

# ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

---

## WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.188>  
УДК 550.388

Л.Ф. Черногор, Є.Г. Жданко, У. Луо

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна  
майдан Свободи, 4, 61022, м. Харків, Україна  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

### ОСОБЛИВОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ ЗБУРЕНЬ В ІОНОСФЕРІ ПІД ДІЄЮ МОНОІМПУЛЬСНОГО ТА ПЕРІОДИЧНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НАГРІВНОГО СТЕНДА

---

**Предмет і мета роботи.** Взаємодії потужного радіовипромінювання з іоносферою традиційно приділяється багато уваги. При цьому детально досліджується велика кількість фізичних ефектів, що виникають у межах діаграми направленості антени нагрівного стенда. Вплив потужним радіовипромінюванням на іоносферу також є зручним інструментом для дослідження взаємодії підсистем у системі «Земля—атмосфера—іоносфера—магнітосфера», генерації та поширення збурень далеко за межі діаграми направленості випромінюючої антени. Такі збурення відносяться до великомасштабних. Мета цієї роботи — виклад результатів аналізу особливостей генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного стенда.

**Методи і методологія.** Для впливу на іоносферу потужним радіовипромінюванням використовувався нагрівний стенд «Сура». Діагностика збурень проводилася на відстані 960 км від нагрівного стенда за допомогою доплерівського радару вертикального зондування.

**Результати.** Уперше 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 на іоносферну плазму моноімпульсу тривалість реакції іоносфери співпадала з його тривалістю. При цьому квазіперіодичні варіації доплерівського зміщення частоти тільки починали генеруватися. Удавана горизонтальна швидкість поширення збурень становила від ~300 до ~420 м/с. Важливо, 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.

**Висновки.** Встановлено основні особливості у варіаціях доплерівських спектрів, викликані потужним радіовипромінюванням.

**Ключові слова:** іоносфера, нагрівний стенд, доплерівський радар, збурення концентрації електронів.

---

Цитування: Черногор Л.Ф., Жданко Є.Г., Луо У. Особливості генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного стенда. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27, № 3. С. 188—202. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.188>

Citation: Chernogor, L.F., Zhdanko, Y.H., and Luo, Y., 2022. Features of the large-scale ionospheric disturbances generated under the action of monopulse or periodic radio-frequency emissions from a heating facility. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(3), pp. 188—202. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.188>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## Вступ

Взаємодії потужного радіовипромінювання з іоносферою в кінці ХХ і на початку ХХІ століть приділялося багато уваги [1–24]. Було детально досліджено велику кількість фізичних ефектів, що виникають у межах або поблизу діаграми направленості 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 «Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера», генерації та поширення збурень далеко за межі діаграми направленості випромінюючої антени [6, 18]. Такі збурення вважають великомасштабними. У роботі [25] описано механізми генерації квазіперіодичних великомасштабних збурень. Найбільш ефективним серед них є модуляція іоносферних струмів в області верхнього гібридного резонансу, посилена ефектом магнітного zenіту, 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 zenіту та нагрів електронів під дією періодичного радіовипромінювання призводить до слабкого нагріву іонів і нейтралів на висотах, більших 250 км, генерації акустико-гравітаційних хвиль у нейтральній атмосфері, модуляції цими хвилями концентрації електронів і поширення приблизно на 1...2 тис. км рухомих іоносферних збурень [11–18, 23–25]. 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, а також певні типи хвильових збурень, що досягають висот 800 км, а можливо, і більших [26, 27]. Особливий інтерес становить можливість генерації квазіпостійних варіацій геоелектричного та геомагнітного полів, а також досить низькочастотних електромагнітних хвиль, що проникають у магнітосферу та здатні викликати висипання високоенергійних електронів з радіаційного поясу

і, як наслідок цього, додаткову іонізацію атмосфери [6, 16–18, 28–30]. Так може реалізовуватися взаємодія підсистем за схемою зі зворотним зв'язком: іоносфера → магнітосфера → радіаційний пояс → атмосфера → іоносфера [16–18, 29].

Взаємодія підсистем у системі «Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера» носить складний характер і на цей час вивчена ще недостатньо повно як в експериментальному, так і в теоретичному аспекті. Потрібна постановка цілеспрямованих експериментів і разом з цим – пошук оптимальних режимів випромінювання нагрівних стендів. Особливий інтерес представляє вивчення взаємодії підсистем у середніх широтах, де в природних умовах вона не так явно виражена, як у високих широтах.

Посилення взаємодії підсистем у середніх широтах спостерігається під час слабких і помірних магнітних бур, коли система «Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера» активується, стає метастабільною і її легше перевести в нестабільний стан, діючи відносно слабкими потоками потужного радіовипромінювання [17, 18, 24, 28–30]. Як відомо, у період геокосмічних бур 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 (з енергією порядку 1...100 кеВ) електрони, які потім висипаються в іоносферу протягом наступних 10...15 діб, підтримуючи її збурений стан (див., наприклад, [31–37]).

У роботах [6, 23] описано результати перших, ранніх і нецілеспрямованих експериментальних досліджень великомасштабних (~1 000 км) аперіодичних і квазіперіодичних збурень у нижній і середній іоносфері, а також викладено основні результати сучасних експериментів.

Авторами [23] за допомогою методів часткового відбиття, вертикального та похилого багатотрасового багаточастотного зондування були проведені комплексні радіофізичні спостереження за великомасштабними (~1 000 км) аперіодичними збуреннями у нижній іоносфері та квазіперіодичними збуреннями в середній іоносфері, які супроводжували вплив на іоносферу потужного (ефективна потужність – 40...95 МВт) нестационарного радіовипромінювання стенда «Сура». Спостереження виконані в обсерваторіях ХНУ

імені В.Н. Каразіна протягом чотирьох вимірвальних кампаній у 2017–2018 рр. Час запізнювання аперіодичних збурень у нижній іоносфері становив 15...18 хв, а їх тривалість – 5...10 хв. Збурення слідували за ввімкненням/вимкненням потужного радіовипромінювання. У роботі [23] проаналізовано природу цих збурень. Основні ефекти в середній іоносфері були такі. За ефективною потужності станда не менше 40...60 МВт приблизно через 40...60 хв після початку його випромінювання на радіотрасах, віддалених на ~1000 км від місця впливу, доплерівські спектри (ДС) помітно розширювалися, проявлялася багатопроменевість. Періодичний нагрів іоносфери призводив до періодичних варіацій доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) з максимальним відхиленням 0.1...0.2 Гц і амплітуди сигналу. Тривалість реакції становила 70...180 хв. Цим варіаціям відповідало відносно збурення  $\delta_N$  концентрації електронів  $N$  від 3 до 12 %. Квазіперіодичні варіації ДЗЧ й амплітуди викликані генерацією та поширенням хвиль зі швидкостями від 0.2 до 1.6 км/с і періодами 15...30 хв. Швидкість 0.2...0.4 км/с, на відміну від швидкості ~1.6 км/с, спостерігалася регулярно.

Автори [23] також зазначили основні напрямки майбутніх досліджень проявів великомасштабних аперіодичних і квазіперіодичних збурень в іоносфері та їх вплив на характеристики поширення радіохвиль на віддалених радіотрасах.

У роботі [24] наведені результати експериментальних досліджень аперіодичних і квазіперіодичних збурень в іоносфері, що спостерігалися під впливом потужного радіовипромінювання станда «Сура» на геокоосмічну плазму в спокійних і магнітозбурених умовах. Для діагностики використовувався доплерівський радар вертикального зондування, розташований на відстані близько 960 км від нагрівного станда. Реєстровані аперіодичні збурення, що мали час запізнювання близько 25 хв (удавану горизонтальну швидкість поширення 640 м/с), швидше за все, пов'язані з генерацією ударно-хвильового імпульсу атмосферно-гравітаційної природи. Квазіперіодичні збурення з періодом 12...15 хв в одних випадках мали період, що дорівнює періоду циклу нагріву, а в інших – періоду власних коливань в атмосфері. Швидкість квазіперіодичних збурень становила ~300...400 м/с. Обгово-

рюються ефекти штучної генерації плазмової турбулентності, спільної дії сонячного термінатора та потужного радіовипромінювання, а також ефекти, пов'язані з впливом на іоносферу радіохвилі з частотою, рівною четвертій гармоніці гірчостоти електронів. Відзначається підготовча роль магнітної активності в системі «Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера», що визначила характер збурень в іоносфері.

Мета цієї роботи – виклад результатів аналізу особливостей генерації великомасштабних збурень в іоносфері під дією моноімпульсного та періодичного радіовипромінювання нагрівного станда декаметрового діапазону поблизу мінімуму сонячної активності за наявності слабкої та помірної магнітних бур.

## 1. Стан космічної погоди

Уявлення про стан космічної погоди на певну дату можна отримати, використовуючи дані сайту <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>>.

За фоновому значення концентрації  $n_{sw}$  заряджених частинок у сонячному вітрі близько  $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  24 і 27 серпня 2021 р. спостерігалось збільшення до  $20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  і  $24 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  відповідно (рис. 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  $(0.1...0.2) \cdot 10^5 \text{ К}$  до  $1.3 \cdot 10^5 \text{ К}$ . 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 флуктували 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 спостерігалось 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 (тут і далі всесвітній час 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.

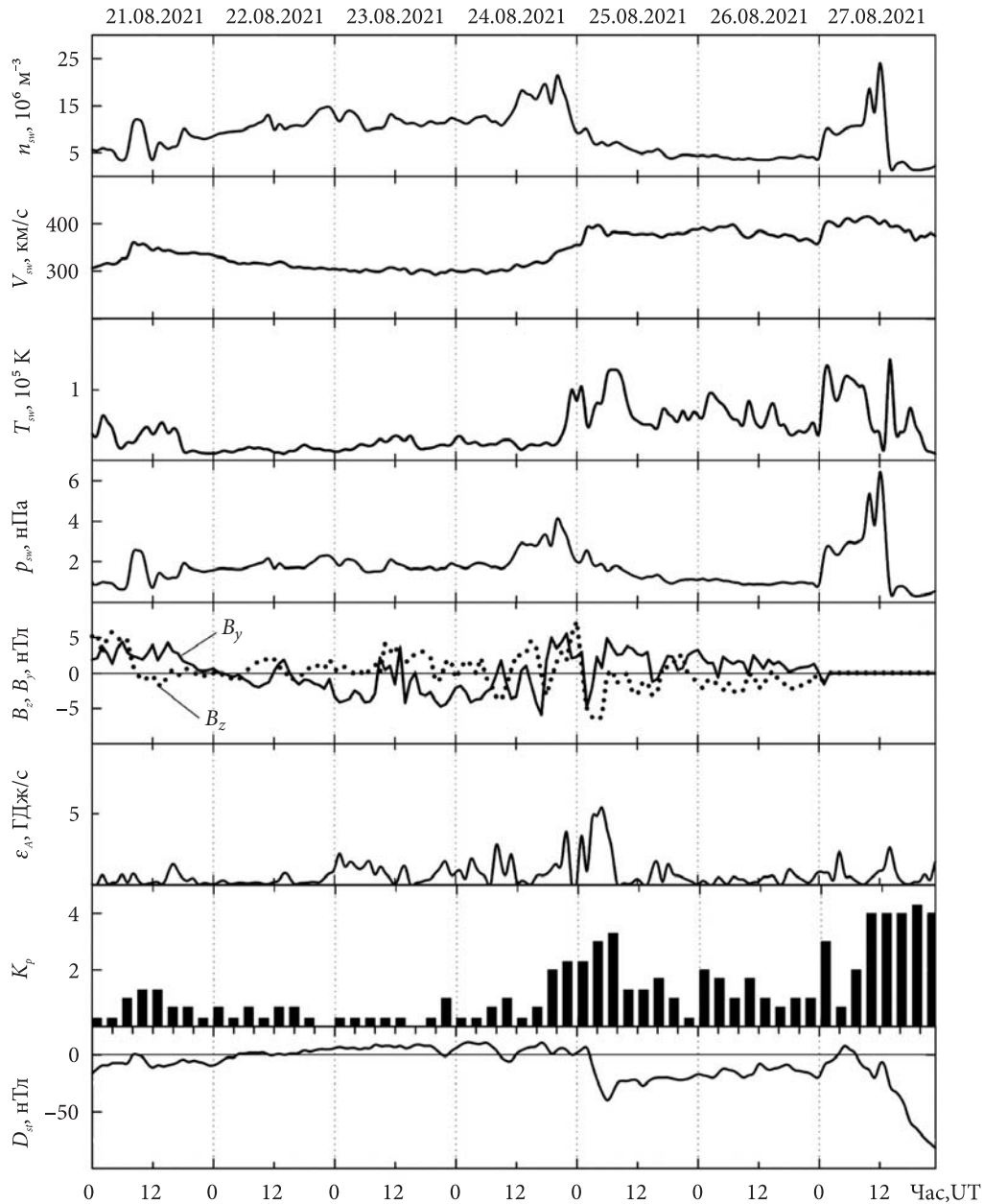
Значення енергії, переданої сонячним вітром магнітосфері, під час магнітних бур збільшувалися від 1...2 до 5.0...5.5 ГДж/с.

## 2. Засоби та методи досліджень

### 2.1. Нагрівний стенд «Сура»

Стенд «Сура» розташований у 100 км на схід від м. Нижній Новгород (Росія), його географічні координати: 56°09' пн. ш., 46°06' сх. д. [21]. 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 направленості антени стенда була нахилена на південь на  $12^\circ$ . Використання у вимірюваннях хвиль звичайної поляризації призводило до посилення генерації штучних іоносферних збурень за рахунок ефекту магнітного зеніту, коли радіохвиля з



**Рис. 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  $\epsilon_A$ , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу;  $K_p$ -індексу та  $D_{st}$ -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) у період 21–27 серпня 2021 р.



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 її нагріву [8].

## 2.2. Доплерівський радар

Для реєстрації іоносферних збурень, викликаних нагрівом іоносфери потужним радіовипромінюванням стенда «Сура», використовувався радар вертикального доплерівського зондування, що знаходиться на відстані 960 км від стенда [38].

Радар розташований поблизу м. Харків (Україна) на території Радіофізичної обсерваторії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, її координати:  $49^{\circ}38'$  пн. ш.,  $36^{\circ}20'$  сх. д. Основні параметри радара: діапазон частот  $f = 1 \dots 24$  МГц, імпульсна потужність радіопередавального пристрою – 1 кВт, тривалість зондуючого імпульсу – 500 мкс, частота повторення імпульсів – 100 Гц, смуга пропускання фільтра радіоприймального пристрою – 10 Гц. Антенна система являє собою вертикальний ромб із коефіцієнтом підсилення  $G \approx 1 \dots 10$  залежно від частоти зондуючої хвилі. За такого потенціалу радара відношення сигнал/завада для звичайної хвилі в нічний час може досягати  $10^5 \dots 10^6$ . У денний час це відношення зазвичай на 1...2 порядки менше. Похибка оцінки ДЗЧ  $f_d$  складає близько 17 мГц. Радар спряжений із персональним комп'ютером, утворюючи програмно-апаратний комплекс, що веде вимірювання та попередню обробку відбитого від іоносфери сигналу в реальному часі.

Під час експериментів вимірювання виконувалися на частотах зондування 3 200 і 4 200 кГц. Сигнал на частоті 4 200 кГц регулярно піддавався дії завади, тому в роботі представлені результати вимірювань для радіохвилі з  $f = 3 200$  кГц.

Висотна протяжність відбитого зондуючого сигналу близька до 150 км. З огляду на це використовувалося стробування за висотою з дискретністю  $\Delta z' = 75$  км у діапазоні діючих висот  $z' = 75 \dots 450$  км, якому відповідає діапазон дійсних висот  $75 \dots 250$  км, а дискретність відліків висоти  $\Delta z \approx 30 \dots 35$  км. При цьому виділялися основні канали, в яких амплітуда сигналу мала максимальні значення.

## 2.3. Методи обробки даних

*Первинна обробка.* Комплексна амплітуда биттів коливань опорного генератора та відбитого сигналу записувалася в цифровому вигляді (частота опитування 10 Гц) на носій інформації, потім за допомогою перетворення Фур'є обчислювалися ДС у діапазоні можливих доплерівських зміщень від  $-1$  до  $+1$  Гц на інтервалі часу 60 с.

*Вторинна обробка.* 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  $f_d(t)$ , які далі піддавалися системному спектральному аналізу, що використовує взаємодоповнюючі віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення з базисною функцією Морле [39].

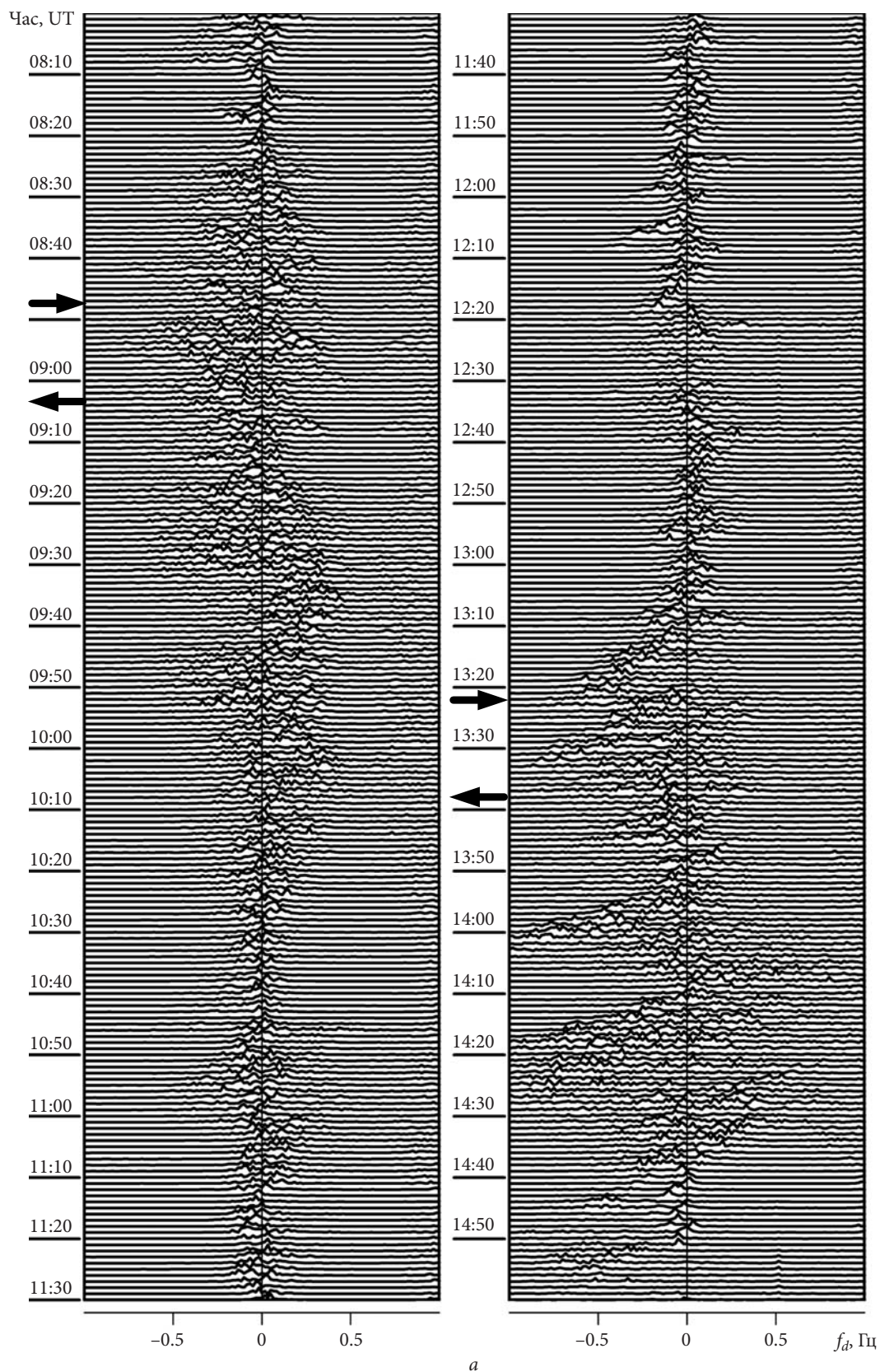
Для аналізу отриманих даних в якості додаткової інформації залучалися часові залежності нормованої амплітуди відбитого сигналу, а також дані розташованого поруч цифрового іонозонда [38]. Критична частота  $f_oF2$  у денний час змінювалася в межах 5...6 МГц, а частота  $f_{\min}$  – в межах 2.0...2.5 МГц. Висота  $z'$  для звичайної хвилі варіювала в межах 300...350 км.

## 3. Результати аналізу даних спостережень

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 виявилось неможливим через ефект розсіпання спектра (рис. 2). При другому ввімкненні моноімпульсу тривалістю 16 хв в інтервалі часу 14:00–16:00 спостерігалися значні знакозмінні варіації ДЗЧ з амплітудою  $f_{da} \approx 0.25 \dots 0.30$  Гц. Важливо, що ефективна потужність  $PG$  у цьому випадку становила всього 25 МВт.

27 серпня 2021 р. варіації ДС під впливом моноімпульсу спостерігалися в інтервалі часу 13:48–14:04 (рис. 3). Амплітуда варіацій досягала 0.15...0.16 Гц, ефективна потужність  $PG$  – приблизно 80 МВт.

Далі розглянемо періодичний режим радіовипромінювання. Нагрівний стенд працював з



**Рис. 2.** Часові варіації ДС при моноімпульсному та періодичному впливі 25 серпня 2021 р.: *a* —  $z' = 75 \dots 150$  км; *б* —  $z' = 150 \dots 225$  км; *в* —  $z' = 225 \dots 300$  км; *г* —  $z' = 300 \dots 375$  км. Стрілками тут і далі показані моменти ввімкнення ( $\rightarrow$ ) та вимкнення ( $\leftarrow$ ) нагрівного стенда (див. так само с. 194–196)



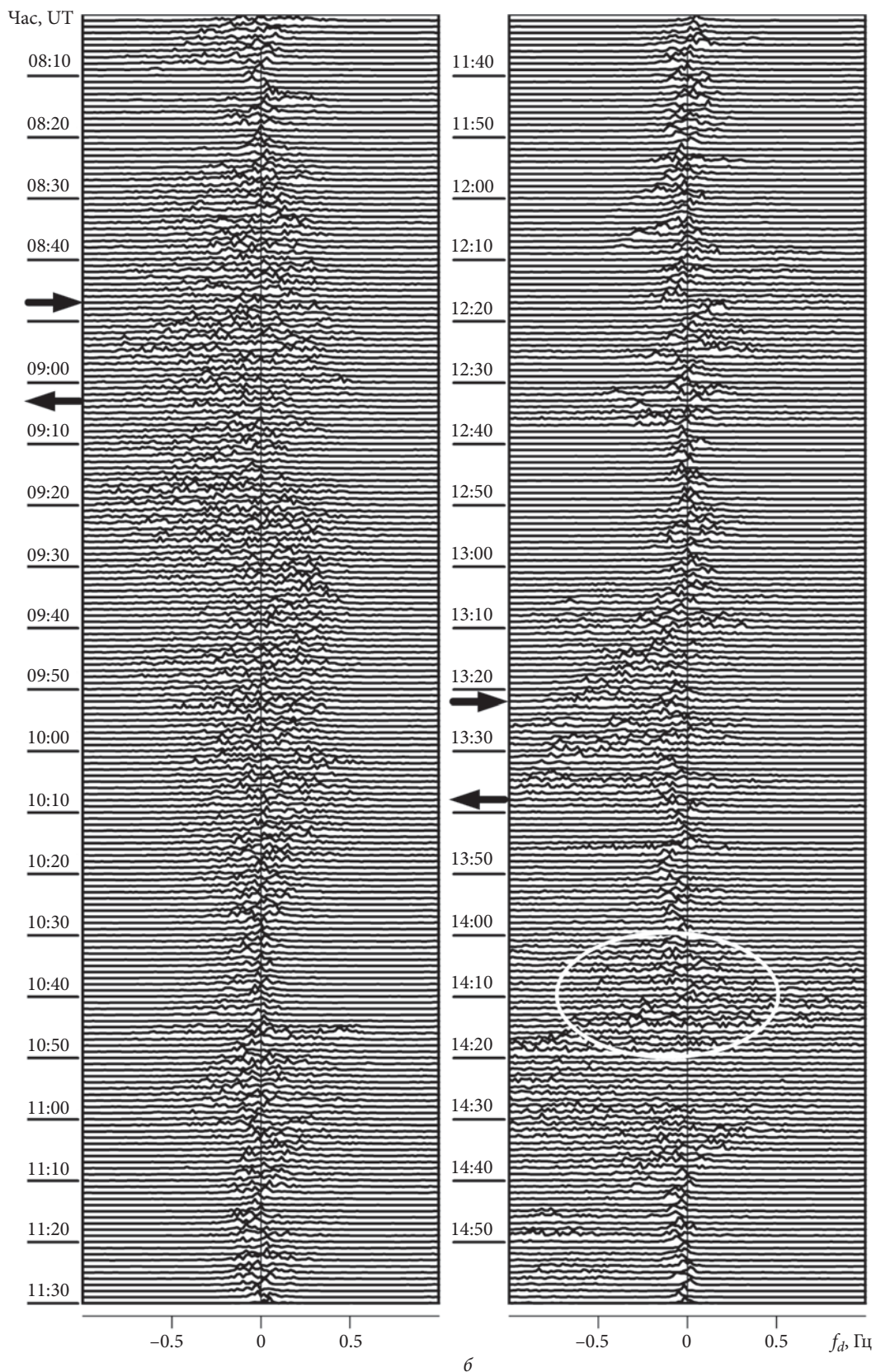


Рис. 2. Продолжения

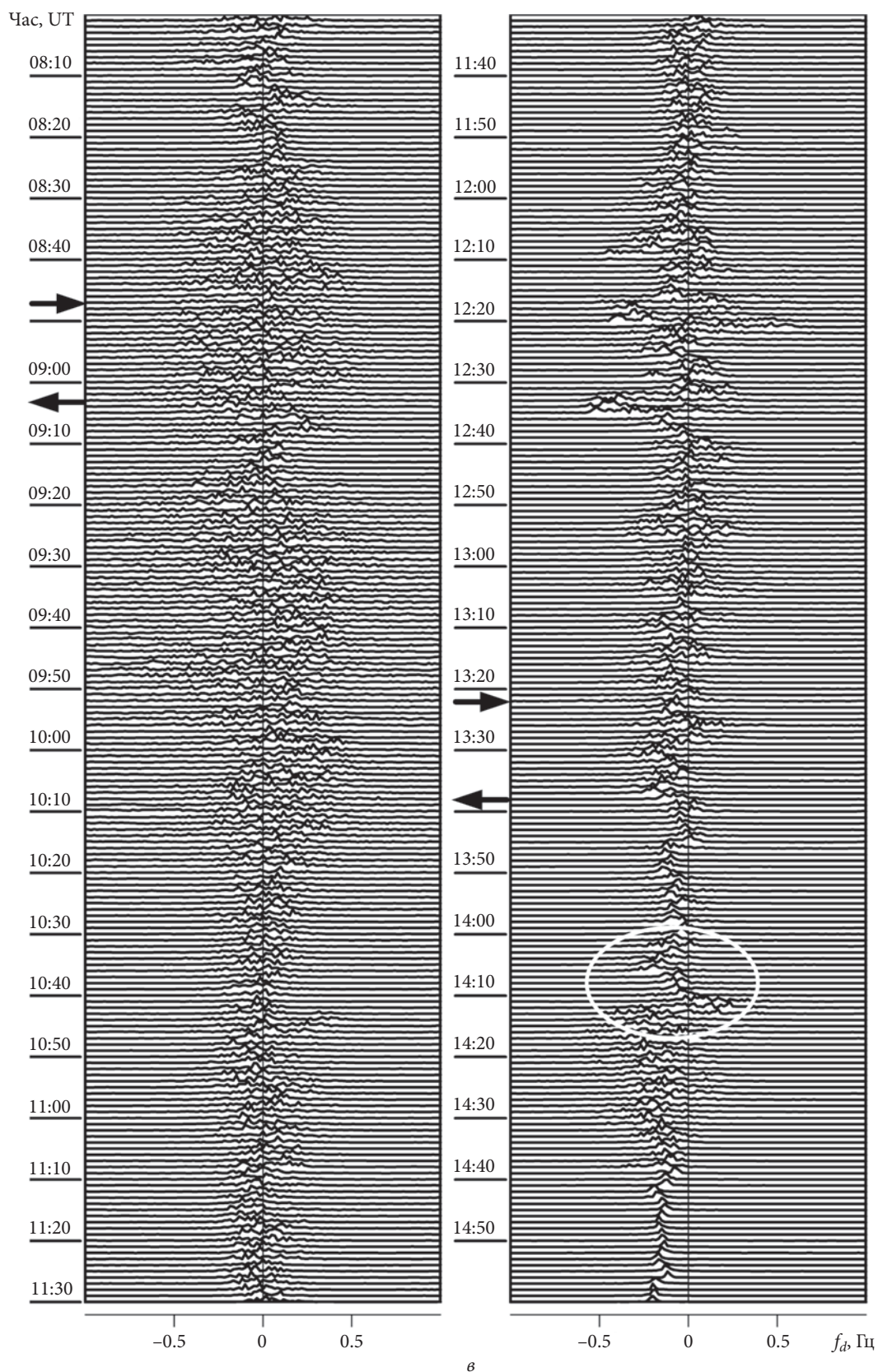


Рис. 2. Продовження



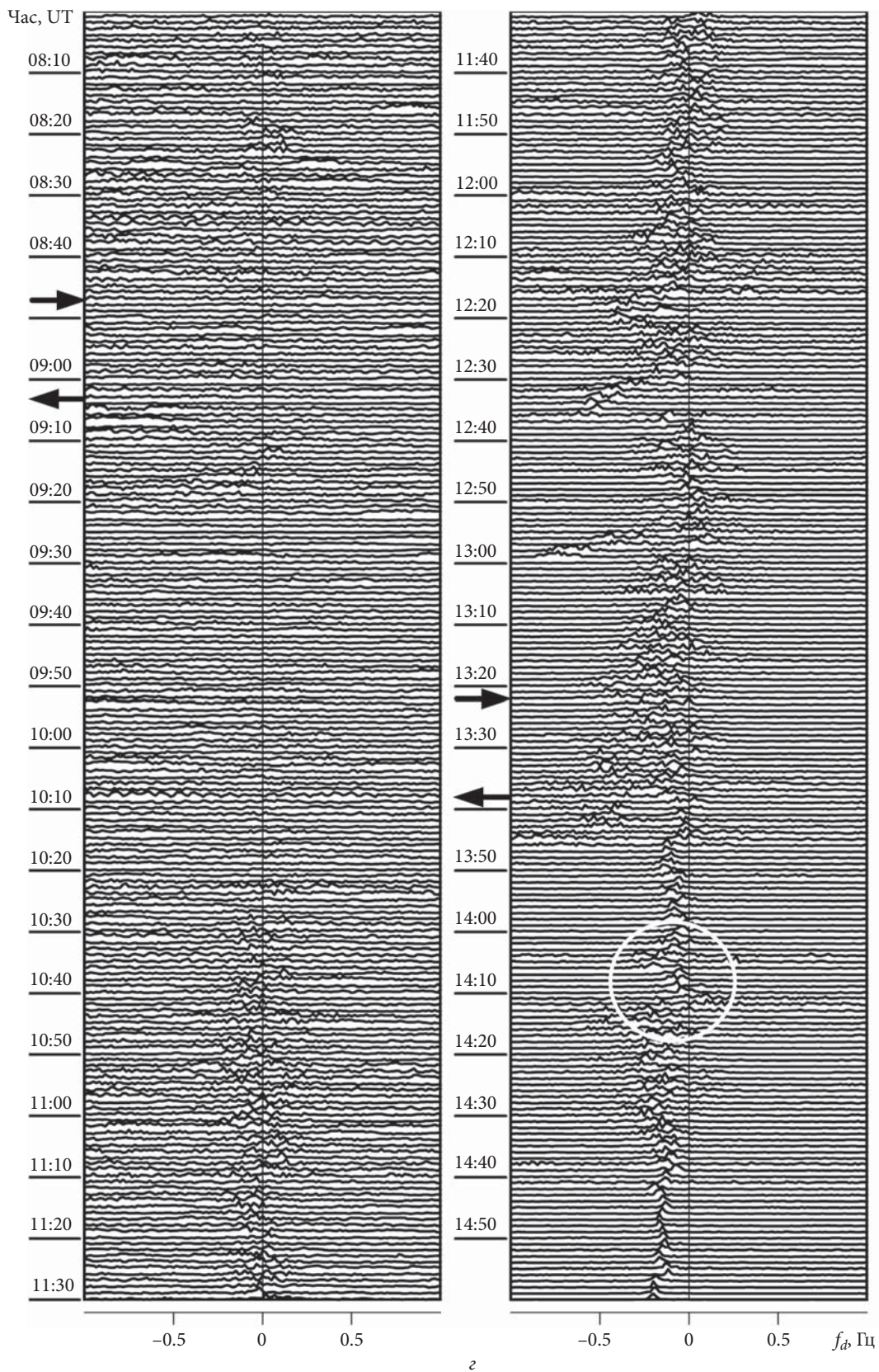


Рис. 2. Закінчення



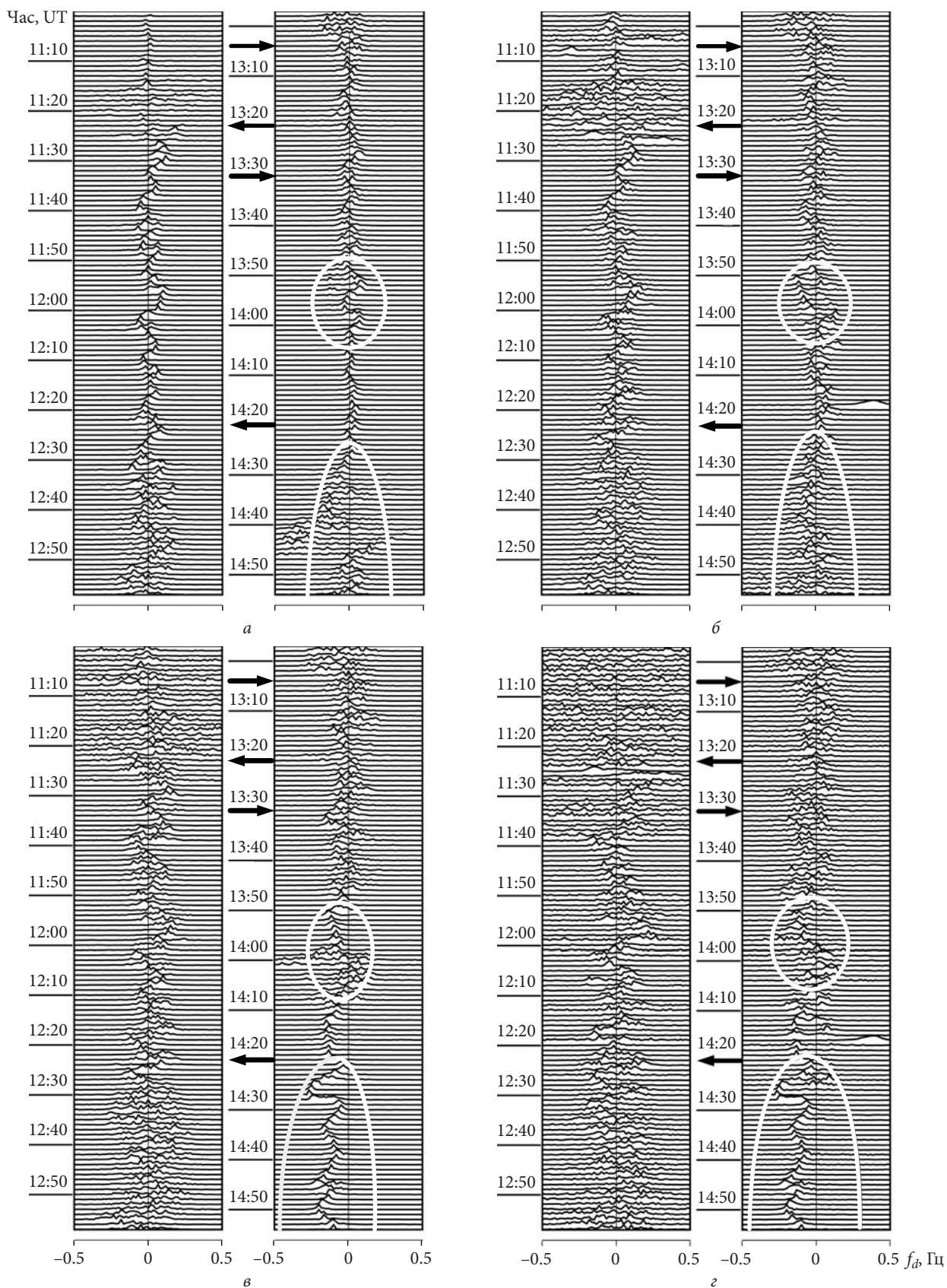


Рис. 3. Часові варіації ДС при моноімпульсному та періодичному впливі 27 серпня 2021 р.: а –  $z' = 75...150$  км; б –  $z' = 150...225$  км; в –  $z' = 225...300$  км; г –  $z' = 300...375$  км

13:30 до 14:20 в режимі: 10 хвилин випромінювання, 10 хвилин пауза,  $PG \approx 55$  МВт. При діючій висоті відбитої радіохвилі  $z' = 75 \dots 150$  км (дійсна висота  $z \approx 75 \dots 100$  км) значні варіації ДС спостерігалися в інтервалі часу 14:24–14:46 (рис. 3, а).

У діапазоні висот  $z' = 150 \dots 225$  км ( $z \approx 100 \dots 120$  км) після 14:22 реєструвалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з  $T \approx 6 \dots 7$  хв і  $f_{da} \approx 0.12 \dots 0.13$  Гц (див. рис. 3, б).

При  $z' = 225 \dots 300$  км ( $z \approx 120 \dots 140$  км) значні варіації ДС почалися після 14:00 (див. рис. 3, в). Після 14:20 варіації ДЗЧ стали квазіперіодичними з періодом  $T \approx 6 \dots 7$  хв і амплітудою  $f_{da} \approx 0.12 \dots 0.13$  Гц. Тривалість квазіперіодичних варіацій становила не менше 35 хв.

Поведінка ДС у діапазоні висот  $z' = 300 \dots 375$  км ( $z \approx 140 \dots 160$  км) була приблизно такою ж, як і при  $z' = 225 \dots 300$  км (див. рис. 3, г).

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

#### 4. 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 доплерівським 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 атмосферними гравітаційними хвилями (АГХ) [40]. 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 нами зазначалося, що реєстровані збурення у вигляді квазіперіодичних процесів спостерігалися за умови  $PG \geq 40 \dots 50$  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 ( $z' = 75 \dots 150$  км);  $\Delta t \approx 52$  хв ( $z' = 150 \dots 225$  км) і  $\Delta t \approx 50$  хв ( $z' = 225 \dots 300$  км). Їм відповідають удавані швидкості 296, 308 і 320 м/с. Важливо, що зі збільшенням висоти збільшується вдавана швидкість поширення збурення. Цією властивістю володіють рухомі іоносферні збурення, викликані рухом АГХ [40].

Цікаво, що в діапазоні висот  $z' = 225 \dots 300$  км значні варіації ДС почалися приблизно о 14:00 (див. рис. 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  $T \approx 6 \dots 7$  хв і  $f_{da} \approx 0.12 \dots 0.13$  Гц із співвідношення для відносної амплітуди коливань концентрації електронів [18]

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

маємо  $\delta_N \approx 1.1 \dots 1.4$  %. Тут  $c$  — швидкість світла у вакуумі,  $L \approx 30$  км — товщина шару іоносфери, що дає основний внесок у ДЗЧ,  $f = 3.2$  МГц — частота доплерівського 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 [40].

#### Висновки

Уперше 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 співпада-



ла з тривалістю моноімпульсу. При цьому квазіперіодичні варіації ДЗЧ тільки починали генеруватися.

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

Періодичний режим випромінювання нагрітого стенда супроводжувався генерацією квазіперіодичних збурень концентрації електронів з

відносною амплітудою  $\sim 1\%$  і періодом, близьким до періоду Брента—Вяйсяля.

Дослідження Л.Ф. Черногора і У. Лио проведені в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля—атмосфера—іоносфера»). Робота Л.Ф. Черногора і Є.Г. Жданка підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476, 0121U109881 і 0121U109882).

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*. М.: Наука, 1973. 272 с.
2. Gurevich A.V. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1978. 465 p.
3. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. *Волновые явления в ионосфере и космической плазме*. М.: Наука, 1984. 392 с.
4. Молчанов О.А. *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме*. М.: Наука, 1985. 224 с.
5. Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. *Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы*. 1989. Т. 9. С. 1—140.
6. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1998. № 6. С. 17—40.
7. Gurevich A.V. Modern problems of ionospheric modification. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1999. Т. 42, № 7. С. 599—606.
8. Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. Эффект магнитного зенита. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005. Т. 48, № 9. С. 772—787.
9. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145—1177.
10. Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В. Стенд «Сура»: исследования атмосферы и космического пространства (обзор). *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 7. С. 545—576.
11. Бурмака В.П., Домнин И.Ф., Урядов В.П., Черногор Л.Ф. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощного радиоизлучения. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 11. С. 859—880.
12. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Пушин В.Ф. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2011. Т. 54, № 2. С. 81—96.
13. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 1—2. С. 14—36.
14. Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C. and Förster M. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams. *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, Iss. 11, id L11101.
15. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности распространения акустико-гравитационных волн, генерируемых мощным периодическим радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 4. С. 219—239.
16. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности волновых возмущений в ионосфере при периодическом нагреве плазмы радиоизлучением стенда «Сура». *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 5. С. 307—321.
17. Черногор Л.Ф. Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощного нестационарного радиоизлучения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 1. С. 49—64.
18. Черногор Л.Ф. *Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе*. Монография. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2014. 448 с.
19. Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований. *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 2. С. 22—48.
20. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А., Белов А.С., Парро М., Рош Ж.—Л. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F2-области мощным радиоизлучением стенда «Сура». *Изв. вузов. Радиофизика*. 2016. Т. 59, № 3. С. 198—222.
21. Фролов В.Л. *Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2017. 468 с.
22. Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V. and Rietveld M.T. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space. *Space Sci. Rev.* 2018. Vol. 214, Iss. 8, id 118.
23. Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Фролов В.Л. Крупномасштабные возмущения в нижней и средней ионосфере, сопровождавшие воздействие на неё радиоизлучением стенда «Сура». *Изв. вузов. Радиофизика*. 2019. Т. 62, № 6. С. 440—459.

24. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности крупномасштабных возмущений, индуцируемых в ионосфере мощным декаметровым радиоизлучением во время умеренных магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61, № 5. С. 618–640. DOI: 10.31857/S0016794021040039.
25. Черногор Л.Ф. Механизмы генерации колебаний инфразвукового диапазона в верхней атмосфере под действием мощного периодического радиоизлучения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 3. С. 240–252.
26. Васьков В.В., Димант Я.С., Рябова Н.С., Клименко В.В., Дункан Л.М. Тепловые возмущения магнитосферной плазмы при резонансном нагреве F-слоя ионосферы полем мощной радиоволны. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1992. Т. 32, № 5. С. 140–152.
27. Васьков В.В., Комраков Г.П., Рябова Н.А. Тепловые возмущения околоземной плазмы, создаваемые мощным радиоизлучением комплекса «Сура». *Геомагнетизм и аэрономия*. 1995. Т. 35, № 5. С. 75–82.
28. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Аперiodические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере: результаты ионозондовых наблюдений. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57, № 2. С. 110–128.
29. Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Болотин И.А., Рябов А.О., Бертлье Ж.-Ж., Парро М. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2019. Т. 62, № 9. С. 641–663.
30. Рябов А.О., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопряжённой относительно стенда «Сура» области ионосферы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2020. Т. 63, № 4. С. 285–296.
31. Wratt D.S. J. Ionisation enhancement in the middle latitude D-region due to precipitating high energy electrons. *Atmos. Terr. Phys.* 1976. Vol. 38, Iss. 5. P. 511–516.
32. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1994. Vol. 99, id A4. P. 5771–5792.
33. Buonsanto M.J. Ionospheric Storms – A Review. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88, Iss. 3–4. P. 563–601.
34. Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., Misawa H., Morioka A. and Evans D.S. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25, № 6. P. 1359–1364.
35. Соколов С.Н. Магнитные бури и их эффекты в нижней ионосфере. Различия бурь разных типов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. Т. 51, № 6. С. 757–768.
36. Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. *Физика геокосмических бурь*: Монография. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2014. 408 с.
37. Черногор Л.Ф. Фізика геокоsmічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2021. Т. 27, № 1 (128). С. 3–77.
38. Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Поднос В.А., Тырнов О.Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика, 2013. С. 160–182.
39. Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 48, № 5. С. 681–702.
40. Госсард Э.Э., Хук У.Х. *Волны в атмосфере*. Пер. с англ. под ред. Г.С. Голицына. М.: Мир, 1978. 532 с.

Стаття надійшла 04.10.2021

## REFERENCES

1. Gurevich, A.V., Shvartsburg, A.B., 1973. *Nonlinear Theory of Radiowave Propagation in the Ionosphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
2. Gurevich, A.V., 1978. *Nonlinear Phenomena in the Ionosphere*. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
3. Gershman, B.N., Erukhimov, L.M., Yashin, Yu.Ya., 1984. *Wave Phenomena in the Ionosphere and in the Cosmic Plasma*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
4. Molchanov, O.A., 1985. *Low-Frequency Waves and Radiation Induction in the Near-Earth Plasma*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
5. Mityakov, N.A., Grach, S.M., Mityakov, S.N., 1989. Ionospheric disturbance by powerful radio waves. *Itogi Nauki Tekh., Ser.: Geomagn. Vys. Sloi Atmos.*, **9**, pp. 1–140 (in Russian).
6. Garmash, K.P., Chernogor, L.F., 1998. Effects in the near-Earth plasma stimulated by the influence of powerful radio emission. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, **6**, pp. 17–40 (in Russian).
7. Gurevich, A.V., 1999. Modern problems of ionospheric modification. *Radiophys. Quantum Electron.*, **42**(7), pp. 525–532.
8. Gurevich, A.V., Zybin, K.P., Carlson, H.S., 2005. Magnetic zenith effect. *Radiophys. Quantum Electron.*, **48**(9), pp. 686–699.
9. Gurevich, A.V., 2007. Nonlinear effects in the ionosphere. *Phys.Usp.*, **50**(11), pp. 1091–1121.
10. Belikovich, V.V., Grach, S.M., Karashtin, A.N., Kotik, D.S., Tokarev, Yu.V., 2007. The “Sura” facility: Study of the atmosphere and space (a review). *Radiophys. Quantum Electron.*, **50**(7), pp. 497–526.
11. Burmaka, V.P., Domnin, I.F., Uryadov, V.P., Chernogor, L.F., 2009. Variations in the parameters of scattered signals and the ionosphere connected with plasma modification by high-power radio waves. *Radiophys. Quantum Electron.*, **52**(11), pp. 774–795.
12. Chernogor, L.F., Frolov, V.L., Komrakov, G.P., Pushin, V.F., 2011. Variations in the ionospheric wave perturbation spectrum during periodic heating of the plasma by high-power high-frequency radio waves. *Radiophys. Quantum Electron.*, **54**(2), id. 75, pp. 81–96.
13. Chernogor, L.F., Frolov, V.L., 2012. Traveling ionospheric disturbances generated due to periodic plasma heating by high-power high-frequency radiation. *Radiophys. Quantum Electron.*, **55**(1–2), pp. 13–32.

14. Mishin, E., Sutton, E., Milikh, G., Galkin, I., Roth, C. and Förster, M., 2012. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams. *Geophys. Res. Lett.*, **39**(11), id. L11101.
15. Chernogor, L.F. and Frolov, V.L., 2013. Features of propagation of the acoustic-gravity waves generated by high-power periodic radiation. *Radiophys. Quantum Electron.*, **56**(4), pp. 197–215.
16. Chernogor, L.F., Frolov, V.L., 2013. Features of the wave disturbances in the ionosphere during periodic heating of the plasma by the “Sura” radiation. *Radiophys. Quantum Electron.*, **56**(5), pp. 276–289.
17. Chernogor, L.F., 2013. Lower ionospheric large-scale disturbances caused by powerful nonstationary radiation. *Radio phys. radio astron.*, **18**(1), pp. 49–64 (in Russian).
18. Chernogor, L.F., 2014. *Physics of High-Power Radio Emission in Geospace*. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
19. Frolov, V.L., 2015. Spatial structure of plasma density perturbations induced in the ionosphere when modified by powerful HF radio waves: Review of experimental results. *Sol.-Terr. Phys.*, **1**(2), pp. 22–48 (in Russian).
20. Frolov, V.L., Rapoport, V.O., Shorokhova, E.A., Belov, A.S., Parrot, M., Rauch, J.-L., 2016. Features of the electromagnetic and plasma disturbances induced at the altitudes of the Earth’s outer ionosphere by modification of the ionospheric F2 region using high-power radio waves radiated by the SURA heating facility. *Radiophys. Quantum Electron.*, **59**(3), pp. 177–198.
21. Frolov, V.L., 2017. *Artificial Turbulence of the Midlatitude Ionosphere*. N. Novgorod: N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ.
22. 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., 2018. Past, present and future of active radio frequency experiments in space. *Space Sci. Rev.*, **214**(8), id. 118. DOI: 10.1007/s11214-018-0549-7.
23. Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Frolov, V.L., 2019. Largescale disturbances in the lower and middle ionosphere accompanying its modification by the Sura heater. *Radiophys. Quantum Electron.*, **62**(6), pp. 395–411.
24. Chernogor, L.F., Frolov, V.L., 2021. Features of large-scale disturbances induced in the ionosphere by high-power decameter radiation during moderate magnetic storms. *Geomagn. Aeron.*, **61**(5), pp. 721–742. DOI: 10.1134/S0016793221040034.
25. Chernogor, L.F., 2012. Mechanisms for generating oscillations in the infrasound frequency range in the upper atmosphere by periodic high-power radio transmissions. *Radio phys. radio astron.*, **17**(3), pp. 240–252.
26. Vas’kov, V.V., Dimant, Ya.S., Ryabova, N.S., Klimenko, V.V., Dunkan, L.M., 1992. Thermal disturbances of the magnetospheric plasma during resonant heating of the ionospheric F region by a powerful radiowave field. *Geomagn. Aeron.*, **32**(5), pp. 140–152 (in Russian).
27. Vas’kov, V.V., Komrakov, G.P., Ryabova, N.A., 1995. Thermal disturbances of near-Earth plasma created by powerful radio emission of the Sura facility. *Geomagn. Aeron.*, **35**(5), pp. 75–82 (in Russian).
28. Chernogor, L.F., Frolov, V.L., Barabash, V.V., 2014. Aperiodic Large-Scale Disturbances in the Lower Ionosphere. Ionosonde Observation Results. *Radiophys. Quantum Electron.*, **57**(2), pp. 100–116.
29. Frolov, V.L., Akchurin, A.D., Bolotin, I.A., Ryabov, A.O., Berthelier, J.-J., Parrot, M., 2019. Precipitation of energetic electrons from the Earth’s radiation belt stimulated by high-power HF radio waves for modification of the midlatitude ionosphere. *Radiophys. Quantum Electron.*, **62**(9), pp. 571–590.
30. Ryabov, A.O., Frolov, V.L., Akchurin, A.D., 2020. Artificial precipitation of energetic electrons in a magnetically conjugate region of the ionosphere relative to the Sura facility. *Radiophys. Quantum Electron.*, **63**(4), pp. 257–267.
31. Wratt, D.S.J., 1976. Ionisation enhancement in the middle latitude D-region due to precipitating high energy electrons. *Atmos. Terr. Phys.*, **38**(5), pp. 511–516.
32. Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T., Vasyliunas, V.M., 1994. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **99**, id. A4, pp. 5771–5792.
33. Buonsanto, M.J., 1999. Ionospheric Storms – A Review. *Space Sci. Rev.*, **88**(3–4), pp. 563–601.
34. Tadokoro, H., Tsuchiya, F., Miyoshi, Y., Misawa, H., Morioka, A., Evans, D.S., 2007. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms. *Ann. Geophys.*, **25**(6), pp. 1359–1364.
35. Sokolov, S.N., 2011. Magnetic storms and their effects in the lower ionosphere: Differences in storms of various types. *Geomagn. Aeron.*, **51**(6), pp. 741–752.
36. Chernogor, L.F., Domnin, I.F., 2014. *Physics of Geospace Storms*. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv V.N. Karazin National University Publ. (in Russian).
37. Chernogor, L.F., 2021. Physics of geospace storms. *Space Sci. Technol.*, **27**(1), pp. 3–77 (in Ukrainian).
38. Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Podnos, V.A., Tyrnov, O.F., 2013. The V.N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. In: Zasukha, S.A. and Fedorov, O.P., eds. 2013. *Space Project “Ionosat-Micro”*. Kyiv: Akadempriodika Publ., pp. 160–182 (in Russian).
39. Chernogor, L.F., 2008. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagn. Aeron.*, **48**(5), pp. 652–673.
40. Gossard, E.E. and Hook, W.H., 1975. *Waves in the Atmosphere*. Amsterdam: Elsevier Publ.

Received 04.10.2021



L.F. Chernogor, Ye. H. Zhdanko, and Y. Luo

V.N. Karazin Kharkiv National University

4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

FEATURES OF THE LARGE-SCALE IONOSPHERIC  
DISTURBANCES GENERATED UNDER THE ACTION  
OF MONOPULSE OR PERIODIC RADIO-FREQUENCY EMISSIONS  
FROM A HEATING FACILITY

**Subject and Purpose.** Considerable attention has traditionally been given to the interaction of high-power radio-frequency emissions with the ionosphere. The great many physical effects taking place within the limits of a powerful (heating) facility's antenna pattern are subjected here to a thorough and detailed analysis. Also, the application of high-power radio emissions provides a convenient means for studying subsystem coupling in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system, as well as of generation and propagation of disturbances well beyond the antenna pattern of the transmitter. The present paper has been aimed at analyzing the features revealed by the large-scale ionospheric disturbances as these are generated under the impact of either monopulse or periodic radio-frequency emissions from an HF heating facility.

**Methods and Methodology.** In the course of the experiments, the ionosphere was affected with high power radio frequency emission from the heating facility Sura. The disturbances were diagnosed at a distance of 960 km from the heater, with the aid of a vertical incidence Doppler radar.

**Results.** It has been found that through the period of minimal solar activity the ionospheric disturbances observable at a range about  $10^3$  km from the heater did arise as the effective radiated power of the latter approached to 25 MW. The duration of the ionospheric response to the impact of an incident monopulse was equal to the length of that latter, while the quasi-periodic variations shown by the Doppler frequency shift just started to appear. The apparent horizontal speed of the propagating disturbances was found to vary from about 300 m/s to 420 m/s. Note that speed to increase at higher altitudes. The periodic mode of heater operation was accompanied by generation of quasi-periodic disturbances in the electron density, of relative amplitudes about 1% and periods close to the Brunt–Väisälä period.

**Conclusions.** The basic features of Doppler spectrum variations, contained in the signals from a diagnostic radar, have been identified in connection with high-power HF radiation incident on the ionosphere

**Keywords:** *ionosphere, heater system, Doppler radar, electron density perturbation.*