

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-05>

УДК 551.558, 551.596, 534.221

**КОМБІНАЦІЙНІ ЧАСТОТИ СИГНАЛУ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ВЧ РАДАРУ
В ДІАПАЗОНІ ГЕОМАГНІТНИХ ПУЛЬСАЦІЙ РС1****В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор***Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна**E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com*

Поступила до редакції 17 листопада 2020 р.

Актуальність. Актуальність роботи обумовлена необхідністю вивчення МГД хвиль різної природи на іоносферних висотах, джерела генерації яких знаходяться в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

Об'єктом дослідження даної роботи були іоносферні збурення, що супроводжували геомагнітні пульсації протягом проходження ранкового сонячного термінатора 23–24 березня 2010 р.

Метою цієї роботи було виявлення доплерівським ВЧ радаром короткоперіодних іоносферних збурень у діапазоні геомагнітних мікропульсацій типу РС1 (1–5 Гц) та дослідження їх спектрального складу.

Методи і методологія. За допомогою доплерівського ВЧ радара отримано динамічні спектри варіацій, які спостерігалися.

Результати. Показано, що іоносферні збурення виникають головним чином на комбінаційних частотах. Оцінено тривалості подібних збурень – близько хвилини. Частоти збурень становили 0.7, 1.5 і 2.5 Гц. Виявлені квазіперіодичні биття з частотою 1–5 Гц, тривалість яких може становити від півгодини до декількох годин. Дано обґрунтування появ максимумів биття на комбінаційних частотах на основі моделі сигналу, модульованого в іоносфері УНЧ хвилями. Проведено порівняльний аналіз варіацій, отриманих за допомогою спектрограм, з відомими раніше моделями фазово-модульованих сигналів. Розроблено модель відбитого від іоносфери амплітудно-фазового модульованого сигналу, визначені його основні параметри.

Висновки. Доплерівське ВЧ радіозондування може бути ефективним інструментом для дослідження іоносферних збурень у діапазоні геомагнітних пульсацій РС1. Під час дослідження часових варіацій доплерівського зміщення частоти в період весіннього рівнодення встановлено наступне. Період іоносферних збурень сягав 0.2–1 с, їх тривалість варіювала від 1 до більше, ніж 10 хв. Виявлено помітне збільшення амплітуди биття, яке може бути ознакою появи в доплерівських спектрах бічних максимумів. Установлено наявність коливань у діапазоні частот першої гармоніки спектральної резонансної системи іоносферного альвенівського резонатору. Підтверджено, що тривалі іоносферні збурення мають лінійно зростаючу частоту заповнення хвильового пакета, швидкість зміни частоти якого близька до 10^{-3} Гц/с.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: термінатор, спектрограма, доплерівський ВЧ радар, УНЧ хвилі, комбінаційні частоти

**COMBINATIONAL FREQUENCIES OF HF DOPPLER RADAR SIGNALS
IN THE PC1 GEOMAGNETIC PULSATION RANGE****V. F. Pushin, L. F. Chernogor***V. N. Karazin Kharkiv National University, 61022, Kharkiv, Svobody square, 4, Ukraine*

Urgency. The urgency of this work is determined by the necessity of studying MHD waves originating from various sources within the Earth–atmosphere–ionosphere– magnetosphere system and arriving at ionospheric heights.

The object of research. A matter of this study is ionospheric disturbances that accompanied geomagnetic pulsations during the dawn terminator on 23–24 March 2010.

Purpose of Work. The present work was aimed at revealing short-period ionospheric disturbances in the Pc1 micropulsation frequency range (1–5-Hz) and at investigating their spectral content.

Techniques and Methodology. The dynamic spectra of the variations under study were obtained with the HF Doppler radar.

Results. The ionospheric disturbances have been shown to arise mainly at combinational frequencies. The durations of such disturbances have been estimated to be of the order of one minute, and the disturbance frequencies 0.7 Hz, 1.5 Hz, and 2.5 Hz. The quasi-periodic interference in the 1–5-Hz frequency band has been detected to persist for over one-half hour to a few hours. Based on the model of the signal modulated by ULF waves in the ionosphere, the appearance of constructive interference at combinational frequencies has been validated. The intercomparisons of the variations obtained using the spectrograms and the known models for the phase-modulated signals have been made. A model for the amplitude- and phase-modulated signal reflected from the ionosphere has been developed, and the signal basic parameters have been determined.

Conclusions. The HF Doppler sounding can be a means for studying ionospheric disturbances in the Pc1 geomagnetic pulsation range. During the study of time variations of the Doppler frequency shift during the spring equinox, the following results were found. The period of ionospheric perturbations reached 0.2–1 s, their duration

varied from 1 min to more than 10 min. A noticeable increase in the amplitude of the beat is detected, which may be a sign of the appearance of lateral maxima in the Doppler spectra. The presence of oscillations in the frequency range of the first harmonic of the spectral resonance system of the ionospheric Alfvén resonator is established. Long-term ionospheric perturbations have a linearly increasing frequency of filling the wave packet. The rate of frequency change is close to 10^{-3} Hz/s.

KEY WORDS: terminator, spectrogram, HF Doppler radar, ULF waves, combinational frequencies

КОМБИНАЦИОННЫЕ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ДОПЛЕРОВСКОГО ВЧ РАДАРА В ДИАПАЗОНЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1

В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения МГД волн различной природы на ионосферных высотах, источники генерации которых находятся в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

Объектом исследования данной работы были ионосферные возмущения, сопровождавшие геомагнитные пульсации в течение прохождения утреннего солнечного терминатора 23 – 24 марта 2010 г.

Целью настоящей работы являлось обнаружение доплеровским ВЧ радаром короткопериодных ионосферных возмущений в диапазоне геомагнитных микропульсаций типа Pc1 (1–5 Гц) и исследование их спектрального состава.

Методы и методология. С помощью доплеровского ВЧ радара получены динамические спектры наблюдаемых вариаций.

Результаты. Показано, что ионосферные возмущения возникают главным образом на комбинационных частотах. Оценены длительности подобных возмущений – порядка минуты. Частоты возмущений составляли 0,7, 1,5 и 2,5 Гц. Обнаружены квазипериодические биения с частотой 1 – 5 Гц, длительность которых может составлять от получаса до нескольких часов. Дано обоснование появлений максимумов биений на комбинационных частотах на основе модели сигнала, модулированного в ионосфере УНЧ волнами. Проведен сравнительный анализ вариаций, полученных с помощью спектрограмм, с известными ранее моделями фазово-модулированных сигналов. Разработана модель отраженного от ионосферы амплитудно-фазового модулированного сигнала, определены его основные параметры.

Выводы. Доплеровское ВЧ радиозондирование может быть эффективным инструментом для исследования ионосферных возмущений в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc1. Во время исследования временных вариаций доплеровского смещения частоты в период весеннего равноденствия установлено следующее. Период ионосферных возмущений достигал 0,2–1 с, их длительность варьировала от 1 до более 10 мин. Обнаружено заметное увеличение амплитуды биений, которое может быть признаком появления в доплеровских спектрах боковых максимумов. Установлено наличие колебаний в диапазоне частот первой гармоники спектральной резонансной системы ионосферного альвеновского резонатора. Подтверждено, что длительные ионосферные возмущения имеют линейно возрастающую частоту заполнения волнового пакета, скорость изменения частоты которого близка к 10^{-3} Гц/с.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: терминатор, спектрограмма, доплеровский ВЧ радар, УНЧ волны, комбинационные частоты

ВСТУП

Міжпланетний простір і магнітосфера є джерелами різних типів гідромагнітних хвиль. Поширюючись через іоносферу, магнітогідродинамічні (МГД) хвилі трансформуються в інші типи хвиль [1]. Одним із основних типів геомагнітних мікропульсаций, які спостерігаються на поверхні Землі, є тривалі та досить регулярні коливання Pc1. Геомагнітні пульсації Pc1 являють собою квазисинусоїдальні коливання з періодом 0,2–5 с, що мають характерну модуляцію амплітуди у вигляді окремих хвильових пакетів, які створюють складну картину биття. Тривалість серій змінюється від півгодини до декількох годин, максимум появи відзначається в ранні години місцевого часу [2].

Останнім часом були передбачені та виявлені іоносферний і магнітосферний МГД резонатори [3]. В [2] показано, що геомагнітні пульсації на Землі, як правило, пов'язані зі збуреннями в іоносфері. Ці збурення реєструються, наприклад, наземним доплерівським ВЧ радаром. У даний час ясно, що пояснення геомагнітних пульсаций Pc1 неможливо без уявлення про МГД хвилі в магнітосфері. Так, для пояснення пульсаций Pc1 залучається механізм гірорезонансної нестійкості [4], яка є однією з найважливіших нестабільностей, існуючих у плазмі магнітосфери.

Іоносферний альвєнівський резонатор (ІАР) є одним з основних структурних елементів магнітосферно-іоносферної електродинамічної системи і грає ключову роль в електромагнітних геофізичних процесах з характерними часами $T \approx 0,1–10$ с. На Рис. 1 наведено схему хвилеводного поширення МГД хвиль в області іоносфера – магнітосфера. Альвєнівська хвиля циркулює між верхньою та нижньою межами іоносферного альвєнівського резонатора уздовж геомагнітного поля. Межі ІАР розташовані на висотах E-області й у верхній іоносфері. У магнітосферному альвєнівському мазері іоносфера грає роль селективного та нелінійного елемента, що призводить до появи зворотного зв'язку

в системі хвилі-частинки за рахунок висипань протонів в іоносферу та модуляції її параметрів. Перша резонансна частота ІАР змінюється з плином часу в межах 0.5–3 Гц. На межах ІАР альвенівські хвилі частково відбиваються та трансформуються в інші типи хвиль. Ці хвилі викликають дрейф у схрещених полях іоносферної плазми або змінюють її концентрацію [5].

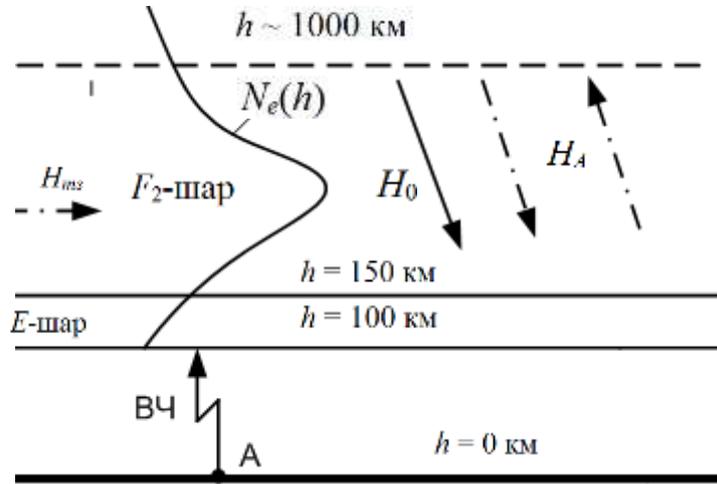


Fig. 1. Sketch showing HF sounding of the MHD waves in the ionosphere: H_0 is the geomagnetic field, H_A is the magnetic field component of the Alfven wave, H_{ms} is the magnetic field component of the magnetosonic wave, A is the observation point.

Рис. 1. Схема ВЧ зондування МГД хвиль у іоносфері: H_0 – вектор геомагнітного поля, H_A – магнітна компонента альвенівської хвилі, H_{ms} – магнітна компонента магнітного звуку, А – точка спостереження.

Сучасні уявлення про структуру та динаміку навколосезного космічного простору базуються, зокрема, на експериментальних даних, отриманих в результаті цілеспрямованих наземних спостережень низки геофізичних параметрів. Одним з ефективних методів наземного спостереження коливань, які виникли в магнітосфері, є зондування іоносфери доплерівським ВЧ радаром. Доплерівське зондування, в принципі, дозволяє визначити взаємодію магнітосферних ультранизькочастотних (УНЧ) збурень з іоносферою. Поширюючись до земної поверхні, ці коливання зазнають ряд змін, що дозволяє, припускаючи механізм їх генерації, отримувати регулярну інформацію про середовище, наприклад, таку як розподіл плазми в магнітосфері та його варіації.

При доплерівському зондуванні іоносфери, як правило, досліджуються варіації головного максимуму спектра биття відбитого від іоносфери сигналу з сигналом опорного гетеродину [6, 7]. Головний максимум за амплітудою значно перевершує бічні максимуми, що ускладнює їх спостереження. Бічні максимуми пов'язані з тонкими ефектами й їх спостереження помітно розширює можливості зондування доплерівським радаром. Бічні максимуми часто спостерігаються на рівні шумів. Крім того, для пояснення ефектів необхідно розширення традиційної моделі сигналу [8, 9].

Збурення, викликані альвенівськими хвилями, можуть бути зареєстровані доплерівським радаром. На частоті зондування ВЧ радара 4.2 МГц нижня межа ІАР знаходиться в області його досяжності. Перпендикулярно геомагнітному полю в шарі F2 поширюється магнітний звук, який супроводжується зміною концентрації плазми і може бути результатом трансформації альвенівської хвилі. Такі МГД хвилі є предметом дослідження доплерівським ВЧ радаром. Спостереження доплерівських спектрів (ДС) дозволяє виявити спектральну резонансну систему спектрів швидких коливань фази сигналу радара, зокрема, за рахунок МГД хвиль. Коливання Pc1 найлегше розпізнати за обвідною несучого сигналу. Зміни частоти появи цих коливань в залежності від місцевого часу в значній мірі визначається широтою точки спостереження. Наприклад, в середніх широтах Pc1 найбільш часто спостерігаються в ранні ранкові години. Численні роботи вказують на одночасну появу коливань Pc1 в магнітоспрямлених точках [10].

У цій роботі проведено спектральний аналіз биття сигналу, відбитого від іоносфери, з сигналом опорного гетеродину. Для аналізу спектру поза головного максимуму спектр в околі головного максимуму придушується. Аналізуються динамічні спектри биття, так звані спектрограми.

Мета роботи – описання результатів спостереження доплерівським ВЧ радаром короткоперіодних іоносферних збурень у діапазоні геомагнітних мікропульсацій типу Pc1 (1–5 Гц) та дослідження їх спектрального складу.

ВИДІЛЕННЯ КОМБІНАЦІЙНИХ ЧАСТОТ

Будемо вважати, що є вихідний часовий ряд биття сигналу доплерівського ВЧ радару, відбитого від іоносфери

$$x(i), i = 0, \dots, N-1,$$

де N – розмір часового ряду. Виділимо комбінаційні частоти (КЧ) ВЧ сигналу на тлі шумів. Дискретне перетворення Фур'є (ПФ) часової послідовності має вигляд:

$$X(k) = F_k[x(i)], k = 0, \dots, N/2.$$

Координата головного максимуму спектру биття дорівнює I^* . Введемо приріст

$$\Delta X(i) = X(i+1) - X(i), i = 0, \dots, N/2-1.$$

Задамо умову локального максимуму в вигляді

$$\Delta X(i) > 0; \Delta X(i+1) > 0; \Delta X(i+2) < 0; \Delta X(i+3) < 0. \quad (1)$$

З умови (1) знаходимо вектор розв'язку

$$\{q_i\}, i = 0, \dots, r.$$

Тоді координата максимуму буде

$$I_i = q_i + 2.$$

Введемо низку максимумів спектру

$$Y(i) = X(I_i), i = 0, \dots, r. \quad (2)$$

Розділимо ряд (2) на дві частини з координатами більшими та меншими за I^*

$$Y_1(i) = Y(i), i = 0, \dots, n_1, Y_2(i) = Y(i), i = n_1+1, \dots, r.$$

Перенесемо початок відліку в точку I^* . Відобразимо Y_1 симетрично відносно точки I^* і для Y_2 перенесемо початок координат в точку I^* .

Умова для комбінаційних частот

$$I^* - I(i) = I(n_1 + j + 1) - I^*; i = 0, \dots, n_1, j = 0, \dots, r - n_1. \quad (3)$$

Розв'язок рівняння (3)

$$i = \{g_n\}, n = 1, \dots, m.$$

де на інтервалі аналізу кількість КЧ дорівнює m . Тоді частоти гармонійної модуляції фази ВЧ сигналу, відбитого від іоносфери рівні

$$F_{fd} = (I^* - I(i))/\tau,$$

де τ – інтервал аналізу.

МОДЕЛІ МОДУЛЬОВАНОГО ІОНОСФЕРОЮ СИГНАЛУ

Для інтерпретації результатів експерименту розглянемо деякі моделі модульованого іоносферою відбитого сигналу при вертикальному доплерівському зондуванні. В [6] розглядалася модель двотонального фазомодульованого (ФМ) сигналу, де одну з модулюючих функцій можна вважати лінійною на інтервалі аналізу. Різномаяття хвильових процесів в іоносфері вимагає використання різних моделей сигналу для пояснення експериментальних даних. Розглянемо одномодовий амплітудно-фазомодульований (АФМ) сигнал у вигляді

$$A(t) = A_m [1 + M \cos(\Omega_0 t + \Phi_0)] \cos((\omega + \omega_d)t + \varphi_0 + \varphi(t)). \quad (4)$$

Фазова модуляція описується функцією

$$\varphi(t) = m_1 \cos(\Omega_1 t + \Phi_1).$$

Тут m_1 – індекс модуляції. Будемо вважати, що частота тону квазістаціонарна, тобто постійна на інтервалі аналізу. Складемо іоносферний сигнал з сигналом опорного гетеродину

$$u(t) = U_m \cos(\omega - \omega_s)t,$$

де ω_s – мале зміщення частоти.

Будемо вважати, що

$$m_1 \Omega_1, m_1 (\omega_s + \omega_d) \gg M \Omega_0,$$

тобто амплітуда повільно змінюється в часі у порівнянні з фазою. Тоді, вважаючи, що індекс m_1 малий, отримаємо для биття опорного сигналу з іоносферним сигналом наступне співвідношення:

$$A(t) = A_m U_m [1 + M \cos(\Omega_0 t + \Phi_0)] \{ \cos(\omega' t + \varphi_0) - m_1 \sin((\omega' + \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_1) - m_1 \sin((\omega' - \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_1) \}, \quad (5)$$

де

$$\omega' = \omega_s + \omega_d.$$

З (5) випливає, що биття є суперпозицією амплітудно-модульованих коливань з частотами

$$\omega', \omega' + \Omega_1, \omega' - \Omega_1.$$

Умова (5) краще виконується для верхньої бічної частоти. Формула для спектру АФМ сигналу (4) в більш загальному вигляді:

$$\begin{aligned} A(t) = A_m U_m \{ & \cos(\omega' t + \varphi_0) + \frac{M}{2} [\cos((\omega' + \Omega_0)t + \varphi_0 + \Phi_0) + \\ & + \cos((\omega' - \Omega_0)t + \varphi_0 - \Phi_0)] - \frac{m_1}{2} [\sin((\omega' + \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_1) + \\ & + \sin((\omega' - \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_1)] - \frac{m_1 M}{4} [\sin((\omega' + \Omega_0 - \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_0 - \Phi_1) + \\ & + \sin((\omega' - \Omega_0 - \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_0 - \Phi_1) + \sin((\omega' - \Omega_0 + \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_0 + \Phi_1) + \\ & + \sin((\omega' + \Omega_0 + \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_0 + \Phi_1)] \}. \end{aligned}$$

Розглянемо ФМ сигнал з однотональною фазовою модуляцією. Виходячи з загальної формули [3], отримаємо

$$A(t) = A_m \sum_{k=-1}^{k=1} J_k(m_1) \cos(\omega' + k \Omega_1)t,$$

де J_k – функція Бесселя k -ого порядку та $m_1 < 1.2$.

Спектр сигналу має три максимуми на частотах

$$\omega', \omega' + \Omega, \omega' - \Omega.$$

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

У роботі, в якості прикладу, проведено детальний аналіз результатів доплерівського зондування іоносфери 23 березня та 24 березня 2010 р. під час проходження ранкового сонячного термінатора. Динамічні спектри досліджувалися по всій смузі частот системи обробки ВЧ радару 0–10 Гц при частоті квантування 10 Гц. Для спостереження складових спектрів далеко від головного максимуму спектр в його околі придушувався ковзним вікном із центральною частотою, рівною частоті головного максимуму спектра. Розглянуто послідовність динамічних спектрів (спектрограми). Спектри розподілено на дві частини: в околі головного максимуму та поза ним. Ширина смуги придушення дорівнює 1.2 Гц. Частота випромінюваного сигналу дорівнює 4.2 МГц, зміщення частоти випромінюваного сигналу в порівнянні з опорною частотою дорівнює 2.4 Гц. Інтервал аналізу ДС – 40 с. Система обробки дозволяє стробувати сигнал за часом. Частота сигналу – 4.2 МГц. Проведено пошук локальних ДС, у яких спостерігаються короткоперіодні варіації з частотою в діапазоні геомагнітних пульсацій Pc1 (1–5 Гц). Виділимо для дослідження часовий інтервал в околі моменту максимуму ДЗЧ.

Аналіз ДС показав, що для окремих спектрів бічні максимуми розташовані симетрично щодо головного максимуму. У цьому випадку поява бічних максимумів можна пояснити комбінаційними частотами [1], викликаними іоносферними збуреннями. На панелях 2a–2d показано нормовані спектри потужності биття з комбінаційними частотами, які відповідають частоті збурення 1.5 Гц, де цифрами 1 та 2 позначено амплітуди максимумів спектрів у зоні та поза зоною придушення. Іоносферні збурення з такою частотою спостерігаються поза зоною придушення протягом 12 хв. Можливо, що це одне й те ж тривале збурення. Збурення такої тривалості та частоти спостерігаються в геомагнітних пульсаціях Pc1 [2]. На панелях 2e та 2f наведено локальні спектри, в яких чітко проглядаються комбінаційні частоти. На панелі 2e наведено локальний спектр поза зоною придушення для 24 березня 2010 р., де комбінаційні частоти відповідають збуренню з частотою 2.5 Гц. На панелі 2f наведено спектр поза зоною придушення для того ж дня. Час обрано при максимумі доплерівського зсуву частоти (ДЗЧ). Комбінаційні частоти відповідають частоті збурення 0.7 Гц. Послідовність ДС дозволяє оцінити тривалість збурення. В даному випадку тривалість збурення близько 1 хв. Спостерігалися і більш тривалі збурення. На Рис. 3 наведено спектрограму биття для експерименту 23 березня при проходженні ранкового сонячного термінатора. Розраховано динамічні спектри для інтервалу часу з нуля годин за місцевим часом до 7 годин. Наведено спектри поза зоною придушення, варіації частоти головного максимуму (суцільна крива) та нормовані варіації максимуму поза зоною придушення (вертикальні стовпчики вгору). Максимальне зміщення частоти досягається в зоні придушення о 05:20 LT, тобто значно пізніше часу сходу Сонця на іоносферних висотах. У Таблиці наведені часи сходу та заходу Сонця на різних висотах для м. Харків. Поза зоною придушення спостерігається тонка структура сигналу з лінійною зміною частоти. За часом появи такі збурення збігаються з максимумом варіацій ДЗЧ повного спектра. Поява таких максимумів може бути викликана виникненням багатопробності або нелінійністю фази сигналу на інтервалі аналізу. При цьому можуть спостерігатися максимуми на двох частотах симетричних щодо частоти головного максимуму. Варіації ДЗЧ головного максимуму відбуваються майже синхронно як 23 березня, так і 24 березня. Для обох днів максимум ДЗЧ спостерігається о 05:20 LT. На Рис. 3 поза зоною придушення спостерігаються варіації частоти максимумів. Характерною рисою цих варіацій є те, що вони зміщені за частотою та розташовані по обидва боки від варіацій ДЗЧ. Аналіз ДС показав, що для окремих спектрів бічні максимуми розташовані симетрично щодо головного максимуму. У цьому випадку появу бічних максимумів можна пояснити комбінаційними частотами [6], викликаними іоносферними збуреннями в діапазоні частот геомагнітних пульсацій Pc1. Зі спектрограми видно, що верхня гілка частково виходить за частоту Найквіста та проявляється у вигляді накладання частот.

При інтерпретації результатів слід відзначити, що геомагнітна обстановка під час проведення експерименту була спокійною.

Таблиця. Дані про схід та захід Сонця протягом проходження ранкового сонячного термінатора

Table. Sunrise and sunset data during the passage of the dawn terminator

| Дата | Схід Сонця (час LT) | | Захід Сонця (час LT) | |
|--------------------|---------------------|--------|----------------------|-------|
| | 0 км | 150 км | 150 км | 0 км |
| 23 березня 2010 р. | 05:28 | 04:07 | 19:13 | 17:53 |
| 24 березня 2010 р. | 05:26 | 04:05 | 19:15 | 17:55 |

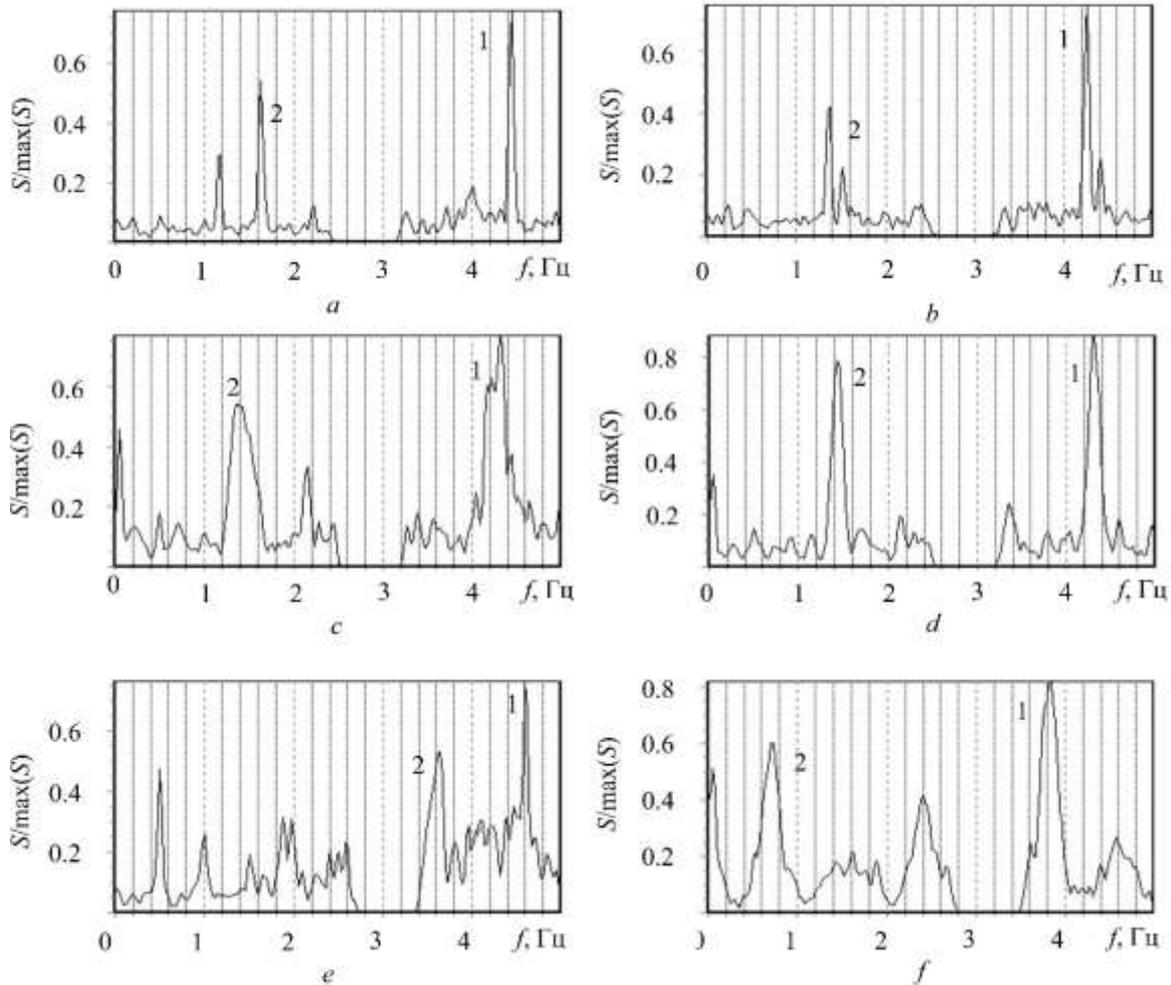


Рис. 2. Локальні динамічні нормовані спектри ВЧ сигналу за 24 березня 2010 року; інтервал аналізу – 40 с.

Fig. 2. Local normalized dynamic spectra of HF signals on March 24, 2010 determined for 40-s intervals of data

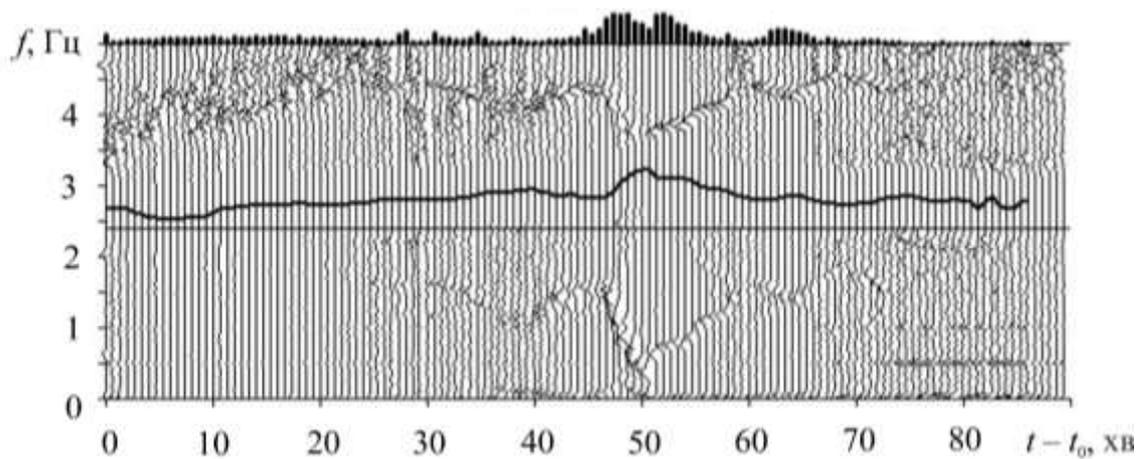


Рис. 3. Приклад спектрограми биття зонduючого сигналу, 23 березня 2010 р.

Fig. 3. Spectra of the beat signal between the reference signal and the probing signal modulated by ULF waves in the ionosphere for March 23, 2010.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У ході експерименту виявлено короткі збурення тривалістю близькою до інтервалу аналізу ~ 1 хв та довші ~ 10 хв. Тривалі збурення представляються спектрограмами, короткі – окремими спектрами. Короткі та тривалі збурення викликані, ймовірно, різними джерелами. Іоносферні збурення тривалістю порядку інтервалу аналізу спектра мають частоти 0.7, 1.5 і 2.5 Гц. Такі частоти лежать в діапазоні частот першої гармоніки спектральної резонансної системи ІАР. Тривалі збурення, ймовірно, пов'язані з модами магнітосферного резонатора. Частота заповнення хвильового пакета наростає лінійно, що спостерігається також в магнітограмах [11]. Швидкість зміни частоти складає близько 10^{-3} Гц/с.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Розроблено методику виявлення короткоперіодних іоносферних збурень у діапазоні 1–5 Гц за допомогою доплерівського ВЧ радару.
2. Виявлено короткі (~ 1 хв) та тривалі (більше 10 хв) іоносферні збурення в діапазоні 1–5 Гц. Для аналізу використовувалися окремі спектри та спектрограми биття ВЧ сигналу.
3. Виявлено тривалі короткоперіодні варіації спектру биття під час максимуму ДЗЧ. При цьому спостерігається помітне збільшення амплітуди биття, що може бути ознакою появи в ДС бічних максимумів.
4. Іоносферні збурення тривалістю близько інтервалу аналізу спектру ~ 40 с мають частоти 0.7, 1.5 і 2.5 Гц. Такі частоти лежать у діапазоні частот першої гармоніки спектральної резонансної системи ІАР.
5. Тривалі іоносферні збурення мають лінійно зростаючу частоту заповнення хвильового пакета. Швидкість зміни частоти близька до 10^{-3} Гц/с.

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. та Пушина В. 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>

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alperovich LS, Fedorov EN. Hydromagnetic Waves in the Magnetosphere and the Ionosphere, Series: Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer, 2007. XXIV+426 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6637-5>
2. Модель космоса. Том I. Физические условия в космическом пространстве. М.: Книжный дом Университет (КДУ), 2007. 872 с.
3. Пилипенко ВА. Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых полей в околоземном пространстве, Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. ИФЗ им. О. Ю. Шмидта, ИКИ РАН, 2007. 241 с.
4. Гершман БН., Ерухимов ЛМ., Яшин ЮЯ Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
5. Pilipenko VA, Fedorov EN, Teramoto M, Yumoto K. The mechanism of mid-latitude Pi2 waves in the upper ionosphere as revealed by combined Doppler and magnetometer observations. Ann. Geophys. 2013;31:689–695. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-689-2013>
6. Пушин ВФ., Черногор ЛФ. Спектральный анализ биений опорного сигнала и отраженного от ионосферы ВЧ сигнала. Радиофизика и радиоастрономия. 2014;19(2):160–169. <https://doi.org/10.15407/rpra19.02.160>
7. Пушин ВФ., Черногор ЛФ. Обнаружение квазипериодических процессов в ионосфере в диапазоне акустико-гравитационных волн. Радиофизика и радиоастрономия. 2012;17(4):333–344. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/627>
8. Басаков СИ. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Высшая школа, 2000. 462 с.
9. Афраймович ЭЛ. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.
10. Obayashi T. Hydromagnetic whistlers. J. Geophys. Res. 1965;70(5):1069–1078.

<https://doi.org/10.1029/JZ070i005p01069>

11. Akasofu S.-I., Chapman S. Solar–Terrestrial Physics. London: Oxford U.P., 1972. XXIII, 901 p.

REFERENCES

1. Alperovich LS, Fedorov EN. Hydromagnetic Waves in the Magnetosphere and the Ionosphere, Series: Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer, 2007. XXIV+426 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6637-5>
2. The Space Model. Volume 1. Physical Conditions in Space. Moscow, Russia: KDU, 2007. 872 p. [In Russian].
3. Pilipenko VA. Resonance Effects of ULF Wave Fields in the Near-Earth Space, Extended Abstract of Doctoral (Phys.–Math.) Dissertation. Moscow: Schmidt IPhE, IRS RAN, 2007, 241 p. [In Russian].
4. Gershman BN, Eruhimov LM, Yashin YuYa. Wave of the phenomenon in an ionosphere and space plasma. Moscow: Science, 1984. 392 p. [In Russian].
5. Pilipenko VA, Fedorov EN, Teramoto M, Yumoto K. The mechanism of mid-latitude Pi2 waves in the upper ionosphere as revealed by combined Doppler and magnetometer observations. Ann. Geophys. 2013;31:689–695. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-689-2013>
6. Pushin VF, Chernogor LF. Spectral Analysis of Reference Signal and of HF Signal Reflected from the Ionosphere Beats. Radio Phys. Radio Astron. 2014;19(2):160–169 [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra19.02.160>
7. Pushin VF, Chernogor LF. Detecting of Quasi-Periodic Oscillations in the Ionosphere within the Acoustic Gravity Waves Range. Radio Phys. Radio Astron. 2012;17(4):333–343 [In Russian]. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/627>
8. Baskakov SI. Radiotechnical Circuits and Signals. Moscow, Russia: Vysshaya shkola, 2000. 462 p. [In Russian].
9. Afraimovich EL. Interferential Methods of Ionosphere Sounding. Moscow: Nauka; 1982. 198 p. [In Russian].
10. Obayashi T. Hydromagnetic whistlers. J. Geophys. Res. 1965;70(5):1069–1078. <https://doi.org/10.1029/JZ070i005p01069>
11. Akasofu S.-I., Chapman S. Solar–Terrestrial Physics. London: Oxford U.P., 1972. XXIII, 901 p.