

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-04>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР<sup>1</sup>, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

К. П. ГАРМАШ<sup>1</sup>, к. ф.-м. наук, с.н.с.

e-mail: [garmash@karazin.ua](mailto:garmash@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

Q. GUO<sup>2</sup>, PhD, prof.

e-mail: [guoqiang@hrbeu.edu.cn](mailto:guoqiang@hrbeu.edu.cn) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8366-7163>

Є. Г. ЖДАНКО<sup>1</sup>, аспірант, м.н.с.

e-mail: [eugenezhd@gmail.com](mailto:eugenezhd@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4612-4194>

В. Ф. ПУШИН<sup>1</sup>, н.с.

e-mail: [pushin.vf@gmail.com](mailto:pushin.vf@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1957-179X>

А. М. ЦИМБАЛ<sup>1</sup>, к. ф.-м. наук, доц.

e-mail: [A.Tsymbal@karazin.ua](mailto:A.Tsymbal@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

Yu. ZHENG<sup>3</sup>, PhD, prof.

e-mail: [zhengyu@qdu.edu.cn](mailto:zhengyu@qdu.edu.cn) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6166-5733>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

<sup>2</sup>Harbin Engineering University, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, Kumaï

<sup>3</sup>Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, Kumaï

## ПАРАМЕТРИ РУХОМИХ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ: РЕЗУЛЬТАТИ ПРОСТОРОВО РОЗНЕСЕНОГО ПОХИЛОГО ВЧ РАДІОЗОНДУВАННЯ

**Актуальність.** Особливості іоносферного радіоканалу полягають у залежності його параметрів від фази сонячної активності, стану Сонця, стану атмосферно-космічної погоди, пори року, часу доби, географічних координат тощо. Атмосфера й іоносфера, а значить і відповідні радіоканали, рідко бувають спокійними. Зазвичай вони збурюються високоенергетичним джерелами природного та техногенного походження. Саме збурення параметрів радіоканалу обмежують потенційні тактико-технічні характеристики систем радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування Землі з космосу та радіоастрономії. Для зменшення впливу нестационарних і випадкових збурень необхідна їх діагностика та наступна адаптація до збурених умов. Динамічні процеси в атмосфері досліджуються багатьма радіофізичними методами: трансіоносферним радіозондуванням сигналами Глобальної навігаційної супутникової системи, некогерентного розсіяння, вертикального та похилого зондування іоносфери тощо. Похиле зондування іоносфери має низку переваг. При цьому використовують як власні радіопередавачі, так і передавачі світової мережі радіомовних або службових радіостанцій. Безперервний моніторинг іоносфери та іоносферного радіоканалу стає більш дешевим саме при використанні світової мережі. При цьому метод радіозондування є пасивним. Він дозволяє охопити моніторингом значні території Земної кулі (аж до глобальних). Метод має високу чутливість завдяки вимірюванням доплерівського зміщення частоти та амплітуди сигналу. Його роздільна здатність за часом складає близько 10 с, за частотою – 0.01–0.1 Гц. Точність вимірювання доплерівського зміщення частоти не гірше 0.01 Гц. При цьому вдається моніторити відносні варіації концентрації електронів  $N$  не менше  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  або досліджувати рух іоносферної плазми зі швидкістю не менше 0.1–1 м/с.

**Метою** цієї роботи є викладення результатів визначення головних параметрів рухомих іоносферних збурень над КНР за допомогою багатотрасового похилого ВЧ радіозондування іоносфери.

**Методи і методологія.** Для просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування іоносфери було використано багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний комплекс, розміщений на території Харбінського інженерного університету. Моніторинг проведено на 14 радіотрасах різної протяжності та орієнтації. Для гармонічної моделі рухомих іоносферних збурень з використанням трьох радіотрас визначено фазові зсуви на двох інших радіотрасах по відношенню до опорної радіотраси. Цей зсув дорівнює добутку хвильового вектору на відому базу, що визначається відстанню та орієнтацією між радіопередавачами. В загальному випадку є не одне рухоме іоносферне збурення, а суперпозиція низки рухомих іоносферних збурень різних масштабів і напрямків їх руху. Для визначення параметрів цих збурень спочатку знаходяться крос-спектри, з яких обчислюються періоди та фази крос-спектрів.

**Результати.** Стосовно просторово рознесеного похилого радіозондування іоносфери зі застосуванням багаточастотного багатотрасового когерентного радіотехнічного комплексу ВЧ діапазону розроблено методику визначення періодів, горизонтальних довжин хвиль і азимуту приходу рухомих іоносферних

збурень. За допомогою крос-спектрального аналізу визначено періоди, горизонтальні довжини хвиль, горизонтальну швидкість і азимут переважаючих за амплітудою рухомих іоносферних збурень. Підтверджено, що рухомі іоносферні збурення з періодами ~16–40 хв та швидкостями в декілька сотень метрів за секунду викликані генерацією та поширенням атмосферних гравітаційних хвиль. Хвилі з періодом ~10–13 хв мали електромагнітну природу. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів у хвилі зазвичай складала ~1–10%. Як правило, рухомі іоносферні збурення переміщувалися вздовж магнітного меридіану, причому частіше за все з півночі на південь.

**Висновки.** Успішне функціонування комплексу та працездатність запропонованих методик продемонстровано на прикладі визначення основних параметрів рухомих іоносферних збурень.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** просторово рознесене похиле радіозондування, іоносфера, рухомі іоносферні збурення, параметри збурень, доплерівський спектр, крос-спектр

**Як цитувати:** Черногор ЛФ, Гармаш КП, Guo Q, Жданко ЄГ, Пушин ВФ, Цимбал АМ, Zheng Yu. Параметри рухомих іоносферних збурень: результати просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022; 37:47-59. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-04>

**In cites:** Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zhdanko YN, Pushin VF, Tsymbal AM, Zheng Yu. Parameters of traveling ionospheric disturbances: results from spaced oblique HF sounding. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". (In Ukrainian). 2022; 37:47-59. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-04>

## ВСТУП

Іоносфера була та залишається і на сьогодні основним каналом поширення радіохвиль практично всіх діапазонів: від вкрай низькочастотних (3–30 Гц) до гіпервисокочастотних (0.3–3 ТГц). Особливості іоносферного радіоканалу полягають у залежності його параметрів від фази сонячної активності, стану Сонця, стану атмосферно-космічної погоди, пори року, часу доби, географічних координат тощо. Атмосфера

й іоносфера, а значить, і відповідні радіоканали рідко бувають спокійними. Зазвичай вони збурюються високоенергетичним джерелами природного та техногенного походження. До перших належать сонячні бурі, галактичне космічне випромінювання, падіння метеороїдів, грози, погодні фронти, урагани (тайфуни), виверження вулканів, землетруси тощо. До других можна віднести потужні вибухи, пуски та польоти ракет, космічних апаратів і великих літаків, потужне радіо- та акустичне випромінювання тощо. Саме збурення параметрів радіоканалу обмежують потенційні тактико-технічні характеристики систем радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування Землі з космосу та радіоастрономії. Для зменшення впливу нестационарних і випадкових збурень необхідна їх діагностика та наступна адаптація до збурених умов.

Динамічні процеси в атмосфері досліджуються багатьма радіофізичними методами: трансіоносферним радіозондуванням сигналами Глобальної навігаційної супутникової системи, некогерентного розсіяння, вертикального та похилого зондування іоносфери тощо.

Підкреслимо, що похиле зондування іоносфери має низку переваг. При цьому використовують як власні радіопередавачі, так і передавачі світової мережі радіомовних або службових радіостанцій. Безперервний моніторинг іоносфери та іоносферного радіоканалу стає більш дешевим саме при використанні світової мережі. При цьому метод радіозондування є пасивним. Він дозволяє охопити моніторингом значні території Земної кулі (аж до глобальних). Метод має високу чутливість завдяки вимірюванням доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) та амплітуди сигналу. Його роздільна здатність за часом складає близько 10 с, за частотою – 0.01–0.1 Гц. Точність вимірювання ДЗЧ не гірше 0.01 Гц. При цьому вдається моніторити відносні варіації концентрації електронів  $N$  не менше  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  або досліджувати рух іоносферної плазми зі швидкістю не менше 0.1–1 м/с.

Метод похилого зондування іоносфери використовується низкою авторів [1–15]. Найбільш відомі роботи авторів із Чехії [1, 2], Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Україна [3, 4], Харківського національного університету та Харбінського інженерного університету (Україна, КНР) [5–14]. Заслугує уваги і робота [15]. Автори [1] досліджували поширення атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ), іоносферні ефекти землетрусів, динамічні процеси в приекваторіальній іоносфері, іоносферний відгук на потужні метеорологічні явища, спалахи на Сонці та магнітну активність. Автори [2] провели статистичні дослідження горизонтального поширення АГХ з періодами  $T \approx 8$ –30 хв.

У роботах [1, 5, 6] вивчався відгук іоносфери на землетруси. Автори [10–12] дослідили іоносферні ефекти під час геокосмічних бур. У роботі [8] описано іоносферні ефекти Камчатського метеороїду. Іоносферні ефекти потужних тайфунів викладено в [9, 13, 14]. Автори [7] проаналізували ефекти в іоносфері, що супроводжували часткове сонячне затемнення над КНР.

У роботі [16] за допомогою похилого ВЧ зондування досліджувалась взаємність іоносферного радіоканалу. Характеристики радіоканалу на трасі Антарктика–Іспанія вивчалися авторами [17, 18]. Вплив магнітної активності на сигнали похилого зондування описано в роботі [19]. Моделювання іоносферного радіоканалу вивчалось авторами [20].

Результати систематичних досліджень іоносферних збурень методом похилого радіозондування описано в монографії [21].

Проведені дослідження підтвердили високу ефективність похилого ВЧ радіозондування іоносфери. Встановлено, що всі джерела збурень генерували рухомі іоносферні збурення (РІЗ), викликані поширенням АГХ. Актуальним завданням є розширення можливостей похилого ВЧ радіозондування іоносфери.

Метою цієї роботи є викладення результатів визначення головних параметрів РІЗ над КНР за допомогою багатотрасового похилого ВЧ радіозондування іоносфери.

### ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

*Засоби.* Для просторово рознесеного похилого ВЧ радіозондування іоносфери було використано багаточастотний багатотрасовий когерентний радіотехнічний комплекс, розміщений на території Харбінського інженерного університету. Комплекс описано в роботах [5–7]. Апаратно він складається з активної магнітної рамкової антени (діапазон частот 0.01–30 МГц), широкодіапазонного програмно визначаємого радіоприймального пристрою (Software Defined Radio або SDR) типу USRP\_N210 з дочірніми платами LFRX/LRTX і дисциплінуємим за сигналами супутників GPS високостабільним опорним генератором, а також персонального комп'ютера.

Для моніторингу використовувалося 14 радіотрас різної протяжності та орієнтації (Рис. 1). Перелік радіопередавальних радіостанцій наведено в Табл. 1.

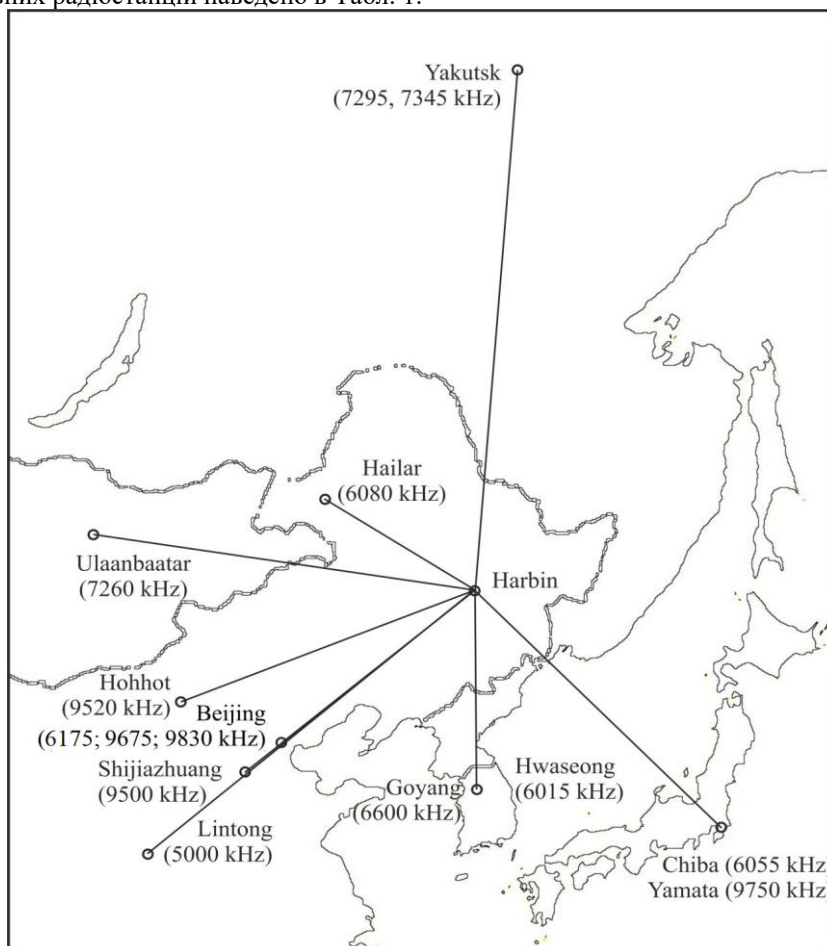


Рис. 1. Схема розташування радіопередавальних пристроїв та радіоприймального пристрою (Харбін)

Fig. 1. Layout of the radio transmitters and radio receiver (Harbin)

*Методи.* Отриманню параметрів РІЗ передувало розв'язання низки наступних 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 сферичної Землі. По-друге, розроблена методика синтеза доплерограм на похилих ВЧ радіотрасах різної орієнтації по відношенню до вектору напруженості геомагнітного поля. Виявлено головні особливості доплерограм для РІЗ з параметрами, що змінюються в широких межах. По-третє, для гармонічної моделі РІЗ з використанням трьох радіотрас визначалися фазові зміщення  $\Delta\Phi_{12,13}$  у часових варіаціях ДЗЧ на двох інших радіотрасах (з умовними номерами 2 та 3) по відношенню до опорної радіотраси (з умовним номером 1). Це зміщення дорівнює добутку хвильового вектору  $\vec{k}$  на відому базу  $\vec{d}_{1,2}$ , що визначається відстанню та орієнтацією між серединами радіотрас:

$$\Delta\Phi_{12} = -\vec{k}\vec{d}_{12}, \quad (1)$$

$$\Delta\Phi_{13} = -\vec{k}\vec{d}_{13}. \quad (2)$$

З (1) і (2) маємо проєкції

$$k_x = \frac{d_{12y}\Delta\Phi_{13} - d_{13y}\Delta\Phi_{12}}{d_{12y}d_{13x} - d_{13y}d_{12x}}, \quad (3)$$

$$k_y = \frac{\Delta\Phi_{13} - k_x d_{13x}}{d_{13y}}. \quad (4)$$

Таблиця 1. Основні відомості про радіотраси (за матеріалами <https://fmscan.org/index.php>)

Table 1. General information about radio paths (according to <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.

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

$$\sin \alpha = \frac{k_y}{k},$$

$$\cos \alpha = \frac{k_x}{k},$$

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2.$$

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 їх 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 проекція довжини хвилі РІЗ на вектор бази більше розміру бази.

### РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

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

*Стан космічної погоди.* Дослідженню відгуку іоносфери на будь-яке збурення повинен передувати ретельний аналіз стану космічної погоди. Обмежимося аналізом стану магнітного поля Землі. Для цього використано дані сайту [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. В Табл. 2 і 3 наведено значення індексів  $K_p$  та  $D_{st}$ . Можна бачити, що магнітне поле Землі залишалось майже незбуреним.

Таблиця 2. Значення індексу  $K_p$

Table 2.  $K_p$ -index values

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

Таблиця 3. Значення індексу  $D_{st}$

Table 3.  $D_{st}$ -index values

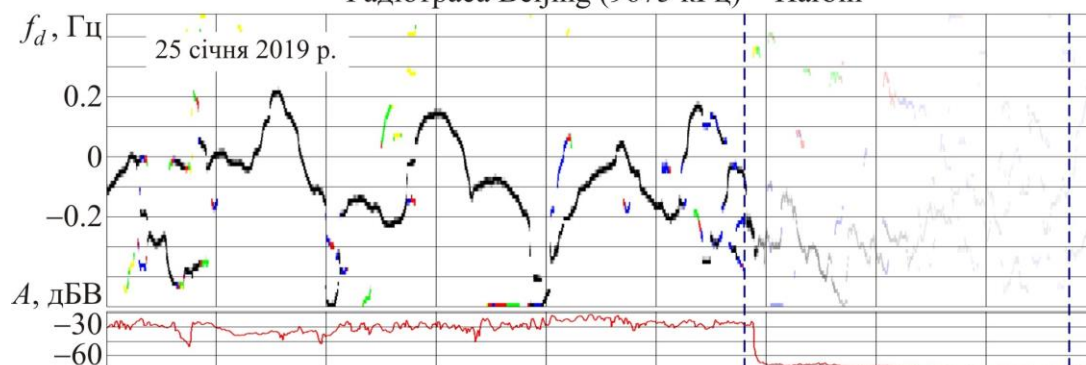
Час доби, UT	24 січня 2019 р.	25 січня 2019 р.	26 січня 2019 р.	6 лютого 2019 р.	7 лютого 2019 р.	8 лютого 2019 р.
00:00	10	1	-4	-5	-13	-16
01:00	10	2	-3	-2	-13	-11
02:00	11	-3	-5	-3	-13	-11
03:00	4	-6	-6	-8	-14	-14
04:00	-7	-11	-6	-9	-15	-14
05:00	-14	-15	-2	-6	-14	-13
06:00	-17	-15	-1	-3	-12	-12
07:00	-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

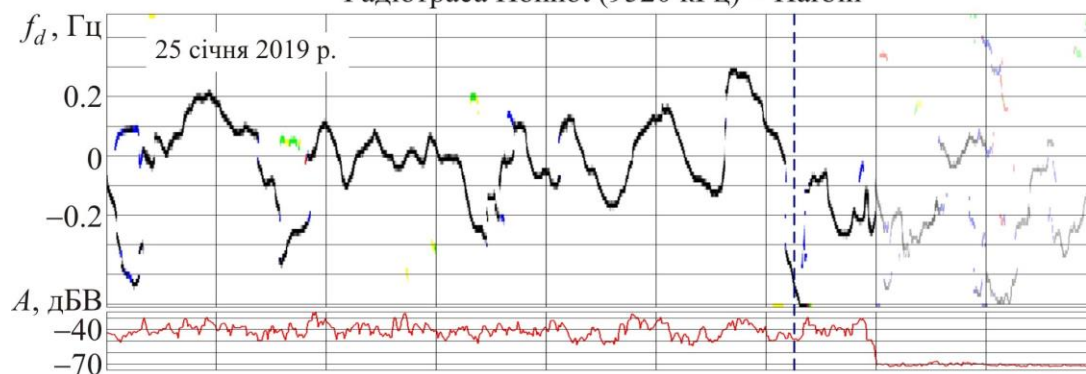
Часові варіації ДЗЧ. У якості прикладу наведемо результати спостережень за часовими варіаціями ДЗЧ на трьох радіотрасах: Hohhot–Harbin, Beijing–Harbin та Shijiazhuang–Harbin (див. Рис. 1). Залежності ДЗЧ  $f_d(t)$  для 25 січня 2019 р. і 7 лютого 2019 р. показано на Рис. 2 і 3. Із рисунків можна бачити, що варіації

ДЗЧ є квазіперіодичними. Така поведінка викликана поширенням у іоносфері РІЗ. 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). 7 лютого 2019 р. також мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодом біля 40, 20 та 13 хв (див. Рис. 3).

Радіотраса Beijing (9675 кГц) – Harbin



Радіотраса Hohhot (9520 кГц) – Harbin



Радіотраса Shijiazhuang (9500 кГц) – Harbin

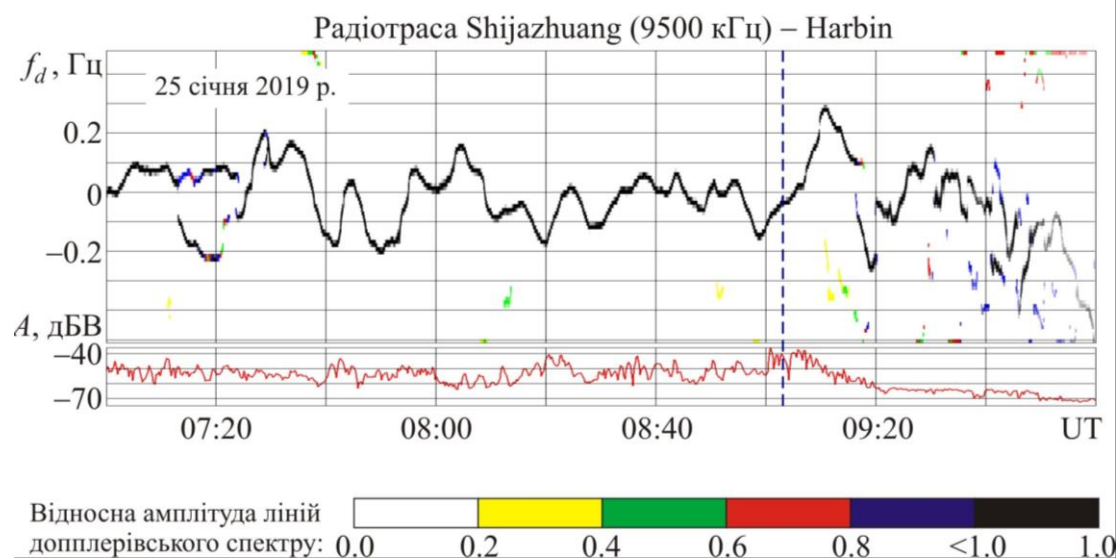
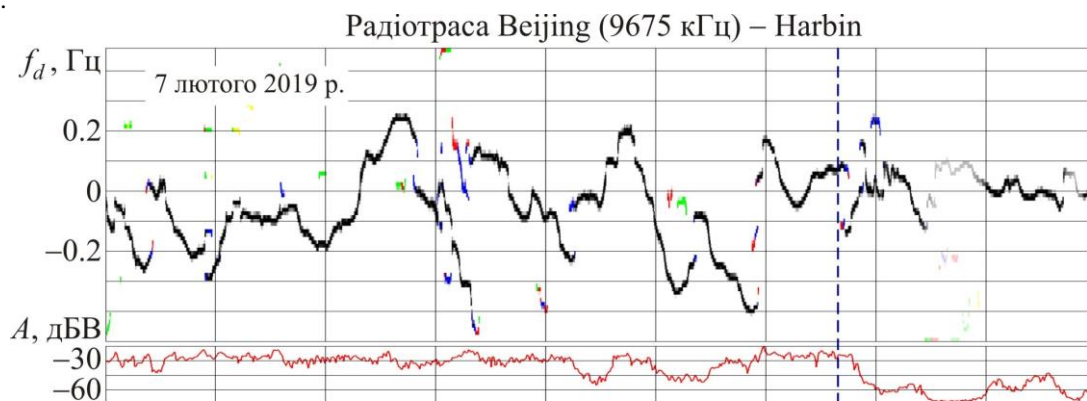


Рис. 2. Часові варіації ДЗЧ 25 січня 2019 р. на радіотрасах Beijing–Harbin, Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin. Вертикальними пунктирними лініями показано моменти заходу Сонця на висотах 0 і 100 км  
 Fig. 2. Time variations of Doppler shift on January 25, 2019 on the Beijing–Harbin, Hohhot–Harbin and Shijiazhuang–Harbin radio paths. Vertical dashed lines indicate the sunsets at altitudes of 0 and 100 km

*Крос-спектри. Параметри РІЗ.* У якості опорної вибрано радіотрасу Beijing–Harbin. Розраховано крос-спектри часових варіацій ДЗЧ на трасах Hohhot–Harbin та Shijiazhuang–Harbin по відношенню до опорної траси. Нормовані крос-спектри  $S/S_{\max}$  та їхні фази  $\Phi$  показано на Рис. 4 для 25 січня 2019 р. та на Рис. 5 для 7 лютого 2019 р. Уточнені значення частоти  $F$ , періоду  $T$ , горизонтальної довжини хвилі, швидкості РІЗ та азимуту приходу хвилі наведено у Табл. 4.

### ОБГОВОРЕННЯ

Розроблена методика визначення параметрів РІЗ застосована для обробки даних просторово рознесеного похилого радіозондування. Із крос-спектрів отримано діапазони частот, періоди, горизонтальні довжини хвиль, горизонтальні швидкості та азимуту (див. Табл. 4). Без сумніву, ці РІЗ були викликані генерацією та поширенням АГХ [21]. Переважний напрям руху хвилі від екватору та до екватору. Короткоперіодні ( $T \approx 10\text{--}13$  хв) РІЗ мали швидкість 436–888 м/с. Швидше за все, ці хвилі мають електромагнітну природу [22].



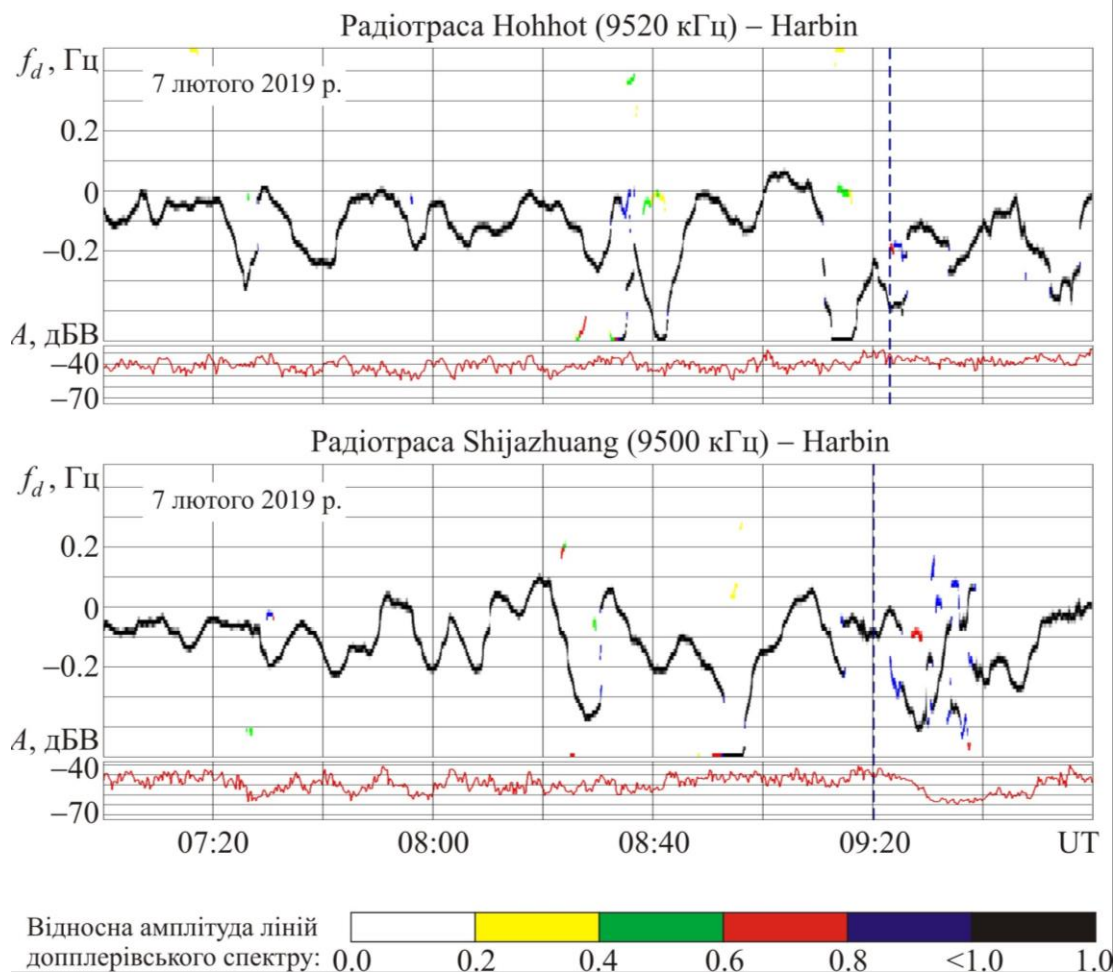


Рис. 3. Часові варіації ДЗЧ 7 лютого 2019 р. на радіотрасах Beijing–Harbin, Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin. Вертикальною пунктирною лінією показано момент заходу Сонця на поверхні Землі  
 Fig. 3. Time variations of Doppler shift on February 7, 2019 on the Beijing–Harbin, Hohhot–Harbin and Shijiazhuang–Harbin radio paths. Vertical dashed line indicate the sunset time at the ground

Оцінимо відносну амплітуду збурень  $N$  у полі РІЗ. Для цього скористаємося співвідношенням [7] для

$$\delta_{Na} = \frac{KcT}{4\pi H} \frac{f_d}{f},$$

де  $K = \frac{1 + \cos \theta}{2(1 + 2\zeta \text{tg}^2 \theta) \cos^2 \theta}$ ,  $\text{tg} \theta = \frac{R}{2z_r}$ ,  $R$  – довжина радіотраси вздовж поверхні Землі,  $z_r$  – висота відбиття радіохвилі,  $\zeta = (z_r - z_0)/r_0$ ,  $z_0$  – висота початку іоносфери,  $r_0$  – радіус Землі,  $H$  – висота однорідної атмосфери.

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%.



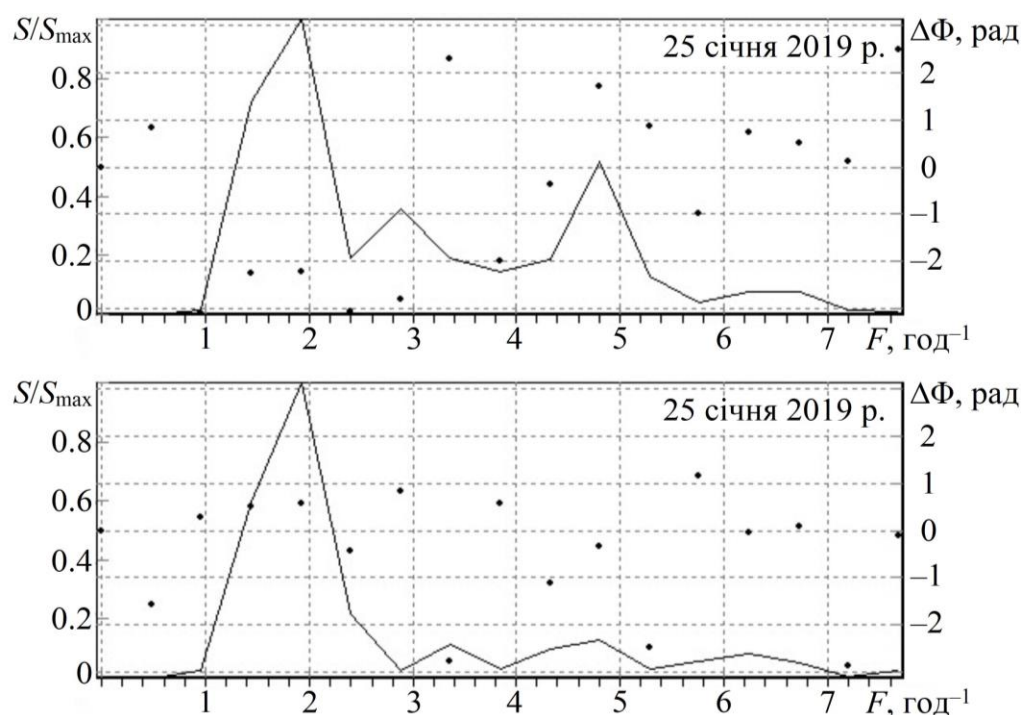


Рис. 4. Нормовані крос-спектри (суцільна лінія) та фази крос-спектрів (точки) варіацій ДЗЧ 25 січня 2019 р. на радіотрасах Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin по відношенню до радіотраси Beijing–Harbin (панелі зверху вниз)

Fig. 4. Normalized cross-spectra (solid line) and phases of cross-spectra (dots) of Doppler shift variations on January 25, 2019 on the Hohhot–Harbin and Shijiazhuang–Harbin radio paths relatively to the Beijing–Harbin radio path (panels from top to bottom)

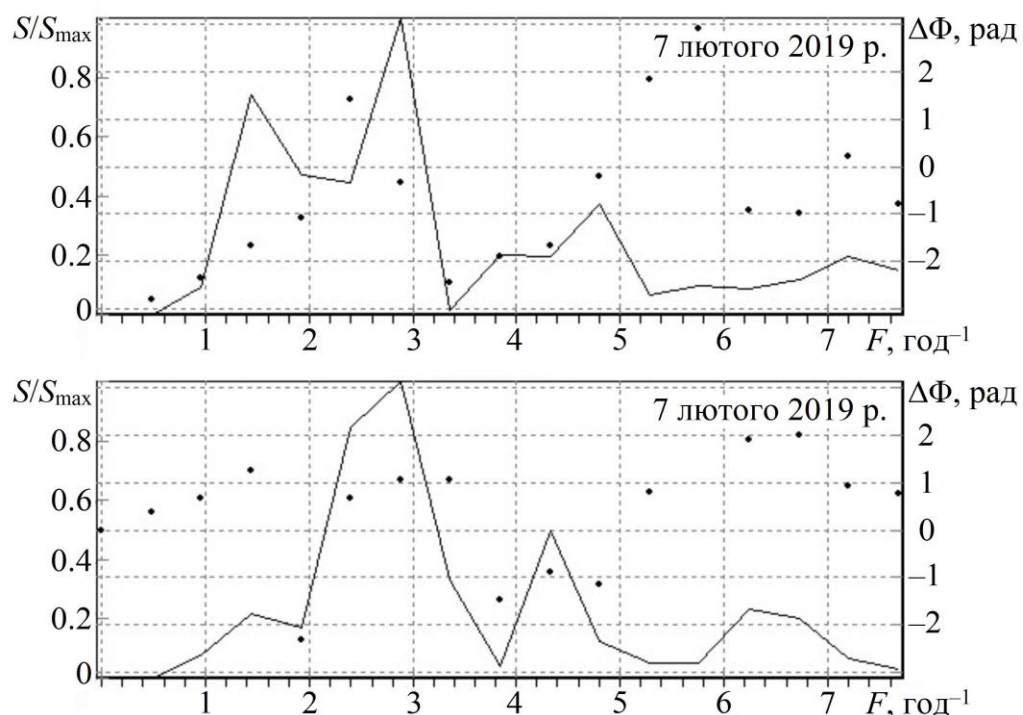


Рис. 5. Нормовані крос-спектри (суцільна лінія) та фази крос-спектрів (точки) варіацій ДЗЧ 7 лютого 2019 р. на радіотрасах Hohhot–Harbin і Shijiazhuang–Harbin по відношенню до радіотраси Beijing–Harbin (панелі зверху вниз)

Fig. 5. Normalized cross-spectra (solid line) and phases of cross-spectra (dots) of Doppler shift variations on February 7, 2019 on the Hohhot–Harbin and Shijiazhuang–Harbin radio paths relatively to the Beijing–Harbin radio path (panels from top to bottom)

Таблиця 4. Основні параметри РІЗ  
Table 4. Main parameters of TIDs

Дата	Частота, год <sup>-1</sup>	Період, хв	Довжина хвилі, км	Швидкість, м/с	Азимут, град	Переважаючий 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

### ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. 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.

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

3. 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.

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

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

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

### ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф. виконано 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»). Також робота Черногора Л. Ф., Гармаша К. П., Жданка С. Г., Пушина В. Ф. і Цимбала А. М. частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476, 0121U109881 і 0121U109882).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
2. Chum J, Athieno R, Baše J, Burešová D, Hruška F, Laštovička J, McKinnell LA, Šindelářová T. Statistical investigation of horizontal propagation of gravity waves in the ionosphere over Europe and South Africa. *J. Geophys. Res.* 2012;117:A03312. <https://doi.org/10.1029/2011JA017161>
3. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Жданко ЄГ, Леус СГ, Поднос ВА. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2020;33:42-59. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>
4. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Жданко ЄГ, Леус СГ, Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021;26(4):326-343. <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326>
5. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, 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;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
6. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СМ. 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. *Радіофізика та електроніка*. 2019;30:16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>
7. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020;55:e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
  8. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Shulga SN, Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020;207:105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
  9. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, 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;67(8):2439-2469. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038>
  10. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СМ. Ефекти геокосмічної бурі 5—6 серпня 2019 р. *Космічна наука і технологія*. 2021;27(2(129)):45-69.
  11. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021;61(1):73-91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
  12. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August – 2 September, 2019 geospace storm. *Annales Geophysicae*. 2021;39(4). <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
  13. Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, 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;127:e2022JA030553. <https://doi.org/10.1029/2022JA030553>
  14. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y, Luo Y. Disturbances in the ionosphere that accompanied typhoon activity in the vicinity of China in September 2019. *Radio Science*. 2022;57:e2022RS007431. <https://doi.org/10.1029/2022RS007431>
  15. Nakata H, Nozaki K, Oki Y. et al. Software-defined radio-based HF doppler receiving system. *Earth Planets Space*. 2021;73(209). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01547-5>
  16. Zhou C, Zhao Z, Deng F, Ni B, Chen G. Midlatitude ionospheric HF channel reciprocity: Evidence from the ionospheric oblique incidence sounding experiments. *Radio Sci*. 2010;45:RS6017, <https://doi.org/10.1029/2010RS004477>
  17. Vilella C, Miralles D, Pijoan JL. An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link: Sounding results. *Radio Sci*. 2008;43:RS4008. <https://doi.org/10.1029/2007RS003812>
  18. Ads AG, Bergadà P, Vilella C, Regué JR, Pijoan JL, Bardají R, Mauricio J. A comprehensive sounding of the ionospheric HF radio link from Antarctica to Spain. *Radio Sci*. 2012;48:1-12. <https://doi.org/10.1029/2012RS005074>
  19. Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander LjR, Belehaki A, Tsagouri I, Kouris SS, Vallianatos F, Makris J, Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*. 2009;43(11):1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
  20. Vertogradov G, Uryadov V, Vertogradov V. Oblique Sounding and Modeling of the Ionospheric HF Channel. *Radiophys Quantum Electron*. 2005;48:405-419. <https://doi.org/10.1007/s11141-005-0084-8>
  21. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.
  22. 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;31:163-172, <https://doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013>

#### REFERENCES

1. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
2. Chum J, Athieno R, Baše J, Burešová D, Hruška F, Laštovička J, McKinnell LA, Šindelářová T. Statistical investigation of horizontal propagation of gravity waves in the ionosphere over Europe and South Africa. *J. Geophys. Res*. 2012;117:A03312. <https://doi.org/10.1029/2011JA017161>
3. Chernogor LF, Garmash KP, Zhdanko YH, Leus SG, Podnos VA. Software and hardware system of multi-frequency oblique sounding the ionosphere. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Radio Physics and Electronics»*. 2020;33:42-59. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>

4. Chernogor LF, Garmash KP, Zhdanko YH, Leus SG, Luo Y. Features of ionospheric effects from the partial solar eclipse over the city of Kharkiv on 10 June 2021. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2021;26(4):326-343. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326>
5. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, 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;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
6. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SM. HF radio-wave characteristic variations over China during moderate earthquake in Japan on September 5, 2018. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Radio Physics and Electronics»*. 2019;30:16-26. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>
7. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020;55:e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
8. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Shulga SN, Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020;207:105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
9. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, 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;67(8):2439-2469. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.038>
10. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SM. Geospace storm effects on August 5–6, 2019. *Space Science and Technology*. 2021;27(2(129)):45-69. (In Ukrainian).
11. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021;61(1):73-91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
12. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August – 2 September, 2019 geospace storm. *Annales Geophysicae*. 2021;39(4). <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
13. Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, 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;127:e2022JA030553. <https://doi.org/10.1029/2022JA030553>
14. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y, Luo Y. Disturbances in the ionosphere that accompanied typhoon activity in the vicinity of China in September 2019. *Radio Science*. 2022;57:e2022RS007431. <https://doi.org/10.1029/2022RS007431>
15. Nakata H, Nozaki K, Oki Y. et al. Software-defined radio-based HF doppler receiving system. *Earth Planets Space*. 2021;73(209). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01547-5>
16. Zhou C, Zhao Z, Deng F, Ni B, Chen G. Midlatitude ionospheric HF channel reciprocity: Evidence from the ionospheric oblique incidence sounding experiments. *Radio Sci*. 2010;45:RS6017, <https://doi.org/10.1029/2010RS004477>
17. Vilella C, Miralles D, Pijoan JL. An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link: Sounding results. *Radio Sci*. 2008;43:RS4008. <https://doi.org/10.1029/2007RS003812>
18. Ads AG, Bergada P, Vilella C, Regué JR, Pijoan JL, Bardají R, Mauricio J. A comprehensive sounding of the ionospheric HF radio link from Antarctica to Spain. *Radio Sci*. 2012;48:1-12. <https://doi.org/10.1029/2012RS005074>
19. Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander LjR, Belehaki A, Tsagouri I, Kouris SS, Vallianatos F, Makris J, Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*. 2009;43(11):1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
20. Vertogradov G, Uryadov V, Vertogradov V. Oblique Sounding and Modeling of the Ionospheric HF Channel. *Radiophys Quantum Electron*. 2005;48:405-419. <https://doi.org/10.1007/s11141-005-0084-8>
21. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.
22. 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;31:163-172, <https://doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013>

Стаття надійшла до редакції: 16 вересня 2022 р.

Рекомендовано до друку: 27 жовтня 2022 р.

**PARAMETERS OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES:  
RESULTS FROM SPACED OBLIQUE HF SOUNDING**

**L. F. Chernogor<sup>1</sup>, K. P. Garmash<sup>1</sup>, Q. Guo<sup>2</sup>, Y. H. Zhdanko<sup>1</sup>, V. F. Pushin<sup>1</sup>,  
A. M. Tsymbal<sup>1</sup>, Yu. Zheng<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, 61022, Kharkiv, Svoboda Square, 4*

<sup>2</sup>*Harbin Engineering University, 145 Nantong Street, Nangang District, Harbin, 150001, China*

<sup>3</sup>*Qingdao University, 308 Ningxia Road, Qingdao, 266071, China*

**Urgency.** A characteristic feature of the ionospheric radio channel is that its parameters depend on season, local time, solar activity, geographic coordinates, the state of the sun, the state of atmospheric-space weather, etc. The state of the atmosphere and ionosphere and thus the state of the corresponding radio channels is rarely quiet. Usually, they are disturbed by high-energy sources of natural or anthropogenic nature. It is the perturbation of the parameters of the radio channel that limits the potential tactical and performance characteristics of radar, radio navigation, radio astronomy, radio communication systems, and remote radio sensing of the Earth from space. To improve the radio link performance, the non-stationary and random disturbances need to be diagnosed, and the link characteristics should be adapted to the disturbed conditions. The dynamic processes in the atmosphere are studied with many radio techniques, viz. ionosonde, incoherent scatter radar technique, signals from Global Positioning System satellite constellation, observations of HF radio waves at oblique incidence, etc. The oblique incidence technique can use dedicated transmitters, intercept signals from non-dedicated transmitters, utilize the transmitters of opportunity, those used for broadcasting or for dedicated services. As a result, the continuous monitoring of the ionosphere becomes cheaper when shortwave radio communication links at HF frequencies are used for overseas broadcasting. The technique of oblique sounding is a passive technique, and it is capable of monitoring large, up to global-scale, areas of the planet Earth. The technique shows high sensitivity since it employs measurements of the Doppler shift and the signal amplitude. Its time resolution is 10 s, and the Doppler resolution is 0.01–0.1 Hz, yielding the Doppler shift error of better than 0.01 Hz. These errors translate into the capability of monitoring electron density variations of order of  $10^{-4}$ – $10^{-3}$ , and vertical movements of 0.1–1 m/s.

**The aim** of this work is to present the results of determining the parameters of traveling ionospheric disturbances over the People's Republic of China by making use of the database measurements made with the multiple path oblique HF radio waves probing the ionosphere.

**Methods and Methodology.** The multifrequency multiple path coherent system located at the Harbin Engineering University campus has been used to acquire spaced measurements along 14 oblique HF radio wave propagation paths of different lengths and orientations. Based on the harmonic model of traveling ionospheric disturbances and making use of three propagation paths, the phase shifts along two propagation paths were determined in relation to the reference path. This shift equals to the dot product of the wave vector on the known reference base, which is defined to be the vector from one transmitter to another. Generally, a superposition of traveling ionospheric disturbances with different values of wave vector and frequency occurs instead of a single traveling ionospheric disturbance. To determine the parameters of these traveling ionospheric disturbances, the cross-spectra are first calculated, which are then used for calculating the periods and phases of the cross-spectra.

**Results.** Regarding spaced measurements taken along oblique HF radio wave propagation paths with the multifrequency multiple path coherent system, the technique has been developed for determining periods, horizontal wavelengths, and the azimuths of arrival of the traveling ionospheric disturbances. The cross-spectral analysis was invoked to determine the periods, horizontal wavelengths, and the azimuths of arrival of the traveling ionospheric disturbances with predominant amplitudes. The ~16–40-min period traveling ionospheric disturbances are confirmed to be generated by atmospheric gravity waves, whereas the ~10–13-min period waves are electromagnetic in nature. Usually, the relative amplitude of disturbances in the electron density was observed to be ~1–10%. As a rule, the ionospheric disturbances traveled along magnetic meridians, most often from the north to the south.

**Conclusions.** The system performance and working of the proposed techniques have been demonstrated through the determination of salient parameters of traveling ionospheric disturbances.

**KEY WORDS:** *spaced oblique radio-wave sounding, ionosphere, traveling ionospheric disturbance, disturbance parameter, Doppler spectrum, cross-spectrum*

The article was received by the editors: 16 September 2022

The article is recommended for printing: 27 October 2022