

## РАДІОФІЗИКА ГЕОКОСМОСУ

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra26.03.211>

УДК 551.558, 551.596, 534.221 В. Ф. ПУШИН, Л. Ф. ЧОРНОГОР

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

### СИНТЕЗ ДОПЛЕРОГРАМ КВАЗІВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ ДОПЛЕРІВСЬКИМ ВЧ РАДАРОМ ІЗ РОЗНЕСЕНИМ ПРИЙМАННЯМ

*Предмет і мета роботи: Іоносфера як радіоканал широко використовується засобами комунікації, радіонавігації, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування. Параметрам радіоканалу властива нестационарність, зумовлена динамічними процесами в іоносфері. Дослідження динамічних процесів у іоносфері належить до актуальних задач космічної радіофізики та радіофізики геокосмосу. Метою цієї роботи є викладення результатів синтезу доплерограм у разі вертикального та слабопохилого доплерівського зондування іоносфери.*

*Методи і методологія: Одним із найефективніших методів дослідження іоносфери є метод доплерівського зондування. Він має високі роздільні здатності за часом (близько 10 с), за доплерівським зміщенням частоти ( $0.01 \div 0.1$  Гц) і точність вимірювання доплерівського зміщення частоти ( $\sim 0.01$  Гц). За таких умов вдається відстежувати відносні варіації концентрації електронів в іоносфері ( $10^{-4} \div 10^{-3}$ ) або досліджувати рух іоносферної плазми зі швидкістю  $0.1 \div 1$  м/с. Розв'язання оберненої радіофізичної задачі, що полягає в знаходженні параметрів іоносфери, найчастіше означає розв'язання прямої радіофізичної задачі. У методі доплерівського зондування вона пов'язана з побудовою доплерограм і порівнянням їх із вимірними доплерограмами.*

*Результати: Для звичайної компоненти радіохвилі спостерігається внутрішньомодова багатопроменевість у вигляді потрійної луни. Вплив геомагнітного поля і сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації (10 %) призводить до утворення складних променевих структур із каустиками. Під час переміщення рухомих іоносферних збурень уздовж магнітного меридіана утворюються зони мовчання. Поздовжнє і поперечне переміщення точки відбиття променя для слабопохилої траси с. Гайдари – с. Гракове довжиною 50 км досягає декількох десятків кілометрів. У разі вертикального зондування азимут приходу сигналу в пункт спостереження фрагментарно співпадає з азимутом напрямку рухомих іоносферних збурень. Відбитий радіопромінь повертається в пункт спостереження шляхом падаючого. Здійснено синтез доплерограми ВЧ сигналу і виконано порівняння з доплерограмою, зареєстрованою на радарі Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Отримана оцінка (15 %) підтверджує існування сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації.*

*Висновки: Виконано розрахунки доплерограм і гоніограм для вертикального та слабопохилого зондування іоносфери з урахуванням сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації, викликаних рухомими іоносферними збуреннями.*

*Ключові слова: іоносфера, похиле доплерівське зондування, синтез доплерограм, рухомі іоносферні збурення, електронна концентрація*

#### 1. Вступ

Іоносфера в якості радіоканалу широко використовується засобами комунікації, радіонавігації, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування. Параметрам радіоканалу властива нестационарність, зумовлена динамічними процесами в іоносфері. Ці процеси викликаються варіаціями космічної погоди, впливом на системи Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля і Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера

цілої низки природних (сонячні бурі, падіння метеороїдів, грози, погоні фронти, урагани, виверження вулканів, землетруси) і штучних (вибухи, польоти космічних апаратів, потужне радіо- та акустичне випромінювання) джерел енерговиділення.

Дослідження динамічних процесів у іоносфері належить до актуальних задач космічної радіофізики та радіофізики геокосмосу. Для вивчення цих процесів розроблено низку радіофізичних методів.

Одним із найефективніших методів є метод доплерівського зондування. Він має високу роздільну здатність за часом (близько 10 с), за доплерівським зміщенням частоти (ДЗЧ) ( $0.01 \div 0.1$  Гц) і точність вимірювання ДЗЧ ( $f_d \sim 0.01$  Гц). За таких умов вдається відстежувати відносні варіації електронної концентрації в іоносфері ( $\delta_N \geq 10^{-4} \div 10^{-3}$ ) або досліджувати рух іоносферної плазми зі швидкістю  $v \geq 0.1 \div 1$  м/с.

Розрізняють вертикальне і похиле доплерівське зондування іоносфери. У першому випадку досліджуються динамічні процеси безпосередньо над радіосистемою [1, 2]. В разі похилого зондування вдається охопити значні площі з розміром у сотні – тисячі квадратних кілометрів [3–11]. В цьому разі вимірювальна система розташована в одному пункті та приймаються сигнали декількох радіостанцій, рознесених у просторі. Такими є системи, реалізовані у Харківському національному університеті (ХНУ) імені В. Н. Каразіна (Україна) [1–5], в Інституті атмосферної фізики (Чехія) [12], в Харбінському інженерному університеті (КНР) [13–22] та інші [3–11].

Можлива й інакша конфігурація похилого доплерівського зондування: випромінювач знаходиться в одному пункті, а приймання і обробка сигналу здійснюються в рознесених на певну відстань пунктах. В цьому разі розширюються можливості методу, наприклад, можна досліджувати не тільки амплітуду і періоди рухомих іоносферних збурень (РІЗ), але і напрямок їх руху.

Розв'язання оберненої радіофізичної задачі, що полягає в знаходженні параметрів іоносфери, найчастіше зводиться до розв'язання прямої радіофізичної задачі [23, 24]. У методі доплерівського зондування вона зводиться до побудови доплерограм (залежностей ДЗЧ від часу) і порівняння їх із виміряними доплерограмами.

Метою цієї роботи є викладення результатів синтезу доплерограм при вертикальному та слабопохилому доплерівському зондуванні іоносфери.

## 2. Постановка задачі

В інтерпретації результатів квазівертикального зондування іоносфери необхідно враховувати вплив геомагнітного поля і горизонтальних градієнтів електронної концентрації. Розв'язання оберненої задачі в тривимірному-неоднорідному

квазістаціонарному середовищі можливе лише через розв'язання прямої задачі в наближенні геометричної оптики. Розрахункові доплерограми синтезуються шляхом вибору моделі нестационарного збурення електронної концентрації та геомагнітного поля. У цій роботі розглянуто випадки сильних збурень, коли вплив горизонтальних градієнтів порівнянний із впливом магнітного поля Землі.

Припустимо, що експериментальна база являє собою ВЧ випромінювач і три просторово-рознесені пункта спостереження. Така диспозиція реалізована у Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Параметри ВЧ радара наведені в [2, 25]. Геометрію вимірювального комплексу показано на рис. 1.

Випромінювач і один з приймальних пунктів знаходяться в пункті А. Пункти В і С розташовані так, що лінія А–В майже паралельна, а лінія А–С перпендикулярна географічному меридіану.

Для розрахунків ДЗЧ,  $f_d(t)$ , будемо користуватися процедурою синтезу багатопараметричних іонограм, запропонованою в [26]. В якості об'єктів досліджень розглядаються РІЗ, викликані акустико-гравітаційними хвилями (АГХ). Оцінки ДЗЧ виконувалися для вертикального і квазівертикального зондування магнітоактивної іоносфери з тривимірним-неоднорідним нестационарним збуренням.

## 3. Головні співвідношення

Оберемо променеві рівняння в декартових координатах у вигляді [27]:

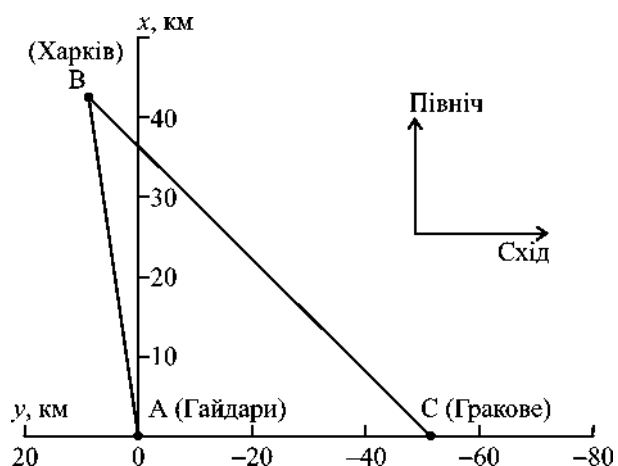


Рис. 1. Геометрія комплексу доплерівського ВЧ зондування іоносфери

$$\frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = J\mathbf{p} - KY, \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = I\nabla X.$$

Тут  $\mathbf{r}$  – радіус-вектор променя,  $\mathbf{p}$  – вектор хвильової нормалі,

$$J = -2(2(1 - X - Y^2)(q + 1) + \mathbf{Y}\mathbf{p} + Y^2),$$

$$K = 2(p^2 - 1)\mathbf{Y}\mathbf{p}, \quad (2)$$

$$I = (-(p^2 - 1) + (\mathbf{Y}\mathbf{p})^2 + 2(1 + 2X) - Y^2)q + 2 - 3X,$$

де  $X = \omega_p^2 / \omega^2$ ,  $\omega_p^2 = e^2 N / \varepsilon_0 m$  – плазмова частота електронів ( $e$  і  $m$  – відповідно заряд і маса електрона,  $N$  – концентрація електронів,  $\varepsilon_0$  – електрична стала);  $\mathbf{Y} = Y\mathbf{B}/B$ ,  $Y = \omega_B / \omega$ ,  $\mathbf{B}$  і  $B$  – вектор індукції геомагнітного поля і його модуль,  $\omega_B = eB/m$  – гірочастота електронів;

$q = \frac{a}{-b \pm \sqrt{b^2 - ac}}$ ,  $a = 1 - X$ ,  $b = a - Y_T^2 / 2$ ,  $c = a - Y^2 + XY_L^2$ ,  $Y_L$  і  $Y_T$  – відповідно поздовжня та поперечна відносно вектора індукції геомагнітного поля складові вектора  $\mathbf{Y}$ , знак “+” для  $O$ -хвилі (звичайної хвилі), знак “-” для  $H$ -хвилі (незвичайної хвилі).

Для розв’язання 2-точкової задачі при заданих крайових точках  $A$  і  $B$  необхідно доповнити рівняння (1), (2) рівняннями для похідних  $\mathbf{r}_\alpha$ ,  $\mathbf{p}_\alpha$  за параметром  $\alpha = \{\varepsilon, \beta\}$ , де  $\varepsilon$  – кут виходу променя (азимут) в горизонтальній площині відносно напрямку на пункт спостереження,  $\beta$  – кут виходу променя з горизонтальної площини (кут місця). Для виразів (1) рівняння для похідних мають вигляд:

$$\frac{d\mathbf{r}_\alpha}{d\tau} = \left[ \left( \frac{\partial J}{\partial \mathbf{r}}, \mathbf{r}_\alpha \right) + \left( \frac{\partial J}{\partial \mathbf{p}}, \mathbf{p}_\alpha \right) \right] \mathbf{p} + J\mathbf{p}_\alpha - \left( \frac{\partial K}{\partial \mathbf{p}}, \mathbf{p}_\alpha \right) \mathbf{Y},$$

$$\frac{d\mathbf{p}_\alpha}{d\tau} = \left[ \left( \frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}}, \mathbf{r}_\alpha \right) + \left( \frac{\partial L}{\partial \mathbf{p}}, \mathbf{p}_\alpha \right) \right] \frac{\partial X}{\partial \mathbf{r}} + L \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left( \frac{\partial X}{\partial \mathbf{r}}, \mathbf{r}_\alpha \right).$$

В результаті маємо розширену систему променевих рівнянь. Методика розв’язання крайової задачі розглянута в [26]. Циклічне уточнення променевих координат  $(\alpha, \beta)$  здійснюється з умови мінімуму функції

$$\varphi(\alpha) = (\Delta_1(\alpha), \Delta_1(\alpha)),$$

$$\Delta_1 = \Delta_0 - \mathbf{r}_\alpha \Delta \alpha + S(\mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_\alpha \Delta \alpha),$$

де  $\Delta_0$  – вектор від пункту спостереження до точки променя на поверхні Землі в попередній ітерації;  $\Delta_1$  – вектор від пункту спостереження до точки променя в наступній ітерації;  $S$  – відстань від поверхні  $\tau = \text{const}$  до поверхні Землі,  $S(\mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_\alpha \Delta \alpha) = -z_\alpha \Delta \alpha$ ,  $\mathbf{I}_0$  – одиничний вектор вздовж променя у початковій точці ітерації,  $\mathbf{I}_\alpha \Delta \alpha$  – приріст вектора при зміні  $\alpha$  на  $\Delta \alpha$ ,  $\mathbf{I}_\alpha$  – похідна від одиничного вектора за  $\alpha$ ,  $z_\alpha$  – компонента вектора  $\mathbf{r}_\alpha$ . Рівняння для параметра  $\alpha(\beta)$  з точністю до членів порядку  $\Delta \alpha^2$  має вигляд

$$A\Delta \alpha^2 + B\Delta \alpha + C = 0.$$

Тут

$$A = -3g_\alpha^2 + (-2(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{I}_\alpha) + 3(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{I}_0) - 2(\Delta_0, \mathbf{I}_\alpha))g_\alpha,$$

$$B = (\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{r}_\alpha) + g_\alpha^2 + (-2(\mathbf{r}_\alpha, \mathbf{I}_0) - 2(\mathbf{I}_0, \Delta_0) + (\Delta_0, \mathbf{I}_\alpha))g_\alpha,$$

$$C = -(\mathbf{r}_\alpha, \Delta_0) + (\mathbf{I}_0, \Delta_0)g_\alpha,$$

$$g_\alpha = z_\alpha / l_{0z},$$

де  $l_{0z}$  – компонента вектора  $\mathbf{I}_0$ .

ДЗЧ  $f_d$  знаходимо шляхом обчислення інтеграла вздовж знайденого розв’язку нелінійної крайової задачі. Диференціальне рівняння для  $f_d$  розв’язується числовими методами разом з розширеною системою. Рівняння для  $f_d$  у квазістаціонарному наближенні для незалежної змінної  $\tau$  має вигляд:

$$\frac{df_d}{d\tau} = -\frac{f}{c} \frac{\partial n}{\partial t} |J\mathbf{p} - KY| \left( \frac{\mathbf{p}}{n}, \mathbf{s} \right),$$

де  $f$  – частота зондувальної ВЧ хвилі,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $n$  – фазовий коефіцієнт заломлення,  $t$  – час,  $\mathbf{s}$  – одиничний вектор уздовж променя. Показник заломлення без урахування

зіткнень електронів з іншими частинками для ВЧ радіохвилі задається формулою Еплтона–Хартрі у вигляді [28]

$$n^2 = 1 + qX.$$

#### 4. Моделі середовища

*Модель регулярної іоносфери.* Для синтезу багатопараметричних іонограм необхідно задати регулярним розподілом електронної концентрації та моделлю збурення. У дослідженні збурень в іоносферній плазмі зазвичай вважають, що регулярна іоносфера – це фон, на якому утворюються неоднорідності електронної концентрації різної природи. Для опису фону будемо використовувати сучасну модель глобального розподілу електронної концентрації IRI-2016, яка була пристосована для розрахунків характеристик ВЧ сигналу в геометрооптичному наближенні.

*Модель іоносферних збурень. Синтез іонограм.* Розглянемо повільні процеси в іоносфері з характерними часовими масштабами від декількох хвилин до годин. Такими процесами можуть бути РІЗ різного типу [28, 29]. Важливу роль в динаміці іоносферної плазми відіграють АГХ [28]. Вивченню збурень електронної концентрації, викликаних АГХ, присвячено низку робіт (див., наприклад, [14, 17–19, 22, 30–33]). В [28] отримано розв’язок для збурень електронної концентрації, породжених АГХ. Модель РІЗ надається в мультиплікативному вигляді:

$$N(\{x_i\}) = N_0(x_3)(1 + \delta(x_3) \cos(k_j x_j)),$$

де  $\{x_i\} = (x, y, z, t)$ ,  $\{k_i\} = (k_x, k_y, k_z, -\Omega)$  – компоненти вектора  $\mathbf{x}$  та хвильового вектора  $\mathbf{k}$ ,  $\Omega$  – кругова частота.

Функція амплітуди збурення має вигляд

$$\delta(x_3) = a \exp \left[ - \left( \frac{x_3 - z_m}{2H} \right)^2 \right].$$

Тут  $a$  – амплітуда,  $z_m$  – висота осі хвильового каналу,  $H$  – зведена висота нейтральної атмосфери на висоті відбиття зондуючого ВЧ сигналу.

#### 5. Дисперсійне співвідношення

Дисперсійне рівняння для АГХ наведено в [29, 30]. При заданій частоті  $\omega$  і фіксованому напрямку поширення, який визначається відношенням  $k_x/k_z$  (кутом  $\theta$  з горизонтальною площиною), розв’язок рівняння можна записати у вигляді

$$\omega^2 = \frac{c_s^2}{2} \left( k_H^2 \pm \sqrt{k_H^4 - 4(\gamma - 1)g^2 k^2 c_s^{-4} \cos^2 \theta} \right), \quad (3)$$

$$k_H^2 = k^2 + \frac{1}{4H^2},$$

де  $\omega = 2\pi/T$ ;  $c_s$  – швидкість звуку;  $\gamma$  – відношення теплоємностей при постійному тиску і постійному об’ємі;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $k = 2\pi/L$ ,  $L$  – довжина хвилі;  $H$  – зведена висота нейтральної атмосфери на висотах F-шару;  $\omega_a^2 = \gamma g / 4H$ ;  $\omega_g^2 = (\gamma - 1)g / \gamma H$ . Розв’язок дисперсійного рівняння складається з двох гілок: знак “–” відповідає внутрішнім гравітаційним хвилям (ВГХ), для яких  $\omega < \omega_g$ , а знак “+” – акустичним хвилям (АХ), для яких  $\omega > \omega_a$ , розділеним забороненою зоною. Нижня межа для періодів ВГХ –

$$T_g = \frac{2\pi}{\omega_g}, \quad \omega_g = \sqrt{\frac{(\gamma - 1)g}{\gamma H}},$$

і верхня межа для АХ –

$$\omega_a = \frac{L^{-1}}{\sqrt{\frac{\gamma g}{4H} + \gamma g H \left( \frac{2\pi}{L} \sin \theta \right)^2}}.$$

На рис. 2, а і рис. 3, а показано дисперсійні криві для ВГХ, на рис. 2, б і рис. 3, б – для АХ. Рис. 2, а і рис. 2, б – для горизонтального поширення та рис. 3, а і рис. 3, б – для поширення під кутом  $76^\circ$  до горизонтальної площини. Зведена висота  $H$  змінюється в часі та просторі.

Спектральний аналіз результатів багаторічних спостережень показав, що часто спостерігаються двадцятихвилинні компоненти. Розглянемо  $H$  у діапазоні 20 ÷ 60 км. На рис. 2, а наведено дисперсійні криві для ВГХ при  $H = 20, 30, 40, 50, 60$  км (криві 1, 2, 3, 4, 5).

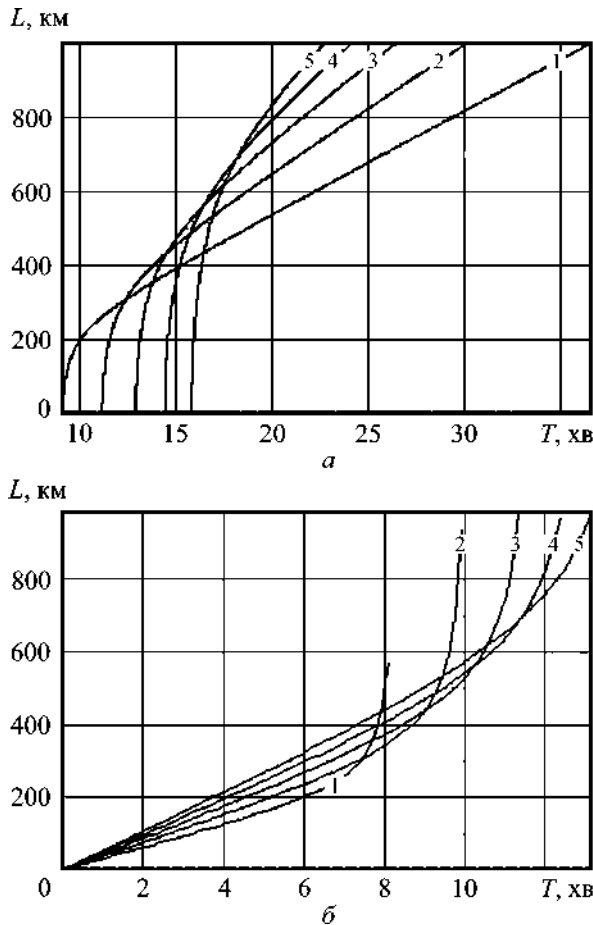


Рис. 2. Дисперсійні криві ( $L$  – довжина хвилі,  $T$  – період АГХ) для горизонтального поширення ВГХ (а) і АХ (б): 1 –  $H=20$  км, 2 –  $H=30$  км, 3 –  $H=40$  км, 4 –  $H=50$  км, 5 –  $H=60$  км

Результати експериментів показують, що  $L_h > L_v$  і навіть  $L_h \gg L_v$  [29] ( $L_h$  і  $L_v$  – горизонтальна і вертикальна довжини хвиль). Найчастіше спостерігається співвідношення  $L_h : L_v = 4 : 1$ .

З рис. 2, а випливає, що з періодом  $T < 20$  хв ВГХ може мати довжину хвилі  $L$  від 100 до 700 км залежно від  $H$ . У розрахунках будемо вважати, що  $T=20$  хв, висота осі хвильового каналу – 220 км, напівтовщина хвильового каналу – 60 км, РІЗ переміщується похило до горизонтальної площини. Профіль обраний для часу сходу Сонця 1 вересня 2019 р. – 05:00 LT. Висота максимуму шару F2 становить 280 км, максимум плазмової частоти – 3.1 МГц. Зміна параметрів РІЗ і частоти випромінювання буде обговорюватися у подальшому.

Виконаємо синтез доплерограм для РІЗ з  $\delta = |\Delta N / N_0| \geq 10\%$ , довжина хвилі яких становить від 100 до 600 км.

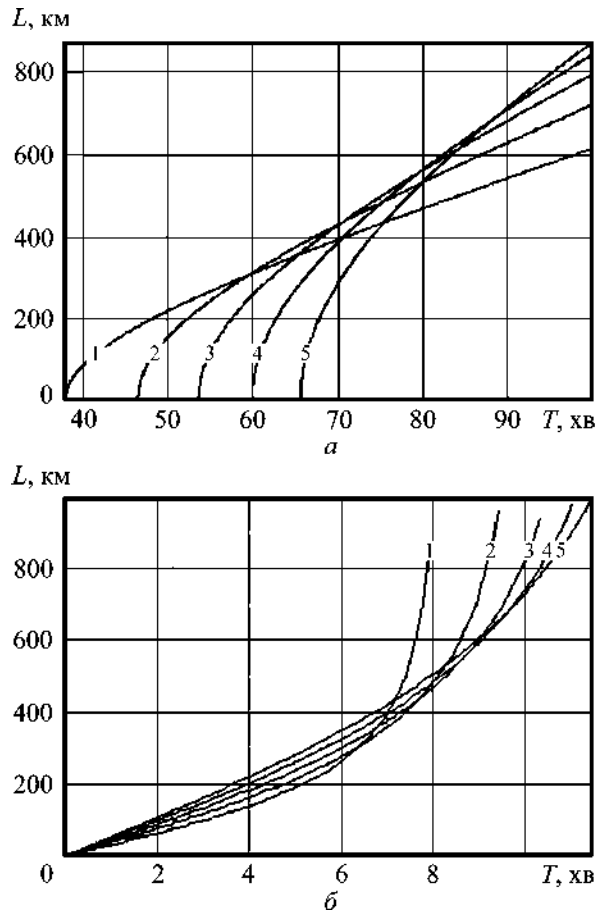


Рис. 3. Дисперсійні криві ( $L$  – довжина хвилі,  $T$  – період АГХ) для похилого поширення ВГХ (а) і АХ (б): 1 –  $H=20$  км, 2 –  $H=30$  км, 3 –  $H=40$  км, 4 –  $H=50$  км, 5 –  $H=60$  км

## 6. Доплерограми і гоніограми

**Квазівертикальне зондування.** Розглянемо ВГХ з періодом на межі зони, що розділяє акустичні та гравітаційні хвилі при  $T=20$  хв,  $L=100$  км. Збурення рухається під кутом  $76^\circ$  до горизонтальної площини. На рис. 4 показано доплерограму і гоніограму (залежність азимута від часу) для  $O$ -хвилі при малому рознесенні передавача та приймача для широтної траси с. Гайдари – с. Гракове довжиною 50 км. Частота доплерівського ВЧ радара фіксована і становить 2.4 МГц. Висота максимуму F-шару становить 280 км, максимум плазмової частоти – 3.1 МГц. Розглянемо РІЗ, яке рухається уздовж меридіана перпендикулярно трасі. Азимут напрямку руху РІЗ  $\psi = 180^\circ$ . Градієнт електронної концентрації при цьому поперечний до траси. Магнітне поле в цьому разі за відсутності РІЗ слабо впливає на поширен-

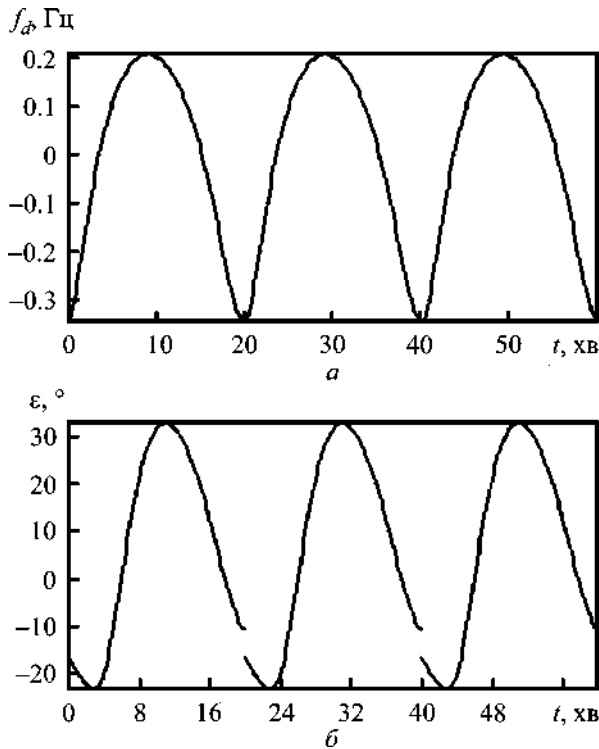


Рис. 4. Доплерограма на трасі с. Гайдари – с. Гракове (*O*-хвиля,  $|\Delta N|/N = 10\%$ , рух РІЗ під нахилом  $\theta = 76^\circ$  до горизонтальної площини уздовж геомагнітного меридіану на південь) (*a*); гоніограма (рух РІЗ під кутом  $45^\circ$  до геомагнітного меридіану) (*б*)

ня ВЧ сигналу. Доплерограми та гоніограма на рис. 4 побудовані для значення  $\delta = 10\%$ . Бічне відхилення променів пов'язане з впливом поперечного градієнта збурення електронної концентрації і досягає 20 км. Асиметрія траєкторій у горизонтальній площині викликана одночасним впливом геомагнітного поля та горизонтального градієнта електронної концентрації. Амплітуда варіацій кутів приходу в горизонтальній площині досягає  $30^\circ$ .

На рис. 5 показано результати розрахунку траєкторії променів у горизонтальній і вертикальній площинах для ДЗЧ, наведеного на рис. 4. Бічне відхилення променів відбувається в обидва боки від вертикальної площини, яка проходить через кореспондуючі пункти.

Розглянемо рух РІЗ у напрямку захід – схід, тобто уздовж траси. На рис. 6 наведено доплерограму, на рис. 7 – траєкторії променя. З рис. 6 випливає, що сигнал *O*-моди – однопроменевиий. Бічне відхилення променів відбувається у напрямку на схід і досягає 16 км. Проекція точки

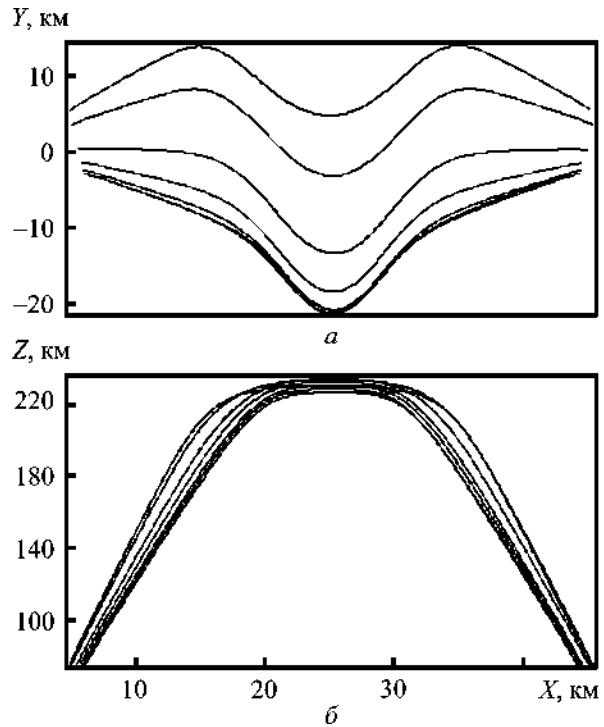


Рис. 5. Траєкторії променів у горизонтальній (*a*) і вертикальній (*б*) площинах для ДЗЧ, доплерограму якого наведено на рис. 4, *a*

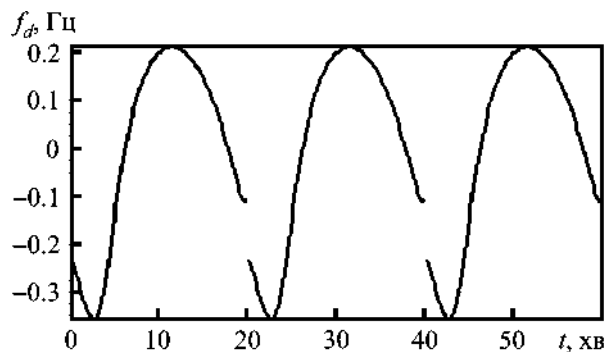


Рис. 6. Доплерограма на похилій трасі (*O*-хвиля, рух РІЗ перпендикулярно геомагнітному меридіану,  $\psi = 90^\circ$ )

відбиття в вертикальній площині зміщується від пункту випромінювання майже до точки відбиття.

*Вертикальне зондування.* У разі вертикального зондування через те, що точки випромінювання та прийому суміщені, мають місце великі варіації азимута ВЧ хвилі, що приходить. На рис. 8 наведено доплерограму (рис. 8, *a*) та проєкції траєкторій на вертикальну площину (рис. 8, *б*) для *O*-хвилі. РІЗ рухається похило вздовж геомагнітного меридіана,  $\delta = 10\%$ ,

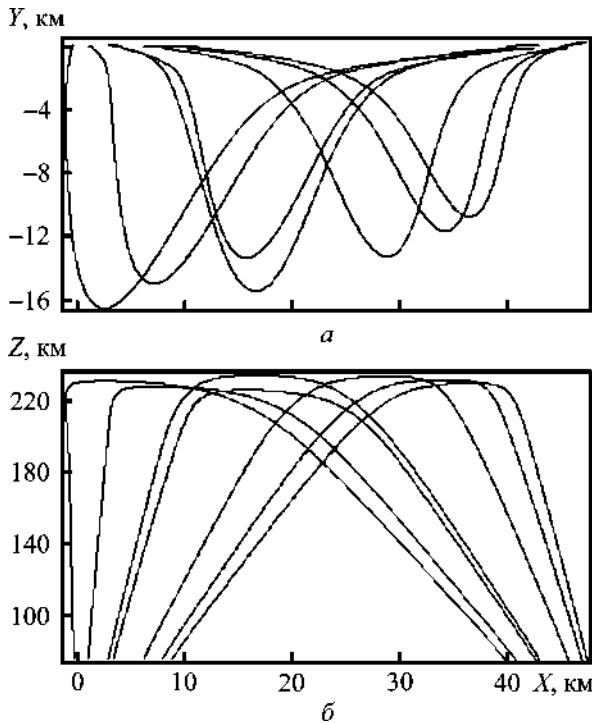


Рис. 7. Траєкторії променів у горизонтальній (а) і вертикальній (б) площинах для ДЗЧ, доплерограму якого наведено на рис. 6

довжина хвилі – 100 км, період – 20 хв. Точки відбиття променів знаходяться поблизу осі хвильового каналу. Відбиті промені повертаються шляхом падаючих.

На рис. 9 наведено доплерограму, а на рис. 10 – траєкторії променів для РІЗ, які переміщуються поперек магнітному меридіану, що відповідає умовам розташування радара вертикального доплерівського зондування в с. Гайдари.

Оцінимо азимут ВЧ хвилі, що приходить, для  $\psi = 45^\circ$ . На рис. 11–13 наведено відповідно доплерограму, траєкторії в горизонтальній і вертикальній площинах та гоніограму. Як видно з рис. 9 і рис. 11, залежності  $f_d(t)$  майже не відрізняються, хоча траєкторії радіохвиль відрізняються суттєво.

Квазігоризонтальні ділянки на рис. 13 дозволяють оцінити азимут ВЧ хвилі, що приходить. Оцінкою азимута РІЗ може служити величина  $(\psi + \pi)$ .

Зауважимо, що розриви кривих на рис. 4, 6, 8 і 9 пов'язані з розбіжністю ітераційного процесу на даному часовому інтервалі, обумовленому динамікою променевої структури.

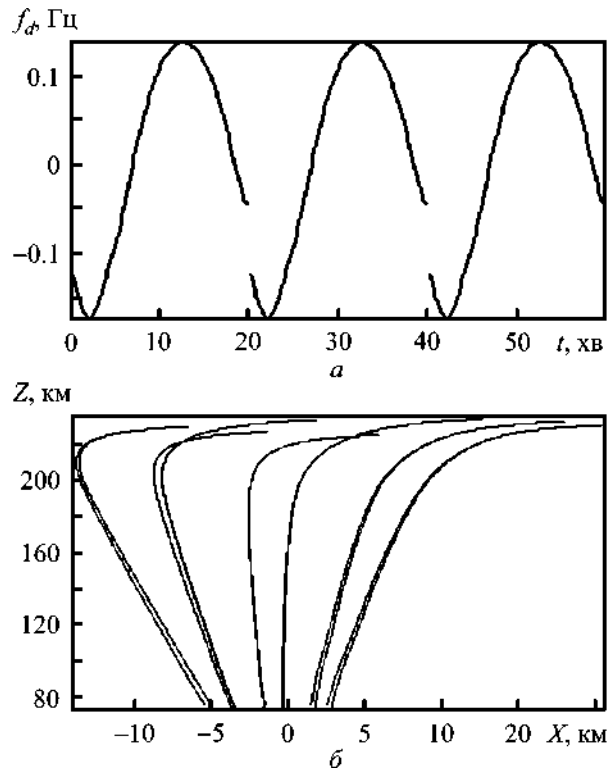


Рис. 8. Доплерограма (а) та проєкції траєкторій на вертикальну площину для О-хвилі (б) (РІЗ рухається похило уздовж геомагнітного меридіану,  $\delta = 10\%$ , довжина хвилі – 100 км, період – 20 хв)

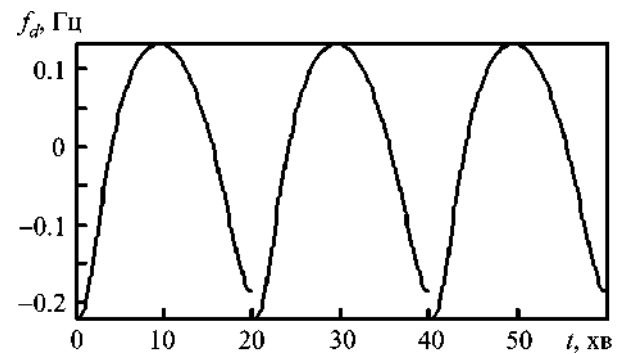


Рис. 9. Доплерограма вертикального зондування в с. Гайдари (О-хвиля,  $|\Delta N|/N = 10\%$ ,  $\psi = 90^\circ$ )

## 7. Результати спостережень

На рис. 14 для прикладу наведено спектрограму, отриману вертикальним доплерівським зондуванням на частоті 3.7 МГц (вертикальна розгортка – нормований спектр биттів, неперервна крива – варіації нормованого у вікні перегляду максимуму спектра). Сигнал має багатомодову структуру. Спостережувана потрійна луна була

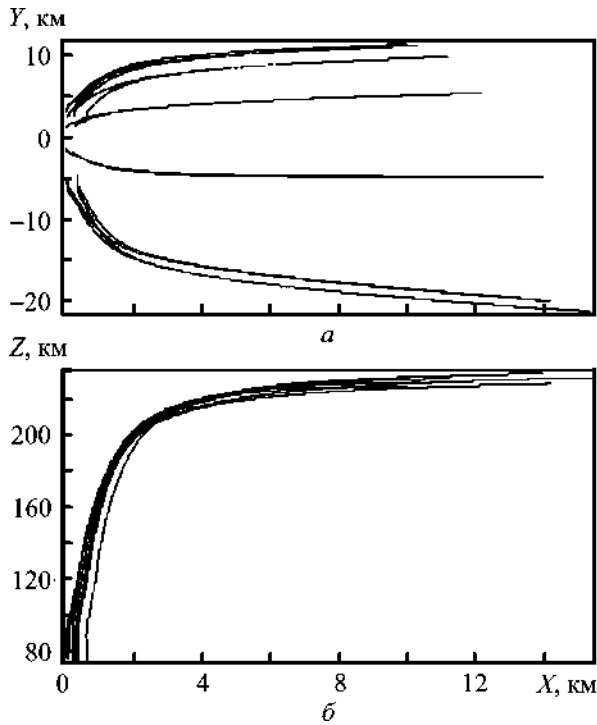


Рис. 10. Траєкторії променів вертикального зондування в горизонтальній (а) і вертикальній (б) площинах ( $\psi = 90^\circ$ )

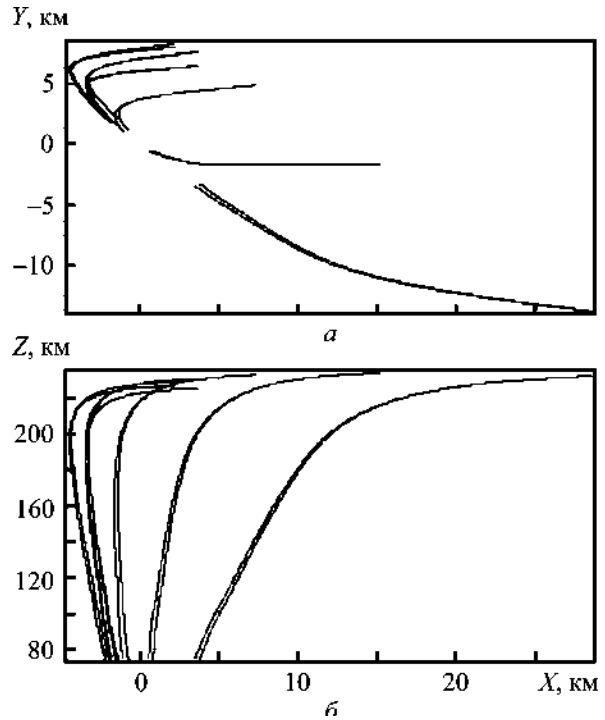


Рис. 12. Траєкторії променів вертикального зондування в горизонтальній (а) і вертикальній (б) площинах ( $\psi = 45^\circ$ )

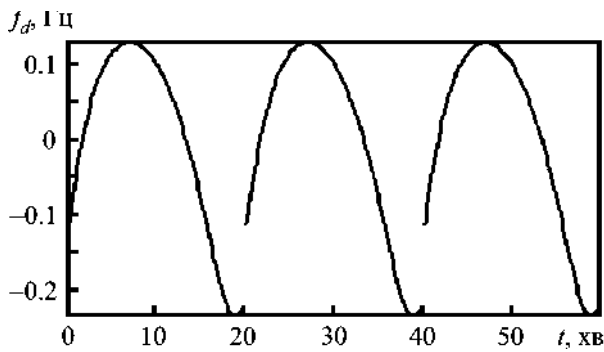


Рис. 11. Доплерограма вертикального зондування в с. Гайдари (О-хвиля,  $|\Delta N|/N = 10\%$ ,  $\psi = 45^\circ$ )

інтерпретована в [28]. Зміщення ДЗЧ у негативний бік пояснюється наближенням вечірнього термінатора.

Синтезуємо доплерограму, яка відповідає результатам спостережень, наведеним на рис. 14. Період РІЗ становить 20 хв, амплітуда варіацій ДЗЧ – 0.5 Гц. Розрахунки показали, що характерною рисою доплерограм для горизонтального переміщення РІЗ є нахил у бік, протилежний зростанню часу. Чим більший нахил, тим

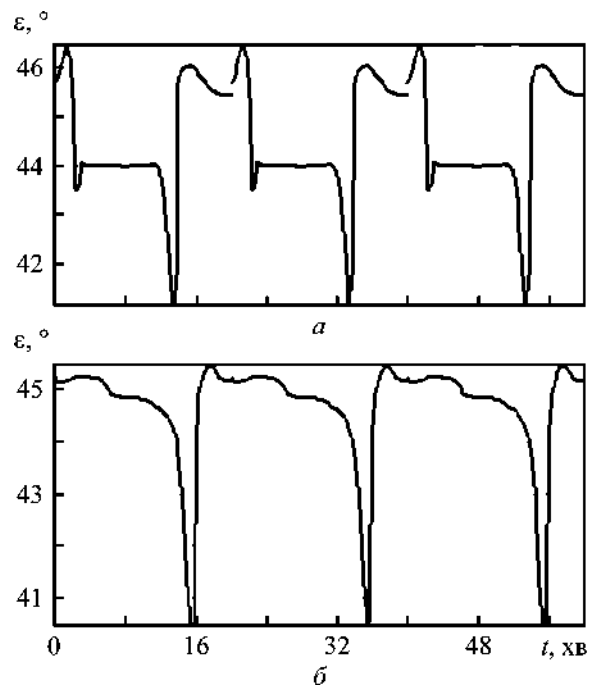


Рис. 13. Гоніограми для похилого поширення РІЗ ( $\psi = 45^\circ$ ) (а) та горизонтального поширення РІЗ ( $\psi = 45^\circ$ ) (б)



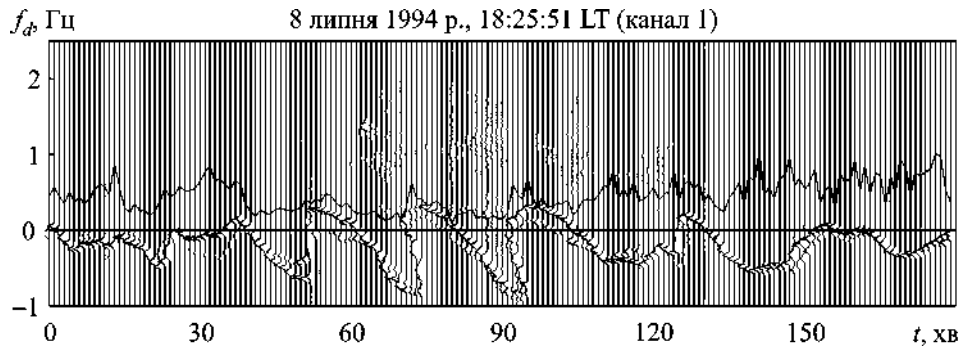


Рис. 14. Спектрограма доплерівського вертикального зондування (частота 3.7 МГц): вертикальна розгортка – нормований спектр біттів, неперервна крива – варіації нормованого в вікні перегляду максимуму спектру

більше значення  $\delta$ . При великих  $\delta$  з'являється внутрішньомодова багатопроменевість. Задамося  $L = 200$  км для горизонтального переміщення ВГХ. Параметри профілю плазмової частоти: максимальна плазмова частота за моделлю IRI-2016 становить 5.6 МГц, висота максимуму – 270 км. Вважатимемо, що РІЗ рухається з півночі на південь. На рис. 15, а наведено доплерограму для трьох періодів і  $\delta = 15\%$ . Оціночна амплітуда РІЗ становить 15%.

На рис. 15, б наведено фактор фокусування для ізотропного випромінювача, розрахований за формулою

$$\Phi = \sqrt{\frac{\cos \beta D_0(\alpha, \beta, t)}{\cos \beta_0 D(\alpha, \beta, t)}}$$

де  $D_0(\alpha, \beta, t)$  і  $D(\alpha, \beta, t)$  – якобіан для середовища без збурення і зі збуренням.

Порівнюючи спектрограму з розрахунками, можна помітити фокусування ВЧ хвилі на ребрах ДЗЧ.

## 8. Обговорення результатів

Синтез доплерограм дозволяє оцінити параметри моделі спостережуваних нестационарних збурень типу РІЗ в умовах квазівертикального ВЧ зондування іоносфери. Особливість такого зондування полягає в необхідності одночасного врахування геомагнітного поля та горизонтальних градієнтів. Розглянуто випадки сильних збурень для часу, близькому до моменту проходження термінатора. Відносно збурення в РІЗ  $\delta \geq 10\%$ . Розрахунки виконано для короткої середньопівнічної траси с. Гайдари – с. Гракове довжиною

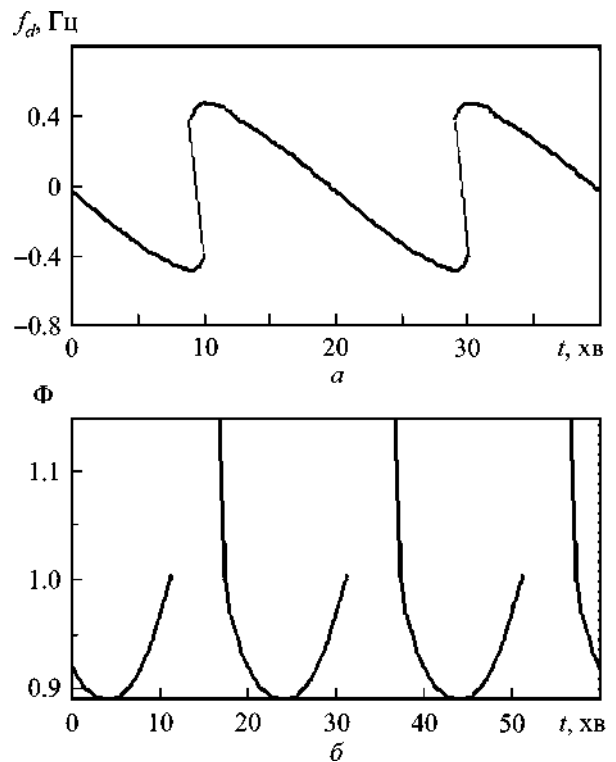


Рис. 15. Синтезована доплерограма за реєстрацією, наведеною на рис. 14 (а), та фактор фокусування (б)

50 км і вертикального зондування, для горизонтальних і похилих рухів РІЗ уздовж і поперек геомагнітного меридіана. Припускаючи, що при одночасному спостереженні вертикальної та горизонтальної хвиль вони породжені єдиним процесом, для прикладу виконано розрахунки для  $L_h : L_v = 4 : 1$ . Доплерограми для горизонтальних рухів РІЗ, на відміну від доплерограм для похилого руху, мають характерні особливості – нахили, що переходять зі збільшенням  $\delta$  в окремі гілки. Показано, що для поздовжнього руху пере-

важає вплив горизонтального градієнта. Бокове відхилення  $O$ -хвилі досягає декількох десятків кілометрів. При поперечному русі до магнітного меридіану точки відбиття променів зміщуються вздовж траси і їх земна проекція досягає пункту спостереження. Для  $O$ -хвилі побудовано променеві структури для сильних РІЗ. Показано для вертикального зондування, що відбитий промінь повертається за тією ж траєкторією, що і падаючий. При цьому азимут сигналу, що приходить, на окремих фрагментах гоніограми співпадає з азимутом напрямку руху РІЗ.

Для прикладу синтезовано доплерограму з сильним збуренням, яка відповідає доплерограмі, отриманій на харківському ВЧ радарі. Знайдена оцінка не суперечить існуючим даним. Вплив геомагнітного поля і сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації призводить до утворення складних променевих структур із каустиками. Під час руху вздовж магнітного меридіана з'являються зони мовчання, коли в пунктах спостереження зникає ВЧ сигнал.

## 9. Головні результати

Виконано розрахунки доплерограм і гоніограм для вертикального та слабопохилого зондування іоносфери з урахуванням сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації, викликаних РІЗ, у результаті яких встановлено наступне.

1. Для  $O$ -хвилі спостерігається внутрішньомодова багатопроменевість у вигляді потрійної луни.

2. Вплив геомагнітного поля і сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації,  $\delta \geq 10\%$ , призводить до утворення складних променевих структур із каустиками. Під час руху РІЗ уздовж магнітного меридіану утворюються зони мовчання.

3. Поздовжнє і поперечне переміщення точки відбиття променя для слабопохилої траси с. Гайдари – с. Гракове довжиною 50 км досягає декількох десятків кілометрів.

4. Під час вертикального зондування азимут приходу сигналу в пункт спостереження фрагментарно співпадає з азимутом напрямку РІЗ. Відбитий радіопромінь повертається в пункт спостереження шляхом падаючого.

5. Виконано синтез доплерограми ВЧ сигналу і порівняння з доплерограмою, зареєстрованою на радарі ХНУ імені В. Н. Каразіна. Отримана оцінка  $\delta = 15\%$  підтверджує існування сильних горизонтальних градієнтів електронної концентрації.

Робота виконана за часткової підтримки Національного фонду досліджень України, проект 2020.02/0015 “Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля – атмосфера – іоносфера”. Робота фінансувалася також в рамках держбюджетної НДР установ МОН України, номер держреєстрації 0119U002538.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Rozumenko V. T., Tsybal A. M., and Tyrnov O. F. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun Geosph.* 2012. Vol. 7, No. 2. P. 133–139. URL: [http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO//00SGArhiv/SG\\_v7\\_No2\\_2012-pp-133-139.pdf](http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO//00SGArhiv/SG_v7_No2_2012-pp-133-139.pdf)
2. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект “Ионосат-Микро”*. Киев: Академперіодика, 2013. С. 160–182.
3. Гармаш К. П., Гоків А. М., Костров Л. С., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере. *Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия “Радиофизика и электроника”*. 1998. № 405. С. 157–177.
4. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 7. С. 3–15.
5. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsybal A. M., and Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. *Telecommun. Radio Eng.* 1999. Vol. 53, No. 4–5. P. 6–20. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20
6. Благовещенская Н. Ф. *Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. 287 с.

7. Pietrella M., Perrone L., Fontana G., Romano V., Malagnini A., Tutone G., Zolesi B., Cander Lj. R., Belehaki A., Tsagouri I., Kouris S. S., Vallianatos F., Makris J., and Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43, Is. 11. P. 1611–1620. DOI: 10.1016/j.asr.2008.01.022
8. Mlynarczyk J., Koperski P., and Kulak A. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting. *Adv. Space Res.* 2012. Vol. 49, Is. 1. P. 83–88. DOI: 10.1016/j.asr.2011.09.031
9. Shi S.-Z., Zhao Z.-Y., Liu Y., Chen G., Li T., Liu J.-N., and Yao M. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF skywave multistatic radar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2014. Vol. 11, No. 7. P. 1270–1274. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2291831
10. Shi S.-Z., Chen G., Yang G.-B., Li T., Zhao Z.-Y., and Liu J.-N. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2015. Vol. 53, No. 4. P. 2185–2194. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2357443
11. Verhulst T., Altadill D., Mielich J., Reinisch B., Galkin I., Mouzakis A., Belehaki A., Burešová D., Stankov S., Blanch E., and Kouba D. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. *Adv. Space Res.* 2017. Vol. 60, Is. 8. P. 1644–1656. DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.033
12. Laštovička J. and Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Adv. Space Res.* 2017. Vol. 60, Is. 8. P. 1629–1643. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.032
13. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Zheng Y., Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цимбал А. М. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2018. Вип. 28. С. 88–93.
14. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., and Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. Vol. 186. P. 88–103. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.003
15. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., and Rozumenko V. T. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019. Вип. 30. С. 3–15.
16. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. Н. Варіації характеристик радіохвиль ВЧ діапазону над Китаєм, які супроводжували помірний землетрус в Японії 5 вересня 2018 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019. Вип. 30. С. 16–26.
17. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., and Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 2020. Vol. 55, Is. 2. id. e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866
18. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., and Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Adv. Space Res.* 2020. Vol. 66, Is. 2. P. 226–242. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.037
19. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., and Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2020. Vol. 207. id. 105336. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
20. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., and Zheng Y. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, September 21–25, 2020. P. 253–258. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252713
21. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., and Zheng Y. Oblique-Incidence Ionospheric Radio-Sounding: Seismo-Ionospheric Effects. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, September 21–25, 2020. P. 354–359. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252767
22. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., and Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagn. Aeron.* 2021. Vol. 61, Is. 1. P. 73–91. DOI: 10.1134/S001679322006002X
23. Афраймович Э. Л. *Интерференционные методы радиозондирования ионосферы*. Москва: Наука, 1982. 198 с.
24. Reinisch B. W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. *Radio Sci.* 1986. Vol. 21, Is. 3. P. 331–341. DOI: 10.1029/RS021i003p00331
25. Пушин В. Ф., Черногор Л. Ф. Спектральный анализ биений опорного сигнала и отраженного от ионосферы ВЧ сигнала. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2014. Т. 19, № 2. С. 160–169. DOI: 10.15407/rpra19.02.160
26. Pushin V. F. and Kostrov L. S. 3-D ray-tracing synthesis of multiparameter ionograms as obtained by digital sounders in a disturbed ionosphere. *Telecommun. Radio Eng.* 1999. Vol. 53, No. 2. P. 58–64. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i2.110
27. Haselgrove C. B. and Haselgrove J. Twisted Ray Paths in the Ionosphere. *Proc. Phys. Soc.* 1960. Vol. 75, No. 3. P. 357–363.
28. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. Москва: Мир, 1973. 502 с.
29. Гершман Б. Н. *Динамика ионосферной плазмы*. Москва: Наука, 1974. 255 с.
30. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы*. Москва: Наука, 1988. 527 с.
31. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСИЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
32. Chernogor L. F. and Garmash K. P. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Techno-

- genic Catastrophe. *Geomagn. Aeron.* 2018. Vol. 58, Is. 5. P. 673–685. DOI: 10.1134/S0016793218050031
33. Panasenko S. V., Otsuka Y., van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., and Nishioka M. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. Vol. 191. id. 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015
- ## REFERENCES
1. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., PODNOS, V. A., ROZUMENKO, V. T., TSYMBAL, A. M. and TYRNOV, O. F., 2012. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun Geosph.* [online]. vol 7, no. 2, pp. 133–139 [viewed 1 June 2021]. Available from: [http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO//00S-GArhiv/SG\\_v7\\_No2\\_2012-pp-133-139.pdf](http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO//00S-GArhiv/SG_v7_No2_2012-pp-133-139.pdf)
  2. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., PODNOS, V. A. and TYRNOV, O. F., 2013. The V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. In: *Space Project “Ionosat-Micro”*. Kyiv, Ukraine: Academperiodyka Publ, pp. 160–182. (in Russian).
  3. GARMASH, K. P., GOKOV, A. M., KOSTROV, L. S., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., FEDORENKO Y. P., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1998. Radiophysical Research and Modeling of Processes in the Ionosphere Disturbed by Sources of Various Nature. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* vol 405, pp. 157–177. (in Russian).
  4. GARMASH, K. P., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1999. Radio propagation studies of the processes acting in the near-Earth plasma disturbed by high-energy sources. Part 1. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* no. 7, pp. 3–15. (in Russian).
  5. GARMASH, K. P., GOKOV, A. M., KOSTROV, L. S., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F., FEDORENKO, Y. P., TSYMBAL, A. M. and CHERNOGOR, L. F., 1999. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. *Telecommun. Radio Eng.* vol. 53, no. 4–5, pp. 6–20. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20
  6. BLAGOVESHCHENSKAYA, N. F., 2001. *Geophysical Effects of Active Impacts in Near-Earth Space*. Saint-Petersburg, Russia: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
  7. PIETRELLA, M., PERRONE, L., FONTANA, G., ROMANO, V., MALAGNINI, A., TUTONE, G., ZOLESI, B., CANDER, L.J. R., BELEHAKI, A., TSAGOURI, I., KOURIS, S. S., VALLIANATOS, F., MAKRIS, J. and ANGLING, M., 2009. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Adv. Space Res.* vol. 43, is. 11, pp. 1611–1620. DOI: 10.1016/j.asr.2008.01.022
  8. MLYNARCZYK, J., KOPERSKI, P. and KULAK, A., 2012. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting. *Adv. Space Res.* vol. 49, is. 1, pp. 83–88. DOI: 10.1016/j.asr.2011.09.031
  9. SHI, S.-Z., ZHAO, Z.-Y., LIU, Y., CHEN, G., LI, T., LIU, J.-N. and YAO, M., 2014. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF skywave multistatic radar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* vol. 11, no. 7, pp. 1270–1274. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2291831
  10. SHI, S.-Z., CHEN, G., YANG, G.-B., LI, T., ZHAO, Z.-Y. and LIU, J.-N., 2015. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* vol. 53, no. 4, pp. 2185–2194. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2357443
  11. VERHULST, T., ALTADILL, D., MIELICH, J., REINISCH, B., GALKIN, I., MOUZAKIS, A., BELEHAKI, A., BUREŠOVÁ, D., STANKOV, S., BLANCH, E. and KOUBA, D., 2017. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. *Adv. Space Res.* vol. 60, is. 8, pp. 1644–1656. DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.033
  12. LAŠTOVIČKA, J and CHUM, J., 2017. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Adv. Space Res.* vol. 60, is. 8, pp. 1629–1643. DOI: 10.1016/j.asr.2017.01.032
  13. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q., ZHENG, Y., PODNOS, V. A., ROZUMENKO, V. T., TYRNOV, O. F. and TSYMBAL, A. M., 2018. The coherent multi-frequency multipath system for radiophysical monitoring of dynamic processes in the ionosphere. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* vol. 28, pp. 88–93. (in Russian).
  14. GUO, Q., CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., ROZUMENKO, V. T. and ZHENG, Y., 2019. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 186, pp. 88–103. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.003
  15. GUO, Q., ZHENG, Y., CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P. and ROZUMENKO, V. T., 2019. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* vol. 30, pp. 3–15.
  16. LUO, Y., GUO, Q., ZHENG, Y., GARMASH, K. P., CHERNOGOR, L. F. and SHULGA, S. N., 2019. HF radio-wave characteristic variations over China during moderate earthquake in Japan on September 5, 2018. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* vol. 30, pp. 16–26. (in Ukrainian).
  17. GUO, Q., CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., ROZUMENKO, V. T. and ZHENG, Y., 2020. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* vol. 55, is. 2, id. e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866
  18. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q., LUO, Y., ROZUMENKO, V. T. and ZHENG, Y., 2020. Ionospheric storm effects over the People’s Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Adv. Space Res.* vol. 66, is. 2, pp. 226–242. DOI: 10.1016/j.asr.2020.03.037

19. LUO, Y., CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q., ROZUMENKO, V. T., SHULGA, S. N. and ZHENG, Y., 2020. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 207, id. 105336. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
20. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q., ROZUMENKO, V. T. and ZHENG, Y., 2020. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, September 21-25, 2020, pp. 253–258. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252713
21. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q., LUO, Y., ROZUMENKO, V. T. and ZHENG, Y., 2020. Oblique-Incidence Ionospheric Radio-Sounding: Seismo-Ionospheric Effects. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, September 21-25, 2020, pp. 354–359. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252767
22. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., GUO, Q. and ZHENG, Y., 2021. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagn. Aeron.* vol. 61, is. 1, pp. 73–91. DOI: 10.1134/S001679322006002X
23. AFRAIMOVICH, E. L., 1982. *Interference methods of radio sounding of the ionosphere*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
24. REINISCH, B. W., 1986. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. *Radio Sci.* vol. 21, is. 3, pp. 331–341. DOI: 10.1029/RS021i003p00331
25. PUSHIN, V. F. and CHERNOGOR, L. F., 2014. Spectral analysis of reference signal and of HF signal reflected from the ionosphere beats. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 2, pp. 160–169. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra19.02.160
26. PUSHIN, V. F. and KOSTROV, L. S., 1999. 3-D ray-tracing synthesis of multiparameter ionograms as obtained by digital sounders in a disturbed ionosphere. *Telecommun. Radio Eng.* vol. 53, no. 2, pp. 58–64. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i2.110
27. HASELGROVE, C. B. and HASELGROVE, J., 1960. Twisted Ray Paths in the Ionosphere. *Proc. Phys. Soc.* vol. 75, no. 3, pp. 357–363.
28. DAVIES, K., 1973. *Radio Waves in the Ionosphere*. Moscow, Russia: Mir Publ. (in Russian).
29. GERSHMAN, B. N., 1974. *Dynamics of ionospheric plasma*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
30. BRUNELLI, B. E. and NAMGALADZE, A. A., 1988. *Physics of the ionosphere*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
31. AFRAIMOVICH, E. L. and PEREVALOVA, N. P., 2006. *GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere*. Irkutsk, Russia: SI SC RRS ESSC SB RAMS Publ. (in Russian).
32. CHERNOGOR, L. F. and GARMASH, K. P., 2018. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagn. Aeron.* vol. 58, is. 5, pp. 673–685. DOI: 10.1134/S0016793218050031
33. PANASENKO, S. V., OTSUKA, Y., VAN DE KAMP, M., CHERNOGOR, L. F., SHINBORI, A., TSUGAWA, T. and NISHIOKA, M., 2019. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 191, id. 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015

V. F. Pushin and L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

A SYNTHESIS OF TEMPORAL VARIATIONS  
IN DOPPLER SPECTRA RECORDED  
AT A QUASI-VERTICAL INCIDENCE  
BY THE HF DOPPLER RADAR  
WITH SPACED RECEIVERS

*Purpose:* The ionospheric channel is widely used for the communication, radio navigation, radar, direction finding, radio astronomy, and remote radio probing systems. The radio channel parameters are characterized by nonstationarity due to the dynamic processes in the ionosphere, and therefore their study is one of the topical problems of space physics and earth-space radio physics of geospace. This work aims at presenting the results of synthesis of temporal variations in the Doppler spectra obtained by the Doppler probing of the ionosphere at vertical and quasi-vertical incidence.

*Design/methodology/approach:* One of the most effective methods of ionosphere research is the Doppler sounding technique. It has a high time resolution (about 10 s), a Doppler shift resolution (0.01–0.1 Hz), and the accuracy of Doppler shift measurements (~0.01 Hz) that permits monitoring the variations in the ionospheric electron density ( $10^{-4}$ – $10^{-3}$ ) or the study of the ionospheric plasma motion with the speed of 0.1–1 m/s and greater. The solution of the inverse radio physical problem, consisting in determination of the ionosphere parameters, often means solving the direct radio physical problem. In the Doppler sounding technique, it belongs with the construction of variations in Doppler spectra and comparing them with the Doppler spectra measurements.

*Findings:* For the radio wave ordinary component, three echoes being produced by three rays are observed. Influence of the geomagnetic field and large horizontal gradients in the electron density of  $\delta \geq 10\%$  give rise to complex ray structures with caustic surfaces. The ionospheric disturbances traveling along the magnetic meridian form the skip zones. The longitudinal and transverse displacement of the ray reflection point attains a few tens of kilometers along the vil. Haidary to vil. Hrakove quasi-vertical radiowave propagation path, for which the great circle range is 50 km. For the vertical incidence, the signal azimuth at the receiver coincides with the traveling ionospheric disturbance azimuth. The synthesis of temporal variations in the HF Doppler spectra has been made and compared with the temporal variations in the Doppler spectra recorded with the V. N. Karazin Kharkiv National University radar. The estimate of  $\delta = 15\%$  obtained confirms the existence of large horizontal gradients in electron density.

*Conclusions:* Temporal variations in Doppler spectra and in azimuth have been calculated for the vertical and quasi-vertical incidence with allowance for large horizontal gradients of the electron density caused by traveling ionospheric disturbances.

*Key words:* ionosphere, Doppler sounding at oblique incidence, synthesis of temporal variations in HF Doppler spectra, traveling ionospheric disturbances, electron density

Стаття надійшла до редакції 4.06.2021