

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>

УДК 550.385.37: 550.388

**ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС БАГАТОЧАСТОТНОГО  
ПОХИЛОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ****Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Є. Г. Жданко, С. Г. Леус, В. А. Поднос***Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна**E-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com)*

Поступила до редакції 30 листопада 2020 р.

**Актуальність.** Іоносфера була і буде 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 і високоенергетичні процеси техногенного походження. Значними можливостями для дослідження в галузі радіофізики геокосмоса, вивчення каналу поширення радіохвиль і динамічних процесів у геокосмосі мають засоби похилого зондування (ПЗ). В цьому випадку можуть використовуватися як власні радіопередавальні пристрої, так і мережа радіомовних станцій. За допомогою ПЗ вдається охопити значні регіони Земної кулі (аж до глобальних), і тим самим вивчати динамічні процеси в геокосмосі над цими регіонами.

**Метою** цієї роботи є короткий опис когерентного багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу ПЗ іоносфери й ілюстрація його працездатності на прикладі вивчення динамічних процесів у геокосмосі.

**Методи і методологія.** Описано когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, який призначено для радіофізичного моніторингу динамічних процесів у геокосмосі, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження. Комплекс здатний приймати радіосигнали в низькочастотному (НЧ) і високочастотному (ВЧ) діапазонах частот. Розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке визначається колом розв'язуваних задач. Кількість радіотрас та їх орієнтація залежать від специфіки розв'язуваних задач. В основі функціонування комплексу лежать вимірювання амплітуди сигналу та його доплерівського зміщення частоти (для ВЧ і НЧ) чи фази (для НЧ діапазону). За допомогою авторегресійного алгоритму забезпечується роздільна здатність за доплерівською частотою до 0.02 Гц та за часом не більше 1 хв. Після отримання часових залежностей доплерівських спектрів, фаз і амплітуд для різних трас проводиться подальша обробка цих часових рядів.

**Результати.** У ХНУ імені В. Н. Каразіна тривалий час функціонує та модернізується 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 і земного походження.

**Висновки.** Успішне функціонування комплексу продемонстровано на прикладах дослідження динамічних процесів у геокосмосі, викликаних дією різноманітних джерел енерговиділення.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** радіофізичний моніторинг, похиле зондування іоносфери, когерентний комплекс, радіотраси, доплерівські спектри, фаза сигналу, амплітуда сигналу

**SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM  
OF MULTI-FREQUENCY OBLIQUE SOUNDING THE IONOSPHERE****L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Y. H. Zhdanko, S. G. Leus, V. A. Podnos***V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine*

**Background.** The ionosphere was and will be the main channel for the propagation of radio waves of various bands (from extremely low to super-high frequencies). A feature of this channel is the dependence of its parameters on the state of space weather. Space weather is formed primarily by processes on the Sun and by processes on Earth (to a lesser extent). High-energy processes of man-made origin can also make a certain contribution to the state of space weather. Means of oblique sounding (OS) have significant opportunities for research in the field of geospace radiophysics, study of the channel of propagation of radio waves and dynamic processes in the geospace. In this case, both own radio transmitting devices and a network of broadcasting stations can be used. With the help of OS, it is possible to cover significant regions of the globe (up to global ones), and thereby study the dynamic processes in the geospace over these regions.

**The purpose** of this work is to briefly describe the multi-frequency multiple-path radio system of the OS ionosphere and to illustrate its performance using the example of studying dynamic processes in the geospace.

**Techniques and Methodology.** A coherent multi-frequency multiple-path oblique sounding radio system of the ionosphere is described. It is intended for radiophysical monitoring of dynamic processes in the geospace caused by variations in space weather, the impact on the ionosphere of high-energy sources of space and terrestrial origin. The

complex is capable of receiving radio signals in the low-frequency (LF) and high-frequency (HF) ranges. Original software has been developed, depending on the range of tasks to be solved. The number of radio paths and their orientation depend on the specifics of the tasks being solved. The operation of the complex is based on measurements of the Doppler shift of frequency and amplitude or phase and amplitude of the signal. The autoregressive algorithm provides a Doppler frequency resolution of up to 0.02 Hz and a time resolution of 1 min. After obtaining the time dependences of the Doppler spectra, phases and amplitudes for various radio propagation paths, further processing of the time series is performed.

**Results.** At V. N. Karazin Kharkiv National University, a multi-frequency multi-path radio engineering complex for oblique sounding of the ionosphere has been developed and is operating, designed for radiophysical monitoring of dynamic processes in the geospace caused by variations in space weather, the impact on the ionosphere of high-energy sources of space and terrestrial origin.

**Conclusions.** The successful functioning of the complex is demonstrated by the example of studying the dynamic processes in the geospace caused by the action of various sources of energy release.

**KEY WORDS:** radio monitoring, oblique incidence probing the ionosphere, coherent system, radio propagation paths, Doppler spectra, signal phase, signal amplitude

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МНОГОЧАСТОТНОГО НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Е. Г. Жданко, С. Г. Леус, В. А. Поднос

*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022, г. Харьков, Украина*

**Актуальность.** Ионосфера была и будет основным каналом распространения радиоволн различных диапазонов (от крайне низких до сверхвысоких частот). Особенностью этого канала является зависимость его параметров от состояния космической погоды. Космическая погода формируется, прежде всего, процессами на Солнце и, в меньшей степени, процессами на Земле. Определенный вклад в состояние космической погоды могут давать и высокоэнергетические процессы техногенного происхождения. Значительными возможностями для исследования в области радиофизики геокосмоса, изучения канала распространения радиоволн и динамических процессов в геокосмосе обладают средства наклонного зондирования (НЗ). В этом случае могут использоваться как собственные радиопередающие устройства, так и сеть радиовещательных станций. При помощи НЗ удается охватить значительные регионы земного шара (вплоть до глобальных), и тем самым изучать динамические процессы в геокосмосе над этими регионами.

**Целью** настоящей работы является краткое описание когерентного многочастотного многотрассового радиотехнического комплекса НЗ ионосферы и иллюстрация его работоспособности на примере изучения динамических процессов в геокосмосе.

**Методы и методология.** Описан когерентный многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, предназначенный для радиофизического мониторинга динамических процессов в геокосмосе, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения. Комплекс способен принимать радиосигналы в низкочастотном (НЧ) и высокочастотном (ВЧ) диапазонах частот. Разработано оригинальное программное обеспечение, зависящее от круга решаемых задач. Количество радиотрасс и их ориентация зависят от специфики решаемых задач. В основе функционирования комплекса лежат измерения амплитуды сигнала и его доплеровского смещения частоты (для ВЧ и НЧ), или фазы (для НЧ диапазона). При помощи авторегрессионного алгоритма обеспечивается разрешающая способность по доплеровской частоте до 0.02 Гц и по времени не более 1 мин. После получения временных зависимостей доплеровских спектров, фаз и амплитуд для различных трасс производится дальнейшая обработка этих временных рядов.

**Результаты.** В ХНУ имени В. Н. Каразина продолжительное время функционирует и модернизируется многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, предназначенный для радиофизического мониторинга динамических процессов в геокосмосе, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения.

**Выводы.** Успешное функционирование комплекса продемонстрировано на примерах исследования динамических процессов в геокосмосе, вызванных действием различных источников энерговыделения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** радиофизический мониторинг, наклонное зондирование ионосферы, когерентный комплекс, радиотрассы, доплеровские спектры, фаза сигнала, амплитуда сигнала

### ВСТУП

Ионосфера 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.

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 (див., наприклад, [5]). На жаль, у світі є всього близько десяти радарів некогерентного розсіяння, більшість з них розташована у Західній півкулі. Тільки по два радари є в Європі (м. Tromsø, Норвегія; м. Харків, Україна) й Азії (поблизу м. Иркутськ, Росія; Qijiang, КНР). 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 [6–9]. Іонозонди чисельністю понад 230 штук розташовані на Земній кулі вкрай нерівномірно. Крім того, вони дають інформацію про динамічні процеси в іоносфері переважно над місцем розташування іонозонда.

Більшими можливостями для дослідження в галузі радіофізики геокосмоса, вивчення каналу поширення радіохвиль і динамічних процесів в іоносфері мають засоби похилого зондування (ПЗ) [8, 10–20]. В цьому випадку можуть використовуватися як власні радіопередавальні пристрої [16–18, 20], так і мережа радіомовних станцій [8, 11, 14, 20]. 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. Безперервний моніторинг динамічних процесів в іоносфері стає значно дешевшим при використанні світової мережі радіомовних станцій. Відсутність мережі власних радіопередавальних пристроїв при ПЗ іоносфери дозволяє зберегти заводську обстановку на попередньому рівні. Цими міркуваннями й керувалися розробники багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу для ПЗ іоносфери, описаного нижче.

Засоби ПЗ іоносфери досить давно й успішно використовуються для вивчення динамічних процесів [20–26].

Для моніторингу динамічних процесів в іоносфері в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна створено когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс високочастотного (ВЧ) та низькочастотного (НЧ) діапазонів радіохвиль [21–23, 25, 26]. Комплекс розташований в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

На відміну від авторів [20], нами використовуються як надкороткі (~44 км), так і більш протяжні траси (до 2 тис. км).

Метою цієї роботи є короткий 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.

## ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

*Загальні відомості.* В основу радіофізичного моніторингу динамічних процесів в іоносфері покладені вимірювання доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ)  $f_d$ , або в загальному випадку – доплерівських спектрів (ДС), а також амплітуди відбитого сигналу ВЧ діапазону або фази й амплітуди відбитого сигналу НЧ діапазону.

Метод доплерівського зондування має високу чутливість до змін параметрів середовища.

Розглянемо найпростішу ситуацію, коли шуми відсутні, сигнал одномодовий і інтервал його стаціонарності більше інтервалу обробки (період хвилі значно більше інтервалу обробки). Такі можливості методу діагностики назвемо потенційними.

Експериментально вдається виділити відносно доплерівське зміщення частоти  $\delta_{fd} = f_d/f$  не менше відносної нестабільності частоти, яка для рубідієвого стандарту частоти складає  $\delta_f \approx 10^{-10}$ . Покладемо  $\delta_{fd\min} \approx \delta_f$ .

При використанні ВЧ радіохвиль і похилого зондування відносна зміна концентрації електронів  $N$  у полі акустико-гравітаційної хвилі (АГХ) з періодом  $T$  дається співвідношенням [27–31]:

$$\delta_N = \frac{K}{4\pi} \frac{cT}{L} \delta_{fd}, \quad (1)$$

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

При використовуваній нами довжині радіотрас  $R \approx 675$  км значення  $K \approx 5.1-2.3$  при висоті відбиття радіохвилі  $z_r \approx 100-300$  км відповідно. За середнього значення  $K = 3.7 \pm 1.4$ ,  $L \approx 30$  км і  $\delta_{fd\min} \approx 10^{-10}$ , із (1) отримаємо, що

$$\delta_{N\min} \approx 3 \cdot 10^{-5} T, \quad (2)$$

де період  $T$  дається в с. Результати оцінок  $\delta_{N\min}$  за співвідношенням (2) наведені в Табл. 1 (середній рядок).

ДЗЧ пов'язано зі швидкістю вертикального руху плазми в іоносфері наступним співвідношенням:

$$\delta_{fd} = -2 \frac{v}{c} \cos \theta,$$

де  $\theta$  – кут між траєкторією хвилі і вертикаллю. 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.

Таблиця 1. Залежність  $\delta_{N\min}$  від періода АГХ

$T, \text{с}$	$10^2$	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	$10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$10^4$
$\delta_{N\min}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	0.15	0.3
$\delta_{N\min}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$

При використанні НЧ радіохвиль, що відбиваються в нижній іоносфері, співвідношення для  $\delta_N$  має інший вигляд. Фазовий зсув  $\Delta\phi$  при зміні висоти відбиття на  $\Delta z_r$  дається наступним виразом [32]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi f}{c} \Delta z_r \cos \theta \approx \frac{8\pi f}{c} \frac{z_r}{R} \Delta z_r. \quad (3)$$

При поширенні АГХ  $\Delta z_r$  і  $\Delta\phi$  змінюються за періодичним законом з періодом  $T$ . Амплітуда  $\Delta\phi_a$  пов'язана з амплітудою ДЗЧ наступним співвідношенням:

$$f_{da} = \frac{\Delta\phi_a}{T} \approx \frac{8\pi f}{T} \frac{z_r}{c R} \Delta z_{ra}. \quad (4)$$

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

$$\delta_{N\min} \approx \frac{\Delta z_{ra\min}}{L}. \quad (5)$$

Тоді з (4) та (5) маємо

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

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

$$\delta_{N\min} \approx 6 \cdot 10^{-6} T.$$

Залежність  $\delta_{N\min}$  від  $T$  також наведена в Табл. 1 (нижній рядок).

При фазових вимірюваннях у НЧ діапазоні похибка  $\Delta\phi \approx 0.1^\circ$ . Тоді

$$\delta_{N\min} = \frac{\lambda}{8\pi L} \frac{R}{z_r} \Delta\phi_{a\min}.$$

При  $\lambda = 3.75$  км,  $L \approx 5$  км,  $z_r \approx 80$  км,  $R \approx 2000$  км і  $\Delta\phi_{a\min} \approx 2 \cdot 10^{-3}$  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 [33]), дозволяє на порядок підвищити роздільну здатність за часом (наприклад, до  $\delta t \approx 10$  с). За цей час область відбиття зміщується за висотою на  $\Delta z_{\min} = v_{\min} \delta t \approx 1.5\text{--}15$  м. Отримані оцінки  $\delta_{N_{\min}}$ ,  $v_{\min}$  і  $\Delta z_{\min}$  свідчать про високу чутливість методів доплерівського та фазового зондувань.

### КОМПЛЕКС ПОХИЛОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

*Загальні відомості.* 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 дислокована в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (поблизу с. Гракове, Харківська обл.,  $49.65^\circ$  пн. ш.,  $36.9^\circ$  сх. д.).

Дослідження варіацій характеристик ВЧ радіохвиль, відбитих від іоносфери, здійснюється за допомогою системи доплерівського 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 доплерівських 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 дуже низькочастотному (ДНЧ) діапазонах (частоти  $10\text{--}100$  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 (Російська Федерація), а також варіацій доплерівського 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 ( $f = 1.5\text{--}30$  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 доплерівського 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  $1\text{--}32$  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. 1. 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 атенуатора.

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  $f = 1.5\text{--}30$  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  $0\text{--}300$  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.

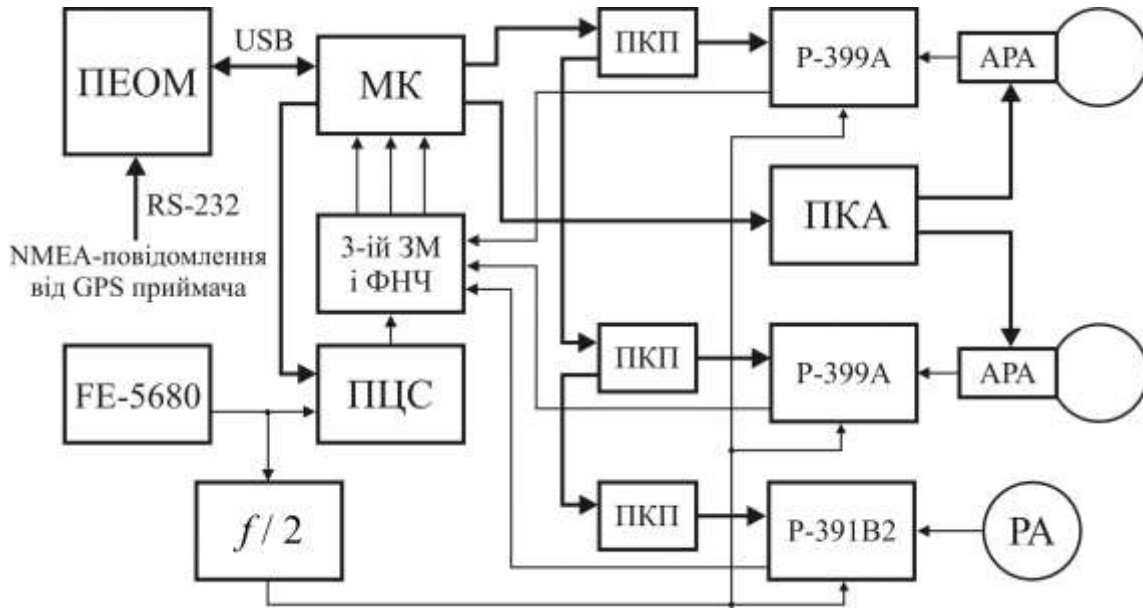


Рис. 1. Структурна схема програмно-апаратної системи пасивного зондування іоносфери. ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина, P-399A – приймач радіосигналів декаметрового діапазону, P-391B2 – приймач радіосигналів гектометрового діапазону, 3-й ЗМ і ФНЧ – блок 3-їх змішувачів частоти та фільтрів 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 навіпл

Fig. 1. Block diagram of the software defined system. ПЕОМ is the personal computer, P-399A is HF radio receivers, P-391B2 is the hectometer radio wave range radio receiver, 3<sup>rd</sup> ЗМ and ФНЧ is the 3<sup>rd</sup> mixer and low pass filter, FE-5680 is the rubidium frequency standard, ПЦС is the direct digital synthesizer, МК is the microcontroller, ПКП is the receiver control board, АРА is an active loop antenna, РА is the loop antenna, ПКА is the antenna control board,  $f/2$  is the frequency divider.

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  $0.1^\circ$ , а амплітуди – 2–3 %.

Блок-схема системи, створеної для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ, наведена на Рис. 2, а її зовнішній вигляд – на Рис. 3.

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.

Рис. 2. 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

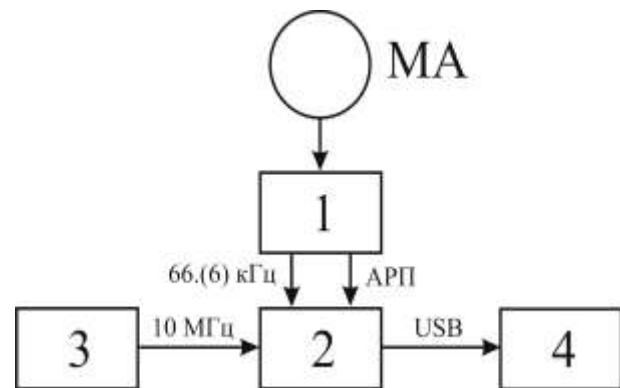


Fig. 2. Block diagram of the system for studying variations in the phase and amplitude of the signals transmitted by the RBU radio station. MA is a loop magnetic antenna; 1 is the upgraded PK-66 radio receiver; 2 is the block developed for making measurements and acquiring the data; 3 is the Ch1-69 rubidium frequency standard; 4 is the USB flash memory.



Рис. 3. 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

Fig. 3. Photo of the system for studying ionospheric variations in the phase and amplitude of the RBU station signals of the Standard Frequency and Time Signal Service. Receiver PK-66 (top) with magnetic antenna and microcontroller phase meter (left); Ch1-69 rubidium frequency standard (bottom)



Якісні характеристики частотно-часових параметрів системи (значення відносної нестабільності частоти зразкового сигналу порядку  $(1-2) \cdot 10^{-11}$  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.

*Характеристики використаних радіотрас.* Кількість радіотрас та їх орієнтація залежать від специфіки розв'язуваних задач. У цих дослідженнях використовувалися 7 радіотрас різної орієнтації та протяжності (див. Рис. 4 та Табл. 2).

Для дослідження висотної залежності проявів динамічних процесів у іоносфері для приблизно одного і того ж географічного розташування радіостанцій застосовувалися чотири різні частоти радіохвилі. При цьому одна радіохвиля відбивалася в D-області, друга – в E-області, а дві інші – в F-області іоносфери.



Рис. 4. Радіотраси, які використовуються для похилого зондування іоносфери

Fig. 4. Radio paths used for sounding the ionosphere at oblique incidence

### МЕТОДИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Обробка даних доплерівського 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 магнітні 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 [34]. 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.

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  $\sim 1.33$  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.

Таблиця 2. Відомості про радіотраси, які використовуються для ПЗ іоносфери

Частота, кГц	Місце розташування	Відстань від приймача, км	Азимут відносно приймача	Потужність, кВт	Час роботи, УТ
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	Епізодично
4201	Те ж саме	44	267°	1	Епізодично
4996	Росія, Московська обл., м. Електроуглі 55.7378° пн. ш. 38.1539° сх. д.	675	7°	5	00:00–24:00
9996	Те ж саме	675	7°	8	00:00–24:00
14996	Те ж саме	675	7°	8	00:00–24:00

### ПРИКЛАДИ РЕЄСТРАЦІЙ

*Реакція на рух сонячного термінатора.* Приклад результатів спостережень варіацій ДЗЧ представлений на Рис. 5. Із Рис. 5 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 та періодом від 5 до 30 хв.

Розглянемо це докладніше. Перед заходом Сонця на поверхні Землі спостерігалось від'ємне зміщення доплерівської частоти. Найбільш добре це спостерігалось 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.

Радіохвиля з частотою 3.2 МГц днем відбивалася в Е-області іоносфери. При цьому спостерігалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодами  $T$  від 5 до 10 хв. Приблизно такі ж періоди відзначалися 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 відзначалися варіації з  $T \approx 15$  хв. Доплерівські 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.

Вимірювання на частоті 14.996 МГц протягом 2015 р. були неефективними.

Цікаво, що 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.

Знаючи  $f_{da}$  і  $T$ , можна за співвідношенням (1) оцінити  $\delta_N$ . Результати оцінок для радіохвилі з  $f = 3.2$  МГц наведено в Табл. 3. З Табл. 3 видно, що значення  $\delta_N$  змінювались від 0.45 до 13.5 % при збільшенні періоду від 5 до 30 хв.

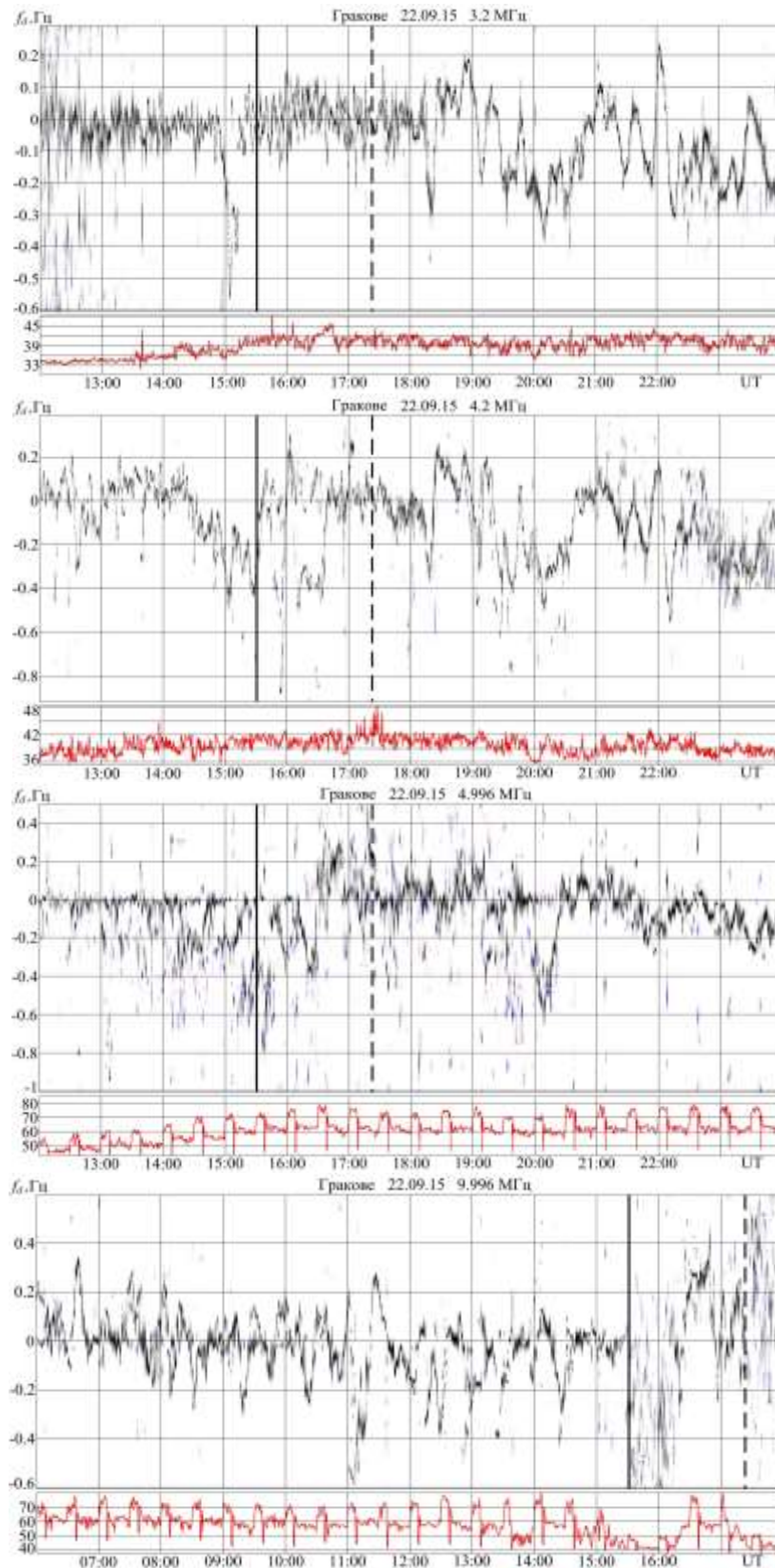


Рис. 5. Варіації доплерівського зміщення частоти 22 вересня 2015 р. на частотах 3.2, 4.2, 4.996 та 9.996 МГц. Суцільною та пунктирною лініями позначено захід Сонця на висотах 0 та 300 км відповідно

Fig. 5. UT variations in the Doppler frequency shift on September 22, 2015 at 3.2 MHz, 4.2 MHz, 4.996 MHz, and 9.996 MHz. Solid and dashed lines indicate the sunset at altitudes of 0 and 300 km, respectively

Таблиця 3. Параметри спостережуваних квазіперіодичних збурень

$T$ , хв	5	10	15	30	30
$f_{da}$ , Гц	0.05	0.07	0.10	0.15	0.25
$\delta_N$ , %	0.45	1.2	2.7	8.1	13.5

*Реакція на сонячні спалахи.* Приклад результатів моніторингу космічної погоди представлено на Рис. 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. Геомагнітне поле характеризувалося як спокійне з середньодобовим індексом  $K_{pmax} = 1$  для 11–12 січня і  $K_{pmax} = 3$  для 13–14 січня. В інтервали реєстрацій потрапили два сонячні рентгенівські спалахи класу M1, які мали місце о 09:11 UT 11 січня і 08:38 UT 13 січня 2013 р. На Рис. 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. 6 поряд із добовим ходом фази й амплітуди радіохвилі видно чітку реакцію сигнальних параметрів на спалахи: короточасні 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.

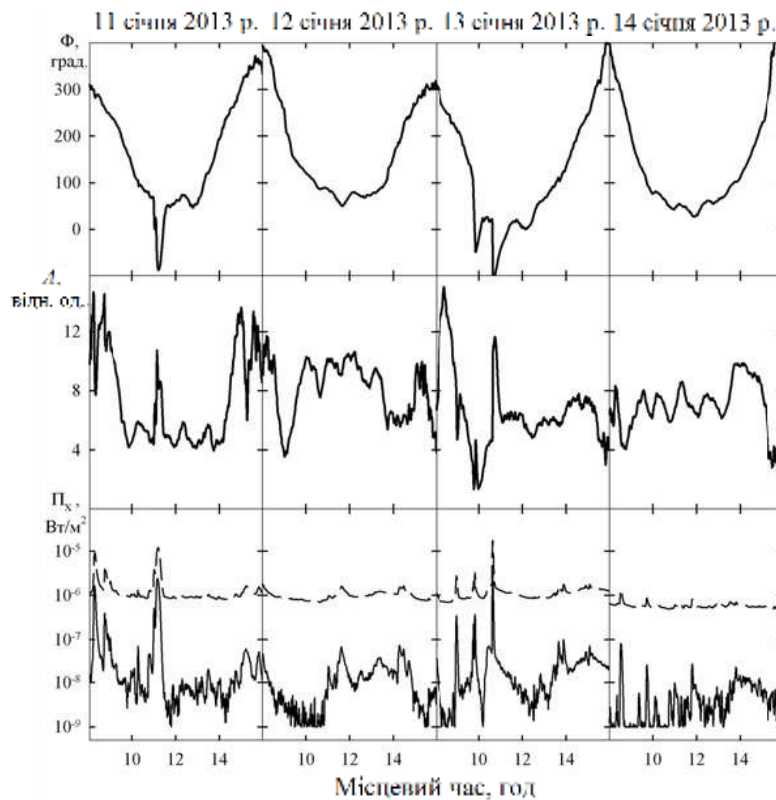


Рис. 6. Варіації середньої фази й амплітуди відбитого від іоносфери сигналу станції РБУ (м. Москва), зареєстровані в м. Харків у час доби поблизу опівдня з 11 до 14 січня 2013 р., а також реєстрації потоку сонячного рентгенівського випромінювання в діапазонах 0.05–0.4 нм (суцільні лінії) і 0.1–0.8 нм (штрихові) на супутнику GOES-15

Fig. 6. Local time variations in the averaged phase and amplitude of the RBU (Moscow) station signal, reflected from the ionosphere and registered in Kharkiv around the local noon from 11 to 14 January 2013, as well as X-ray flux in the 0.05–0.4 nm (solid lines) and 0.1–0.8 nm (dashed lines) ranges measured on the GOES-15 spacecraft

Опишемо коротко добові варіації  $f_d(t)$  і  $A(t)$  (Рис. 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  $\pm 0.1$  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 доплерівське зміщення частоти й амплітуду сигналу на частоті 77.5 кГц (див. Рис. 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  $\Delta T$  близько 34 і 20 хв відповідно. Зсув фази сигналу

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

Для цих випадків значення  $\Delta\varphi$  дорівнюють 3.9 і 1.3. Зі співвідношення (3) знаходимо, що зміщення області відбиття становило близько 15 і 5 км. При цьому для  $L \approx 5$  км з (5) 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.

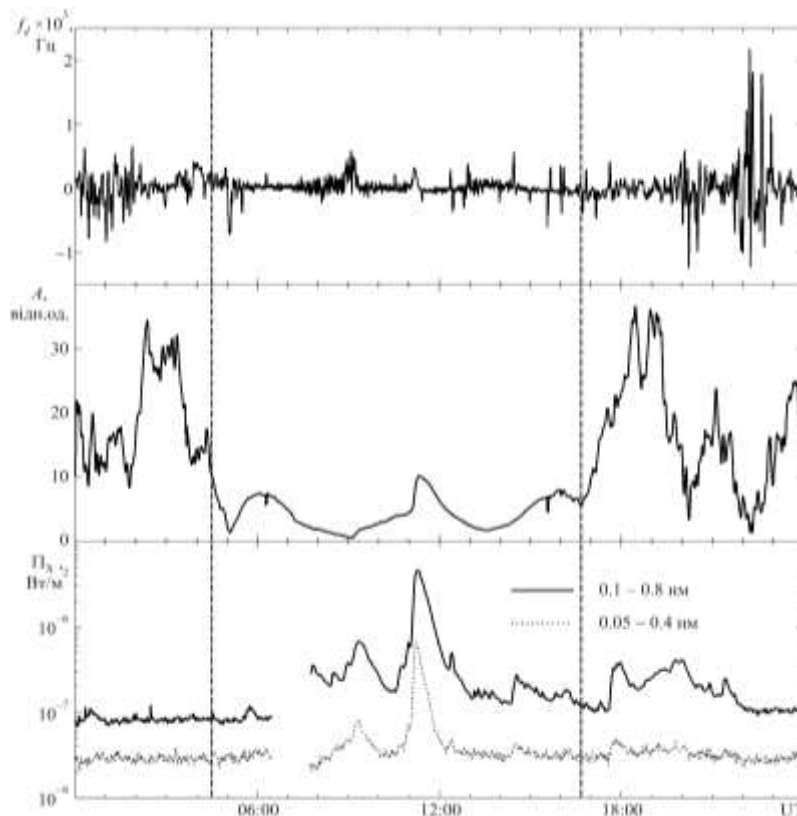


Рис. 7. Часові варіації доплерівського зміщення частоти й амплітуди сигналу станції DCF77 (траса Mainflingen, ФРН – Гракове, 77.5 кГц) і потоку енергії 20 березня 2019 р. під час рентгенівського спалаху С класу на Сонці. Вертикальними лініями показані моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі в точці з координатами  $50^\circ$ пн. ш.,  $23^\circ$ сх. д., які відповідають середині радіотраси

Fig. 7. UT variations in the Doppler shift of frequency and in the amplitude of the signal from the DCF77 station (Mainflingen (Germany, 77.5 kHz) to Grakove propagation path) as well as the X-ray energy flux on March 20, 2019 during a class C solar flare event. The vertical lines indicate sunrise and sunset times at the ground at  $(50^\circ\text{N}, 23^\circ\text{E})$  geographic coordinates, which correspond to the middle of the radio path

*Реакція 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. 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. Зі співвідношення (1) маємо  $\delta_N \approx 2\%$ . 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 [35].

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 спостерігалось в сусідні дні, можна припустити, що воно пов'язане з іоносферною бурєю і, зокрема, зі збільшенням поглинання радіохвилі в результаті збільшення  $N$  за рахунок висипання в нижню іоносферу високоенергійних (з енергією  $\sim 10$  кеВ) електронів з магнітосфери.

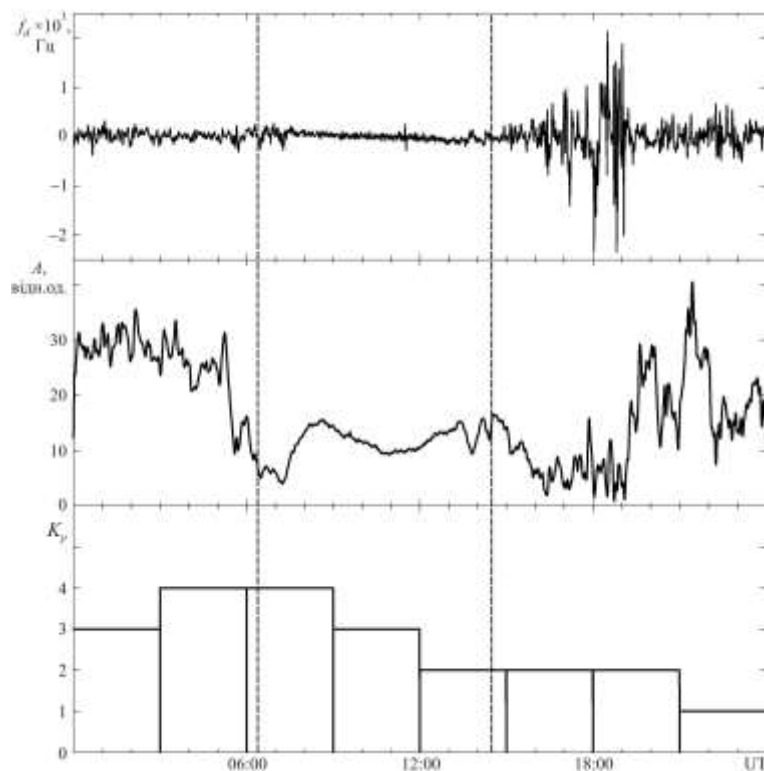


Рис. 8. Часові варіації доплерівського зміщення частоти й амплітуди сигналу станції DCF77 (траса Mainflingen, ФРН – Гракове, 77.5 кГц) і  $K_p$ -індексу 19 грудня 2019 р. після геомагнітного збурення. Вертикальними лініями показані моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі в точці з координатами  $50^\circ$ пн. ш.,  $23^\circ$ сх. д., які відповідають середині радіотраси

Fig. 8. UT variations in the Doppler shift of frequency and in the amplitude of the signal from the DCF77 station (Mainflingen (Germany, 77.5 kHz) to Grakove propagation path) after the geomagnetic perturbation, as well as the  $K_p$ -index for December 19, 2019. The vertical lines indicate sunrise and sunset times at the ground at  $(50^\circ\text{N}, 23^\circ\text{E})$  geographic coordinates, which correspond to the middle of the radio path

### ОБГОВОРЕННЯ

Комплекс багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери протягом багатьох років забезпечував експериментальними даними про динамічні процеси в геокосмосі, викликані джерелами різної фізичної природи [21–23, 25, 26]. 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 [27–31, 34, 36, 37]. З'явилася можливість синхронних вимірювань на двох подібних комплексах.

У цій статті 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  $\sim 100$  км) спостерігаються процеси з  $T$  від 5 хв і більше, а вище – з  $T$  від  $\sim 10$  хв і більше. Очевидно, що квазіперіодичні коливання викликані атмосферними гравітаційними хвилями, для яких  $T_{\min} \approx 5$  хв в нижній іоносфері, а вище  $T_{\min} \approx 10\text{--}15$  хв [35].

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

### ВИСНОВКИ

1. 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.

2. Комплекс потенційно здатний виявляти відносне ДЗЧ  $\sim 10^{-10}$ , зсув фази в НЧ діапазоні  $\sim 0.1^\circ$ , варіації амплітуди 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  $\sim 0.02\text{--}0.05$  м/с.

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

### 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. частково підтримана в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0119U002538).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### Authors' ORCID ID

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

K. P. Garmash  <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Черногор ЛФ, Домнин ИФ. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
2. Черногор Л Ф. Фізика геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2021;27(1(128)):3-77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>
3. Афраймович ЭЛ, Перевалова НП. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
4. Ясюкевич ЮВ, Едемский ИК, Перевалова НП, Полякова АС. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: Монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 259 с.
5. Пуляев ВА, Дзюбанов ДА, Домнин ИФ. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: Монография. Харьков: НТУ “ХПИ”; 2011. 240 с.
6. Reinisch BW, Galkin IA, Khmyrov GM, Kozlov AV, Bibl K., Lisysyan IA, Cheney GP, Huang X, Kitrosser DF, Paznukhov VV, Luo Y, Jones W, Stelmash S, Hamel R, Grochmal J. New Digisonde for research and monitoring applications. Radio Science. 2009 Feb 19;44(1):RS0A24. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
7. Reinisch BW, Galkin IA. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO). Earth, Planets and Space. 2011 Apr 01;63(4):377–381. <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 Oct 15;60(8):1644–1656. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>



9. Зализовский АВ, Кашеев АС, Кашеев СБ, Колосков АВ, Лисаченко ВН, Пазнухов ВВ, Пикулик ИИ, Сопин АА, Ямпольский ЮМ. Макет портативного когерентного ионозонда. *Космічна наука і технологія*. 2018;24(3(112)):10–22. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010>
10. Ivanov VA, Kurkin VI, Nosov VE, Uryadov VP, Shumaev VV. Chirp Ionosonde and its Application in the Ionospheric Research. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003 Nov;46(11):821–851. <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c>
11. Galushko VG, Kascheev AS, Paznuhkov VV, Yampolski YuM, Reinisch BW. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. *Radio Science*. 2008 Aug;43(4): RS4013. <https://doi.org/10.1029/2007RS003735>
12. Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander L, Belehaki A, Tsagouri I, Kouris S, 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 Jun 02;43(11):1611–1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
13. 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 Jan;49(1):83–88. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.031>
14. Paznuhkov VV, Galushko VG, Reinisch BW. Digisonde observations of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Advances in Space Research*. 2012;49(4):700–710. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.012>
15. Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG, Vertogradov VG, Kubatko SV. Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013 Nov 14;56(5):259-275. <https://doi.org/10.1007/s11141-013-9431-3>
16. Shi SZ, Zhao ZY, Liu JN, Liu Y, Chen G, Li T, Yao M. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF skywave-multistatic radar. *IEEE Geosci. Remote Sens*. 2014;11(7):1270-1274. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2291831>
17. Shi SZ, 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 Apr;53(4):2185-2194. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2357443>
18. 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 the parasitic oblique-incidence sounder. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015 Jul 08;12(10):2070-2074. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2447524>
19. Heitmann AJ, Cervera MA, Gardiner-Garden RS, Holdsworth DA, MacKinnon AD, Reid IM, Ward BD. Observations and modeling of traveling ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle-of-arrival sounder. 32nd URSI GASS; 2017 Aug 19–26; Montreal, QC, Canada. pp. 1-4. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105329>
20. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017 Oct 15;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
21. Гармаш КП, Гоков АМ, Костров ЛС, Розуменко ВТ, Тырнов ОФ, Федоренко ЮП, Цымбал АМ, Черногор ЛФ. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере. *Вестник Харьковского университета. Серия «Радиофизика и электроника»*. Харьков: ХГУ; 1998;405:157-177.
22. Гармаш КП, Розуменко ВТ, Тырнов ОФ, Цымбал АМ, Черногор ЛФ. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999;7:3-15.
23. Garmash KP, Gokov AM, Kostrov LS, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Fedorenko YuP, Tsymbal AM, Chernogor LF. 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;53(4-5):6-20. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20>
24. Благовещенская НФ. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат; 2001. 287 с.
25. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Rozumenko VT, Tsymbal AM, Tyrnov OF. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun and Geosphere*. 2012 Nov;7(2):133-139.
26. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Поднос ВА, Тырнов ОФ. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика; 2013:160-182.



27. 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 May;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
28. 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 Feb;55(2):e2019RS006866 <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
29. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, 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 Jul 15;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
30. 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 Oct;207:Paper No. 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
31. 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>
32. Черногор ЛФ. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомagnetизм и аэрoномия*. 2015; 55(3):370-385. <https://doi.org/10.1134/S0016793215030044>
33. Marple SL, Jr. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.; 1987. 492 p.
34. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Guo Q, Zheng Y, Поднос ВА, Розуменко ВТ, Тырнов ОФ, Цимбал АМ. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2018;28:88-93.
35. 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.
36. Guo Q, Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019;30:3-15.
37. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СН. Вариации характеристик радиоволн ВЧ диапазона над Китаем, сопровождавшие умеренное землетрясение в Японии 5 сентября 2018 г. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019;30:16–26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>

#### REFERENCES

1. Chernogor LF, Domnin IF. *Physics of geospace storms: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine; 2014. 408 p. (Russian).
2. Chernogor LF. *Physics of Geospace Storms*. *Space Science and Technology*. 2021;27(1(128)):3-77. (Ukrainian).
3. Afraimovich EL, Perevalova NP. *GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere*. Irkutsk: Solar–Terrestrial Physics Institute SD RAS: SI SC RRS ESSC SD RAMS; 2006. 479 p. (Russian).
4. Yasyukevich YuV, Edemskiy IK, Perevalova NP, Polyakova AS. *Ionosphere Response on Helio- and Geophysical Disturbances according to GPS Data*. *Solar–Terrestrial Physics Series*. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2013. p. 259. (Russian).
5. Pulyaev V. A., Dzyubanov D. A., Domnin I. F. *Determination of the ionospheric parameters using the incoherent scattering technique: Monograph*. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2011. 240 p. (in Russian).
6. Reinisch BW, Galkin IA, Khmyrov GM, Kozlov AV, Bibl K, Lisysyan IA, et al. *New Digisonde for research and monitoring applications*. *Radio Science*. 2009 Feb 19;44(1):1-15. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
7. Reinisch BW, Galkin IA. *Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO)*. *Earth, Planets and Space*. 2011 Jun 14;63(4):377-381. <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 Oct 15;60(8):1644-1656. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>
9. Zalizovski AV, Kashcheyev AS, Kashcheyev SB, Koloskov AV, Lisachenko VN, Paznukhov VV, Pikulik II, Sopin AA, Yampolski YuM. *A prototype of a portable coherent ionosonde mode*. *Space Science and Technology*. 2018;24(3)(112):10-22. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010> (Russian).
10. Ivanov VA, Kurkin VI, Nosov VE, Uryadov VP, Shumaev VV. *Chirp Ionosonde and its Application in the Ionospheric Research*. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003 Nov;46(11):821-851. <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c>

11. Galushko VG, Kascheev AS, Paznukhov VV, Yampolski YM, Reinisch BW. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. *Radio Science*. 2008;43(4):1-10. <https://doi.org/10.1029/2007RS003735>
12. 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 Jun 02;43(11):1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
13. 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 Jan 01;49(1):83-88. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.031>
14. Paznukhov VV, Galushko VG, Reinisch BW. Digisonde observation of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Advances in Space Research*. 2012;49(4):700-710. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.012>
15. Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG, Vertogradov VG, Kubatko SV. Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013 Nov 14;56(5):259-275. <https://doi.org/10.1007/s11141-013-9431-3>
16. Shi SZ, Zhao ZY, Liu JN, 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 Jul;11(7):1270-1274. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2291831>
17. Shi SZ, Chen G, Yang GB, Li T, Zhao ZY, Liu JN. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015 Apr;53(4):2185-2194. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2357443>
18. Shi SZ, Yang GB, Zhao ZY, Liu JN. 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 Oct;12(10):2070-2074. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2447524>
19. Heitmann J, Cervera MA, Gardiner-Garden RS, Holdsworth DA, MacKinnon AD, Reid IM, Ward BD. Observations and modeling of ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle of arrival sounders. 32nd URSI GASS; 2017 Aug 19 – 26; Montreal, QC, Canada. pp. 1-4. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105329>
20. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017 Oct 15;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
21. Garmash KP, Gokov AM, Kostrov LS, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Fedorenko YP, Tsymbal AM, Chernogor LF. Radio Wave Investigations and Modeling the Processes in the Ionosphere Disturbed by Sources of Various Nature. 1. Instrumentation and Processes in the Naturally Disturbed Ionosphere. *Bulletin of Kharkiv State University Radio Physics and Electronics*. 1998;(405):157-177. (Russian).
22. Garmash KP, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Tsymbal AM, Chernogor LF. Radio Wave Investigations the Processes in the Near-Earth Plasma Disturbed by Sources of Various Nature. 1. *Foreign Radio Electronics. Progress in Modern Radio Electronics*. 1999;7:3-15. (Russian).
23. Garmash KP, Gokov AM, Kostrov LS, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Fedorenko YP, Tsymbal AM, Chernogor LF. 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;53(4-5):6-20. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20>
24. Blagoveshchenskaya NF. Geophysical Effects of Active Impacts in Near-Earth Space. Saint-Petersberg: Gidrometeoizdat, 2001. 287 p. (Russian).
25. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Rozumenko VT, Tsymbal AM, Tyrnov OF. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun and Geosphere*. 2012 Nov;7(2):133-139.
26. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Tyrnov OF. The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio physical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. *Space Project “Ionosat-Micro”*, Academperiodika, Kyiv, 2013:160-182. (Russian).
27. 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 May;186:88–103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
28. 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 Feb;55(2):e2019RS006866 <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
29. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, 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 Jul 15;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>

30. 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: Paper No. 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
31. 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>
32. Chernogor LF. Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015;55(3):353–368. <https://doi.org/10.1134/S0016793215030044>
33. Marple SL, Jr. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.; 1987 Jan 01. 492 p.
34. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Y, Podnos VA, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Tsymbal AM. The coherent multi-frequency multipath system for radiophysical monitoring of dynamic processes in the ionosphere. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”*. 2018;28:88–93 (Russian).
35. 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.
36. Guo Q, Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT. 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;30:3–15. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-01>
37. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SN. 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. (Russian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>