запізнювання: 27, 52, 75 і 148 хв. Приблизно після 00:28 відбитий сигнал, поступово зміщуючись з діючих висот 150–225 км до висот 375–450 км, перестав реєструватися. Після 01:00 з'явився слабкий відбитий сигнал. Область відбиття поступово зміщувалася вниз і відбитий сигнал з діючих висот 150–225 км знову з'явився близько 01:48.

Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц протягом того ж часу показані на рис. 4.17. З рис. 4.17 видно, що характер варіацій змінювався з часами запізнювання близько 25, 50, 70 і 135 хв. Відбитий сигнал був відсутній у всіх каналах з 00:15 до 02:50.

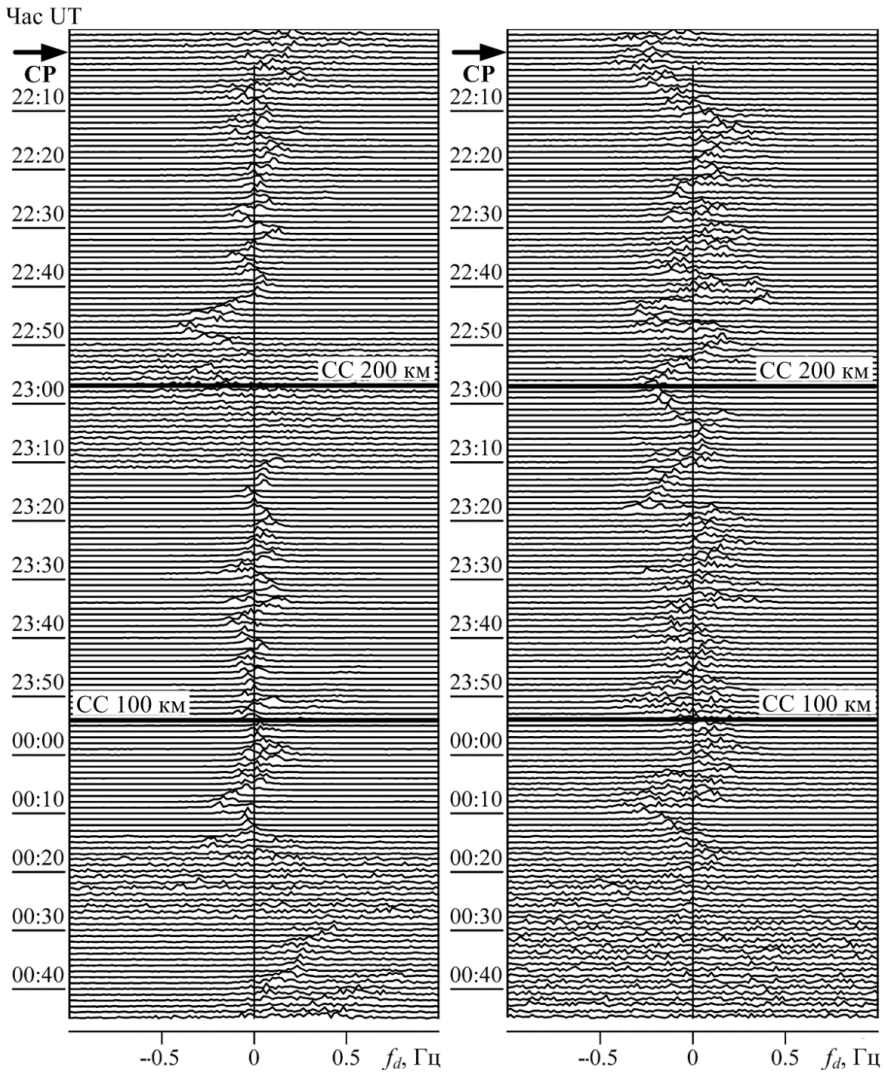


Рис. 4.17. Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у нічний час 3 червня 2010 р. о 22:00:08 UT. Діапазон діючих висот 150–225 км (ліворуч) і 375–450 км (праворуч)

Сильна МБ. Приклад часових варіацій ДС, які супроводжували нічний старт ракети *Протон* 29 вересня 2011 р. о 18:31:59, наведено на рис. 4.18. Протягом усього часу спостережень мало місце або розширення ДС, або їхнє «розсипання». Сильно змінювався період квазіперіодичних збурень ДС. Часто варіації були аперіодичними. На частоті 3.2 МГц зміни характеру варіацій спостерігалися через 10, 93 і 173 хв після старту ракети. На частоті 4.2 МГц вони дорівнювали 10, 84 і 170 хв.

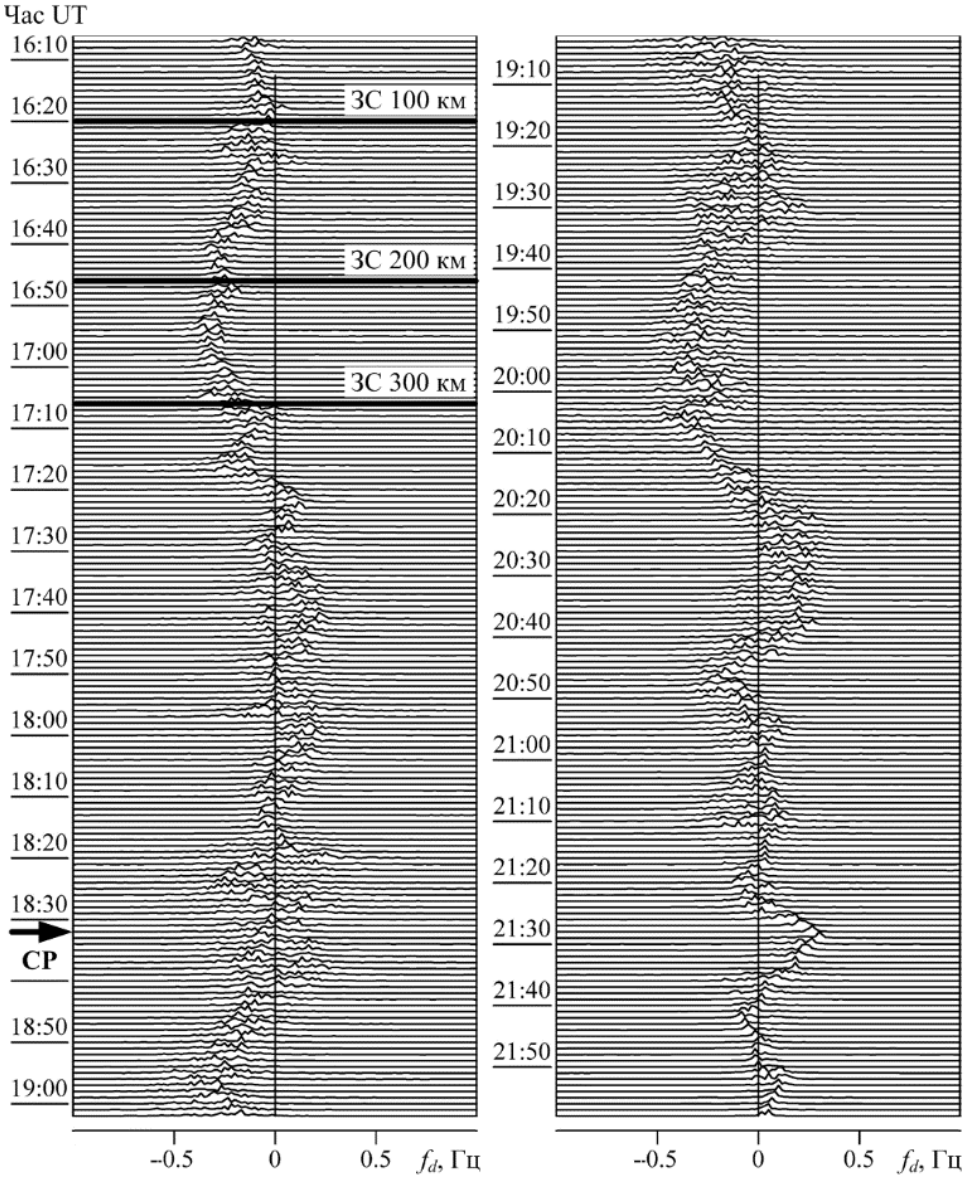


Рис. 4.18. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у нічний час 29 вересня 2011 р. о 18:31:59 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км

Сильна МБ. Приклад часових варіацій ДС, які реєструвалися впродовж вечірнього старту ракети *Протон* 8 грудня 2013 р. о 12:12, показано на рис. 4.19. Видно, що протягом усього часу спостереження хвильова активність була сильною: амплітуда f_{da} досягала 0.5–0.6 Гц, період $T \approx 10$ хв. Виявити зміну характеру варіацій важко. Імовірно, вона спостерігалася через 14, 48, 65, 107 і 130 хв після старту ракети. На можливі ефекти старту ракети наклалися ефекти вечірнього сонячного термінатора.

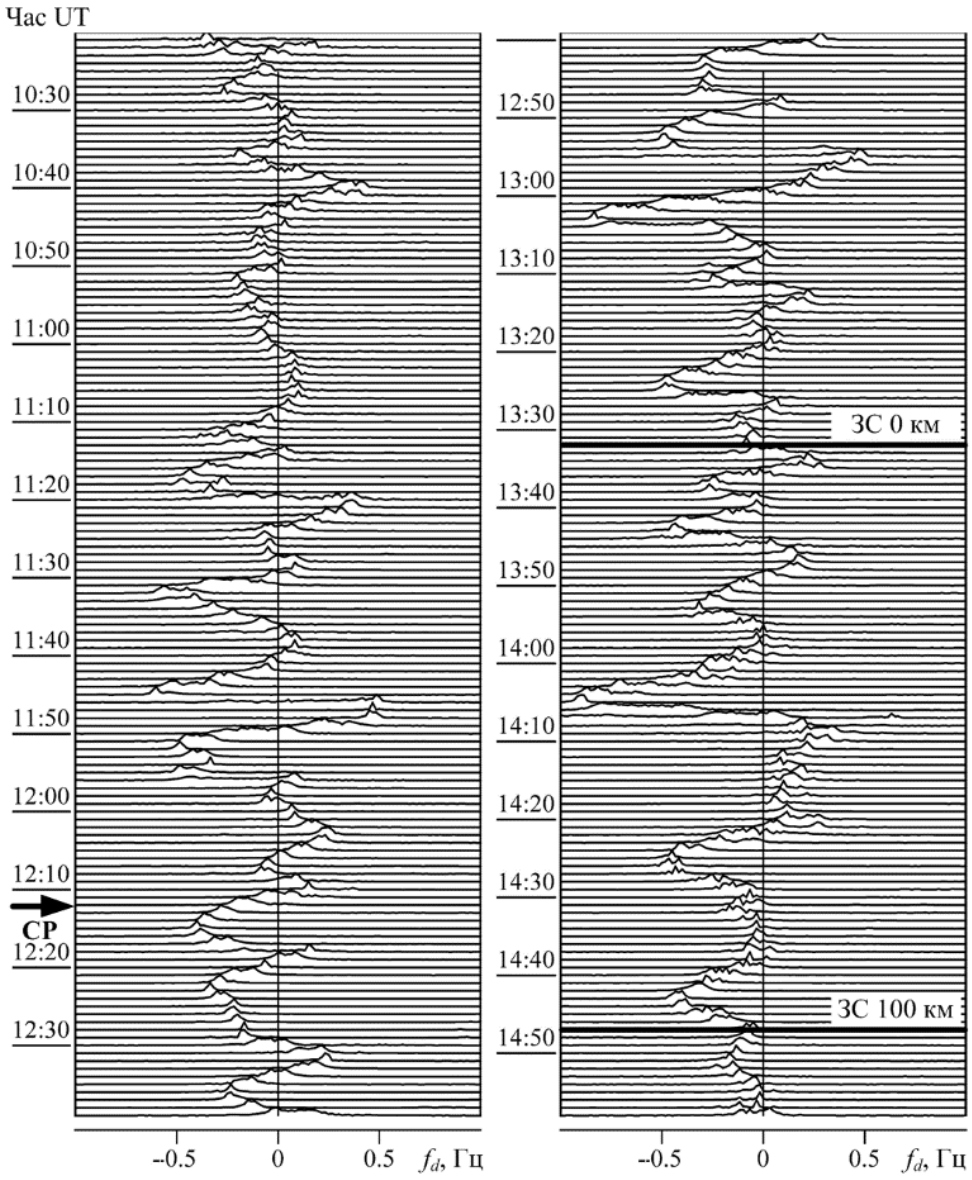


Рис. 4.19. Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у денний час 8 грудня 2013 р. о 12:12 UT. Діапазон діючих висот 225–300 км

Дуже сильна МБ. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, які супроводжували вечірній старт ракети *Протон* 9 липня 2012 р. о 18:38:30, наведено на рис. 4.20. Варіації ДС протягом усього часу спостережень були аперіодичними. Варіації ДЗЧ були значними: від –1 до 1 Гц. Ефекти від старту ракети та вечірнього термінатора наклалися. Можливо, що реакція на старт ракети відмічалася з часом запізнювання 14, 45 і 79 хв. Лише після 19:58 збурення стали квазіперіодичними з $T \approx 23$ хв і $f_{da} \approx 0.1$–0.3 Гц.

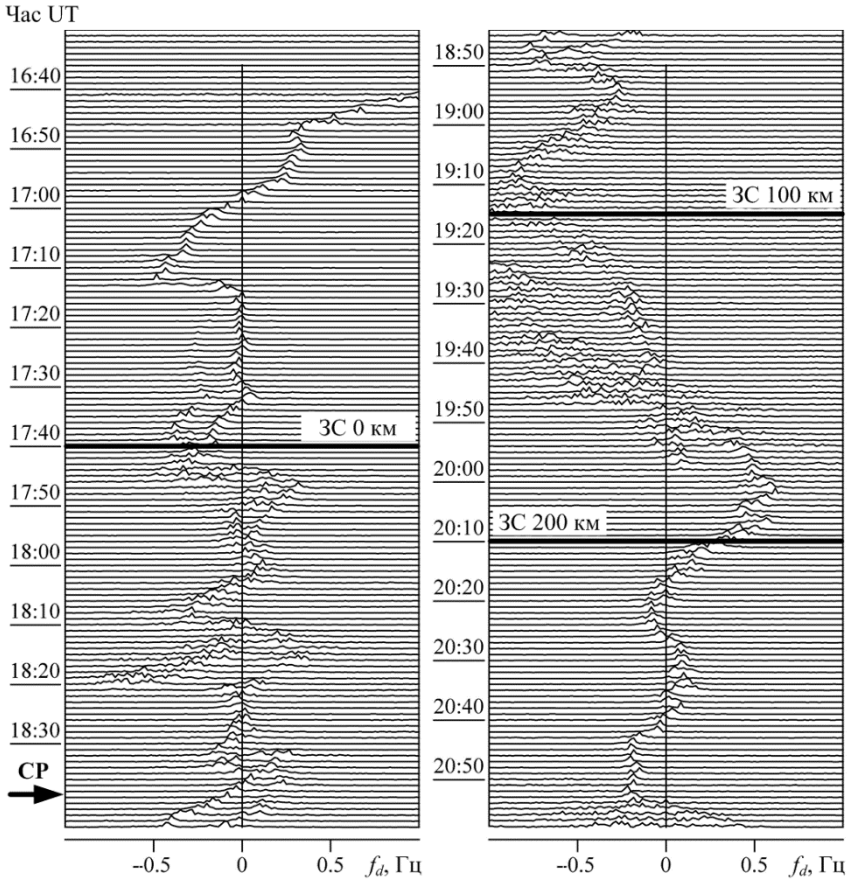


Рис. 4.20. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у вечірній час 9 липня 2012 р. о 18:38:30 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км

Дуже сильна МБ. Приклад часових варіацій ДС, що послідували за нічним стартом ракети *Протон* 28 вересня 2017 р. о 18:52, показано на рис. 4.21. Видно, що протягом всього часу спостереження мав місце ефект «розсипання» ДС. Часи запізнювання можливої реакції іоносфери на старт ракети становили 48, 118 і 208 хв. Амплітуда f_{da} досягала 0.5 Гц, а $T \approx 25$–30 хв.

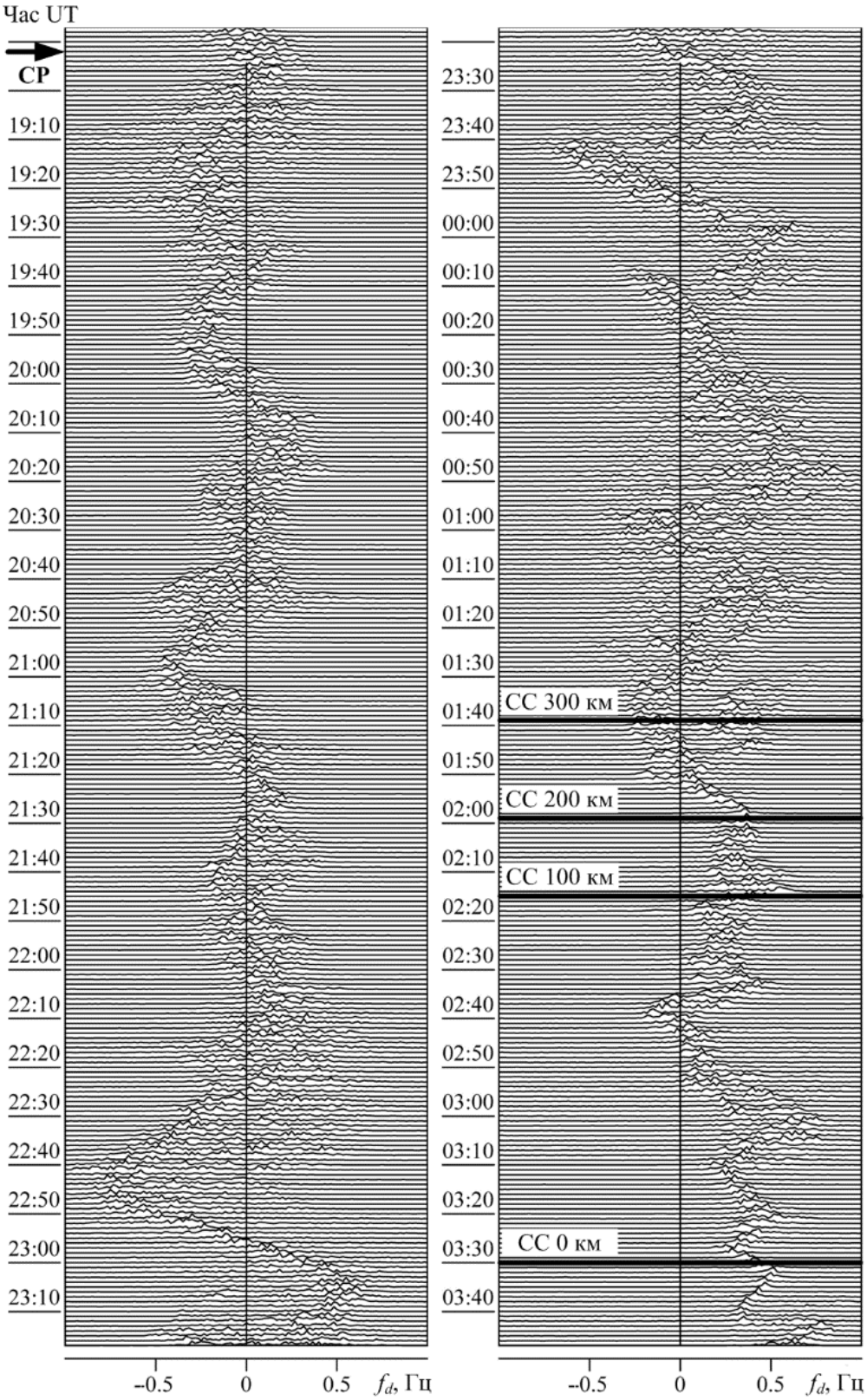


Рис. 4.21. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Протон* у вечірній час 28 вересня 2017 р. о 18:52 UT. Діапазон діючих висот 375–450 км

4.4.3. Результати спостережень ефектів старту ракети *Союз*

Вельми помірна МБ. Приклад часових варіацій ДС, які супроводжували старт ракети *Союз* у перехідний час доби 2 квітня 2010 р. о 03:04:33, наведено на рис. 4.22. До 03:20 сигнал на частоті 4.2 МГц через низькі значення N в нічний час у період глибокого мінімуму сонячної активності був відсутній. Майже протягом усього часу спостережень ДС залишалися практично одномодовими. Зміна характеру варіацій ДС відмічалася через 25, 117 і 161 хв після старту ракети.

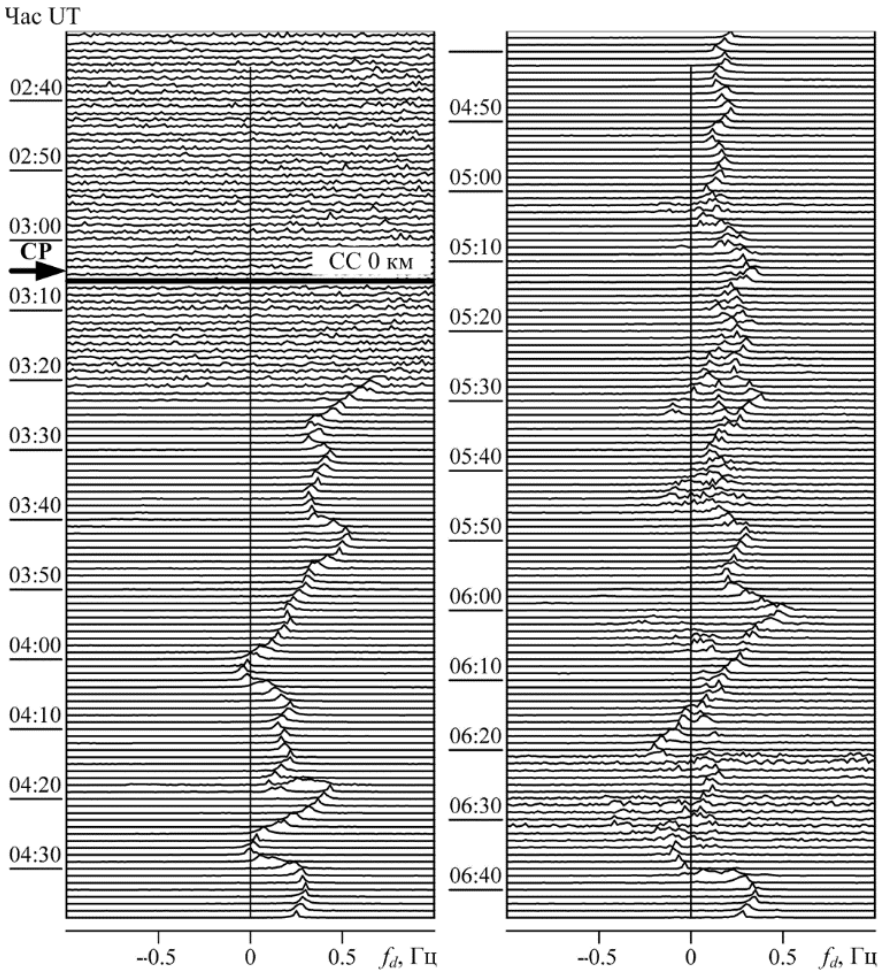


Рис. 4.22. Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Союз* у нічний час 2 квітня 2010 р. о 03:04:33 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км

Вельми помірна МБ. Приклад часових варіацій ДС у період, близький до весняного рівнодення, наведено на рис. 4.23. Ракета *Союз* стартувала 25 березня 2014 р. о 21:17:23. ДС залишалися більш-менш одномодовими лише в окремих інтервалах часу (з 21:00 до 22:10 25 березня 2014 р., з 02:27 до 03:47 26 березня 2014 р.). У решті інтервалів часу спостерігалося «розсипання» спектрів. Пошук реакції на старт ракети був ускладнений. Можливі часи запізнювання реакції іоносфери на старт космічного апарата становили 60, 103, 182 хв.

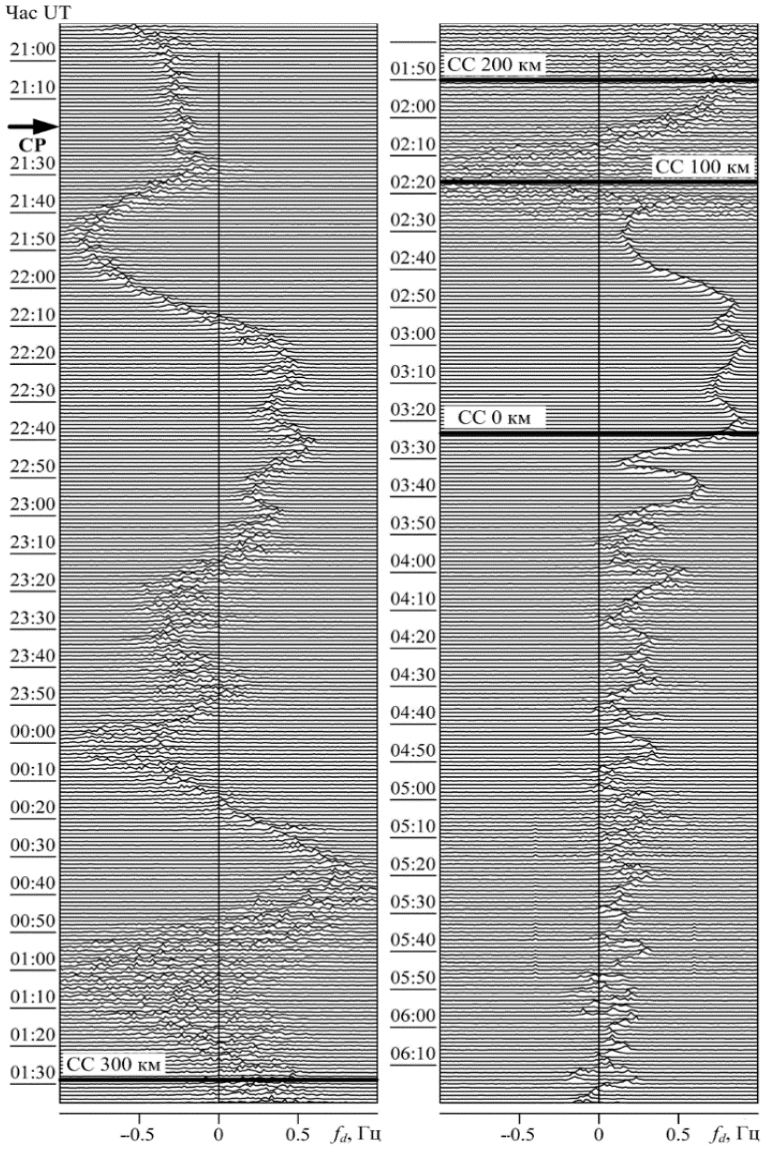


Рис. 4.23. Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Союз* у нічний час 25 березня 2014 р. о 21:17:23 UT. Діапазон діючих висот 375–450 км

Вельми помірна МБ. Нічний старт ракети *Союз* відбувся 15 червня 2010 р. о 21:35:19. Подія мала місце поблизу періоду літнього сонцестояння. При цьому Сонце на висотах понад 250 км не заходить. Приблизно до 22:00 відбитий сигнал на частотах 3.2 і 4.2 МГц був відсутній (рис. 4.24). Протягом усього часу існування ДС вони були уширеними, епізодично спостерігалося їхнє «розсипання». Ускладнено визначення часів запізнювання реакції на старт ракети. Можливо вона мала місце при $\Delta t \approx 24$, 73, 139 і 191 хв, якщо судити з варіацій ДС на частоті 3.2 МГц. На частоті 4.2 МГц ці часи становили 24, 66, 139 і 191 хв.

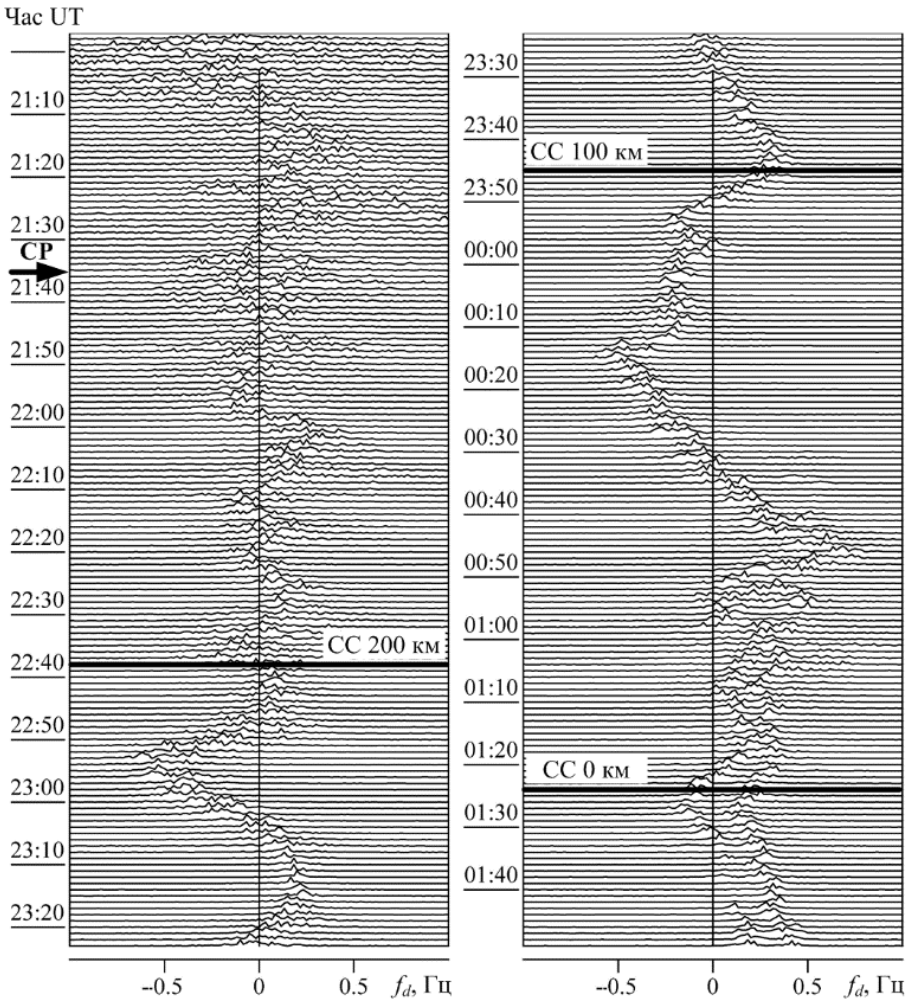


Рис. 4.24. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Союз* у нічний час 15 червня 2010 р. о 21:35:19 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км

Вельми помірна МБ. Нічний старт ракети *Союз* мав місце 25 вересня 2014 р. о 20:25, поблизу періоду осіннього рівнодення. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети, показано на рис. 4.25. Поведінка ДС була нерегулярною. В окремих інтервалах часу сигнал взагалі був відсутній. Після 02:20 він став більш-менш регулярним. Визначення реакції іоносфери на запуск космічного апарата було ускладнено.

Поведінка ДС на частоті 4.2 МГц була схожою.

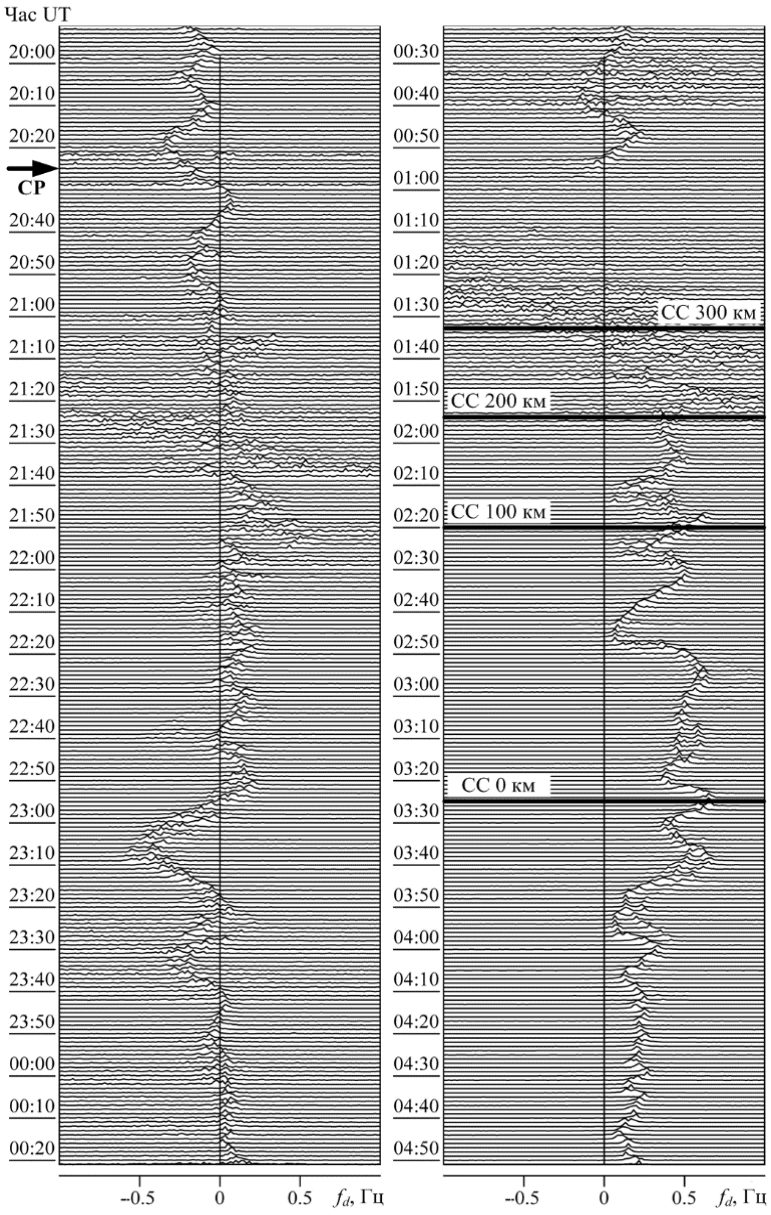


Рис. 4.25. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Союз* у нічний час 25 вересня 2014 р. о 20:25 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км

Сильна МБ. Приклад часових варіацій ДС, що послідували за денним стартом ракети *Союз* 15 грудня 2015 р. о 11:03:09, тобто поблизу періоду зимового сонцестояння, показано на рис. 4.26. Можна бачити, що хвильова активність була високою. Це властиво всім грудневим вимірам. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ після старту ракети збільшилася від 0.20–0.25 до 0.4–0.5 Гц. Квазіперіод суттєво не змінився і становив близько 10 хв. Зміна характеру сигналу мала місце з часами запізнювання близько 11, 62, 103 і 150 хв.

Сильна МБ. Приклад часових варіацій ДС у нічний час поблизу періоду літнього сонцестояння наведено на рис. 4.27. Ракета *Союз* стартувала 7 липня 2016 р. о 01:36:41. Приблизно з 01:00 і до 02:45 варіації ДС відрізнялися нерегулярністю. В інтервалі часу 02:45–04:00 вони були більш-менш регулярними, після чого знову стали нерегулярними. Зміни характеру варіацій ДС спостерігалися через 29, 69 і 109 хв після старту ракети.

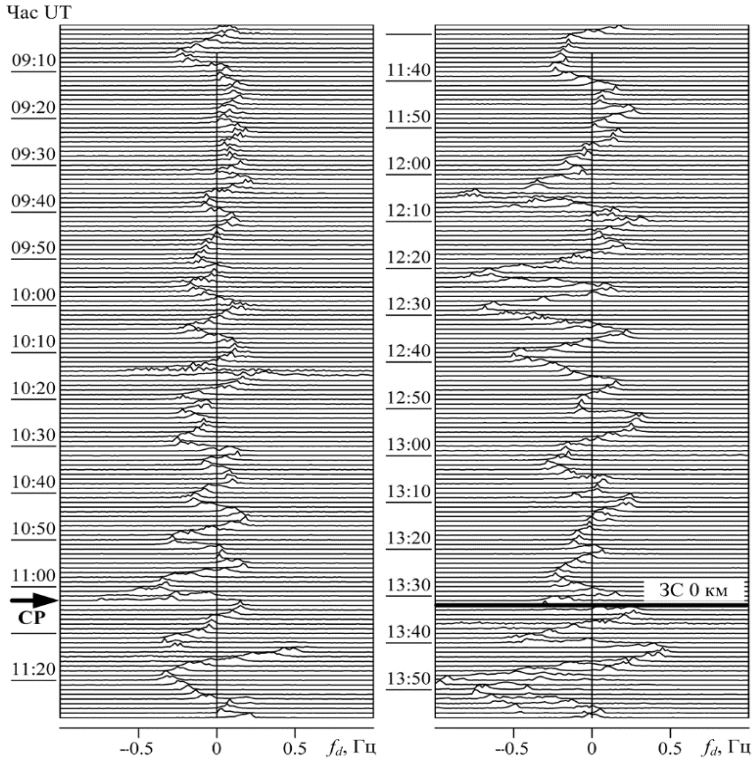


Рис. 4.26. Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Союз* у денний час 15 грудня 2015 р. об 11:03:09 UT. Діапазон діючих висот 225–300 км

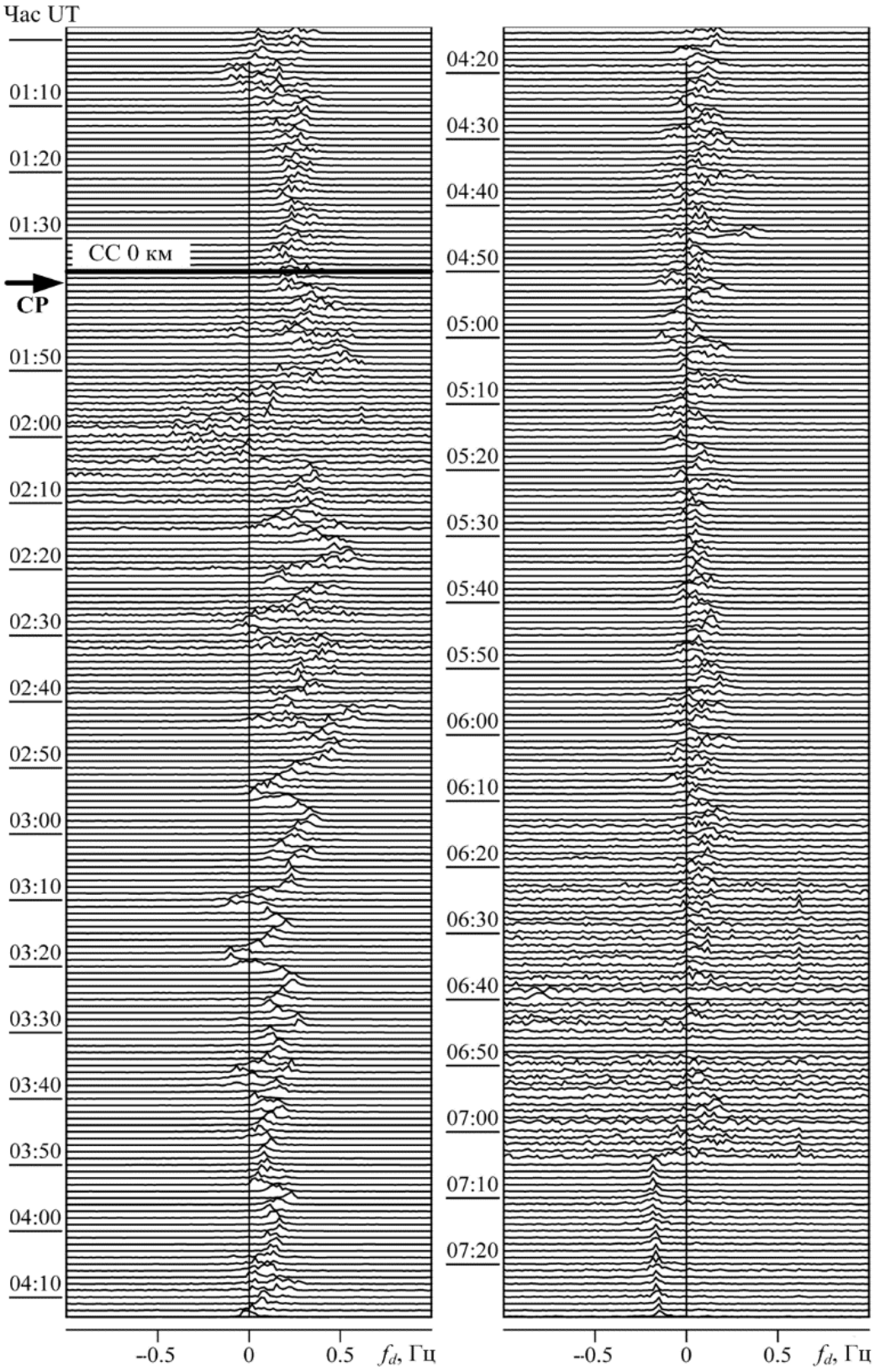


Рис. 4.27. Часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц, що послідували за стартом ракети *Союз* у нічний час 7 липня 2016 р. о 01:36:41 UT. Діапазон діючих висот 300–375 км

4.4.4. Обговорення

Розглянемо вплив ІБ на ефекти, що викликаються стартами ракет в іоносфері.

Протягом 24-го циклу сонячної активності стартувала 81 ракета *Союз* і 53 ракети *Протон*. Для ракети *Союз* старт супроводжувався у 20 випадках МБ, а у 23 випадках – магнітним збуренням з індексом $K_{p\max} = 3$. Для ракети *Протон* відповідно 13 і 12 випадків. Для інших дат індекс K_p змінювався від 0 до 2.

Старт ракети Протон 9 жовтня 2019 р. Вельми помірна МБ ($K_{p\max} = 4$–) практично не вплинула на часові варіації ДС у денний час (див. рис. 4.15). Часам запізнювання $\Delta t = 22$, 80, 137, 233 і 268 хв відповідають горизонтальні вдавані швидкості v', які дорівнюють 2.35 км/с, 530, 300, 175 і 150 м/с. Найменші значення v' близькі до 175 і 150 м/с не пов’язані зі стартом ракети, вони зумовлені дією на іоносферу вечірнього сонячного термінатора.

Старт ракети Протон 3 червня 2010 р. Помірна МБ ($K_{p\max} = 5$–) практично не вплинула на часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц і в нічний час (див. рис. 4.16). Значенням часових затримок, що дорівнюють 27, 52, 75 і 148 хв, відповідають наступні значення v': 1.8 км/с, а також 850, 570 і 280 м/с.

Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц дуже відрізнялися від упорядкованих варіацій ДС на частоті 3.2 МГц (див. рис. 4.17). Більшу частину часу спостерігався ефект «розсипання» ДС. Часи запізнювання були близькі до 25, 50, 70 і 135 хв. Важливо, що ці часи були меншими, ніж на частоті 3.2 МГц. Їм відповідали швидкості близько 2 км/с, а також 890, 615 і 310 м/с, котрі перевищували швидкості, обчислені з вимірювань на частоті 3.2 МГц. Це підтверджує той факт, що збурення викликані саме стартами ракет і поширювалися вздовж іоносфери в напрямку обсерваторії. Справа в тому, що радіохвиля з більшою частотою відбивається вище, де швидкості поширення більше.

Старт ракети Протон 29 вересня 2011 р. Сильна МБ ($K_{p\max}$ = 6–) суттєво вплинула на ДС на частотах 3.2 і 4.2 МГц. Увесь час спостереження відмічався ефект «розсипання» ДС (див. рис. 4.18). Варіації ДС були скоріше аперіодичними. Визначення часів запізнювання дуже ускладнено. Можливо, що на частотах 3.2 і 4.2 МГц вони становили 10, 93 і 173 хв, а також 10, 84 і 170 хв. Їм відповідали вдавані швидкості близько 8 км/с, 455 і 238 м/с, а також 8 км/с, 506 і 242 м/с. Співвідношення другої та третьої швидкостей дозволяє стверджувати, що вони пов'язані зі стартом ракети.

Старт ракети Протон 8 грудня 2013 р. На відміну від інших сезонів узимку, точніше у грудні, значно посилюється хвильова активність (див. рис. 4.19, 4.26). До того ж, у день старту ракети реєструвалася сильна МБ ($K_{p\max}$ = 6). Все це дуже ускладнило пошук реакції іоносфери на старт ракети. Приблизно після 13:30 додався вплив вечірнього сонячного термінатора (див. рис. 4.19). Можливі часи запізнювання реакції іоносфери на старт космічного апарата склали 14, 48, 65, 107 і 130 хв, чому відповідають удавані швидкості 4.4 км/с, а також 930, 670, 390 і 320 м/с.

Старт ракети Протон 9 липня 2012 р. Дуже сильна МБ ($K_{p\max}$ = 7–) істотно вплинула на характер варіацій ДС (див. рис. 4.20). До того ж наклався вплив вечірнього сонячного термінатора. Усе це ускладнювало виявлення реакції іоносфери на старт ракети. Можливо, що ця реакція спостерігалася через 14, 45 і 79 хв після події, чому відповідають удавані швидкості 4.4 км/с, а також 1000 і 540 м/с.

Старт ракети Протон 28 вересня 2017 р. Вплив дуже сильної МБ був значним: весь час спостереження відмічався ефект «розсипання» ДС, квазіперіодичні варіації ДС досягали 0.5 Гц, а період – 25–30 хв (див. рис. 4.21). Хвильові збурення з такими параметрами викликаються МБ. При цьому на широті ~ 70° генеруються АГХ, котрі поширюються в екваторіальному напрямку. Визначення реакції іоносфери на старт космічного апарата дуже ускладнено. Зміна характеру варіацій мала місце через 48, 118 і 208 хв після старту ракети, чому відповідає вдавана швидкість близько 930,

350 і 200 м/с. Мабуть, найменша з них не пов’язана зі стартом космічного апарата. Вплив ранкового сонячного термінатора почав проявлятися значно пізніше, приблизно після 01:00.

Старт ракети Союз 2 квітня 2010 р. Вельми помірна МБ ($K_{p\max}$ = 4–) практично не вплинула на стан нічної іоносфери та часові варіації ДС (див. рис. 4.22). Після старту ракети в місці спостереження тривали ефекти, спричинені ранковим сонячним термінатором. Загалом часові варіації ДС були нерегулярними. Можливі часи запізнювання реакції іоносфери на старт ракети становили 25, 117 і 161 хв. Їм відповідали наступні значення v': 2 км/с, 360 і 255 м/с.

Старт ракети Союз 25 березня 2014 р. Незважаючи на те, що МБ належала до вельми помірних ($K_{p\max}$ = 4–), нічна іоносфера поблизу періоду весняного рівнодення була збурена. Найчастіше спостерігався ефект «розсипання» ДС (див. рис. 4.23). Причина аномально великих варіацій ДЗЧ (від –0.9 до 0.9 Гц) криється у близькості частоти радіохвилі до критичної частоти шару F_2 іоносфери в нічний і перехідний час доби. Усе це ускладнило виявлення реакції на старт космічного апарата. Якщо прийняти, що значення Δt дорівнювали 60, 103 і 182 хв, то отримаємо, що v' близько до 730, 410 і 225 м/с.

Старт ракети Союз 15 червня 2010 р. Подія мала місце поблизу періоду літнього сонцестояння та періоду глибокого мінімуму сонячної активності. ДС зазнавали нерегулярних варіацій, які навряд чи могли бути зумовлені вельми помірною МБ ($K_{p\max}$ = 4–) (див. рис. 4.24). Можливі часи запізнювання на частотах 3.2 і 4.2 МГц, які дорівнюють 24, 139 і 191 хв, збіглися. Це означає, що варіації ДС викликані іншим джерелом. За Δt, яке дорівнювало 73 і 66 хв для частот 3.2 і 4.2 МГц відповідно маємо v' близько 590 і 655 м/с. Таке співвідношення швидкостей дозволяє стверджувати, що збурення зумовлене стартом ракети та переносилося воно за допомогою АГХ.

Старт ракети Союз 25 вересня 2014 р. Подія мала місце у нічний час поблизу періоду осіннього рівнодення. І хоча МБ відносилася до вельми помірних ($K_{p\max}$ = 4–), іоносфера, а отже і ДС були сильно збуреними (див. рис. 4.25). Регулярний характер у поведінці ДС став спостерігатися після 02:20, але пов'язаний він не зі стартом ракети, а з рухом ранкового сонячного термінатора. Зміна характеру варіацій ДС на частотах 3.2 і 4.2 МГц наставала практично синхронно. Можливі значення Δt становили 18, 60, 90, 145 і 190 хв. Усі значення, крім $\Delta t \approx 18$ хв, не пов'язані зі стартом ракети. За Δt = 18 хв маємо $v' \approx 3$ км/с. Така швидкість не відноситься до АГХ, а тому не залежить від висоти відбиття радіохвилі, а отже і від її частоти.

Старт ракети Союз 15 грудня 2015 р. Ефекти помірної МБ ($K_{p\max}$ = 5–) наклалися на ефекти, властиві іоносфері у грудні (див. рис. 4.26). Зміни характеру часових варіацій ДС відмічалися приблизно за 11, 62, 103 і 150 хв після старту ракети, чому відповідають удавані швидкості близько 6.7 км/с, а також 700, 410 і 275 м/с.

Старт ракети Союз 7 липня 2016 р. Старт стався у перехідний час доби. На можливі ефекти від старту наклалися ефекти ранкового сонячного термінатора та помірної МБ ($K_{p\max}$ = 5–). Варіації ДС часто мали хаотичний характер, що ускладнило пошук реакції іоносфери на запуск космічного апарата. Можливо, вона спостерігалася з часом запізнювання, що дорівнює 29, 69 і 109 хв. Тоді v' становить 1.67 км/с, а також 625 і 385 м/с.

Таким чином, МБ, сонячний термінатор та інші високоенергетичні джерела можуть значно маскувати іоносферні ефекти стартів і польотів великих ракет. У разі наявності магнітних збурень з індексом $K_{p\max} \leq 3$, вельми помірних та помірних МБ найчастіше вдається впевнено виділити реакцію іоносфери на запуски космічних апаратів. При збільшенні індексу $K_{p\max}$ це зробити все складніше. Надійність визначення реакції залежить не тільки від інтенсивності МБ та ІБ, а й від сезону року, часу доби, типу ракети, наявності інших джерел збурення.

При стартах ракет спостерігалося декілька груп горизонтальних удаваних швидкостей: 1.7–3 км/с і більше, 700–1000, 300–700 і 150–260 м/с. Перша група, мабуть, має швидкість повільних МГД хвиль. Вона визначається не завжди. Швидкість 700–1000 м/с властива ударним хвилям густини в атмосфері [91], швидкість 300–700 м/с типова для АГХ техногенного походження [91], а найменша швидкість властива АГХ природного походження [178]. Подібні групи швидкостей спостерігалися і раніше авторами [91].

Під час негативних іоносферних бур концентрація електронів N у F-області іоносфери може зменшуватися до 10 разів. При цьому радіохвилі з частотою більше 3 МГц перестають відбиватися від іоносфери. Для дослідження ефектів стартів ракет слід використовувати радіохвилі з частотою ~1.5–2 МГц. Під час позитивних іоносферних бур N у F-області іоносфери, навпаки, збільшується до 2–5 разів. Для зондування іоносфери ефективними є радіохвилі з частотою 3–6 МГц. При цьому менша частота відбивається від E-області, а більша – від F-області іоносфери.

Для охоплення всіх можливих геофізичних станів іоносфери рекомендується одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5–2 до 4–6 МГц.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Проаналізовано параметри іоносферних збурень, що послідували за стартами 81 ракети *Союз* та 53 ракет *Протон* з космодрому Байконур у 2009–2021 рр.

2. Підтверджено, що існує декілька груп часів запізнювання можливої реакції іоносфери на старт і політ ракет. Значення цих часів змінювалися в широких межах (від ~10 до ~300 хв).

3. Групам часів запізнювання відповідає декілька груп удаваних горизонтальних швидкостей поширення збурень (~100–200 м/с; 390 ± 23 м/с;

0.97 ± 0.10 км/с; 1.28 ± 0.13 км/с; 1.68 ± 0.13 км/с; 2.07 ± 0.13 км/с, а також ~8 км/с). Такі швидкості мають повільні АГХ, АГХ техногенного походження, ударні хвилі густини, повільні та звичайні МГД хвилі.

4. Виникаючі збурення (крім ударно-хвильових), як правило, були квазіперіодичними. Період становив від ~5 до ~20 хв, а амплітуда ДЗЧ – 0.1–0.3 Гц.

5. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів зазвичай становила ~1–10%, рідше досягала ~20%.

6. Встановлено, що виявлення реакції іоносфери на віддалений на ~ 2000 км старт і політ великої ракети на фоні геокосмічної бурі допплерівським методом зазвичай можливе за індексу $K_{p\max} \leq 5$, а за більших його значень дуже ускладнено або взагалі неможливе.

7. Продемонстровано, що у ряді випадків навіть за індексу $K_{p\max} = 4$ визначення реакції ускладнено.

8. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети допплерівський радар повинен одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5–2 до 4–6 МГц.

9. Підтверджено існування декількох груп горизонтальних удаваних швидкостей поширення збурень: 1.7–3 км/с і більше, 700–1000, 300–700, 150–260 м/с.

РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ НА ІОНОСФЕРУ ПОТУЖНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Метою цього розділу є аналіз особливостей генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного стенда декаметрового діапазону поблизу мінімуму сонячної активності за наявності слабкої та помірної магнітних бур.

Результати цього розділу опубліковано в роботі [192].

5.1. Нагрівний стенд «Сура»

Географічні координати стенду «Сура»: 56°09' пн. ш., 46°06' сх. д. Під час експериментів, що розглядаються в роботі, два або три модулі стенда працювали синфазно. Максимальна ефективна потужність *PG* випромінювання хвилі накачки змінювалася в межах 25–80 МВт. У всіх експериментах діаграма спрямованості антени стенда була нахилена на південь на 12°. Використання у вимірюваннях хвиль звичайної поляризації призводило до посилення генерації штучних іоносферних збурень за рахунок ефекту магнітного зеніту, коли радіохвиля з урахуванням її рефракції в іоносфері поширюється вздовж силових ліній геомагнітного поля на рівні верхнього гібридного резонансу, що викликало посилення її взаємодії з плазмою та призводило до більш ефективного нагріву [125].

5.2. Методи обробки даних

Для реєстрації іоносферних збурень, викликаних нагрівом іоносфери потужним радіовипромінюванням стенда «Сура», використовувався радар вертикального допплерівського зондування, що знаходиться на відстані 960 км від стенда (див. п.1.4.3).

Під час експериментів вимірювання виконувалися на частотах зондування 3200 і 4200 кГц. Сигнал на частоті 4200 кГц регулярно піддавався дії завади, тому в роботі представлені результати вимірювань для радіохвилі з f = 3200 кГц.

Аналіз динамічних спектрів показав, що сигнал, як правило, мав одномодову структуру, і ця мода відповідала звичайній хвилі. Одномодова структура сигналу дозволила отримати часові залежності варіацій ДЗЧ $f_d(t)$.

Для аналізу отриманих даних в якості додаткової інформації залучалися часові залежності нормованої амплітуди відбитого сигналу, а також дані розташованого поруч цифрового іонозонда. Критична частота fo$F2$ у денний час змінювалася в межах 5–6 МГц, а частота $f_{\min}$ – в межах 2.0–2.5 МГц. Діюча висота z' для звичайної хвилі варіювала в межах 300–350 км.

5.3. Стан космічної погоди

За фонового значення концентрації n_{sw} заряджених частинок у сонячному вітрі близько $5\cdot10^6$ м$^{-3}$ 24 і 27 серпня 2021 р. спостерігалося збільшення до $20\cdot10^6$ м$^{-3}$ і $24\cdot10^6$ м$^{-3}$ відповідно (рис. 5.1).

Швидкість частинок у сонячному вітрі 25–27 серпня 2021 р. збільшувалася від ~ 300 км/с до 400–415 км/с. Цієї ж доби температура частинок T_{sw} збільшувалася від $(0.1–0.2)\cdot10^5$ К до $1.3\cdot10^5$ К. Збільшення n_{sw} і T_{sw} призводило до збільшення тиску в сонячному вітрі від 2.0 до 4.0–6.4 нПа.

Компоненти міжпланетного магнітного поля флуктуювали в межах від –5.9 до 5.6 нТл (для B_y-компоненти) і від –6.9 до 5.4 нТл (для B_z-компоненти). Мінімальне значення B_z-компоненти спостерігалося на початку доби 25 серпня 2021 р. На той час K_p-індекс виріс до 3.3, а D_{st}-індекс зменшився від ~ 10 до –50 нТл. Виникла слабка магнітна буря, яка релаксувала протягом двох діб. Приблизно після 08:00 UT 27 серпня 2021 р. K_p-індекс збільшився до 4.0–

4.3, а D_{st}-індекс почав стрімко зменшуватися до –82 нТл. Спостерігалася помірна магнітна буря.

Значення енергії, переданої сонячним вітром магнітосфері, під час магнітних бур збільшувалися від 1–2 до 5.0–5.5 ГДж/с.

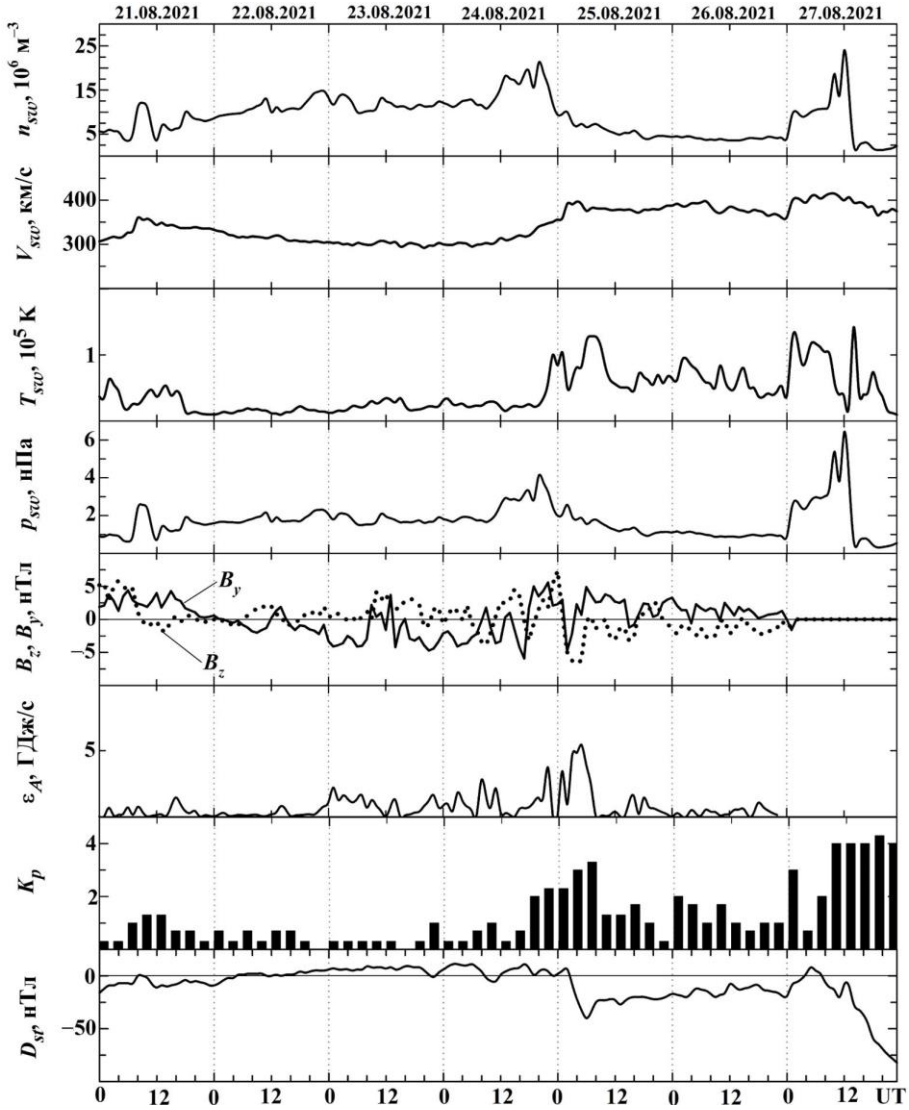
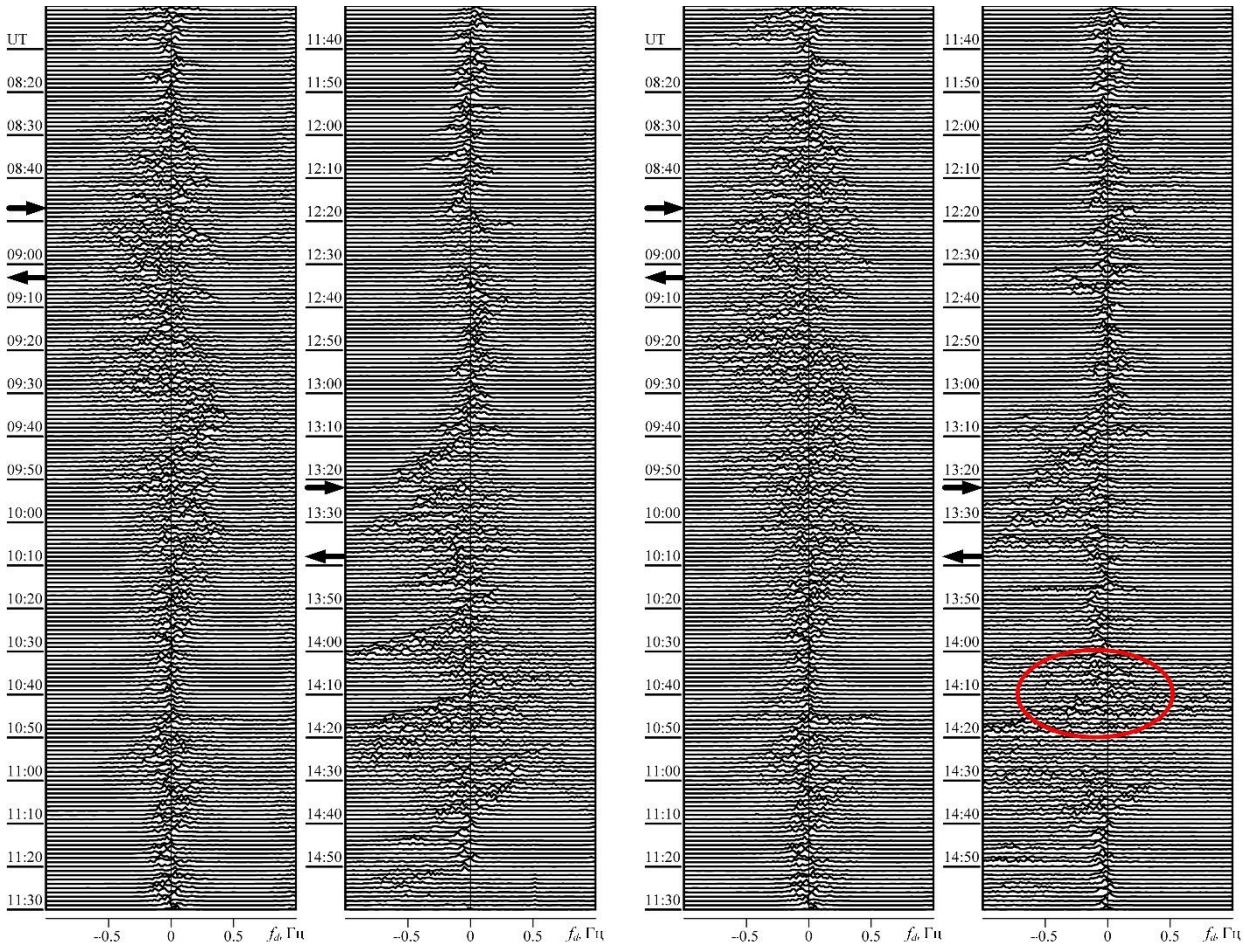


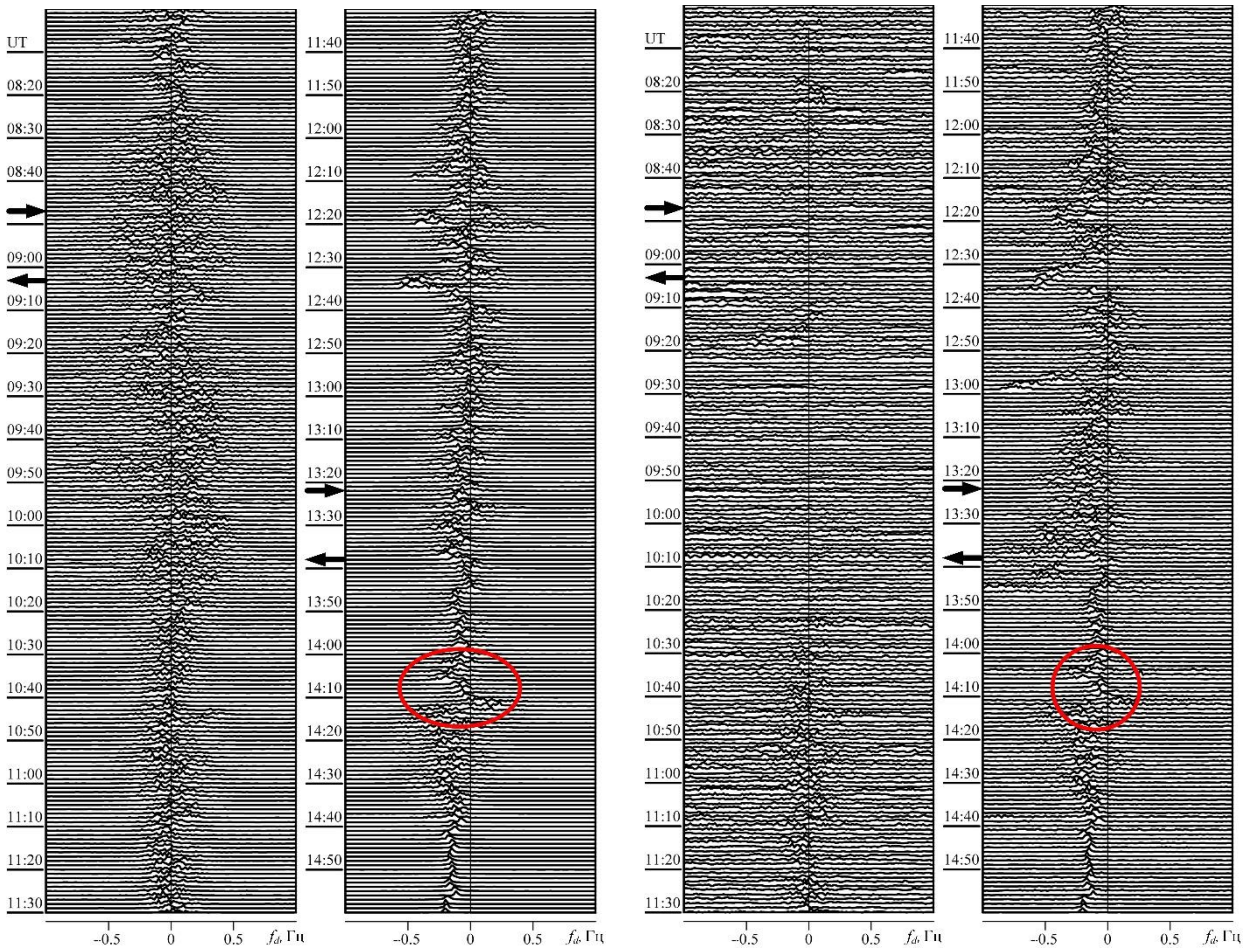
Рис. 5.1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряних концентрацій частинок n_{sw}, температури T_{sw}, радіальної швидкості V_{sw} і розрахованого динамічного тиску p_{sw}, виміряних компонент B_z і B_y міжпланетного магнітного поля, розрахованих значень енергії ε_A, переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p-індексу та D_{st}-індексу (за даними https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html) у період 21–27 серпня 2021 р.

5.4. Результати аналізу даних вертикального зондування

Розглянемо спочатку варіації ДС під впливом на іоносферну плазму моноімпульсу. Моноімпульс вмикався тричі: 25 серпня 2021 р. – з 08:47 до 09:03 і з 13:22 до 13:38; 27 серпня 2021 р. – з 13:04 до 13:20. Спостереження за варіаціями ДС при першому ввімкненні моноімпульсу виявилося неможливим через ефект розсипання спектра (рис. 5.2). При другому ввімкненні моноімпульсу тривалістю 16 хв в інтервалі часу 14:00–16:00 спостерігалися значні знакозмінні варіації ДЗЧ з амплітудою $f_{da} \approx 0.25$–0.30 Гц. Важливо, що ефективна потужність *PG* у цьому випадку становила всього 25 МВт.



а *б*



в *г*

Рис. 5.2. Часові варіації ДС при моноімпульсному впливі 25 серпня 2021 р.: *а* – z' = 75–150 км; *б* – z' = 150–225 км; *в* – z' = 225–300 км; *г* – z' = 300–375 км. Стрілками тут і далі показані моменти ввімкнення (→) та вимкнення (←) нагрівного стенда

27 серпня 2021 р. варіації ДС під впливом моноімпульсу спостерігалися в інтервалі часу 13:48–14:04 (рис. 5.3). Амплітуда варіацій досягала 0.15–0.16 Гц, ефективна потужність *PG* – приблизно 80 МВт.

Далі розглянемо періодичний режим радіовипромінювання. Нагрівний стенд працював з 13:30 до 14:20 в режимі: 10 хв випромінювання, 10 хв пауза, *PG* ≈ 55 МВт. При діючій висоті відбитої радіохвилі z' = 75–150 км (істинна висота z ≈ 75–100 км) значні варіації ДС спостерігалися в інтервалі часу 14:24–14:46 (рис. 5.3, *а*).

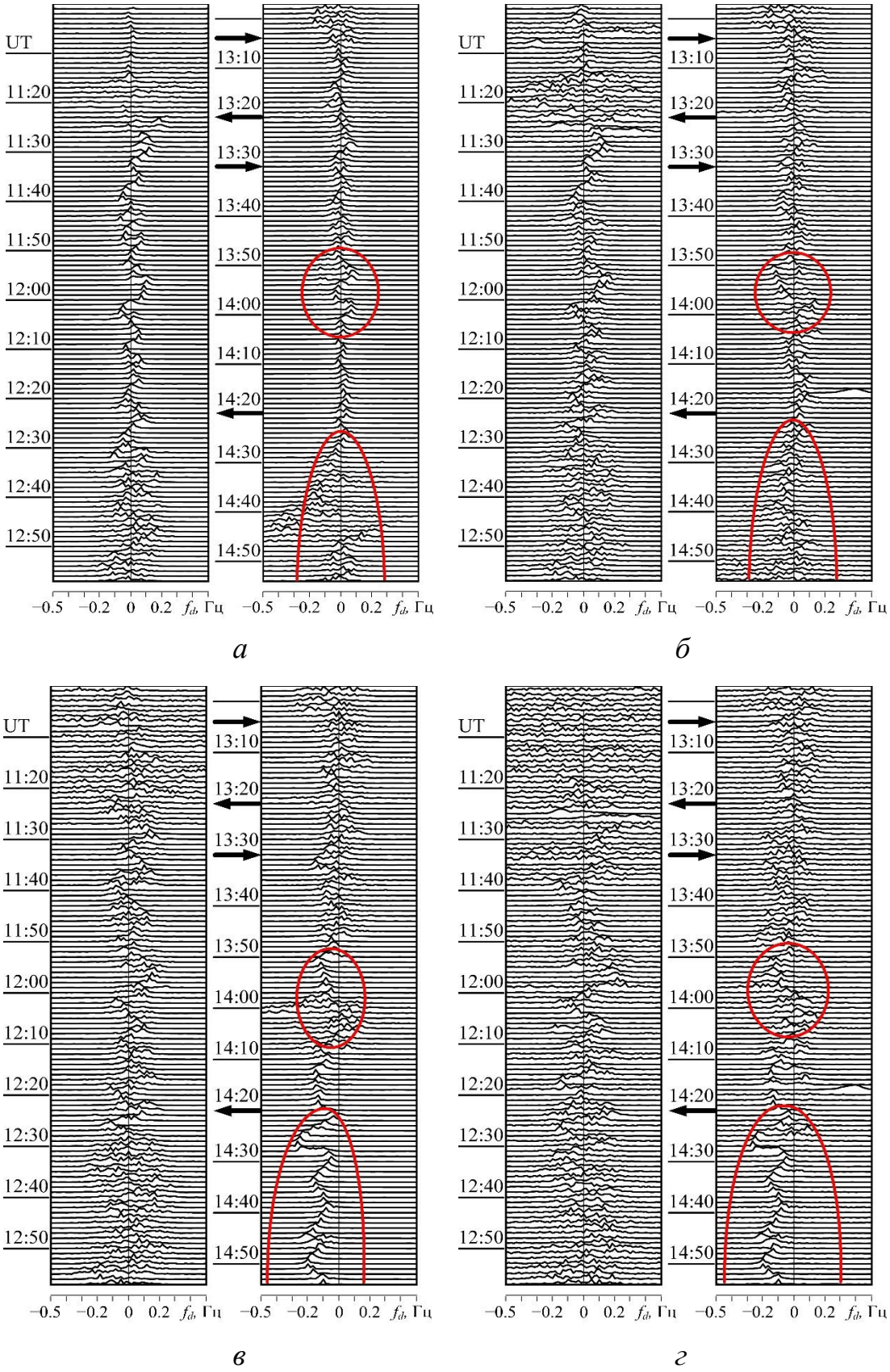


Рис. 5.3. Часові варіації ДС при моноімпульсному та періодичному впливі 27 серпня 2021 р.: *а* – z' = 75–150 км; *б* – z' = 150–225 км; *в* – z' = 225–300 км; *г* – z' = 300–375 км

У діапазоні висот $z' = 150–225$ км ($z \approx 100–120$ км) після 14:22 реєструвалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 6–7$ хв і $f_{da} \approx 0.12–0.13$ Гц (див. рис. 5.3, *б*).

При $z' = 225–300$ км ($z \approx 120–140$ км) значні варіації ДС почалися після 14:00 (див. рис. 5.3, *в*). Після 14:20 варіації ДЗЧ стали квазіперіодичними з періодом $T \approx 6–7$ хв і амплітудою $f_{da} \approx 0.12–0.13$ Гц. Тривалість квазіперіодичних варіацій становила не менше 35 хв.

Поведінка ДС у діапазоні висот $z' = 300–375$ км ($z \approx 140–160$ км) була приблизно такою ж, як і при $z' = 225–300$ км (див. рис. 5.3, *г*).

За умови $z' = 375–400$ км ($z \approx 160–180$ км) відбитий сигнал був відсутній.

5.5. Обговорення

Після другого ввімкнення моноімпульсу о 13:22 збурення ДС почалися о 14:00 і закінчилися о 14:16. Якщо вони викликані дією моноімпульсу, то час запізнювання $\Delta t \approx 38$ хв. За відстані між нагрівним стендом і допплерівським радаром $R \approx 960$ км маємо вдавану горизонтальну швидкість поширення $v = R/\Delta t \approx 420$ м/с. Таку швидкість у *F*-області іоносфери мають рухомі іоносферні збурення, викликані АГХ [178]. Важливо підкреслити, що тривалість збурення співпала з тривалістю впливу. Значення швидкості та тривалості збурення ДС свідчать про те, що воно викликане радіовипромінюванням нагрівного стенда. Підкреслимо також те, що реакція на вплив моноімпульсу спостерігалася в умовах рекордно низької ефективної потужності (всього 25 МВт). Раніше авторами [129, 131, 136] зазначалося, що реєстровані збурення у вигляді квазіперіодичних процесів спостерігалися за умови $PG \geq 40–50$ МВт. Зниження порогу *PG*, мабуть, пов’язане зі зменшенням поглинання гріючої радіохвилі нижче області відбиття в результаті зменшення концентрації електронів у період мінімальної сонячної активності.

Під впливом моноімпульсу 27 серпня 2021 р. суттєві варіації ДС тривалістю, що дорівнювала тривалості моноімпульсу, спостерігалися з часом запізнювання $\Delta t \approx 44$ хв. При цьому $v \approx 364$ м/с.

Реакція на періодичне вмикання нагрівного стенда 27 серпня 2021 р. на різних висотах спостерігалася з різним часом запізнювання: $\Delta t \approx 54$ хв ($z' = 75$–150 км); $\Delta t \approx 52$ хв ($z' = 150$–225 км) і $\Delta t \approx 50$ хв ($z' = 225$–300 км). Їм відповідають удавані швидкості 296; 308 і 320 м/с. Важливо, що зі збільшенням висоти збільшується вдавана швидкість поширення збурення. Цю властивість мають рухомі іоносферні збурення, викликані рухом АГХ [178].

Цікаво, що в діапазоні висот $z' = 225$–300 км значні варіації ДС почалися приблизно о 14:00 (див. рис. 5.3, *в*). При цьому $\Delta t \approx 30$ хв, а $v \approx 533$ м/с. Можна припустити, що ці варіації також були викликані впливом потужного радіовипромінювання, але їх швидкість помітно перевищувала оцінену вище швидкість (320 м/с). У цих збурень могли бути різні механізми генерації. Зокрема, більшу швидкість мають нелінійні хвилі певної природи, в даному випадку АГХ.

Оцінимо параметри квазіперіодичних процесів в іоносфері. За умов $T \approx 6$–7 хв і $f_{da} \approx 0.12$–0.13 Гц для відносної амплітуди коливань концентрації електронів [91]

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L}\frac{f_{da}}{f} \tag{5.1}$$

маємо $\delta_N \approx 1.1$–1.4 %. Тут $L \approx 30$ км – товщина шару іоносфери, що дає основний внесок у ДЗЧ, $f = 3.2$ МГц – частота допплерівського радара.

Підкреслимо, що період коливань ДЗЧ (6–7 хв) не співпадає ні з тривалістю впливу (10 хв), ні з його періодом (20 хв), а визначається властивостями атмосфери на межі *E*- та *F*-областей іоносфери. Цей період був близьким до періоду Брента–Вяйсяля [178].

5.6. Висновки до розділу 5

1. Вперше показано, що в період мінімуму сонячної активності реєстровані збурення в іоносфері на відстані близько 960 км від нагрівного стенда можуть виникати при ефективній потужності, рівній 25 МВт.

2. Під впливом моноімпульсу на іоносферну плазму тривалість реакції іоносфери співпадала з тривалістю моноімпульсу. При цьому квазіперіодичні варіації ДЗЧ тільки починали генеруватися.

3. Удавана горизонтальна швидкість поширення збурень становила від ~ 300 до ~ 420 м/с. Важливо, що зі збільшенням висоти від ~ 110 до ~ 170 км ця швидкість збільшувалася від 296 до 320 м/с. Таку швидкість мають рухомі іоносферні збурення, пов’язані з АГХ.

4. Періодичний режим випромінювання нагрівного стенда супроводжувався генерацією квазіперіодичних збурень концентрації електронів з відносною амплітудою ~ 1 % і періодом, близьким до періоду Брента–Вяйсяля.

РОЗДІЛ 6. ВАРІАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ВЧ РАДІОХВИЛЬ ПІД ЧАС ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 23–24 КВІТНЯ 2023 РОКУ НАД КИТАЄМ

Метою розділу є представлення результатів спостережень часових варіацій характеристик ВЧ радіохвиль та іоносферних збурень протягом геокосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. і в контрольні дні за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого ВЧ зондування іоносфери [193].

6.1. Засоби та методи

Моніторинг іоносферних ефектів геокосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. проводився за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого ВЧ зондування іоносфери, описаному у п.1.4.4.

Використані радіотраси наведено на рис. 6.1. Параметри радіотрас наведено в табл. 6.1.

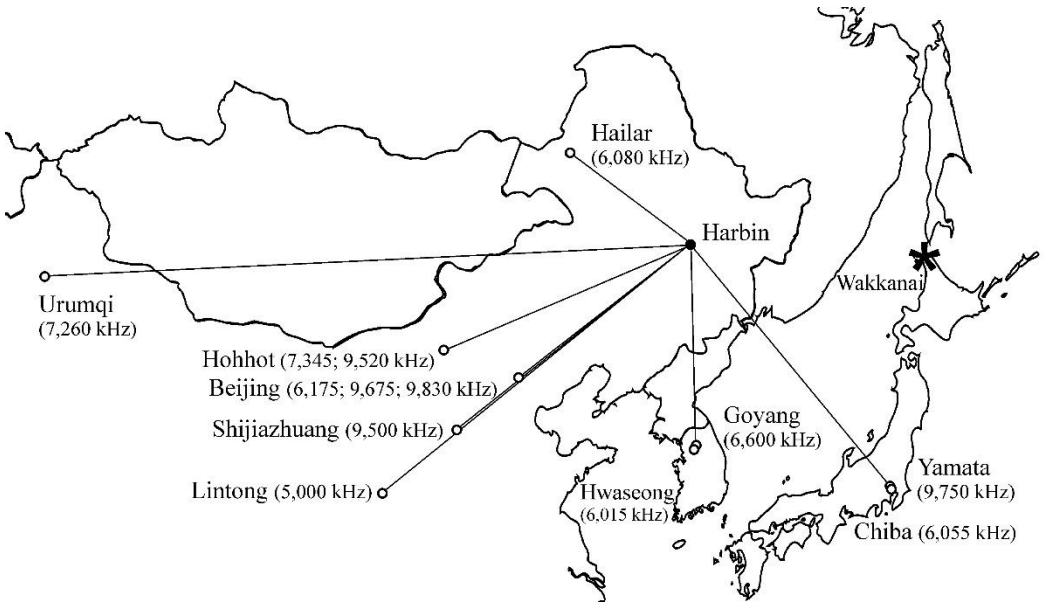


Рис. 6.1. Схема шляхів поширення між приймальною системою в м. Харбін і передавачами, які використовуються для моніторингу динамічних процесів в іоносфері. Зірочкою позначено місце розташування іонозонда WK546, що використовувався для оцінки поточного стану іоносфери

Таблиця 6.1.

Частоти передавача, місцезнаходження, відстані до Харбіна та координати середини шляху (https://fmscan.org/index.php)

Частота (кГц)	Широта/ Довгота	Місцезнаходження (країна)	Відстань до Харбіну (км)	Широта/Довгота середньої точки радіотраси
5000	34.95°N/ 109.56°E	Lintong/Pucheng (China)	1875	40.37°N/ 118.12°E
6015	37.21°N/ 126.78°E	Hwaseong (Korea)	950	41.50°N/ 126.73°E
6055	35.47°N/ 140.21°E	Chiba/Nagara (Japan)	1610	40.63°N/ 133.45°E
6080	49.18°N/ 119.72°E	Hailar/Nanmen (China)	645	47.48°N/ 123.2°E
6175	39.75°N/ 116.81°E	Beijing (China)	1050	42.77°N/ 121.75°E
6600	37.60°N/ 126.85°E	Goyang (Korea)	910	41.69°N/ 126.77°E
7260	43.97°N/ 87.25°E	Urumqi/Changji (China)	3080	44.88°N/ 106.97°E
7345	40.72°N/ 111.55°E	Hohhot (China)	1340	43.25°N/ 119.12°E
9500	38.47°N/ 114.13°E	Shijiazhuang (China)	1310	42.13°N/ 120.41°E
9520	40.72°N/ 111.55°E	Hohhot (China)	1340	43.25°N/ 119.12°E
9675	39.75°N/ 116.81°E	Beijing (China)	1050	42.77°N/ 121.75°E
9750	36.17°N/ 139.82°E	Yamata (Japan)	1570	40.98°N/ 133.25°E
9830	39.75°N/ 116.81°E	Beijing (China)	1050	42.77°N/ 121.75°E

6.2. Космічна погода

21 і 22 квітня 2023 р. концентрація протонів n_{sw} у сонячному вітрі флуктувала біля значення $5 \cdot 10^6$ 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

$21.1 \cdot 10^6$ м$^{-3}$. Збільшення n_{sw} тривало близько 11 годин. 24, 25 і 27 квітня значення n_{sw} флуктували в межах від 10^6 м$^{-3}$ до $8 \cdot 10^6$ м$^{-3}$.

До 16:00 23 квітня 2023 р. швидкість плазми V_{sw} сонячного вітру 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 550 км/с. Лише наприкінці доби 26 квітня 2023 р. вона збільшилася до 650 км/с, після чого мало місце поступове зменшення швидкості. Приблизно до 16:00 23 квітня 2023 р. значення температури протонів T_{sw} у сонячному вітрі флуктували у межах $(1–2) \cdot 10^5$ К. Після цього спостерігався сплеск T_{sw}, що тривав близько 10 годин. Найбільше значення $T_{sw} \approx 2.05 \cdot 10^6$ К. Після сплеску мали місце незначні флуктуації температури (не більше $(1–3) \cdot 10^5$ К).

Значення динамічного тиску p_{sw} сонячного вітру зазвичай не перевищували 1–3 нПа, але з 16:00 23 квітня 2023 р. до 02:00 24 квітня 2023 р. значення p_{sw} збільшувалися до 11 нПа.

Поведінка компонент B_y і B_z міжпланетного магнітного поля (ММП) була наступною. Приблизно до 09:00 UT 23 квітня 2023 р. рівень обох компонентів коливався в межах ±5 нТл. З 10:00 UT 23 квітня 2023 р. рівень коливань зріс приблизно в 4 рази з максимальним значенням $B_y \approx 9.5$ нТл і мінімальним значенням $B_y \approx –30.2$ нТл. Компонента B_z стала від'ємною після 09:00 UT 23 квітня 2023 р. і залишалась від'ємною до 21:00 UT 23 квітня 2023 р., після чого послідувало поступове зростання B_z від –32.4 нТл до 22.5 нТл, яке мало місце приблизно о 16:00 UT 24 квітня 2023 р. До початку нової доби значення B_z зменшилися до 5 нТл, а далі флуктували поблизу 0 нТл. Приблизно такою самою була й поведінка компоненти B_y 25, 26 і 27 квітня 2023 р. Варіації функції Акасофу ε_A, яка характеризує інтенсивність геокосмічної бурі й описує величину енергії в одиницю часу, що надходить до магнітосфери Землі, були наступними. Величина ε_A не перевищувала 10 ГДж/с до 09:00 UT 23 квітня 2023 р. Приблизно з 16:00 23 квітня до 20:00 24 квітня 2023 р. спостерігалися два потужні сплески. При цьому ε_A становила 220.3 ГДж/с і 160 ГДж/с. Тривалість першого сплеску була 14 год, а другого – близько 7 год.

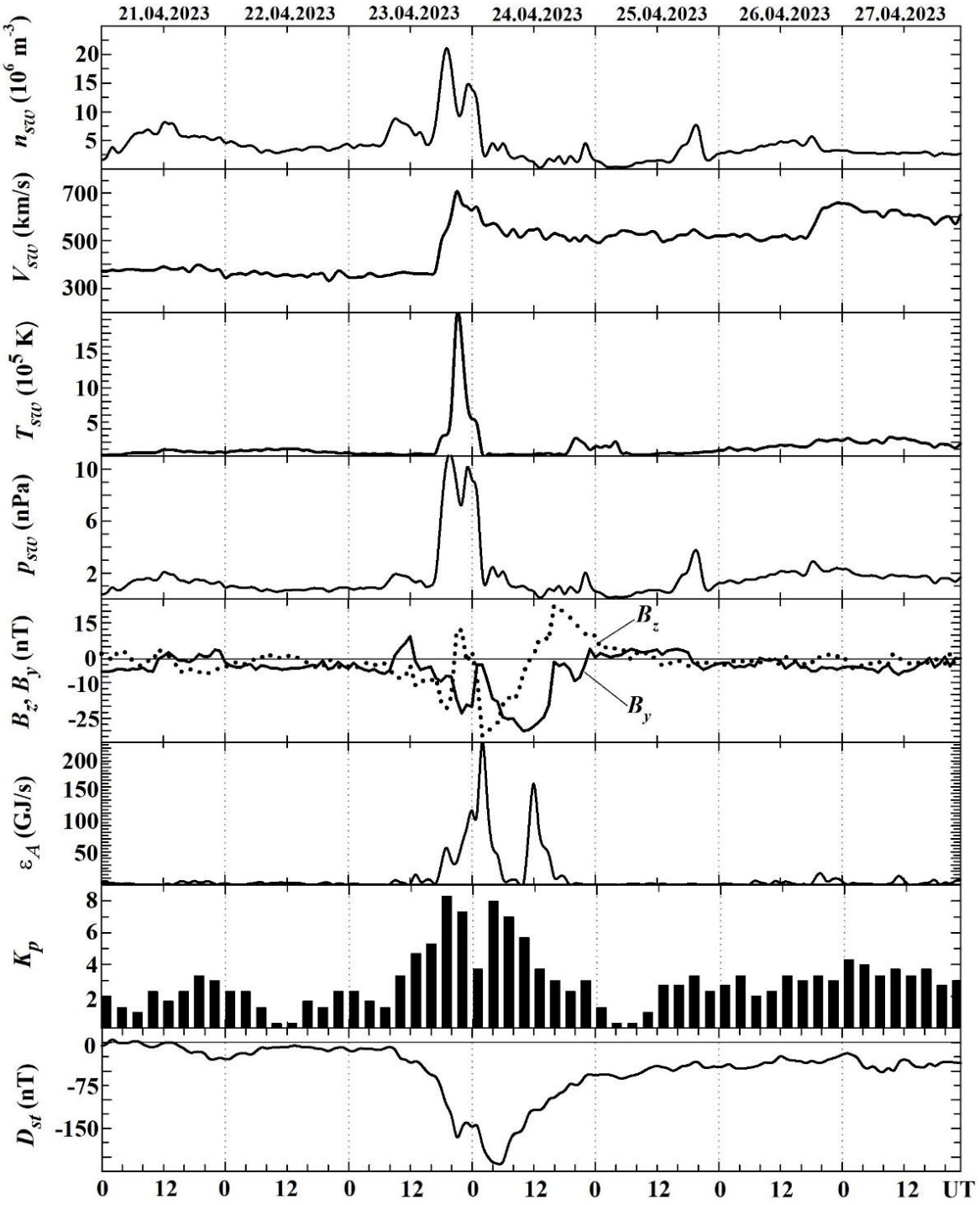


Рис. 6.2. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряна густина протонів n_{sw}, температура протонів T_{sw}, швидкість потоку V_{sw}, розрахований динамічний тиск p_{sw}, виміряні B_z і B_y компоненти міжпланетного магнітного поля, розрахункові значення енергії ε_A, переданої від сонячного вітру магнітосфері Землі за одиницю часу, K_p і D_{st} індекси (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html) за період 21–27 квітня 2023 р.

Значення індексу K_p 21 і 22 квітня 2023 р. не перевищували 3+. Після 12:00 23 квітня 2023 р. цей індекс збільшувався від 4 до 8.3. Далі протягом 6 годин він зменшувався до 4. В інтервалі часу 03:00–06:00 UT 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 флуктував у межах від 2 до 4+.

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

Особливістю геокосмічної, а отже, і магнітної бурі, було те, що вони були двокроковими.

6.3. Результати багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери

Наведемо приклади часових варіацій допплерівських спектрів і амплітуд сигналів протягом іоносферної бурі та контрольних днів.

6.3.1. Радіотраса Hwaseong–Harbin

Радіостанція, яка працює на частоті 6015 кГц, розміщена в Республіці Корея ($R \approx 950$ км). Станція вимикалася в інтервалі часу 00:00–03:00 UT. Дифузність ДС була незначною (рис. 6.3). Деяке її посилення мало місце лише 25 квітня 2023 р. з 14:00 до 21:00. 22 квітня 2023 р. сигнал найчастіше

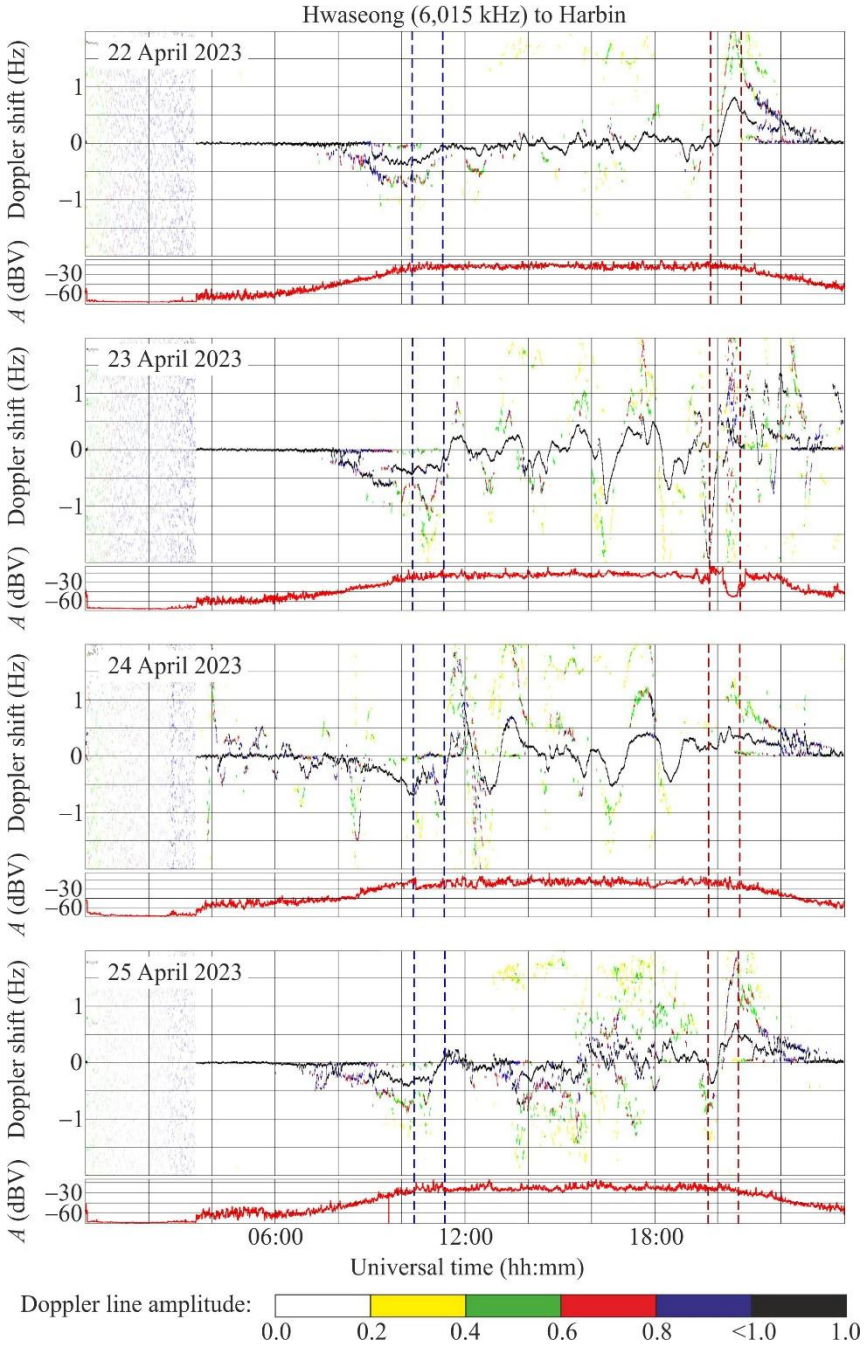


Рис. 6.3. Часові варіації допплерівських спектрів та амплітуд сигналу вздовж радіотраси Hwaseong–Harbin 22–25 квітня 2023 р. на частоті 6015 кГц. Чорний, синій, червоний, зелений і жовтий кольори показують амплітуду допплерівської лінії 1, 0.8, 0.6, 0.4 і 0.2 на відносній шкалі, відповідно. Графік допплерівського зміщення складається з 117600 точок у кожному одногодинному 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 відносно 1 В показана під допплерівськими спектрами на кожній панелі

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

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 варіації $A(t)$ й у нічний час 24 і 25 квітня 2023 р. (див. рис. 6.3).

6.3.2. Радіотраса Goyang–Harbin

Радіостанція, що випромінює на частоті 6600 кГц, дислокована на території Республіки Корея. При цьому $R \approx 960$ км. Реєстрація сигналу тривала протягом нічних годин, але з 07:00 до 11:00 допплерівські вимірювання виявилися неможливими. Вдень рівень сигналу зменшувався до –53 дБВ, а вночі він піднімався до –22 дБВ (рис. 6.4). З 00:00 до 07:00 відбиття відбувалося від шару E і, таким чином, $f_D(t) \approx 0$ Гц. З 22 по 24 квітня 2023 р. ДС були майже одномодовими.

У контрольний день 22 квітня 2023 р. часові варіації були скоріше хаотичними. Амплітуда варіацій становила ±0.2 Гц, квазіперіод змінювався в межах 15–60 хв. Спектр був майже одномодовим. Поблизу ранкового термінатора значення f_D збільшилося від 0 до 0.8 Гц.

23 і 24 квітня 2023 р. з 11:00 до 20:00 варіації ДЗЧ стали квазіперіодичними з основним періодом $T \approx 60$ хв і $f_{Da} \approx 0.2$–0.3 Гц.

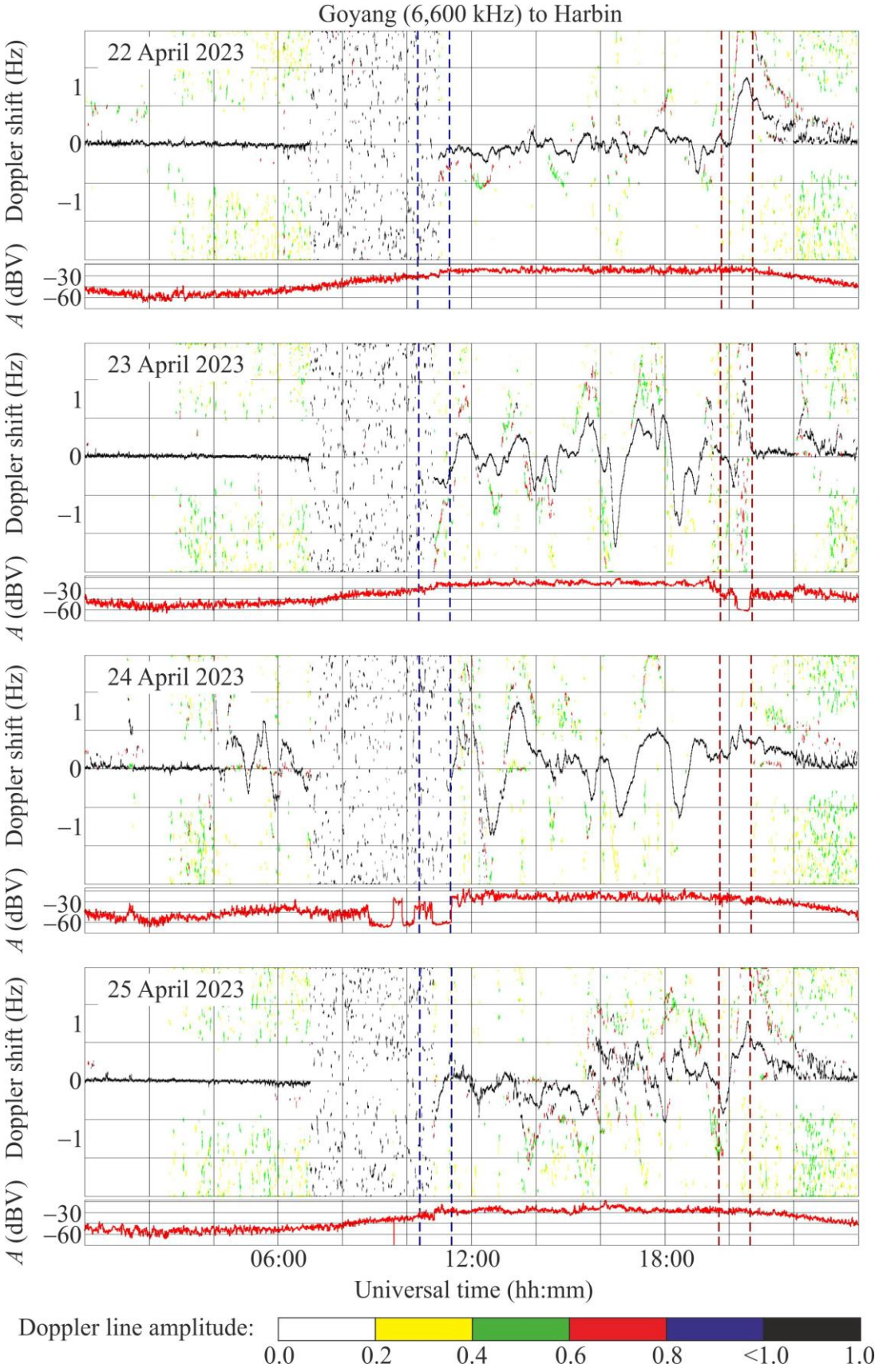


Рис. 6.4. Те саме, що на рис. 6.3, але для радіотраси Goyang–Harbin на частоті 6600 кГц

Іноді розмах ДЗЧ досягав 1.5 Гц і більше. На повільні варіації ДЗЧ накладалися квазіперіодичні коливання з $T \approx 8$–10 хв і $f_{Da} \approx 0.04$–0.05. Найбільші варіації ДЗЧ спостерігалися з 16:00 до 19:00.

24 квітня 2023 р. в інтервалі часу 04:30–07:00 варіації ДЗЧ були квазіперіодичними з $T \approx 60$ хв і $f_{Da} \approx 0.4$–0.5 Гц. Після заходу Сонця амплітуда ДЗЧ збільшилася до 0.8 Гц, а $T \approx 120$ хв. Далі були варіації ДЗЧ зі змінним періодом від 20 до 120 хв, амплітуда коливань досягала 0.50–0.55 Гц. Ранковий термінатор призвів до істотного придушення коливань, при цьому $f_{Da} \approx 0.15$ Гц і менше.

Вночі 25 квітня 2023 р. іоносфера залишалася збуреною. Варіації ДЗЧ були хаотичними. На відміну решти днів спостерігалося істотне розширення ДС (до 1–1.5 Гц).

6.4. Коливання рівня відбиття

23 квітня та меншою мірою 24 квітня 2023 р. спостерігалися значні варіації ДЗЧ, що досягали ±1.7 Гц (табл. 6.2).

Таблиця 6.2.

Основні параметри радіохвиль та іоносфери

f, кГц	6015	6600	7260	7345	9500	9830
R, км	950	960	1496	1845	1310	1050
z_{r0}, км	150	155	140	135	150	160
Δf_{Dm}, Гц	–1.2	–1.25	–0.95	–1.1	–1.7	–1.6
ΔT, хв	12	12	18	10	24	25
Δz_r, км	30	30	44	41	70	55

Такі коливання ДЗЧ були викликані коливаннями висоти відбиття радіохвилі z_r. Приблизно о 16:00 23 квітня 2023 р. на всіх радіотрасах спостерігалося зменшення f_D на 1–1.7 Гц, а потім його збільшення приблизно на таку саму величину. ДЗЧ пов’язано зі швидкістю руху області відбиття

радіохвилі співвідношенням (1.7). Знаючи $v(t)$, можна оцінити зміщення області відбиття радіохвилі за висотою [67]

$$\Delta z_r = \int_0^{\Delta T} v(t)dt = -\frac{c}{2f}\int_0^{\Delta T}\frac{f_D(t)}{\cos\theta(t)}dt \approx -\frac{c\Delta T}{4\overline{\cos\theta}}\frac{\Delta f_{Dm}}{f}, \qquad (6.1)$$

де ΔT – тривалість зміни ДЗЧ на максимальну величину Δf_{Dm}, $\overline{\cos\theta(t)}$ – середнє за час ΔT значення cosθ.

Результати оцінки збільшення висоти відбиття радіохвилі в інтервалі часу 16:00–16:25 23 квітня 2023 р. за співвідношенням (6.1) наведено у табл. 6.2. З табл. 6.2 видно, що зміна висоти Δz_r сягала 30–70 км залежно від радіотраси. Після збільшення z_r наступало її зменшення приблизно на таку ж величину. Тривалість процесу підйому й опускання області відбиття були близькі до 10–25 хв (табл. 6.2).

6.5. Квазіперіодичні процеси

Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ 23 і 24 квітня 2023 р. збільшувалася у кілька разів порівняно з амплітудою подібних варіацій 22 квітня 2023 р. Це однозначно свідчило на користь того, що геокосмічна буря супроводжувалася посиленням хвильової активності в атмосфері й іоносфері.

Період квазіперіодичних варіацій ДЗЧ змінювався в широких межах: від 8–10 до 100–120 хв. Найбільшу амплітуду $f_{Da} \approx 0.3$–0.6 Гц мали коливання з $T \approx 100$–120 хв. Для $T \approx 8$–15 хв $f_{Da} \approx 0.04$–0.05 Гц. Поширення хвиль густини в іоносфері призводить до коливань висоти відбиття радіохвилі.

Оцінимо амплітуду Δz_a цих коливань. Врахуємо, що

$$f_D(t) = f_{Da}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right). \qquad (6.2)$$

Тоді із (6.2) з урахуванням (1.8) маємо

$$v(t) = -\frac{c}{2}\frac{f_{Da}}{f\overline{\cos\theta}}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = -v_a\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \qquad (6.3)$$

де $\overline{\cos\theta(t)}$ – середнє значення cosθ за період T. Тут v_a – амплітуда коливань швидкості вертикального руху області відбиття радіохвилі

$$v_a = \frac{c}{2}\frac{f_{Da}}{f\overline{\cos\theta}}, \tag{6.4}$$

з (6.3) і (6.4) отримаємо, що

$$\Delta z_a = \int_0^{\Delta T} v(t)dt = \frac{v_a T}{\pi} = \frac{cT}{2\pi}\frac{f_{Da}}{f\overline{\cos\theta}}. \tag{6.5}$$

Результати розрахунку v_a і Δz_a за співвідношеннями (6.4) і (6.5) наведені в табл. 6.3. Видно, що v_a змінювалося в межах від ~10 м/с до ~60 м/с, а амплітуда Δz_a варіювала від ~10 км до ~130 км. Період коливань змінювався від ~30 хв до 100–120 хв.

Таблиця 6.3.

Основні параметри квазіперіодичних збурень

f, кГц	5000	6015	6600	7260	7345	9500	9520	9750	9830
f_{Da}, Гц	0.3–0.4	0.4–0.6	0.2–0.3	0.3	0.1–0.3	0.3–0.4	0.4	0.15–0.30	0.15–0.40
f_{Da1}, Гц		0.04	0.04–0.05	0.03–0.04		0.15	0.2	0.04	
T, хв	100–120	120	60	120	30–60	100–110	80–90	30–100	30–100
T_1, хв			8–10	6–10	–	40	40	10–15	–
δ_{Na}, %	–	1.6	1.4–2	1.6–3.5		29	39	2.2–3.5	
Δz_a, км	84–134	64–96	32–48	64	8–40	60–80	64–72	9–58	5–36
ΔT, год	8–10	9	9	7	7	7	5	5	7
v_a, м/с	44–58	28–42	14–21	28	14–40	18–24	24	9–18	7–19

Для більш низькоперіодних ($T_1 \approx$ 8–15 хв) коливань оцінимо амплітуду відносних збурень концентрації електронів δ_{Na}, виходячи зі співвідношення [155]:

$$\delta_{Na} = \frac{K}{4\pi}\frac{cT}{L}\frac{f_{Da}}{f}, \tag{6.6}$$

де L – протяжність області іоносфери за висотою, що дає основний внесок у ДЗЧ.

Результати обчислень δ_{Na} наведено у табл. 6.3, з якої видно, що $\delta_{Na} \approx 1.6$–3.5% для $T_1 \approx 8$–15 хв. Якщо ж $T_1 \approx 40$ хв, то $\delta_{Na} \approx 29$–39%.

6.6. Варіації характеристик радіохвиль

Протягом іоносферної бурі суттєво змінювалися характеристики радіохвиль у діапазоні частот ~5–10 МГц. Варіації амплітуди відбитого сигналу залежно від радіотраси не перевищували 10 дБВ, тоді як добові варіації сягали 30 дБВ.

Іоносферні бурі супроводжувалися уширенням до ±1.5 Гц ДС, появою багатопроменевості та посиленням розсіяння радіохвиль. Останнє спричинене інтенсифікацією плазмової турбулентності.

23 і 24 квітня 2023 р. значно посилилася хвильова активність в атмосфері й іоносфері. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ збільшилася від фонового значення 0.1–0.2 Гц до 0.3–0.4 Гц. Переважали коливання з періодом 100–120 хв. Висота відбиття радіохвиль коливалася з амплітудою від ~30 км до ~130 км. Значними (~30–70 км) були і аперіодичні зміщення області відбиття радіохвиль з характерним часом ~10–25 хв.

Описані варіації характеристик радіохвиль свідчать, що геокосмічна буря супроводжувалася значною перебудовою іоносфери.

6.7. Висновки до розділу 6

Вперше проведено детальний комплексний аналіз варіацій стану космічної погоди та характеристик ВЧ радіохвиль, викликаних однією із найсильніших бур у 25-му сонячному циклі. Встановлено наступне.

1. За допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлено значні збурення характеристик радіохвиль і параметрів іоносфери.

2. У збурені дні 23 і 24 квітня 2023 р. виявлено суттєве (до ±1.5 Гц) уширення ДС, посилення багатопроменевості та розсіяння радіохвиль. У ці дні значно збільшилася хвильова активність в іоносфері.

3. ДЗЧ зазнавало коливань у широкому діапазоні періодів (від ~8–10 хв до 100–120 хв) з амплітудою від 0.04 Гц до 0.3–0.4 Гц. В інтервалі часу ~16:00–16:25 реєструвалося спочатку короткочасне зменшення ДЗЧ на 1–1.2 Гц, а потім таке ж короткочасне його збільшення до 1–1.5 Гц. Амплітуда сигналу протягом іоносферної бурі змінювалася до 10 дБВ.

4. Іоносферна буря супроводжувалася тривалими (до 10 годин) квазіперіодичними варіаціями висоти відбиття 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 ~10 м/с до ~60 м/с. Короткочасні (~10–25 хв) аперіодичні варіації цієї висоти становили 30–70 км. При цьому швидкість дорівнює 50–100 м/с.

Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів становила 1.6–3.5% для періоду 8–15 хв. Якщо період був близький до 40 хв, то ця величина наближалася до 29–39%.

ВИСНОВКИ

1. Для похилого ВЧ зондування іоносфери отримано скоригований закон секанса, а також співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти, відносної амплітуди квазіперіодичних збурень і величини аперіодичних збурень концентрації електронів у іоносфері. Продемонстровано застосовність співвідношень при використанні на практиці.

2. З застосуванням багаточастотного багатотрасового когерентного радіотехнічного комплексу ВЧ діапазону для просторово рознесеного похилого радіозондування іоносфери розроблено методику визначення параметрів рухомих іоносферних збурень: періоду, горизонтальної довжини хвилі, горизонтальної швидкості й азимуту приходу. Підтверджено, що рухомі іоносферні збурення з відповідними періодами викликаються генерацією та поширенням АГХ. Визначено відносну амплітуду збурень концентрації електронів у хвилі та напрямок переміщення. Успішне функціонування розробленого багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу похилого зондування іоносфери продемонстровано під час дослідження динамічних процесів, викликаних різними джерелами енерговиділення.

3. Комплекс потенційно здатний виявляти відносне ДЗЧ $\sim 10^{-10}$, зсув фази в НЧ діапазоні ~0.1°, варіації сигналу не менше 2–3%, збурення концентрації електронів з відносною амплітудою не менше, ніж $\sim 10^{-2}$ % і динамічні процеси, які супроводжуються вертикальним рухом зі швидкістю не меншою ~0.02–0.05 м/с.

4. Проаналізовано параметри іоносферних збурень, що послідували за стартами 81 ракети *Союз* і 53 ракет *Протон* з космодрому Байконур у 2009–2021 рр. Підтверджено існування декількох груп часів запізнювання можливої

реакції іоносфери на старт і політ ракет. Значення цих часів змінювалися від ~10 до ~300 хв. Їм відповідає декілька груп удаваних горизонтальних швидкостей поширення збурень (~100–200 м/с; 390 ± 23 м/с; 0.97 ± 0.10 км/с; 1.28 ± 0.13 км/с; 1.68 ± 0.13 км/с; 2.07 ± 0.13 км/с, а також ~8 км/с). Такі швидкості мають повільні АГХ, АГХ техногенного походження, ударні хвилі густини, повільні та звичайні МГД хвилі. Виникаючі збурення, як правило, були квазіперіодичними. Період становив від ~5 до ~20 хв, а амплітуда ДЗЧ – 0.1–0.3 Гц. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів зазвичай становила ~1–10%, рідше досягала ~20%. Встановлено, що виявлення реакції іоносфери на віддалений на ~ 2000 км старт і політ великої ракети на фоні геокосмічної бурі допплерівським методом зазвичай можливе за індексу $K_{p\max} \leq 5$, а за більших його значень дуже ускладнено або взагалі неможливе. У ряді випадків навіть за індексу $K_{p\max} = 4$ визначення реакції ускладнено. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети допплерівський радар повинен одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5–2 до 4–6 МГц. Підтверджено існування декількох груп горизонтальних удаваних швидкостей поширення збурень: 1.7–3 км/с і більше, 700–1000, 300–700, 150–260 м/с.

5. Виконано радіофізичні спостереження за динамічними процесами в іоносфері протягом СЗ 10 червня 2021 р. і в контрольні дні. Встановлено, що часові варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих радіотрасах в цілому були подібними. На похилих радіотрасах помітніше позначалася багатомодовість. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності в атмосфері й іоносфері. Спостерігалося не менше трьох хвильових цугів. Значення періодів ($T \approx 5$–12 хв) і відносних амплітуд ($\delta_N \approx 0.3$–0.6%) свідчили про те, що хвильові збурення викликані атмосферними гравітаційними хвилями. Аперіодичний ефект СЗ виявився занадто малим (менше 0.01 Гц), аби його можна було впевнено спостерігати. Малість ефекту зумовлена незначною фазою часткового затемнення над Харковом (не більше 0.11).

6. Вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію ПЕВ на сонячне затемнення 25 жовтня 2022 р., що мало місце перед проходженням і в період проходження вечірнього термінатора. Встановлено, що реакція іоносфери на СЗ спостерігалася у глобальних масштабах (від станції Рейк'явік до станції Новосибірськ), а саме СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі. Вперше отримано статистичні характеристики збурень ПЕВ, викликаних затемненням на різних широтах і довготах. Своєрідною була поведінка варіацій ПЕВ під час і після заходу сонця. Зменшення ПЕВ досягало 1.0–19.0 TECU, а максимальне відносне зменшення приблизно –0.32. Зміни всіх параметрів збурення ПЕВ складним чином залежали від відносної площі покриття диску Сонця. Це може пояснюватися немонотонними змінами концентрації електронів у денний час, активізацією іоносферно-плазмосферної взаємодії протягом СЗ, збуренням системи іоносферних струмів, вертикальним дрейфом плазми, а також впливом великомасштабних збурень концентрації електронів, що генеруються затемненням. Час запізнювання максимальної реакції іоносфери відносно максимальної фази затемнення становив 15–25 хв. Тривалість реакції іоносфери на СЗ дещо перевищувала тривалість дії збурюючого джерела і сягала 120–180 хв. Є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія сонячного затемнення та термінатора.

7. Вперше показано, що в період мінімуму сонячної активності реєстровані збурення в іоносфері на відстані близько 960 км від нагрівного стенда можуть виникати при ефективній потужності, рівній 25 МВт. Під впливом моноімпульсу на іоносферну плазму тривалість реакції іоносфери співпадала з тривалістю моноімпульсу. При цьому квазіперіодичні варіації ДЗЧ тільки починали генеруватися. Удавана горизонтальна швидкість поширення збурень становила від ~ 300 до ~ 420 м/с. Важливо, що зі збільшенням висоти від ~ 110 до ~ 170 км ця швидкість збільшувалася від 296 до 320 м/с. Таку швидкість мають рухомі іоносферні збурення, пов'язані з

АГХ. Періодичний режим випромінювання нагрівного стенда супроводжувався генерацією квазіперіодичних збурень концентрації електронів з відносною амплітудою ~ 1 % і періодом, близьким до періоду Брента–Вяйсяля.

Перерахуємо основні **практичні рекомендації**, що випливають з результатів досліджень.

Під час проходження сонячного термінатору, сонячних спалахів та впливу геокосмічних бур амплітуда сигналу може змінюватися до 30 дБВ, а відношення сигнал шум – до мільйона разів. Таким чином, для максимально ефективної роботи радіосистем рекомендується зменшувати потужність радіопередавального пристрою в нічний час і збільшувати її в денний час.

Геокосмічні бурі можуть викликати негативні або позитивні іоносферні бурі. Під час негативних іоносферних бур концентрація електронів у *F*-області іоносфери може зменшуватися до 10 разів. При цьому радіохвилі з частотою близько 3 МГц, поглинаючись, перестають відбиватися від іоносфери, а радіохвилі з більшою частотою проникають через іоносферу, тобто суттєво зменшується частотна ємність радіоканалу. Під час позитивних іоносферних бур концентрація електронів збільшується до 2–5 разів, при цьому помітно збільшується частотна ємність радіоканалу.

Для охоплення всіх можливих геофізичних станів при виявленні збурень в іоносфері (наприклад, стартів ракет) рекомендується одночасно працювати на низці частот.

Усі наведені високоенергетичні джерела збурень іоносфери тією чи іншою мірою впливають на варіації амплітуди сигналу і, таким чином, на відношення сигнал/шум, який визначає тактико-технічні характеристики радіосистем і є ключовим параметром для радіозв’язку, радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування тощо. До того ж, такі джерела можуть суттєво змінювати величину варіацій ДЗЧ, що вносить суттєві похибки, зокрема у визначення швидкості об’єктів і точності пеленгування у ВЧ діапазоні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чорногор Л Ф., Домнін І. Ф. Фізика геокосмічних бур: Монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, Інститут іоносфери НАН і МОН України, 2014. 408 с.

2. Чорногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2021. Т. 27, № 1 (128). С. 3-77. DOI: https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003.

3. Harjosuwito J., Husin A., Dear V., et al. Ionosonde and GPS total electron content observations during the 26 December 2019 annular solar eclipse over Indonesia. Ann. Geophys. 2023. Vol. 41. P. 147-172.

4. Panasenko S. V., Otsuka Y., Van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., Nishioka M. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. Vol. 191. id:105051. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015.

5. Ємельянов Л. Я., Чорногор Л. Ф., Ляшенко М. В., Мірошніков А. Є., Аксьонова К. Д. Рух плазми в іоносфері: дослідження методом некогерентного розсіяння. Харків: ТОВ “ПЛАНЕТА-ПРІНТ”, 2021. 460 с.

6. Кацко С. В., Ємельянов Л. Я., Чорногор Л. Ф. Особливості іоносферної бурі 21-24 грудня 2016 р.. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021. Т. 37, № 2. С. 57-74.

7. Reinisch B. W., Galkin I. A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO). Earth, Planets and Space. 2011. Vol. 63, No. 4. P. 377-381. DOI: https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001.

8. Verhulst T., Altadill D., Mielich J., Reinisch B., Galkin I., Mouzakis A., Belehaki A., Burešová D., Stankov S., Blanch E., Kouba D. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. Advances in Space Research. 2017. Vol. 60, No. 8. P. 1644-1656. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033.

9. Mlynarczyk J., Koperski P., Kulak A. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale

broadcasting. Advances in Space Research. 2012. Vol. 49, No. 1. P. 83-88. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.031.

10. Galushko V. G., Kascheev A. S., Paznukhov V. V., Yampolski Y. M., Reinisch B. W. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. Radio Science. 2008. Vol. 43, No. 4. P. 1-10. DOI: https://doi.org/10.1029/2007RS003735.

11. Paznukhov V. V., Galushko V. G., Reinisch B. W. Digisonde observation of TIDs with frequency and angular sounding technique. Advances in Space Research. 2012. Vol. 49, No. 4. P. 700-710. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.012.

12. Laštovička J., Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. Advances in Space Research. 2017. Vol. 60, No. 8. P. 1629-1643. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032.

13. Shi S. Z., Zhao Z. Y., Liu J. N., Liu Y., Chen G., Li T., Yao M. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF sky-wave-multistatic radar. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014. Vol. 11, No. 7. P. 1270-1274. DOI: https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2291831.

14. Shi S. Z., Chen G., Yang G. B., Li T., Zhao Z. Y., Liu J. N. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 53, No. 4. P. 2185-2194. DOI: https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2357443.

15. Shi S. Z., Yang G. B., Zhao Z. Y., Liu J. N. A novel ionospheric oblique-incidence sounding network consisting of the ionospheric oblique backscatter sounder and parasitic oblique-incidence sounder. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. Vol. 12, No. 10. P. 2070-2074. DOI: https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2447524.

16. Schunk R. W., Nagy A. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. Cambridge University Press, 2000. 554 p.

17. Чорногор Л. Ф. Нелінійна радіофізика: підручник. Вид. 3-тє, переробл. та допов. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. 204 с.

18. Чорногор Л. Ф. Космічна погода: підручник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. 111 с.

19. Sugiura M. Hourly values of equatorial Dst for the IGY. Annals of the international geophysical year. 1964. Vol. 35. P. 9-45.

20. Sugiura M., Poros D. J. Hourly values of equatorial Dst for years 1957 to 1970. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1971. 205 p.

21. Chernogor L. F. Energetics of physical processes operated on May 8-12, 2024: from the solar storm to lithospheric disturbances. Advances in Space Research. 2025. Vol. 75, No. 6. P. 4825-4849. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.069.

22. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth - Atmosphere - Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. Radio Phys. Radio Astron. 2008. Vol. 13, No. 2. P. 120-137.

23. Чорногор Л. Ф. Фізичні ефекти сонячних затемнень в атмосфері та геокосмосі. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. 480 с.

24. Egbdal J., Ambolt N. The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1955. Vol. 7. P. 40-48.

25. Чорногор Л. Ф. Тепловий ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. у приземній атмосфері. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021. Т. 37, № 6. С. 34-48.

26. Chapman S. The influence of a solar eclipse upon the upper atmospheric ionization. Mon. Not. R. Astron. Soc. 1932. Vol. 92. P. 413-420.

27. Higgs A. J. Ionospheric Measurements Made During the Total Solar Eclipse of 1940 October 1. Mon. Not. R. Astron. Soc. 1942. Vol. 102, No. 1. P. 24-34. DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/102.1.24.

28. Ledig P. G., Jones M. W., Giesecke A. A., Chernosky E. J. Effects on the ionosphere at Huancayo, Peru, of the solar eclipse, January 25, 1944. J. Geophys.

Res. 1946. Vol. 51, No. 3. P. 411-418. DOI: https://doi.org/10.1029/TE051i003p00411.

29. Solar eclipses and the ionosphere. A symposium held under the auspices of the International Council of Scientific Unions, Mixed Commission on the Ionosphere / Beynon W. J. G., Brown G. M. (Eds.). London: Pergamon Press, 1956. 330 p.

30. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. Int. J. Rem. Sens. 2011. Vol. 32, No. 11. P. 3199-3218. DOI: https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510.

31. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. Geomagn. Aeron. 2012. Vol. 52, No. 6. P. 768-778. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793212050039.

32. Chernogor L. F. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. Geomagn. Aeron. 2013. Vol. 53, No. 1. P. 19-31. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793213010052.

33. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. Geomagn. Aeron. 2013. Vol. 53, No. 1. P. 113-123. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793213010076.

34. Pitout F., Blelly P.-L., Alcaydé D. High-latitude ionospheric response to the solar eclipse of 1 August 2008: EISCAT observations and TRANSCAR simulation. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2013. Vol. 105-106. P. 336-349. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.02.004.

35. Chen G., Wu C., Huang X., Zhao Z., Zhong D., Qi H., Huang L., Qiao L., Wang J. Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. J. Geophy. Res. Space Phys. 2015. Vol. 120, No. 4. P. 3009-3020. DOI: https://doi.org/10.1002/2014JA020849.

36. Adekoya B. J., Chukwuma V. U. Ionospheric F2 layer responses to total solar eclipses at low and mid-latitude. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. Vol. 138-139. P. 136-160. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.01.006.

37. Chernogor L. F. Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. Kinemat. Phys. Celest. Bodies. 2016. Vol. 32, No. 4. P. 196-206. DOI: https://doi.org/10.3103/S0884591316040024.

38. Marlton G. J., Williams P. D., Nicoll K. A. On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. Vol. 374, No. 2077. id:20150222. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0222.

39. Verhulst T. G. W., Sapundjiev D., Stankov S. M. High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. Advances in Space Research. 2016. Vol. 57, No. 11. P. 2407-2419. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.009.

40. Coster A. J., Goncharenko L., Zhang S.-R., Erickson P. J., Rideout W., Vierinen J. GNSS Observations of Ionospheric Variations During the 21 August 2017 Solar Eclipse. Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44, No. 24. P. 12041-12048. DOI: https://doi.org/10.1002/2017GL075774.

41. Huba J. D., Drob D. SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system. Geophysi. Res. Lett. 2017. Vol. 44, No. 12. P. 5928-5935. DOI: https://doi.org/10.1002/2017GL073549.

42. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsé D., Bruyninx C., Chevalier J.-M., Clette F., De Backer H., De Keyser J., D'Huys E., Dominique M., Lemaire J. F., Magdalenić J., Marqué C., Pereira N., Pierrard V., Sapundjiev D., Seaton D. B., Stegen K., Van der Linden R., Verhulst T. G. W., West M. J. Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. J. Space Weather Space Clim. 2017. Vol. 7. id:A19. DOI: https://doi.org/10.1051/swsc/2017017.

43. Zhang S.-R., Erickson P. J., Goncharenko L. P., Coster A. J., Rideout W., Vierinen J. Ionospheric Bow Waves and Perturbations Induced by the 21 August 2017 Solar Eclipse. Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44, No. 24. P. 12067-12073. DOI: https://doi.org/10.1002/2017GL076054.

44. Cherniak I., Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content Response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017. Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45, No. 3. P. 1199-1208. DOI: https://doi.org/10.1002/2017GL075989.

45. Dang T., Lei J., Wang W., Burns A., Zhang B., Zhang S.-R. Suppression of the Polar Tongue of Ionization During the 21 August 2017 Solar Eclipse. Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45, No. 7. P. 2918-2925. DOI: https://doi.org/10.1002/2018GL077328.

46. Dang T., Lei J., Wang W., Zhang B., Burns A., Le H., Wu Q., Ruan H., Dou X., Wan W. Global Responses of the Coupled Thermosphere and Ionosphere System to the August 2017 Great American Solar Eclipse. J. Geophys. Res. Space Phys. 2018. Vol. 123, No. 8. P. 7040-7050. DOI: https://doi.org/10.1029/2018JA025566.

47. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. Vol. 182. P. 1-9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.016.

48. Wang W., Dang T., Lei J., Zhang S., Zhang B., Burns A. Physical Processes Driving the Response of the *F*2 Region Ionosphere to the 21 August 2017 Solar Eclipse at Millstone Hill. J. Geophys. Res. Space Phys. 2019. Vol. 124, No. 4. P. 2978-2991. DOI: https://doi.org/10.1029/2018JA025479.

49. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. Radio Sci. 2020. Vol. 55, No. 2. id:e2019RS006866. DOI: https://doi.org/10.1029/2019RS006866.

50. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., et al. Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019. J. Geophys. Res.-Space. 2020. Vol. 125, No. 11. id:e2020JA028296.

51. Resende L. C. A., Zhu Y., Denardini C. M., et al. A multi-instrumental and modeling analysis of the ionospheric responses to the solar eclipse on 14 December 2020 over the Brazilian region. Ann. Geophys. 2022. Vol. 40. P. 191-203.

52. Sun Y.-Y., Chen C.-H., Su X., Wang J., Yu T., Xu H.-R., Liu J.-Y. Occurrence of nighttime irregularities and their scale evolution in the ionosphere due to the solar eclipse over East Asia on 21 June 2020. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2023. Vol. 128, No. 2. id:e2022JA030936.

53. Adekoya B. J., Adebesin B. O., David T. W., Ikubanni S. O., Adebiyi S. J., Bolaji O. S., Chukwuma V. U. Solar-eclipse-induced perturbations at mid-latitude during the 21 August 2017 event. Ann. Geophys. 2019. Vol. 37. P. 171-182.

54. Barad R. K., Sripathi S., England S. L. Multi-instrument observations of the ionospheric response to the 26 December 2019 solar eclipse over Indian and Southeast Asian longitudes. J. Geophys. Res. Space Phys. 2022. Vol. 127, No. 9. id:e2022JA030330.

55. Chernogor L. F., Garmash K. P. Ionospheric Processes during the Partial Solar Eclipse above Kharkiv on June 10, 2021. Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2022. Vol. 38, No. 2. P. 61-72.

56. Chukwuma V. U., Adekoya B. J. The effects of March 20 2015 solar eclipse on the F2 layer in the mid-latitude. Advances in Space Research. 2016. Vol. 58, No. 9. P. 1720-1731.

57. Emelyanov L. Ya., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Response of the mid-latitude ionosphere to the solar eclipse on 25 October 2022: results of F2 layer vertical sounding. Advances in Space Research. 2024. Vol. 73, No. 5. P. 2338-2354.

58. Jonah O. F., Goncharenko L., Erickson P. J., et al. Anomalous behavior of the equatorial ionization anomaly during the 2 July 2019 solar eclipse. J. Geophys. Res.-Space. 2020. Vol. 125, No. 9. id:e2020JA027909.

59. Le H., Liu L., Yue X., et al. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. Ann. Geophys. 2008. Vol. 26. P. 107-116.

60. Liu J. Y., Yang S. S., Rajesh P. K., et al. Ionospheric response to the 21 May 2012 annular solar eclipse over Taiwan. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. Vol. 124. P. 3623-3636.

61. Paulino I., Figueiredo C. A. O. B., Rodrigues F. S., et al. Atmospheric gravity waves observed in the nightglow following the 21 August 2017 total solar eclipse. Geophys. Res. Lett. 2020. Vol. 47, No. 17. id:e2020GL088924.

62. Tian Z., Sui Y., Zhu S., et al. Enhancement of electron density in the ionospheric F2 layer near the first contact of the total solar eclipse on 21 August 2017. Earth and Space Science. 2022. Vol. 9. id:e2021EA002016.

63. Wang J., Sun Y.-Y., Yu T., et al. Convergence effects on the ionosphere during and after the annular solar eclipse on 21 June 2020. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2022. Vol. 127. id:e2022JA030471. DOI: https://doi.org/10.1029/2022JA030471.

64. Sun Y.-Y., Shen M. M., Tsai Y.-L., et al. Wave steepening in ionospheric total electron density due to the 21 August 2017 total solar eclipse. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2021. Vol. 126. id:e2020JA028931. DOI: https://doi.org/10.1029/2020JA028931.

65. Beer T. On atmospheric wave generation by the terminator. Planet. Space Sci. 1978. Vol. 26. P. 185-188.

66. Bespalova A. V., Fedorenko A. K,. Cheremnykh O. K, Zhuk I. T. Satellite observations of wave disturbances caused by moving solar terminator. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2016. Vol. 140. P. 79-85.

67. Somsikov V. M. Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere: A review. Geomagn. Aeron. 2011. Vol. 51. P. 707-719. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793211060168.

68. 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. 2020. Vol. 66, No. 2. P. 226-242. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037.

69. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. Geomagn. Aeron. 2021. Vol. 61. P. 73-91. DOI: https://doi.org/10.1134/S001679322006002X.

70. 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. 2021. Vol. 39. P. 657-685. DOI: https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021.

71. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л.Ф., Шульга С. М. Ефекти геокосмічної бурі 5-6 серпня 2019 р.. Космічна наука і технологія. 2021. Т. 27, № 2 (129). С. 45-69. DOI: https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045.

72. Appleton E., Ingram L. Magnetic storms and upper atmospheric ionization. Nature. 1935. Vol. 136. P. 548-549. DOI: https://doi.org/10.1038/136548b0.

73. Danilov A. D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. Int. J. Geomagn. Aeron. 2001. Vol. 2. P. 209-224.

74. Danilov A. D., Morozova L. D. Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). Geomagn. Aeron. 1985. Vol. 25. P. 705-721.

75. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm?. Magnetic

storms. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. (Eds.). 1997. Vol. 98. P. 203-226. DOI: https://doi.org/10.1029/GM098p0203.

76. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. What is a geomagnetic storm?. J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 5771-5792. DOI: https://doi.org/10.1029/93JA02867.

77. Laštovička J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. J. Atmos. Terr. Phys. 1996. Vol. 58. P. 831-843. DOI: https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00106-9.

78. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. J. Geophys. Res. 1959. Vol. 64, No. 4. P. 305-321. DOI: https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305.

79. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms. Handbook of Atmospheric Electrodynamics. Volland H. (Ed.). P. 195-248. Florida, USA: CRC Press, Boca Raton, 1995.

80. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere. Magnetic storms. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. (Eds.). 1998. Vol. 98, P. 249-290. DOI: https://doi.org/10.1029/GM098p0227.

81. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932-2009. J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. id:A3. DOI: https://doi.org/10.1029/2011JA017093.

82. Wratt D. S. J. Ionisation enhancement in the middle latitude D-region due to precipitating high energy electrons. Atmos. Terr. Phys. 1976. Vol. 38, No. 5. P. 511-516.

83. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms - A Review. Space Sci. Rev. 1999. Vol. 88, No. 3-4. P. 563-601.

84. Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., Misawa H., Morioka A., Evans D. S. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms. Ann. Geophys. 2007. Vol. 25, No. 6. P. 1359-1364.

85. Sokolov S. N. Magnetic storms and their effects in the lower ionosphere: Differences in storms of various types. Geomagn. Aeron. 2011. Vol. 51. P. 741-752. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793211050124.

86. Akimov V. F., Kalinin Yu. K., Platonov T. D., Tulinova G. G., Shustov E. I. The effect of ballistic missile trail development in the midlatitude ionosphere. Geomagn. Aeron. 2000. Vol. 40, No. 4. P. 537-540.

87. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. Wave-like processes in the ionospheric *F* region that accompanied rocket launches from the Baikonur site. Geomagn. Aeron. 2006. Vol. 46, No. 6. P. 742-859. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793206060107.

88. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric Wave Disturbances Accompanied by Rocket Launches against a Background of Natural Transient Processes. Geomagn. Aeron. 2004. Vol. 44, No. 4. P. 476-491.

89. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation. Geomagn. Aeron. 2006. Vol. 46, No. 2. P. 199-208. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793206020083.

90. Burmaka V. P., Chernogor L. F. Complex diagnostics of disturbances in the ionospheric plasma parameters far from the trajectories of launched rockets. Geomagn. Aeron. 2009. Vol. 49, No. 5. P. 637-652. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793209050119.

91. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. 542 p.

92. Nagorskii P. M. Analysis of the response of an HF radio signal to ionospheric plasma disturbances caused by acoustic shock waves. Radiophysics and Quantum Electronics. 1999. Vol. 42, No. 1. P. 36-44.

93. Chernogor L. F. Geomagnetic field fluctuations near Kharkov, which accompanied rocket launches from the Baikonur site. Geomagn. Aeron. 2009. Vol. 49, No. 3. P. 403-415.

94. Bernhardt P. A., Ballenthin J. O., Baumgardner J. L., Bhatt A., Boyd I. D., Burt J. M., Caton R. G., Coster A., Erickson P. J., Huba J. D., Earle G. D., Kaplan C. R., Foster J. C., Groves K. M., Haaser R. A., Heelis R. A., Hunton D. E., Hysell D. L., Klenzing J. H., Larsen M. F., Lind F. D., Pedersen T. R., Pfaff R. F., Stoneback R. A., Roddy P. A., Rodriquez S. P., San Antonio G. S., Schuck P. W., Siefring C. L., Selcher C. A., Smith S. M., Talaat E. R., Thomason J. F., Tsunoda R. T., Varney R. H. Ground and Space-Based Measurement of Rocket Engine Burns in the Ionosphere. IEEE Transactions on Plasma Sciences. 2012. Vol. 40, No. 5. P. 1267-1286.

95. Bernhardt P. A., Kashiwa B. A., Tepley C. A., Noble S. T. Spacelab 2 Upper Atmospheric Modification Experiment Over Arecibo. I - Neutral Gas Dynamics. Astrophys. Lett. Comm. 1988. Vol. 27. P. 169-181.

96. Bernhardt P., Swartz W., Kelly M., Sulzer M., Noble S. T. Spacelab 2 Upper Atmospheric Modification Experiment over Arecibo. II - Plasma dynamics. Astrophys. Lett. Comm. 1988. Vol. 27, No. 3. P. 183-198.

97. Booker H. G. A local reduction of F region ionization due to missile transit. J. Geophys. Res. 1961. Vol. 66, No. 4. P. 1073-1079.

98. Bowden G. W., Lorrain P., Brown M. Numerical Simulation of Ionospheric Depletions Resulting From Rocket Launches Using a General Circulation Model. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020. Vol. 125, No. 6. id:e2020JA027836.

99. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. Radio Physics and Radio Astronomy. 1998. Vol. 3, No. 2. P. 181-190.

100. Chou M.-Y., Lin C. C. H., Shen M.-H., Yue J., Huba J. D., Chen C.-H. Ionospheric Disturbances Triggered by SpaceX Falcon Heavy. Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45, No. 13. P. 6334-6342.

101. Chou M.-Y., Shen M.-H., Lin C. C. H., Yue J., Chen C.-H., Liu J.-Y., Lin J.-T. Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the

Launch of FORMOSAT-5 Satellite. Space Weather. 2018. Vol. 16, No. 2. P. 172-184.

102. Ding F., Wan W., Mao T., Wang M., Ning B., Zhao B., Xiong B. Ionospheric response to the shock and acoustic waves excited by the launch of the Shenzhou 10 spacecraft. Geophys. Res. Lett. 2014. Vol. 41, No. 10. P. 3351-3358.

103. Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kapanin I. I., Karpachov A. I., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Mashtaler N. N., Milovanov Yu. B., Misyura V. A., Pakhomova O. V., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Protopop E. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N., Fedorenko Yu. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F., Chulakov S. G., Shemet A. S. Complex radiophysical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft. Space Plasma Physics. Kyiv: SSAU, 1995. P. 161-170.

104. Jackson J. E., Whale H. A., Bauer S. J. Local ionospheric disturbance created by a burning rocket. J. Geophys. Res. 1962. Vol. 67, No. 5. P. 2059-2061.

105. Kakinami Y., Yamamoto M., Chen C.-H., Watanabe S., Lin C., Liu J.-Y., Habu H. Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012. J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. Vol. 118, No. 8. P. 5184-5189.

106. Li G., Ning B., Abdu M. A., Wang C., Otsuka Y., Wan W., Lei J., Nishioka M., Tsugawa T., Hu L., Yang G., Yan C. Daytime F-region irregularity triggered by rocket-induced ionospheric hole over low latitude. Progress in Earth and Planetary Science. 2018. Vol. 5, No. 1. id:11.

107. Lin C. H., Lin J. T., Chen C. H., Liu J. Y., Sun Y. Y., Kakinami Y., Matsumura M., Chen W. H., Liu H., Rau R. J. Ionospheric shock waves triggered by rockets. Ann. Geophys. 2014. Vol. 32, No. 9. P. 1145-1152.

108. Lin C. C. H., Shen M.-H., Chou M.-Y., Chen C.-H., Yue J., Chen P.-C., Matsumura M. Concentric traveling ionospheric disturbances triggered by the launch of a SpaceX Falcon 9 rocket. Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44, No. 15. P. 7578-7586.

109. Ma X., Fang H., Wang S., Chang S. Impact of the ionosphere disturbed by rocket plume on OTHR radio wave propagation. Radio Science. 2021. Vol. 56, No. 4. id:e2020RS007183.

110. Mendillo M. The effect of rocket launches on the ionosphere. Advances in Space Research. 1981. Vol. 1, No. 2. P. 275-290.

111. Mendillo M. Ionospheric holes: A review of theory and recent experiments. Advances in Space Research. 1988. Vol. 8, No. 1. P. 51-62.

112. Mendillo M., Baumgardner J., Allen D. P., Foster J., Holt J., Ellis G. R. A., Klekociuk A., Reber G. Spacelab-2 plasma depletion experiments for ionospheric and radio astronomical studies. Science. 1987. Vol. 238, No. 4831. P. 1260-1264.

113. Mendillo M., Hawkins G. S, Klobuchar J. A. A Large-Scale Hole in the Ionosphere Caused by the Launch of Skylab. Science. 1975. Vol. 187, No. 4174. P. 343-346.

114. Mendillo M., Hawkins G. S., Klobuchar J. A. A sudden vanishing of the ionospheic F region due to the launch of Skylab. J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80, No. 16. P. 2217-2228.

115. Nakashima Y., Heki K. Ionospheric hole made by the 2012 North Korean rocket observed with a dense GNSS array in Japan. Radio Science. 2014. Vol. 49, No. 7. P. 497-505.

116. Saha K., De B. K., Paul B., Guha A. Satellite launch vehicle effect on the Earth’s lower ionosphere: A case study. Advances in Space Research. 2020. Vol. 65, No. 11. P. 2507-2514.

117. Savastano G., Komjathy A., Shume E., Vergados P., Ravanelli M., Verkhoglyadova O., Meng X., Crespi M. Advantages of geostationary satellites for ionospheric anomaly studies: Ionospheric plasma depletion following a rocket launch. Remote Sensing. 2019. Vol. 11, No. 14. id:1734.

118. Ssessanga N., Kim Y. H., Choi B., Chung J.-K. The 4D-var estimation of North Korean rocket exhaust emissions into the ionosphere. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. Vol. 123, No. 3. P. 2315-2326.

119. Wand R. H., Mendillo M. Incoherent scatter observations of an artificially modified ionosphere. J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. id:A1. P. 203-215.

120. Zhu J., Fang H., Xia F., Wan T., Tan X. Numerical Simulation of Ionospheric Disturbance Generated by Ballistic Missile. Advances in Mathematical Physics. 2019. Vol. 2019. id:7935067. DOI: https://doi.org/10.1155/2019/7935067.

121. Zhu J., Fang H. Research on the disturbance of ballistic missile to ionosphere by using 3D ray tracing method. Advances in Space Research. 2020. Vol. 65, No. 3. P. 933-942.

122. Zinn J., Sutherland C. D., Stone S. N., Duncan L. M., Behnke R. Ionospheric effects of rocket exhaust products: HEAO-C and Skylab. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1982. Vol. 44, No. 12. P. 1143-1171.

123. Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. New York, Heildelberg, Berlin: Springer - Verlag, 1978. 465 p.

124. Gurevich A. V. Modern problems of ionospheric modification. Radiophysics and Quantum Electronics. 1999. Vol. 42, No. 7. P. 525-532. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02677558.

125. Gurevich A. V., Zybin K. P., Carlson H. C. Magnetic-Zenith Effect. Radiophysics and Quantum Electronics. 2005. Vol. 48. P. 686-699. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-005-0113-7.

126. Belikovich V. V., Grach S. M., Karashtin A. N., et al. The “Sura” facility: Study of the atmosphere and space (a review). Radiophysics and Quantum Electronics. 2007. Vol. 50, No. 7. P. 497-526. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-007-0046-4.

127. Burmaka V. P., Domnin I. F., Uryadov V. P., et al. Variations in the parameters of scattered signals and the ionosphere connected with plasma modification by high-power radio waves. Radiophysics and Quantum Electronics. 2009. Vol. 52, No. 11. P. 774-795. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-010-9191-2.

128. Chernogor L. F., Frolov V. L., Komrakov G. P., et al. Variations in the ionospheric wave perturbation spectrum during periodic heating of the plasma by

high-power high-frequency radio waves. Radiophysics and Quantum Electronics. 2011. Vol. 54, No. 2. P. 75-88. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-011-9272-x.

129. Chernogor L. F., Frolov V. L. Traveling ionospheric disturbances generated due to periodic plasma heating by high-power high-frequency radiation. Radiophysics and Quantum Electronics. 2012. Vol. 55, No. 1-2. P. 13-32. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-012-9346-4.

130. Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Förster M. *F*2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams. Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39, No. 11. id:L11101.

131. Chernogor L. F., Frolov V. L. Features of Propagation of the Acoustic-Gravity Waves Generated by High-Power Periodic Radiation. Radiophysics and Quantum Electronics. 2013. Vol. 56, No. 4. P. 197-215. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-013-9426-0.

132. Chernogor L. F., Frolov V. L. Features of the Wave Disturbances in the Ionosphere During Periodic Heating of the Plasma by the “Sura” Radiation. Radiophysics and Quantum Electronics. 2013. Vol. 56, No. 5. P. 276-289. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-013-9432-2.

133. Frolov V. L., Rapoport V. O., Schorokhova E. A., et al. Features of the Electromagnetic and Plasma Disturbances Induced at the Altitudes of the Earth’s Outer Ionosphere by Modification of the Ionospheric F 2 Region Using High-Power Radio Waves Radiated by the SURA Heating Facility. Radiophysics and Quantum Electronics. 2016. Vol. 59, No. 3. P. 177-198. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-016-9688-4.

134. Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., Frolov V. L., Honary F., Kosch M. J., McCoy R. P., Mishin E. V., Rietveld M. T. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space. Space Science Reviews. 2018. Vol. 214, No. 8. id:118.

135. Chernogor L. F., Garmash K. P., Frolov V. L. Large-Scale Disturbances in the Lower and Middle Ionosphere Accompanying Its Modification by the Sura

Heater. Radiophysics and Quantum Electronics. Vol. 62, No. 6. P. 395-411. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-019-09986-7.

136. Chernogor L. F., Frolov V. L. Large-Scale Disturbances Features Induced in the Ionosphere by Powerful Decameter Radiation during Moderate Magnetic Storms. Geomagn. Aeron. 2021. Vol. 61, No. 5. P. 721-742. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793221040034.

137. Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Aperiodic Large-Scale Disturbances in the Lower Ionosphere. Ionosonde Observation Results. Radiophysics and Quantum Electronics. 2014. Vol. 57, No. 2. P. 100-116. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-014-9496-7.

138. Frolov V. L., Akchurin A. D., Bolotin I. A., et al. Precipitation of Energetic Electrons from the Earth's Radiation Belt Stimulated by High-Power HF Radio Waves for Modification of the Midlatitude Ionosphere. Radiophysics and Quantum Electronics. 2020. Vol. 62, No. 9. P. 571-590. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-020-10004-4.

139. Ryabov A. O., Frolov V. L., Akchurin A. D. Artificial Precipitation of Energetic Electrons in a Magnetically Conjugate Region of the Ionosphere Relative to the Sura Facility. Radiophysics and Quantum Electronics. 2020. Vol. 63, No. 4. P. 257-267. DOI: https://doi.org/10.1007/s11141-021-10050-6.

140. Reinisch B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Bibl K., Lisysyan I. A., Cheney G. P., Huang X., Kitrosser D. F., Paznukhov V. V., Luo Y., Jones W., Stelmash S., Hamel R., Grochmal J. New Digisonde for research and monitoring applications. Radio Science. 2009. Vol. 44, No. 1. P. 1-15.

141. Чорногор Л. Ф., Милованова Л. І., Милованов Ю. Б., Цимбал А. М., Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. В іоносфері над Харковом: результати вертикального зондування. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021. Т. 35. С. 60-78. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-06.

142. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. Geomagn. Aeron. 2012. Vol. 52, No. 6. P. 779-792.

143. Davies K. Ionospheric radio. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 600 p. DOI: http://dx.doi.org/10.1049/PBEW031E.

144. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. Telecommunications and Radio Engineering. 1999. Vol. 53, No. 4-5. P. 6-20.

145. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Rozumenko V. T., Tsymbal A. M., Tyrnov O. F. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. Sun and Geosphere. 2012. Vol. 7, No. 2. P. 133-139.

146. 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. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 186. P. 88-103.

147. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. Н. Варіації характеристик радіохвиль ВЧ діапазону над Китаєм, які супроводжували помірний землетрус в Японії 5 вересня 2018 р.. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2019. Т. 30. С. 16-26.

148. Marple S. L. Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1987. 492 p.

149. Chernogor L. F. Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. Geomagn. Aeron. 2008. Vol. 48, No. 5. P. 652-673. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793208050101.

150. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2020. Vol. 207. id:105336.

151. 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». 2019. Vol. 30. P. 3-15. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-01.

152. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y., Luo Y. Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6-13 October 2019: Results from multi-frequency multiple path sounding at oblique incidence. Advances in Space Research. 2021. Vol. 67, No. 8. P. 2439-2469. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038.

153. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y., Luo Y. Disturbances in the ionosphere that accompanied typhoon activity in the vicinity of China in September 2019. Radio Science. 2022. Vol. 57. id:e2022RS007431. DOI: https://doi.org/10.1029/2022RS007431.

154. 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. 2022. Vol. 127. id:e2022JA030553. DOI: https://doi.org/10.1029/2022JA030553.

155. 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. 2023. Vol. 41, No. 1. P. 173-195. DOI: https://doi.org/10.5194/angeo-41-173-2023.

156. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric disturbances during the severe magnetic storm of November 7-10,

2004. Geomagn. Aeron. 2007. Vol. 47. P. 720-738. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793207060059.

157. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations. Geomagn. Aeron. 2006. Vol. 46. P. 183-198. DOI: https://doi.org/10.1134/S0016793206020071.

158. Goncharenko, L.P., Erickson, P.J., Zhang, S.-R., et al. Ionospheric response to the solar eclipse of 21 August 2017 in Millstone Hill (42N) observations. Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45, No. 10. P. 4601-4609.

159. Chernogor L. F. Atmosphere-Ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. Geomagn. Aeron. 2016. Vol. 56, No. 5. P. 592-603.

160. Uryadov V. P., Kolchev A. A., Vybornov F. I., Shumaev V. V., Egoshin A. I., Chernov A. G. Ionospheric Effects of a Solar Eclipse of March 20, 2015 on Oblique Sounding Paths in the Eurasian Longitudinal Sector. Radiophysics and Quantum Electronics. 2016. Vol. 59, No. 6. P. 431-441.

161. Chernogor L. F. Garmash K. P. Magneto-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. Geomagn. Aeron. 2017. Vol. 57, No. 1. P. 72-83.

162. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2002. Vol. 64, No. 18. P. 1933-1941.

163. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., et al. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25, No. 4. P. 465-468.

164. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. Ionospheric effects of the August 11, 2018, solar eclipse over the People's Republic of China. Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2020. Vol. 36, No. 6. P. 274-290.

165. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B. Ionospheric Effects of the June 10, 2021, Solar Eclipse in the Arctic. Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2022. Vol. 38, No. 4. P. 197-209.

166. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B., Dorokhov V. L., et al. TEC variations in equatorial ionosphere during June 21, 2020 solar eclipse. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series «Radio Physics and Electronics». 2022. Vol. 36. P. 49-65.

167. Чорногор Л. Ф. Милованов Ю. Б. Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. Т. 27, № 2. С. 93-109. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093.

168. Tsai H. F., Liu J. Y. Ionospheric total electron content response to solar eclipses. J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. id:A6. P. 12657-12668.

169. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System, Theory and Practice. New York: Springer-Verlag, 1992. 326 p.

170. Чорногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Глобальні варіації повного електронного вмісту в екваторіальній іоносфері протягом кільцеподібного сонячного затемнення 21 червня 2020 р.. Кінематика і фізика небесних тіл. 2023. Т. 39, № 4. С. 3-33.

171. Чорногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. у Заполяр'ї. Кінематика і фізика небесних тіл. 2022. Т. 38, № 4. С. 29-52.

172. Чорногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. Т. 27. № 2. С. 93-109. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093.

173. Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г. Допплерівське зміщення частоти ВЧ радіохвиль у іоносфері на похилих радіотрасах. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 39. С. 60-68. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-05.

174. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., Жданко Є. Г., Леус С. Г., Поднос В. А. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування

іоносфери. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2020. Т. 33. С. 42-59.

175. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Жданко Є. Г., Пушин В. Ф., Цимбал А. М., Zheng Yu. Параметри рухомих іоносферних збурень: результати просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 37. С. 47-59. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-04.

176. 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. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 186. P. 88-103.

177. Chernogor L. F. Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. Geomagn. Aeron. 2015. Vol. 55, No. 3. P. 353-368.

178. Gossard E. E., Hooke W. H. Waves in the Atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves, their generation and propagation. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Publ. Co., 1975. 472 p.

179. Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. Ann. Geophys. 2013. Vol. 31. P. 163-172.

180. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., Жданко Є. Г., Леус С. Г., Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р.. Радіофізика і радіоастрономія. 2021. Т. 26, № 4. С. 326-343. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326.

181. Чорногор Л. Ф., Дорохов В. Л., Жданко Є. Г., Милованов Ю. Б., Цимбал А. М. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. поблизу вечірнього термінатора. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 39. С. 69-78. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-06.

182. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Zhdanko Y. H. Response of total electron content to the October 25, 2022 partial solar eclipse from high to low latitudes in the Euro-Asian region. Advances in Space Research. Vol. 74, No. 4. P. 1793-1809. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.020.

183. Chauvenet W. Manual of Spherical and Practical Astronomy, 5th ed. Vol. 1. New York: Dover Publications, 1960. 704 p.

184. Emelyanov L. Ya., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Response of the mid-latitude ionosphere to the solar eclipse on 25 October 2022: results of F2 layer vertical sounding. Advances in Space Research. 2024. Vol. 73, No. 5. P. 2338-2354.

185. Le H., Liu L., Yue X., et al.. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. Ann. Geophys. 2008. Vol. 26. P. 107-116. DOI: https://doi.org/10.5194/angeo-26-107-2008.

186. Chen G., Zhao Z., Ning B., et al. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. id:A06301. DOI: https://doi.org/10.1029/2010JA016305.

187. Luo Y., Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г. Іоносферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28, № 3 (136). С. 62-85. DOI: https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062.

188. Luo Y., Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г. Геокосмічні збурення, що супроводжували старти ракет з космодрому Байконур. Кінематика і фізика небесних тіл. 2022. Т. 38, № 6. С. 3-24. DOI: https://doi.org/10.15407/kfnt2022.06.003.

189. Luo Y., Chernogor L. F., Zhdanko Y. H. Geospace perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome. Kinematics and physics of celestial bodies. 2022. Vol. 38, No. 6. P. 287-299. DOI: https://doi.org/10.3103/S0884591322060046.

190. Бурмака В. П., Костров Л. С., Чорногор Л. Ф. Статистичні характеристики сигналів допплерівського ВЧ радара при зондуванні середньої

іоносфери, збуреної стартами ракет та сонячним термінатором. Радіофізика і радіоастрономія. 2003. Т. 8, № 2. С. 143-162.

191. Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm. Geomagn. Aeron. 1999. Vol. 39, No. 1. P. 69-75.

192. Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г., Luo Y. Особливості генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного стенда. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. Т. 27, № 3. С. 188-202. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra27.03.188.

193. Chernogor L. F., Zhdanko Y. H., Guo Q., Zheng Y., Wang J. Effects from the 23–24 April 2023 geospace storm over the People’s Republic of China. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 28–31, 2024, Kyiv. P. 70-72.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в фахових виданнях:

1. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., **Жданко Є. Г.**, Пушин В. Ф., Цимбал А. М., Zheng Yu. Параметри рухомих іоносферних збурень: результати просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 37. С. 47-59. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-04.

(Особистий внесок здобувача: Участь в обробці експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Розрахунок основних параметрів рухомих іоносферних збурень. Участь у фізичній інтерпретації отриманих результатів.

Особистий внесок Чорногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та основних результатів, їх аналіз.

Особистий внесок Гармаша К.П.: Розробка комплексу. Проведення випробувань його працездатності.

Особистий внесок Guo Q.: Здійснення вимірювань.

Особистий внесок Zheng Yu.: Здійснення вимірювань.

Особистий внесок Пушина В.Ф.: Розробка математичної моделі.

Особистий внесок Цимбала А.М.: Участь в обробці експериментальних даних.)

2. Чорногор Л. Ф., **Жданко Є. Г.** Допплерівське зміщення частоти ВЧ радіохвиль у іоносфері на похилих радіотрасах. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 39. С. 60-68. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-05.

(Особистий внесок здобувача: Виконання аналітичних обчислень та розрахунків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.

Особистий внесок Чорногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та заключних висновків.)

3. Чорногор Л. Ф., Дорохов В. Л., **Жданко Є. Г.**, Милованов Ю. Б., Цимбал А. М. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. поблизу вечірнього термінатора. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Т. 39. С. 69-78. DOI: https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-06.

(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів. Аналіз часових варіацій ПЕВ. Участь у фізичному тлумаченні отриманих результатів.

Особистий внесок Чорногора Л.Ф.: Постановка задачі. Фізичне тлумачення. Написання обговорення та основних результатів.

Особистий внесок Дорохова В.Л.: Збір експериментальних даних.

Особистий внесок Милованова Ю.Б.: Обробка експериментальних даних.

Особистий внесок Цимбала А.М.: Обробка експериментальних даних.)

Наукові праці в наукових виданнях, які індексуються в науковометричній базі SCOPUS:

4. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., **Zhdanko Y. H.** Response of total electron content to the October 25, 2022 partial solar eclipse from high to low latitudes in the Euro-Asian region. Advances in Space Research. Vol. 74, No. 4. P. 1793-1809. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.020.

5. Чорногор Л. Ф., Гармаш К. П., **Жданко Є. Г.**, Леус С. Г., Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. Радіофізика і радіоастрономія. 2021. Т. 26, № 4. С. 326-343. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326.

6. Luo Y., Чорногор Л. Ф., **Жданко Є. Г.** Іоносферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28, № 3 (136). С. 62-85. DOI: https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062.

7. Чорногор Л. Ф., **Жданко Є. Г.**, Luo Y. Особливості генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного стенда. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. Т. 27, № 3. С. 188-202. DOI: https://doi.org/10.15407/rpra27.03.188.

8. Luo Y., Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Geospace perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome. Kinematics and physics of celestial bodies. 2022. Vol. 38, No. 6. P. 287-299. DOI: https://doi.org/10.3103/S0884591322060046.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Analytical theory of the Doppler shift of HF radio waves along oblique propagation paths in the isotropic ionosphere. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18–21, 2022, Kyiv. P. 86-87.

2. Chernogor L. F., Garmash K. P., Leus S. G., Podnos V. A., Tsymbal A. M., **Zhdanko Y. H.** Multifrequency Doppler Software-Controlled Receiving System for Space Weather Monitoring. Proceedings of the 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). October 10–14, 2022, Kyiv. P. 606-611. DOI: https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927064.

3. Chernogor L. F., Rozumenko V. T., **Zhdanko Y. H.** Doppler (HF) Radar Facility for Monitoring Dynamic Processes in Geospace. 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). October 10–14, 2022, Kyiv. P. 600-605. DOI: https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927090.

4. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., **Zhdanko Y. H.**, Zheng Yu. Features of the ionospheric radio wave characteristics over China observed during the solar eclipse of June 21, 2020. Proceedings of the International

Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022. October 18–22, 2022, Kyiv. P. 132-133.

5. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Pushin V. F., Tsymbal A. M., **Zhdanko Y. H.**, Zheng Yu. Parameters of traveling ionospheric disturbances: from spaced oblique HF sounding data. Proceedings of the International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”, APHYS 2022. October 18–22, 2022, Kyiv. P. 128-129.

6. Chernogor L. F., Pushin V. F., **Zhdanko Y. H.** Methodology and results of the study of traveling ionospheric disturbances parameters from spaced oblique HF sounding data. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18–21, 2022, Kyiv. P. 87-88.

7. Chernogor L. F., Garmash K. P., **Zhdanko Y. H.** Features of ionospheric effects from the partial solar eclipse over the city of Kharkiv on 10 June 2021. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 23–26, 2023, Kyiv. P. 127-128.

8. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Ionospheric perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome during solar cycle 24. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 23–26, 2023, Kyiv. P. 128-130.

9. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.** Effects of rocket launches in the ionosphere during geospace storms. Proceedings of the XIX International Scientific Conference Electronics and Applied Physics APHYS 2023. October 17–21, 2023, Kyiv. P. 105-107.

10. Chernogor L. F., **Zhdanko Y. H.**, Guo Q., Zheng Y., Wang J. Effects from the 23–24 April 2023 geospace storm over the People’s Republic of China. Proceedings of the International Conference “Astronomy and Space Physics in the

Kyiv University” in part of the Science Day in Ukraine. May 28–31, 2024, Kyiv. P. 70-72.

11. Chernogor L. F., Pushin V. F., **Zhdanko Y. H.** The impact of ionospheric disturbances on decameter radio wave trajectories. Proceedings of the XX International Scientific Conference Electronics and Applied Physics APHYS 2024. October 22–25, 2024, Kyiv. P. 212-213.

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 08:46:32 16.06.2025

Назва файлу з підписом: Zhdanko_diss.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 15.1 МБ

Перевірені файли:
Назва файлу без підпису: Zhdanko_diss.pdf
Розмір файлу без підпису: 16.5 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: ЖДАНКО ЄВГЕН ГЕННАДІЙОВИЧ
П.І.Б.: ЖДАНКО ЄВГЕН ГЕННАДІЙОВИЧ
Країна: Україна
РНОКПП: 3589003896
Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 08:46:28 16.06.2025
Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер: 5E984D526F82F38F0400000015EBB8019B100D06
Алгоритм підпису: ДСТУ 4145
Тип підпису: Удосконалений
Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)
Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)
Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00