

РАДІОФІЗИКА ГЕОКОСМОСУ

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326>

УДК 524.7, 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, К. П. ГАРМАШ, Є. Г. ЖДАНКО,
С. Г. ЛЕУС, Y. LUO

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

ОСОБЛИВОСТІ ІОНОСФЕРНИХ ЕФЕКТІВ ЧАСТКОВОГО СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ НАД ХАРКОВОМ 10 ЧЕРВНЯ 2021 Р.

Предмет і мета роботи: Сонячні затемнення належать до високоенергетичних джерел збурення підсистем у системах Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Під час сонячного затемнення активується взаємодія підсистем у цих системах, збурюються параметри динамічних процесів. Дослідження цих процесів сприяє кращому розумінню будови та динаміки підсистем. Реакція іоносфери на сонячне затемнення залежить від фази сонячного затемнення, положення у циклі сонячної активності, пори року, часу доби, місця спостереження, стану космічної погоди тощо. Тому дослідження впливу на іоносферу кожного нового сонячного затемнення залишається актуальною геофізичною та радіофізичною задачею. Мета роботи – опис варіацій характеристик радіохвиль і параметрів іоносфери, що супроводжували часткове сонячне затемнення над Харковом 10 червня 2021 р.

Методи і методологія: Для спостережень використовувалися засоби вертикального і похилого доплерівського зондування, розміщені в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Для порівняння залучалися дані магнітної станції “Львів”.

Результати: Виконано радіофізичні спостереження за динамічними процесами в іоносфері протягом сонячного затемнення 10 червня 2021 р. і в контрольні дні. Встановлено, що часові варіації доплерівського зміщення частоти на вертикальних і похилих радіотрасах в цілому були подібними. Доплерівські спектри на цих радіотрасах, власне кажучи, відрізнялися. На похилих радіотрасах помітніше виявлялася багатомодовість. Сонячне затемнення супроводжувалося посиленням хвильової активності в атмосфері й іоносфері. Спостерігалось не менше трьох хвильових цугів. Значення періодів (близько $5 \div 12$ хв) і відносних амплітуд збурень концентрації електронів ($\delta_N \approx 0.3 \div 0.6\%$) свідчили про те, що хвильові збурення викликані атмосферними гравітаційними хвилями. Оцінена амплітуда геомагнітних варіацій з періодом $6 \div 8$ хв. Вона становила близько $0.5 \div 1$ нТл. Приблизно таке саме значення зареєстровано в Х-компоненті геомагнітного поля на найближчій магнітній станції. Аперіодичний ефект сонячного затемнення виявився занадто малим (менше 0.01 Гц), щоб його можна було впевнено спостерігати. Малисть ефекту зумовлена незначною фазою часткового затемнення над Харковом (не більше 0.11).

Висновки: До особливостей сонячного затемнення 10 червня 2021 р. належать незначний аперіодичний ефект і активізація хвильової активності в атмосфері та іоносфері.

Ключові слова: сонячне затемнення, іоносфера, доплерівський спектр, доплерівське зміщення частоти, концентрація електронів, геомагнітне поле, атмосферна гравітаційна хвиля

1. Вступ

Сонячні затемнення (СЗ) належать до високоенергетичних джерел збурення підсистем у системах Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера [1, 2]. Під час СЗ активується взаємодія підсистем у цих системах, збурюються параметри динамічних процесів. Дослідження цих процесів сприяє кращому розумінню будови та динаміки підсистем.

Вивченню впливу СЗ на іоносферу присвячена велика кількість робіт (див., наприклад, бібліографію в книзі [2]). До піонерських належать роботи [3–5]. Ще у 1950-і рр. з’явився перший збірник статей, присвячених дослідженню ефектів СЗ в іоносфері [6]. В ХХІ столітті видано першу монографію, присвячену вивченню ефектів СЗ в атмосфері та геокосмосі [2].

У космічну еру вивчення ефектів СЗ значно активізувалося. Відтоді опубліковано сотні наукових праць, до сучасних належать [7–42]. В цих

роботах вивчалися ефекти в усіх областях іоносфери, застосовувалися різні методи діагностики іоносфери, досліджувався вплив СЗ на поширення радіохвиль здебільшого ВЧ і ДНЧ/НЧ діапазонів.

З аналітичного огляду іоносферних ефектів СЗ, що мали місце в XX–XXI століттях, встановлено, що ефекти, викликані різними затемненнями, суттєво відрізняються. Реакція іоносфери на СЗ залежить від фази сонячного затемнення, положення у циклі сонячної активності, пори року, часу доби, місця спостереження, стану космічної погоди тощо. Тому дослідження впливу на іоносферу кожного нового СЗ залишається актуальною геофізичною та радіофізичною задачею.

Мета роботи – опис варіацій характеристик радіохвиль і параметрів іоносфери, що супроводжували часткове СЗ над Харковом 10 червня 2021 р.

2. Засоби та методи

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

Висотна протяжність відбитого зондуючого сигналу близька до 150 км. Тому використовується стробування за висотою з дискрет-

ністю $\Delta z' = 75$ км у діапазоні діючих висот $z' = 75 \div 450$ км, якому відповідає діапазон дійсних висот $75 \div 250$ км, а дискретність відліків висоти $\Delta z \approx 30 \div 35$ км. За таких умов виділяється основний канал, в якому амплітуда сигналу має максимальні значення.

Пасивний радар доплерівського зондування іоносфери. Цей радар похилого зондування іоносфери детальніше описано в роботі [43]. Його координати: $49^{\circ}65'$ пн. ш., $36^{\circ}9'$ сх. д. Як зондувальні сигнали у цій роботі використовувались радіосигнали радара вертикального доплерівського зондування. Відстань між передавачем і приймачем складає 44 км.

Методи. В основу радіофізичного моніторингу динамічних процесів в іоносфері покладені вимірювання ДЗЧ f_d , або в загальному випадку – доплерівських спектрів (ДС), а також амплітуди відбитого сигналу ВЧ діапазону. Як відомо, метод доплерівського зондування має високу чутливість до змін параметрів середовища. Розглянемо найпростішу ситуацію, коли шуми відсутні, сигнал одномодовий і інтервал його стаціонарності є більшим ніж інтервал обробки (період хвилі значно перевищує інтервал обробки). Такі можливості методу діагностики називаються потенційними.

Експериментально вдається виділити відносно ДЗЧ $\delta_{fd} = f_d/f$ 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 в залежності від робочої частоти та траєкторії радіохвилі найменша відносна зміна концентрації електронів N складає $0.01 \div 0.1\%$ [43].

Якщо ДЗЧ пов'язане зі швидкістю вертикального руху плазми в іоносфері v , то

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

де c – швидкість світла, θ – кут між траєкторією хвилі та вертикаллю. Тоді, якщо $\delta_{fd} \approx 10^{-10}$, маємо $v_{\min} \approx 0.02 \div 0.05$ м/с. Звичайно, у реальній ситуації чутливість розглянутих методів погіршується порівняно з потенційною чутливістю.

При $f_{d \min} = 0.01$ Гц і застосуванні у спектральному аналізі перетворення Фур'є часового розрізнення методу становить 100 с. Використання сучасних методів спектрального оцінювання (наприклад, авторегресійного аналізу

[44]) дозволяє на порядок підвищити роздільну здатність за часом (наприклад, до $\delta t \approx 10$ с). За цей час область відбиття зміщується за висотою на $\Delta z_{\min} = v_{\min} \delta t \approx 0.2 \div 0.5$ м. Отримані оцінки $\delta_{N_{\min}}$, v_{\min} і Δz_{\min} свідчать про високу чутливість метода доплерівського зондування.

Спектральний аналіз даних вертикального доплерівського зондування здійснювався за допомогою перетворення Фур'є на інтервалі часу 100 с, а даних похилого зондування – за допомогою авторегресійного аналізу з роздільною здатністю $\delta t \approx 10$ с.

Загальний контроль за станом іоносфери здійснювався за допомогою цифрового іонозонда [45]. Крок зміни частоти – $11 \div 12$ кГц, похибка вимірювання частоти – 20 кГц. Крок за часом становив 1 хв.

3. Загальні відомості про сонячне затемнення

Особливість СЗ 10 червня 2021 р. полягала в тому, що воно було кільцеподібним <<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>>.

Затемнення почалося 10 червня 2021 р. о 08:12:20 UT (UT – всесвітній час), а закінчилося о 13:11:19 UT. Кільцеве СЗ спостерігалось з 09:49:50 UT до 11:33:43 UT. Фаза максимального покриття диска Сонця мала місце з 10:33:16 UT до 10:36:56 UT. СЗ почалося над територією Канади. Місячна тінь рухалась далі через Гренландію (де відмічалася найбільша фаза), Північний Льодовитий океан, Північний полюс, острів Нова Сибір і Росію (Якутію, Чукотку, Магаданську область, Камчатський край). Часткове СЗ спостерігалось в північній і середній частинах Європи, крім півдня Апеннін і Балкан. Не спостерігалось в Криму, на Кавказі, у південних районах Середньої Азії, Приморському краї, на Сахаліні, півдні Чукотки. Часткове СЗ відмічалось в Монголії, на більшій частині Китаю, на північному сході США, півночі Аляски, у всьому Північному Льодовитому океані, в північній частині Атлантики.

Часткове СЗ спостерігалось і на більшій частині України. Виняток склали лише південні частини Одеської, Миколаївської та Херсонської областей, а також Крим.

Як відомо, СЗ характеризують фазою M , яка дорівнює відносному зменшенню діаметра диска Сонця. При повному СЗ $M = 1$. Крім фази, затемнення характеризують також параметром A , рів-

ним відносною загіненої площі диска. Між A і M існує відомий функціональний зв'язок.

Протягом СЗ 10 червня 2021 р. в Харкові $M_{\max} \approx 0.112$, а $A_{\max} \approx 4.4$ %. Затемнення почалося о 10:42 UT (13:42 LT, LT – місцевий час), а закінчилося о 12:12 UT (15:12 LT). Максимальна фаза мала місце об 11:28 UT (14:28 LT).

4. Стан космічної погоди

Для аналізу стану космічної погоди скористаємося даними сайтів <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>> та <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>>.

Сплески концентрації частинок у сонячному вітрі від $5 \cdot 10^6$ до $(25 \div 30) \cdot 10^6$ м⁻³ спостерігались 7 та 12 червня 2021 р. (рис. 1). Збільшення швидкості частинок від 350 до $500 \div 550$ км/с відмічалось 7 і 8 червня 2021 р. Різкий сплеск температури частинок від $0.2 \cdot 10^5$ до $4.5 \cdot 10^5$ К зареєстровано о другій половині доби 7 червня 2021 р. Сплески тиску частинок від 1 до $5 \div 6$ нПа спостерігались у тих самих інтервалах часу, що й концентрації частинок. Компоненти B_y і B_z міжпланетного магнітного поля флюктували в межах ± 5 нТл. 7, 11 і 12 червня 2021 р. компонента B_z ставала від'ємною. Це призводило до геомагнітних збурень і слабкої бурі. Сплески функції Акасофу ϵ_A від 1 до $8 \div 13$ ГДж/с мали місце 7, 11 і 12 червня 2021 р. Водночас із цим індекс K_p збільшувався від $0 \div 1$ до $3 \div 4$. З 6 на 7, з 10 на 11 та з 11 на 12 червня 2021 р. спостерігалось зменшення D_{st} -індекса до $-(10 \div 33)$ нТл.

Поблизу моменту СЗ та у відповідні моменти часу 6 та 9 червня 2021 р. стан космічної погоди був спокійним ($K_p \approx 0.3$). Це дозволило виявити досить слабку реакцію іоносфери на СЗ.

5. Результати спостережень

5.1. Результати вертикального зондування

За даними іонозонда критична частота шару F2 іоносфери впродовж СЗ змінювалася від 5.1 до 4.7 МГц. Водночас радіохвилі з частотою f , яка становила 3.2 і 4.2 МГц, відбивалися на висотах близько 150 і 200 км відповідно.

Протягом СЗ і невдовзі після нього відмічалася квазіперіодичні варіації f_oF2 з періодом $T \approx 14$ хв і амплітудою $\delta f_a \approx 30$ кГц, чому відповідала відносна амплітуда коливань концентрації електронів $\delta_{Na} \approx 1.25$ %.

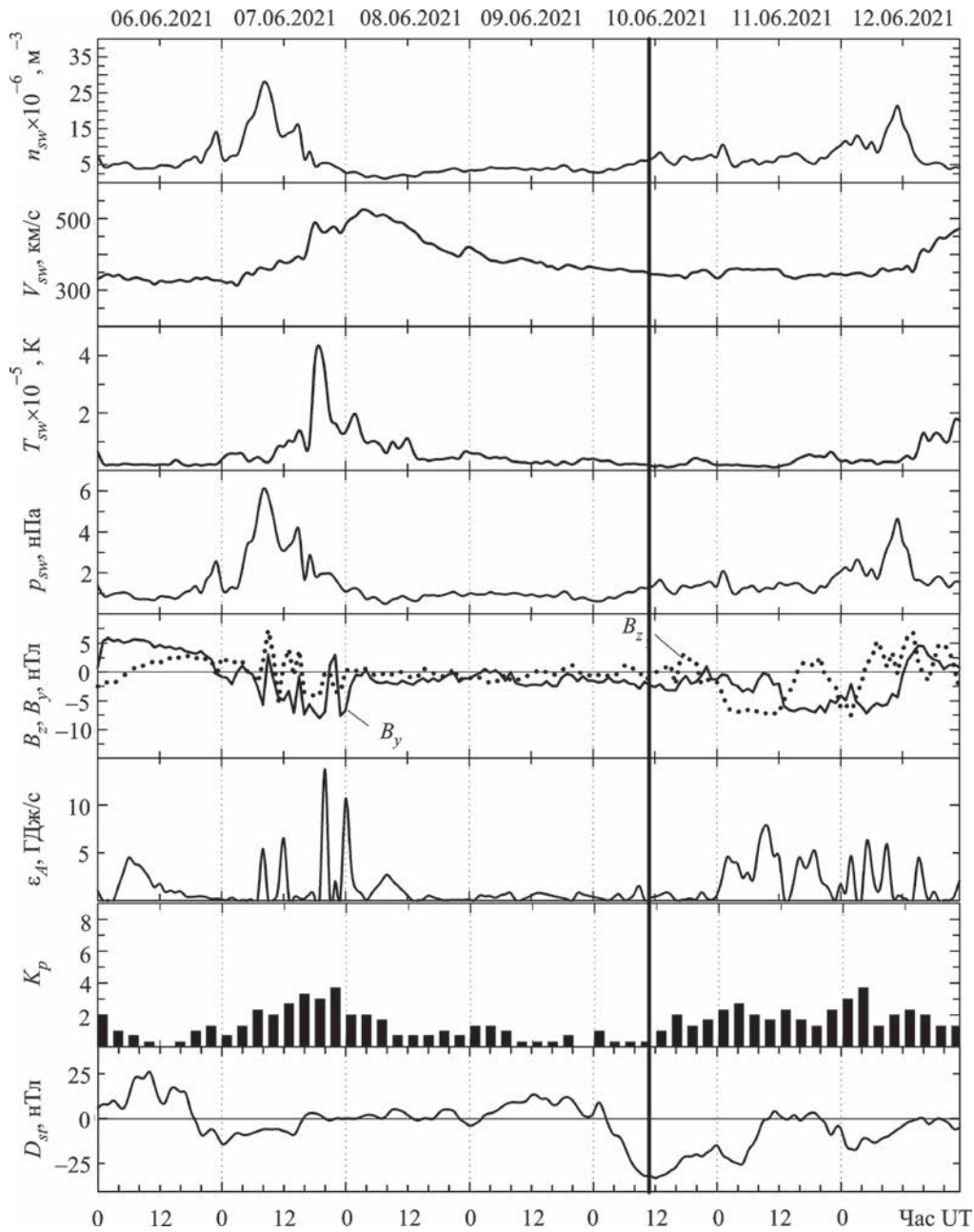


Рис. 1. Часові варіації основних параметрів, що описують стан космічної погоди (панелі зверху вниз): параметрів сонячного вітру – концентрації n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} , температури T_{sw} <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>> і розрахованих значень динамічного тиску p_{sw} , а також B_y -компоненти (лінія) і B_z -компоненти (точки) міжпланетного магнітного поля <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>>, розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу, K_p -індексу, D_{st} -індексу <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>>, – протягом 6–12 червня 2021 р. Вертикальна лінія вказує на момент настання максимальної фази СЗ

5.2. Результати вертикального доплерівського зондування

Часові залежності ДС на частоті $f = 3.2$ МГц, отримані для 9, 10 і 11 червня 2021 р., наведено на рис. 2, 3 і 4. З рис. 2 видно, що в конт-

рольний день 9 червня 2021 р. значну частину часу мало місце уширення ДС. Їх ширина змінювалася від 0.1 до 0.5 Гц. В інтервалах часу 09:40–10:38 і 12:58–15:00 (тут і надалі всесвітній час, UT) мали місце нечітко виражені квазіперіодичні варіації ДЗЧ. Значення квазіперіоду

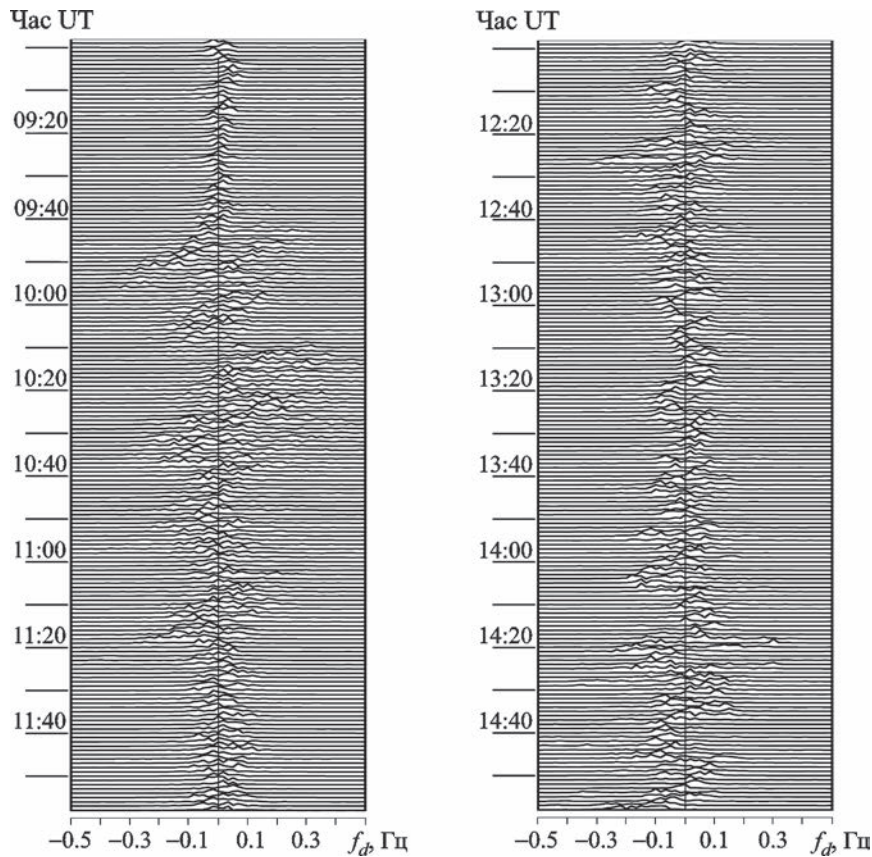


Рис. 2. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 3.2 МГц 9 червня 2021 р.

T змінювалося від 5 до 10 хв, а амплітуда ДЗЧ $f_{da} \approx 0.1 \div 0.2$ Гц.

У контрольний день 11 червня 2021 р. уширення ДС до 0.5 Гц спостерігалось в інтервалах часу 09:06–09:38, 12:08–13:08 (див. рис. 4). В інших інтервалах часу варіації ДЗЧ були незначними. Квазіперіодичні варіації відмічалися з 12:26 до 13:20.

У день СЗ, 10 червня 2021 р., ДС були впорядкованими і вузькосмуговими (див. рис. 3). З 09:50 до 10:38 їх ширина не перевищувала $0.20 \div 0.25$ Гц. У середньому ДЗЧ $f_d \approx 0$ Гц. З 11:19 до 12:01, тобто поблизу максимальної фази СЗ, варіації ДЗЧ стали квазіперіодичними. Водночас $T \approx 6 \div 7$ хв і $f_{da} \approx 0.03 \div 0.06$ Гц. З 12:07 до 12:10 спостерігався нетривалий позитивний сплеск ДЗЧ (до 0.1 Гц). Нове квазіперіодичне збурення ДЗЧ відмічалось в інтервалі часу 12:25–13:12. При цьому $T \approx 5$ хв, а $f_{da} \approx 0.03 \div 0.06$ Гц. Наступне коливання ДЗЧ з $T \approx 12 \div 15$ хв реєструвалося з 13:35 до 14:32.

Розглянемо далі часові варіації ДЗЧ на частоті 4.2 МГц (рис. 5, 6 і 7). З рис. 5 видно, що за день

до затемнення ДС уширювалися до $0.5 \div 0.6$ Гц. В інтервалах часу 09:20–09:52, 10:17–11:07 і 13:00–14:40 варіації ДЗЧ були квазіперіодичними. Значення квазіперіоду змінювалося від 12 до 13 хв, амплітуди – від 0.15 до 0.21 Гц.

У контрольний день 11 червня 2021 р. варіації ДС були скоріше аперіодичними (див. рис. 7). Винятком був інтервал часу 11:28–12:08, коли $T \approx 5$ хв, а $f_{da} \approx 0.20$ Гц. Більшу частину часу відбитий від іоносфери сигнал був відсутній.

У день СЗ квазіперіодичні варіації ДЗЧ мали місце в інтервалах часу 10:26–11:13, 11:22–11:50, 12:27–13:20 та 13:34–15:00 (див. рис. 6). Протягом СЗ і невдовзі після нього $T \approx 7 \div 10$ хв, а $f_{da} \approx 0.10 \div 0.20$ Гц.

5.3. Результати похилого доплерівського зондування

Спочатку розглянемо часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц (рис. 8–10). У контрольний день 9 червня 2021 р. уширення ДС рідко перевищувало 0.1 Гц (див. рис. 8). В інтервалах часу 09:40–10:30 та 13:00–15:00 мали місце ква-

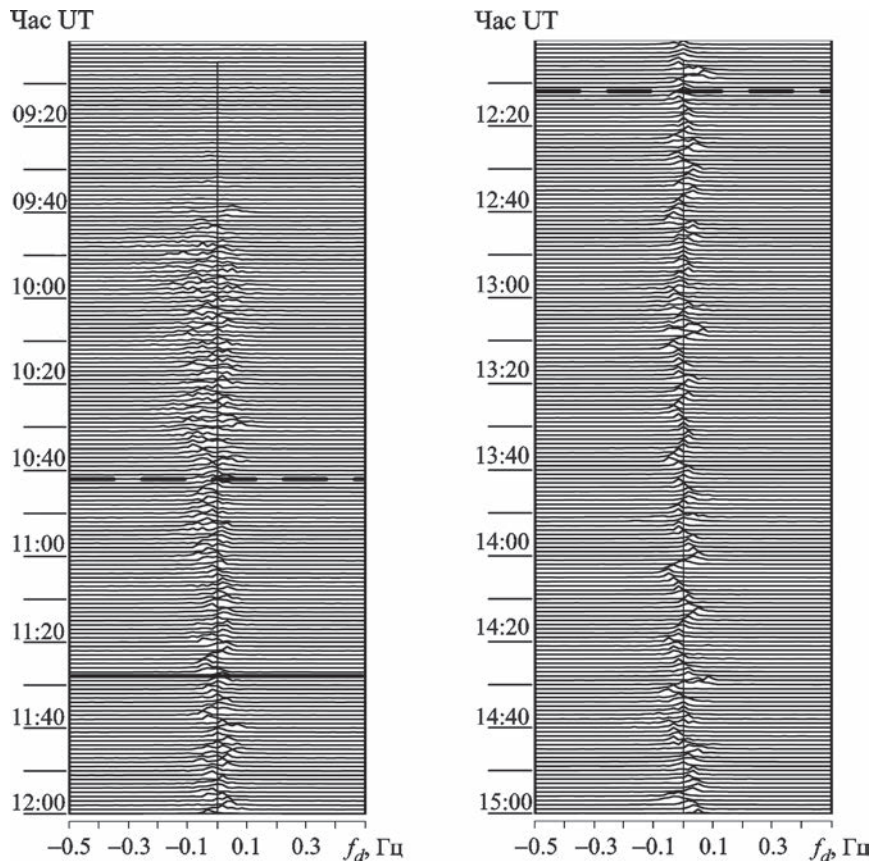


Рис. 3. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 3.2 МГц 10 червня 2021 р. Горизонтальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

зіперіодичні варіації ДЗЧ, $T \approx 5 \div 10$ хв і $f_{da} \approx 0.05 \div 0.10$ Гц.

У контрольний день 11 червня 2021 р. варіації ДЗЧ здебільшого були хаотичними (див. рис. 10). Лише в інтервалі часу 12:20–13:40 спостерігалося квазіперіодичне збурення ДЗЧ з $T \approx 5 \div 6$ хв і $f_{da} \approx 0.05 \div 0.10$ Гц.

У день СЗ, 10 червня 2021 р., до 11:20 ДЗЧ хаотично змінювалося в часі (див. рис. 9). З 11:20 до 12:00 спостерігалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 5$ хв і $f_{da} \approx 0.05$ Гц. З 12:10 до 14:45 також мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ. Для першого цуга $T \approx 6 \div 7$ хв і $f_{da} \approx 0.03 \div 0.06$ Гц, для другого $T \approx 12 \div 15$ хв і $f_{da} \approx 0.03 \div 0.04$ Гц.

Розглянемо ДС на частоті 4.2 МГц (рис. 11–13). За день до СЗ, тобто 9 червня 2021 р., в інтервалах часу 09:20–09:50, 10:10–11:10 та 13:00–14:40 варіації ДС були скоріше квазіперіодичними, ніж хаотичними (див. рис. 11) зі значеннями квазіперіоду та амплітуди ДЗЧ відповідно $2 \div 14$ хв та 0.10 Гц.

Наступного дня після СЗ, тобто 11 червня 2021 р., рівень флуктуацій ДЗЧ збільшився до $0.15 \div 0.20$ Гц (див. рис. 13). Квазіперіодичний характер варіацій відмічався в інтервалах часу 10:30–11:00 та 11:30–12:05 з $T \approx 5$ хв, а $f_{da} \approx 0.10$ Гц.

10 червня 2021 р., в день затемнення, варіації ДС були відносно впорядкованими (див. рис. 12). Квазіперіодичні варіації ДЗЧ спостерігалися в наступних інтервалах часу: 10:30–11:10, 11:20–11:50, 12:30–13:30 та 13:35–15:00. При цьому $T \approx 6 \div 10$ хв, а $f_{da} \approx 0.05 \div 0.10$ Гц.

6. Обговорення

6.1. Квазіперіодичні збурення

Аналіз даних спостережень показав, що в день СЗ мала місце активізація хвильових збурень. Спостерігалося не менше трьох цугів коливань ДЗЧ. Перший з них відмічався протягом СЗ, а два інших починалися приблизно через 10 і 70 хв після закінчення затемнення. Подібні коливан-

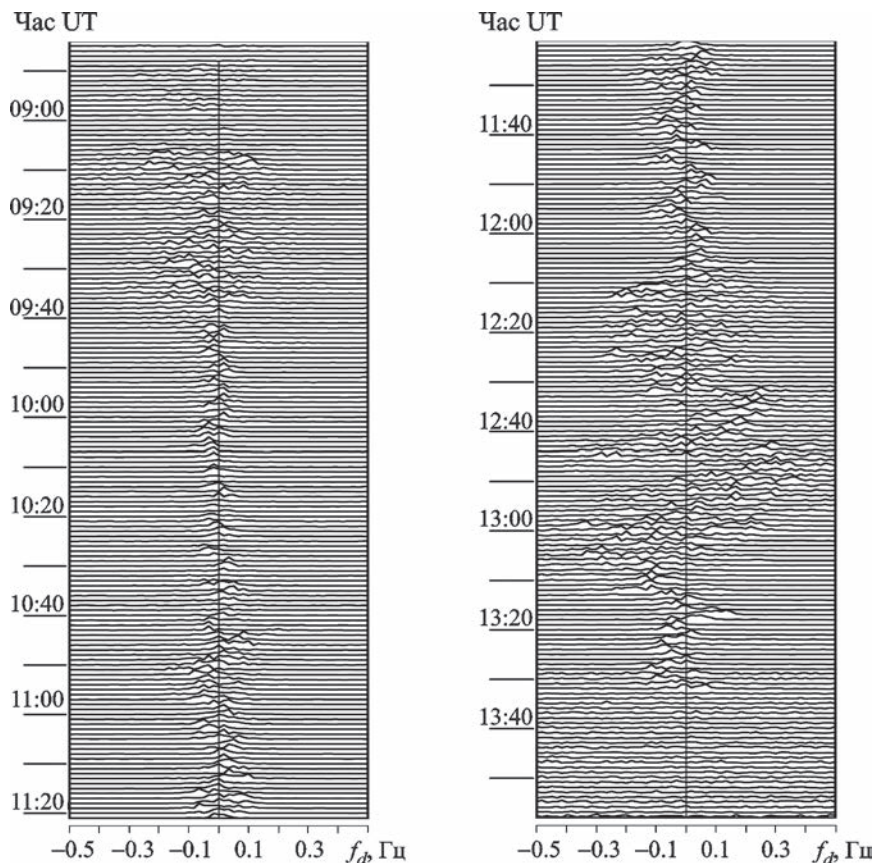


Рис. 4. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 3.2 МГц 11 червня 2021 р.

ня у відповідні моменти часу були відсутні в контрольні дні. На цій підставі вважалось, що вони пов'язані з СЗ. Значення періоду $5 \div 12$ хв свідчить про те, що затемнення супроводжувалося генерацією атмосферних гравітаційних хвиль [46].

Часові варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих трасах були подібними. Проте ДС, загалом кажучи, відрізнялися через різні методики спектрального оцінювання. Крім того, на похилих радіотрасах помітніше виявлялася багатомодовість.

Ступінь покриття диска Сонця була незначною (близько 4 %), аби викликати хвильові збурення безпосередньо над місцем спостереження. Найімовірніше, квазіперіодичні цуги були згенеровані поблизу області, де було максимальне покриття диска Сонця, тобто на відстані ~ 2000 км від радіотрас.

Знаючи $f_{da} \approx 0.03 \div 0.06$ Гц при $f = 3.2$ МГц і $T \approx 7$ хв, можна оцінити амплітуду відносного збурення δ_N концентрації електронів N . Згідно [2], при вертикальному зондуванні

$$\delta_N = \frac{cT}{4\pi L} \frac{f_{da}}{f}, \quad (1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; L – діапазон висот, який дає основний внесок у ДЗЧ. Зі співвідношення (1) для $L \approx 30$ км випливає, що $\delta_N \approx 0.3 \div 0.6$ %.

6.2. Геомагнітний ефект

Значення δ_N пов'язано з амплітудою відносної зміни δ_p тиску p в атмосферних гравітаційних хвилях [47]:

$$\delta_N = A_N \delta_p,$$

де A_N – числовий коефіцієнт, що залежить від періоду атмосферних гравітаційних хвиль, $\delta_p = \delta p / p$. За $T \approx 7$ хв коефіцієнт $A_N \approx 1.24$ [47]. Зі свого боку,

$$\delta_p = \frac{v}{v_s} = \frac{\delta_N}{A_N}, \quad (2)$$

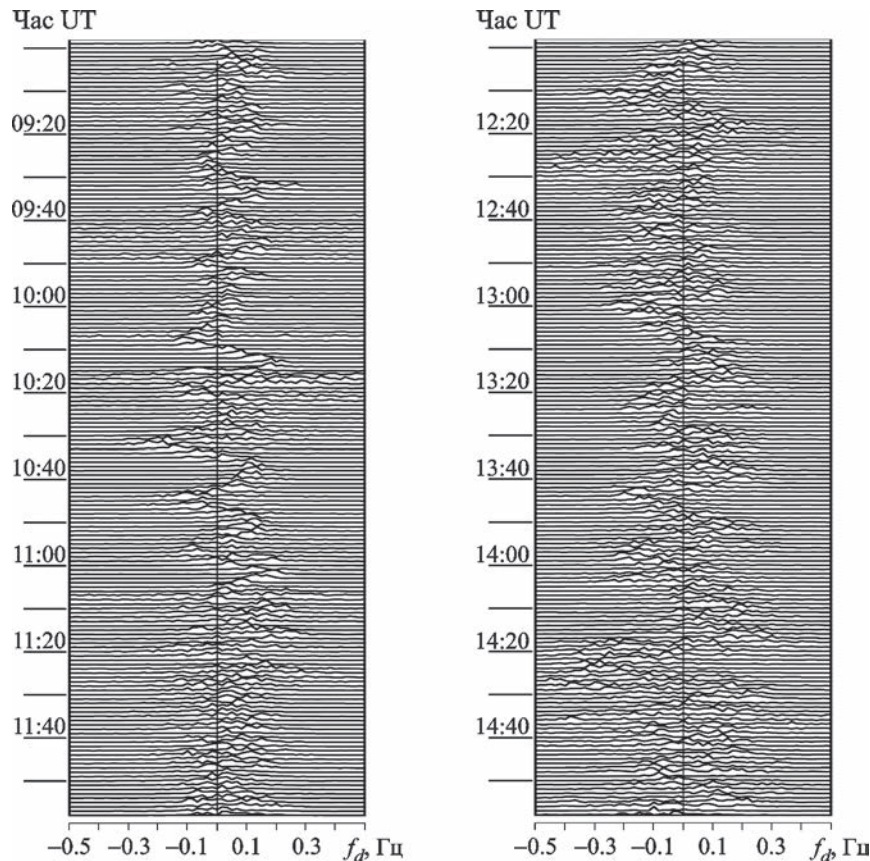


Рис. 5. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 4.2 МГц 9 червня 2021 р.

де v – швидкість частинок у хвилі, v_s – швидкість звуку на висотах динамо-області атмосфери. Квазіперіодичні варіації тиску супроводжуються квазіперіодичними варіаціями швидкості частинок у хвилі, квазіперіодичними варіаціями густини іоносферного струму $\delta j = eNv$ і, зрештою, квазіперіодичними варіаціями X -компоненти (напрямок північ – південь) геомагнітного поля. Для амплітуди варіацій рівня X -компоненти маємо співвідношення [48]

$$\delta X_a \approx \frac{1}{4} \mu_0 e N v H, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна стала, e – заряд електрона, H – висота однорідної атмосфери. Співвідношення (3) справедливе поблизу висоти, де в динамо-області максимальна педерсенівська провідність іонів

$$\sigma_p \approx \varepsilon_0 \frac{\omega_{pi}^2}{v_{in}}. \quad (4) \quad \delta_N(z) = \delta_N(z_1) \exp \left(\int_{z_1}^z \frac{dz}{2H(z)} \right).$$

Тут ε_0 – електрична стала, ω_{pi} і v_{in} – відповідно плазмова частота іонів і частота зіткнень іонів з нейтралами. Співвідношення (4) виконується поблизу верхньої межі динамо-області, тобто поблизу висоти $z \approx 150$ км, де $H \approx 25$ км, а $v_s \approx 400$ м/с, у денний час $N \approx 4 \cdot 10^{11}$ м⁻³.

З (2) маємо $\delta_p \approx (0.24 \div 0.48) \cdot 10^{-2}$ і $v \approx 1 \div 2$ м/с. Тоді з (3) отримуємо $\delta X_a \approx 0.5 \div 1$ нТл. Приблизно таке саме значення δX_a зареєстровано на найближчій магнітній станції “Львів” (рис. 14). Значення періоду $T \approx 6 \div 8$ хв близьке до значення, отриманого методом доплерівського зондування на частоті 3.2 МГц.

Радіохвиля з частотою $f_2 = 4.2$ МГц відбивалася вище, ніж радіохвиля з частотою $f_1 = 3.2$ МГц ($z_2 \approx 200$ км проти ≈ 150 км). Вищій частоті відповідає більше в $f_2/f_1 \approx 1.31$ разів значення f_{da} . Крім того, $f_{da} \propto \delta_N$, а δ_N збільшується зі збільшенням висоти за законом [47]

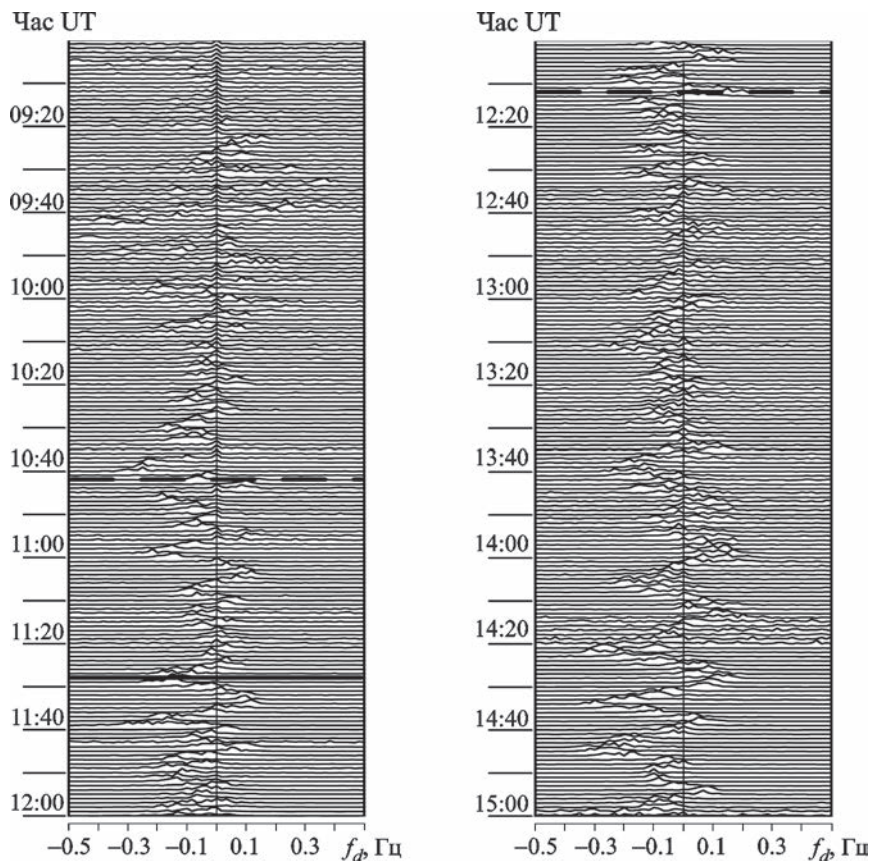


Рис. 6. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 4.2 МГц 10 червня 2021 р. Горизонтальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

За $z_2 \approx 200$ км та середнього за висотою значення $\bar{H} \approx 30$ км відношення $\delta_N(z_2)/\delta_N(z_1) \approx 2.3$. Тоді $f_{da}(f_2)/f_{da}(f_1) \approx 3$. Приблизно в стільки ж разів зареєстрована амплітуда ДЗЧ на частоті 4.2 МГц була вище за амплітуду на частоті 3.2 МГц (0.1 ÷ 0.2 Гц проти 0.03 ÷ 0.06 Гц).

6.3. Аперіодичні збурення

Класична поведінка варіацій ДЗЧ у часі описана у низці робіт (див., наприклад, бібліографію в [2]). СЗ призводить до поступового зменшення концентрації електронів. Близько моменту часу t_m (час відраховується від початку затемнення) за максимальної фази затемнення досягається мінімальне значення N_{\min} . Потім настає поступове збільшення N . ДЗЧ відстежує залежність dN/dt . Виникає двополярна зміна ДЗЧ. Спочатку спостерігається негативний викид ДЗЧ з мінімальним значенням $f_{d\min}$ при $t \approx t/2$. При $t \approx t_m$ значення $f_d \approx 0$ Гц. Потім реєструється позитивний викид зі значенням $f_{d\max}$ при $t \approx 3t_m/2$.

При $t \approx 2t_m$ знов $f_d \approx 0$ Гц. На таку класичну поведінку накладаються природні варіації зенітного кута Сонця і $N(t)$.

Оцінимо аперіодичні варіації ДЗЧ протягом часткового СЗ над Харковом 10 червня 2021 р. Максимальна фаза затемнення становила 0.11, а відносна затінена площа диска $A \approx 4.4\%$. На висотах $z \approx 90 \div 200$ км

$$\frac{N_{\min}}{N_0} \approx \sqrt{\frac{1-A+\xi}{1+\xi}}, \quad (5)$$

де N_0 – незбурене значення N , ξ описує внесок корони Сонця в процес іонізації атмосфери. За даними роботи [2] $\xi \approx 0.25$. При цьому з (5) отримуємо, що $N_{\min}/N_0 \approx 0.98$, а $\delta_N \approx 0.02$.

За даними N_{\min}/N_0 можна оцінити максимальне значення модуля $f_{d\max}$ [2]:

$$|f_{d\max}| \approx \frac{8}{3} f \delta_N \frac{L}{c \Delta t}, \quad (6)$$

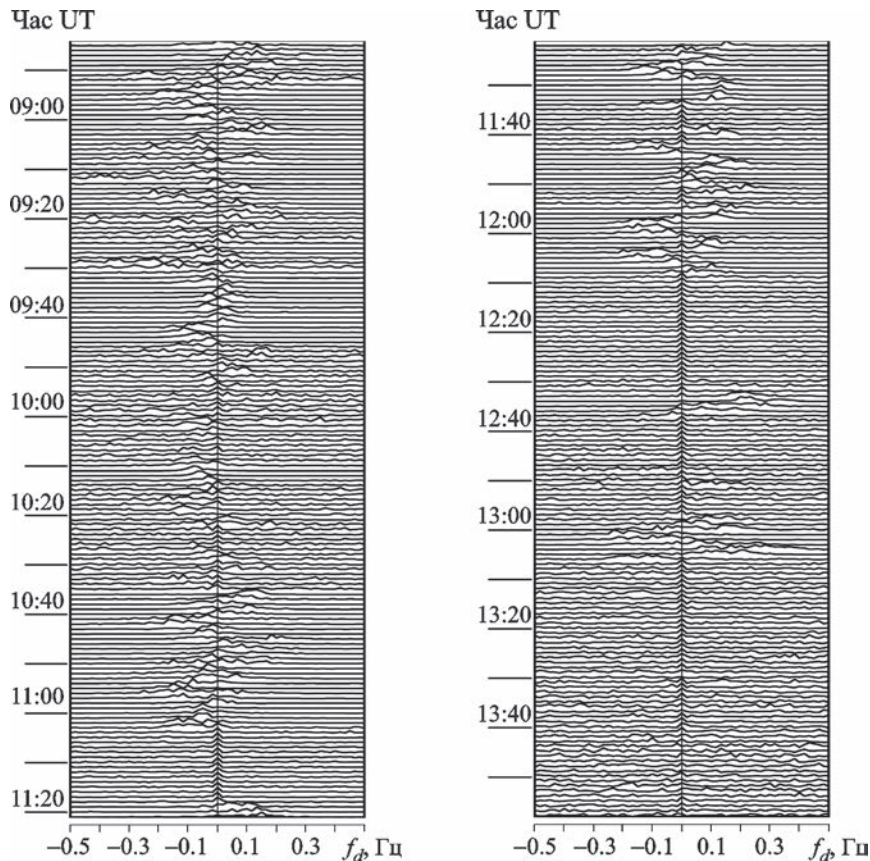


Рис. 7. Часові варіації ДС на вертикальній радіотрасі на частоті 4.2 МГц 11 червня 2021 р.

де Δt – тривалість викиду ($\Delta t \approx t_m \approx 46$ хв). З (6) за $\delta_N \approx 0.02$, $f = 4.2$ МГц, $L \approx 30$ км маємо $|f_{d\max}| \approx 0.008$ Гц. Вимірювання значення 0.008 Гц є межею можливостей доплерівського радара. З цієї причини аперіодичний ефект СЗ не спостерігався.

7. Головні результати

1. Виконано радіофізичні спостереження за динамічними процесами в іоносфері протягом СЗ 10 червня 2021 р. і в контрольні дні. Для спостережень використовувалися методи вертикального і похилого доплерівського зондування. Встановлено, що часові варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих радіотрасах загалом були подібними. ДС на цих радіотрасах, загалом кажучи, відрізнялися. На похилих радіотрасах помітніше позначалася багатомодовість.

2. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності в атмосфері й іоносфері. Спостерігалось не менше трьох хвильових цугів. Значен-

ня періодів ($T \approx 5 \div 12$ хв) і відносних амплітуд ($\delta_N \approx 0.3 \div 0.6$ %) свідчили про те, що хвильові збурення викликані атмосферними гравітаційними хвилями.

3. Оцінено амплітуду геомагнітних варіацій з періодом $6 \div 8$ хв. Вона становила близько $0.5 \div 1$ нТл. Приблизно таке саме значення зареєстровано в Х-компоненті геомагнітного поля на найближчій магнітній станції.

4. Аперіодичний ефект СЗ виявився занадто малим (менше 0.01 Гц), аби його можна було впевнено спостерігати. Малість ефекту зумовлена незначною фазою часткового затемнення над Харковом (не більше 0.11).

Робота виконана за фінансової 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 частково підтримувалася також у межах держбюджетних НДР,

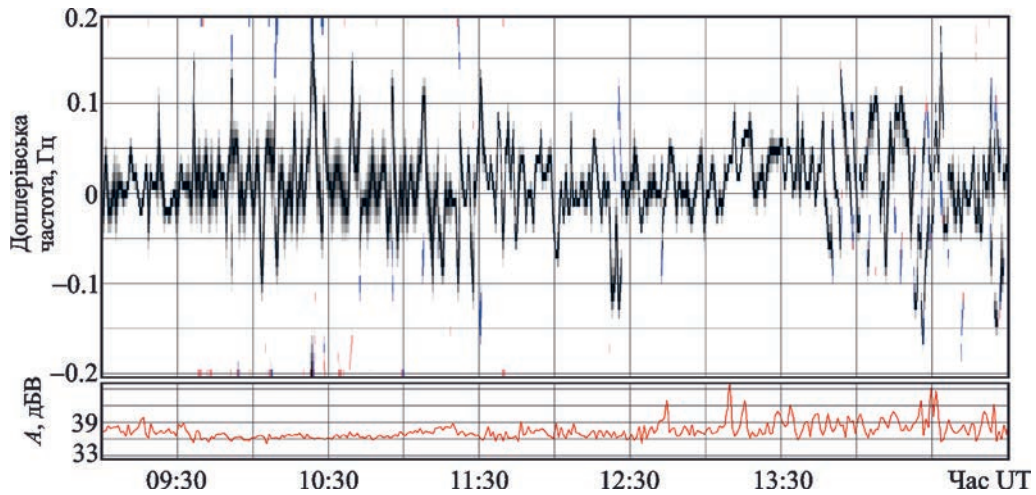


Рис. 8. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 3.2 МГц 9 червня 2021 р.

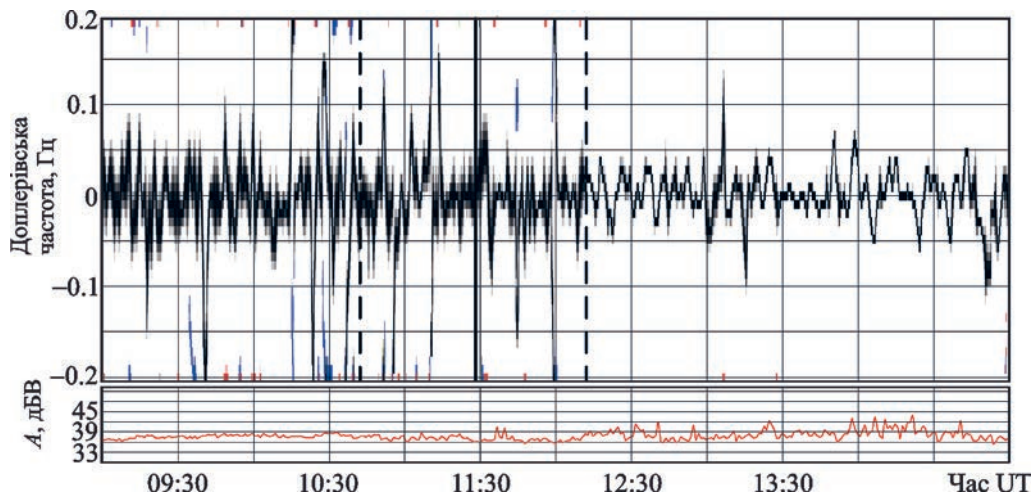


Рис. 9. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 3.2 МГц 10 червня 2021 р. Вертикальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

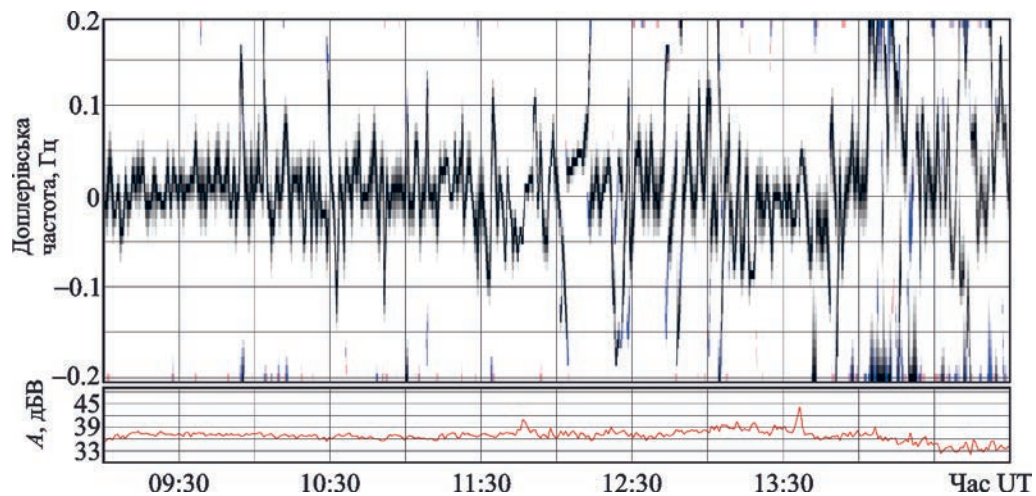


Рис. 10. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 3.2 МГц 11 червня 2021 р.

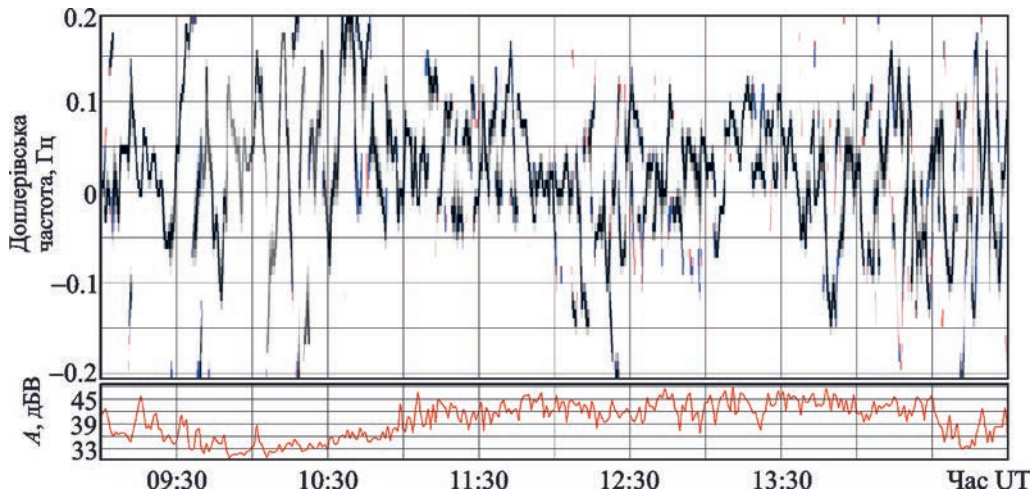


Рис. 11. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 4.2 МГц 9 червня 2021 р.

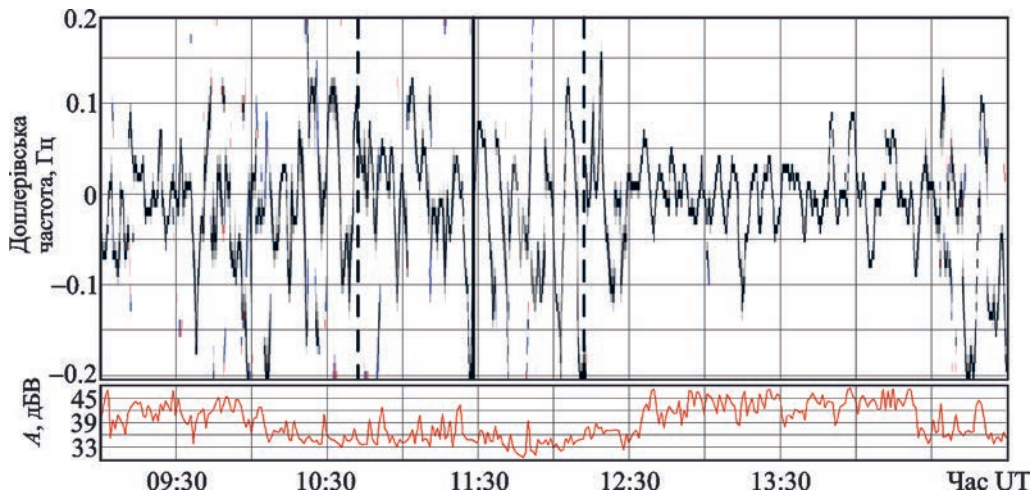


Рис. 12. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 4.2 МГц 10 червня 2021 р. Вертикальні лінії вказують на моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) і закінчення СЗ

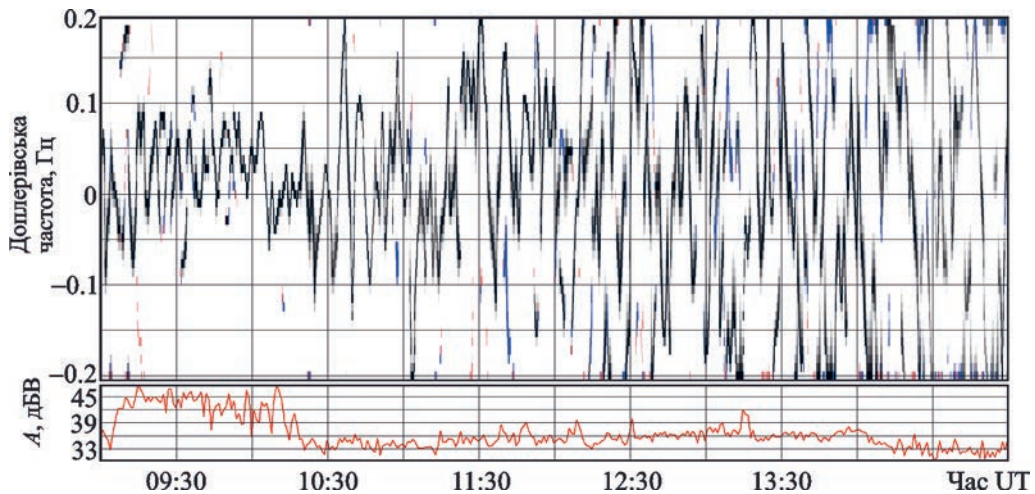


Рис. 13. Часові варіації ДС на похилій радіотрасі на частоті 4.2 МГц 11 червня 2021 р.

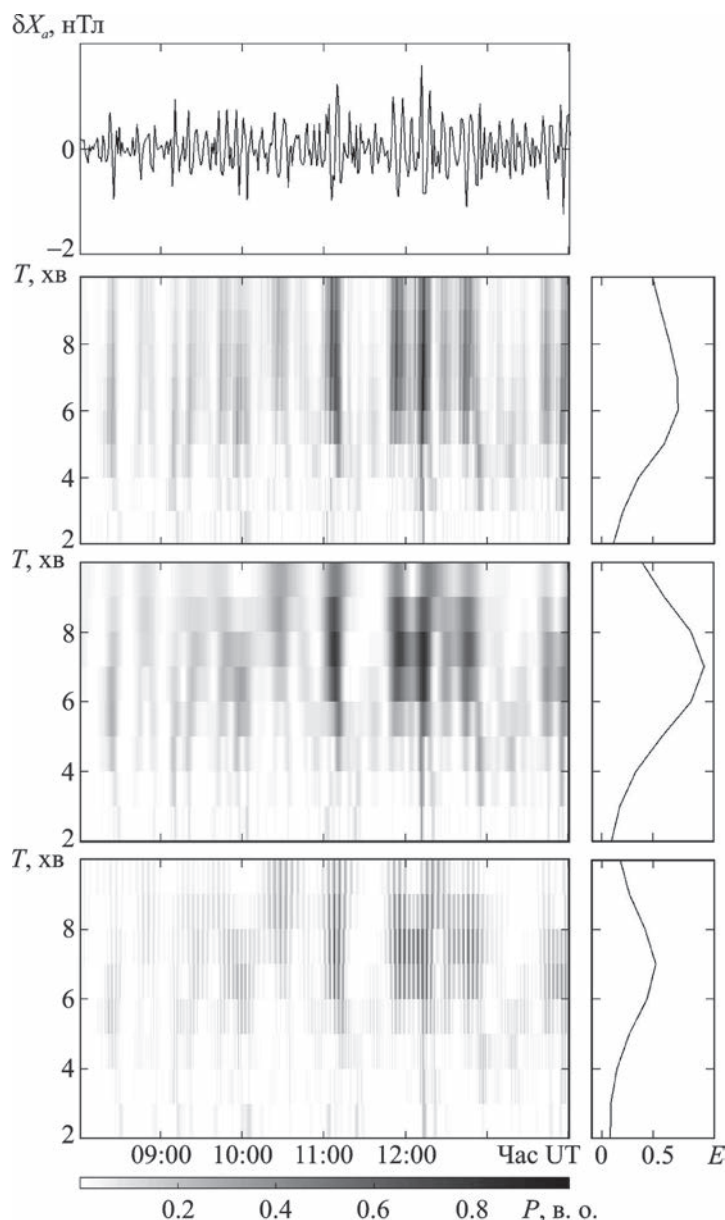


Рис. 14. Часові варіації та результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення (панелі зверху вниз) X -компоненти (напрямок північ – південь) геомагнітного поля в діапазоні періодів $2 \div 10$ хв 10 червня 2021 р. Праворуч показано енергограми (розподіл відносної енергії коливань за періодами)

заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chernogor L. F. and Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* 2008. Vol. 13, Is. 2. P. 120–137.
2. Черногор Л. Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе.* Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
3. Chapman S. The influence of a solar eclipse upon the upper atmospheric ionization. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1932. Vol. 92. P. 413–420.
4. Higgs A. J. Ionospheric Measurements Made During the Total Solar Eclipse of 1940 October 1. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1942. Vol. 102, Is. 1. P. 24–34. DOI: 10.1093/mnras/102.1.24
5. Ledig P. G., Jones M. W., Giesecke A. A., and Chernosky E. J. Effects on the ionosphere at Huancayo, Peru, of the solar eclipse, January 25, 1944. *J. Geophys. Res.* 1946. Vol. 51, Is. 3. P. 411–418. DOI: 10.1029/TE051i003p00411
6. Beynon W. J. G. and Brown G. M., eds. *Solar eclipses and the ionosphere: a symposium held under the auspices of*

- the International Council of Scientific Unions, Mixed Commission on the Ionosphere, in London in August 1955.* London: Pergamon Press., 1956.
7. Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse. *Geomagn. Aeron.* 2010. Vol. 50, Is. 1. P. 96–106. DOI: 10.1134/S0016793210010111
 8. Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagn. Aeron.* 2010. Vol. 50, Is. 3. P. 346–361. DOI: 10.1134/S0016793210030096
 9. Ding F., Wan W., Ning B., Liu L., Le H., Xu G., Wang M., Li G., Chen Y., Ren Z., Xiong B., Hu L., Yue X., Zhao B., Li F., and Yang M. GPS TEC response to the 22 July 2009 total solar eclipse in East Asia. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2010. Vol. 115, Is. A7. id. A07308. DOI: 10.1029/2009JA015113
 10. Le H., Liu L., Ding F., Ren Z., Chen Y., Wan W., Ning B., Xu G., Wang M., Li G., Xiong B., and Hu L. Observations and modeling of the ionospheric behaviors over the east Asia zone during the 22 July 2009 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2010. Vol. 115, Is. A10. id. A10313. DOI: 10.1029/2010JA015609
 11. Sharma S., Dashora N., Galav P., and Pandey R. Total solar eclipse of July 22, 2009: Its impact on the total electron content and ionospheric electron density in the Indian zone. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2010. Vol. 72, Is. 18. P. 1387–1392. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.10.006
 12. Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., and Li N. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2011. Vol. 116, Is. A6. id. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
 13. Chernogor L. F. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* 2011. Vol. 32, Is. 11. P. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
 14. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2011. Т. 16, № 2, С. 164–176.
 15. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagn. Aeron.* 2012. Vol. 52, Is. 6. P. 768–778. DOI: 10.1134/S0016793212050039
 16. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomagn. Aeron.* 2012. Vol. 52, Is. 6. P. 779–792. DOI: 10.1134/S0016793212050040
 17. Madhav Haridas M. K. and Manju G. On the response of the ionospheric *F* region over Indian low-latitude station Gadanki to the annular solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2012. Vol. 117, Is. A1. id. A01302. DOI: 10.1029/2011JA016695
 18. Burmaka V. P. and Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagn. Aeron.* 2013. Vol. 53, Is. 4. P. 479–491. DOI: 10.1134/S001679321304004X
 19. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Черногор Л. Ф. Радиофизические наблюдения акустико-гравитационных волн в ионосфере во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2012. Т. 17, № 4. С. 344–352.
 20. Chernogor L. F. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagn. Aeron.* 2013. Vol. 53, Is. 1. P. 19–31. DOI: 10.1134/S0016793213010052
 21. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., and Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagn. Aeron.* 2013. Vol. 53, Is. 1. P. 113–123. DOI: 10.1134/S0016793213010076
 22. Lyashenko M. V. and Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation results and discussion. *Geomagn. Aeron.* 2013. Vol. 53, Is. 3. P. 367–376. DOI: 10.1134/S0016793213020096
 23. Pitout F., Bletly P.-L., and Alcaydé D. High-latitude ionospheric response to the solar eclipse of 1 August 2008: EISCAT observations and TRANSCAR simulation. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2013. Vol. 105–106. P. 336–349. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.02.004
 24. Chen G., Wu C., Huang X., Zhao Z., Zhong D., Qi H., Huang L., Qiao L., and Wang J. Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. Vol. 120, Is. 4. P. 3009–3020. DOI: 10.1002/2014JA020849
 25. Adekoya B. J. and Chukwuma V. U. Ionospheric F2 layer responses to total solar eclipses at low and mid-latitude. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2016. Vol. 138–139, P. 136–160. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.01.006
 26. Chernogor L. F. Atmosphere-ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomagn. Aeron.* 2016. Vol. 56, Is. 5. P. 592–603. DOI: 10.1134/S0016793216050030
 27. Chernogor L. F. Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2016. Vol. 32, Is. 4. P. 196–206. DOI: 10.3103/S0884591316040024
 28. Marlton G. J., Williams P. D., and Nicoll K. A. On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2016. Vol. 374, Is. 2077. id. 20150222. DOI: 10.1098/rsta.2015.0222
 29. Uryadov V. P., Kolchev A. A., Vybornov F. I., Shumaev V. V., Egoshin A. I., and Chernov A. G. Ionospheric Effects of a Solar Eclipse of March 20, 2015 on Oblique Sounding Paths in the Eurasian Longitudinal Sector. *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. Vol. 59, Is. 6. P. 431–441. DOI: 10.1007/s11141-016-9711-9
 30. Verhulst T. G. W., Sapundjiev D., and Stankov S. M. High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Adv. Space Res.* 2016. Vol. 57, Is. 11. P. 2407–2419. DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.009
 31. Chernogor L. F. and Garmash K. P. Magneto-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomagn. Aeron.* 2017. Vol. 57, Is. 1. P. 72–83. DOI: 10.1134/S0016793216060062
 32. Coster A. J., Goncharenko L., Zhang S.-R., Erickson P. J., Rideout W., and Vierinen J. GNSS Observations of Ionosphere

- ric Variations During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, Is. 24. P. 12041–12048. DOI: 10.1002/2017GL075774
33. Huba J. D. and Drob D. SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system. *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, Is. 12. P. 5928–5935. DOI: 10.1002/2017GL073549
34. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsée D., Bruyninx C., Chevalier J.-M., Clette F., De Backer H., De Keyser J., D’Huys E., Dominique M., Lemaire J. F., Magdalenic J., Marqué C., Pereira N., Pierrard V., Sapundjiev D., Seaton D. B., Stegen K., Van der Linden R., Verhulst T. G. W., and West M. J. Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. *J. Space Weather Space Clim.* 2017. Vol. 7. id. A19. DOI: 10.1051/swsc/2017017
35. Zhang S. R., Erickson P. J., Goncharenko L. P., Coster A. J., Rideout W., and Vierinen J. Ionospheric Bow Waves and Perturbations Induced by the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, Is. 24. P. 12067–12073. DOI: 10.1002/2017GL076054
36. Cherniak I. and Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content Response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, Is. 3. P. 1199–1208. DOI: 10.1002/2017GL075989
37. Dang T., Lei J., Wang W., Burns A., Zhang B., and Zhang S.-R. Suppression of the Polar Tongue of Ionization During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, Is. 7. P. 2918–2925. DOI: 10.1002/2018GL077328
38. Dang T., Lei J., Wang W., Zhang B., Burns A., Le H., Wu Q., Ruan H., Dou X., and Wan W. Global Responses of the Coupled Thermosphere and Ionosphere System to the August 2017 Great American Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. Vol. 123, Is. 8. P. 7040–7050. DOI: 10.1029/2018JA025566
39. Chernogor L. F., Domin I. F., Emelyanov L. Ya., and Lyashenko M. V. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. Vol. 182. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.016
40. 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
41. Wang W., Dang T., Lei J., Zhang S., Zhang B., and Burns A. Physical Processes Driving the Response of the F2 Region Ionosphere to the 21 August 2017 Solar Eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019. Vol. 124, Is. 4. P. 2978–2991. DOI: 10.1029/2018JA025479
42. 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
43. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Жданко Є. Г., Леус С. Г., Поднос В. А. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія “Радіофізика та електроніка”*. 2020. Т. 33. С. 42–59. DOI: 10.26565/2311-0872-2020-33-04
44. Marple Jr. S. L. *Digital spectral analysis with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1987. 492 p.
45. 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. Под ред. С. А. Засухи, О. П. Федорова. *Космический проект “Ионосат-Микро”*. Киев: Академперіодика, 2013. С. 160–182.
46. Gossard E. E. and Hooke W. H. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves, their generation and propagation*. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Publ. Co., 1975. 456 p.
47. Черногор Л. Ф. *Фізика і екологія катастроф: Монографія*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. 556 с.
48. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. 386 с.

REFERENCES

1. CHERNOGOR, L. F. and ROZUMENKO, V. T., 2008. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 13, is. 2, pp. 120–137.
2. CHERNOGOR, L. F., 2013. *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace*. Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
3. CHAPMAN, S., 1932. The influence of a solar eclipse upon the upper atmospheric ionization. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 92, pp. 413–420.
4. HIGGS, A. J., 1942. Ionospheric measurements made during the total Solar eclipse of 1940 October 1. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 102, is. 1, pp. 24–34. DOI: 10.1093/mnras/102.1.24
5. LEDIG, P. G., JONES, M. W., GIESECKE, A. A. and CHERNOGOSKY, E. J., 1946. Effects on the ionosphere at Huancaayo, Peru, of the solar eclipse, January 25, 1944. *J. Geophys. Res.* vol. 51, is. 3, pp. 411–418. DOI: 10.1029/TE051i003p00411
6. BEYNON, W. J. G. and BROWN, G. M., eds., 1956. *Solar eclipses and the ionosphere: a symposium held under the auspices of the International Council of Scientific Unions, Mixed Commission on the Ionosphere, in London in August 1955*. London: Pergamon Press.
7. CHERNOGOR, L. F., 2010. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse. *Geomagn. Aeron.* vol. 50, is. 1, pp. 96–106. DOI: 10.1134/S0016793210010111
8. CHERNOGOR, L. F., 2010. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagn. Aeron.* vol. 50, is. 3, pp. 346–361. DOI: 10.1134/S0016793210030096
9. DING, F., WAN, W., NING, B., LIU, L., LE, H., XU, G., WANG, M., LI, G., CHEN, Y., REN, Z., XIONG, B., HU, L., YUE, X., ZHAO, B., LI, F. and YANG, M., 2010. GPS TEC response to the 22 July 2009 total solar eclipse in East Asia.

- J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 115, is. A7, id. A07308. DOI: 10.1029/2009JA015113
10. LE, H., LIU, L., DING, F., REN, Z., CHEN, Y., WAN, W., NING, B., XU, G., WANG, M., LI, G., XIONG, B. and HU, L., 2010. Observations and modeling of the ionospheric behaviors over the east Asia zone during the 22 July 2009 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 115, is. A10, id. A10313. DOI: 10.1029/2010JA015609
 11. SHARMA, S., DASHORA, N., GALAV, P. and PANDEY, R., 2010. Total solar eclipse of July 22, 2009: Its impact on the total electron content and ionospheric electron density in the Indian zone. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 72, is. 18, pp. 1387–1392. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.10.006
 12. CHEN, G., ZHAO, Z., NING, B., DENG, Z., YANG, G., ZHOU, C., YAO, M., LI, S. and LI, N., 2011. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 116, is. A6, id. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
 13. CHERNOGOR, L. F., 2011. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* vol. 32, is. 11, pp. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
 14. GARMASH, K. P., LEUS, S. G. and CHERNOGOR, L. F., 2011. January 4, 2011 Solar Eclipse Effects over Radio Circuits at Oblique Incidence. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 16, is. 2, pp. 164–176. (in Russian).
 15. CHERNOGOR, L. F., 2012. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagn. Aeron.* vol. 52, is. 6, pp. 768–778. DOI: 10.1134/S0016793212050039
 16. CHERNOGOR, L. F., 2012. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results: 2. Spectral Analysis. *Geomagn. Aeron.* vol. 52, is. 6, pp. 779–792. DOI: 10.1134/S0016793212050040
 17. MADHAV HARIDAS, M. K. and MANJU, G., 2012. On the response of the ionospheric F region over Indian low-latitude station Gadanki to the annular solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 117, is. A1, id. A01302. DOI: 10.1029/2011JA016695
 18. BURMAKA, V. P. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagn. Aeron.* vol. 53, is. 4, pp. 479–491. DOI: 10.1134/S001679321304004X
 19. BURMAKA, V. P., DOMNIN, I. F. and CHERNOGOR, L. F., 2012. Radiophysical observations of acoustic-gravity waves in the ionosphere during solar eclipse of January 4, 2011. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 17, is. 4, pp. 344–352. (in Russian).
 20. CHERNOGOR, L. F., 2013. Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagn. Aeron.* vol. 53, is. 1, pp. 19–31. DOI: 10.1134/S0016793213010052
 21. DOMNIN, I. F., YEMEL'YANOV, L. YA., KOTOV, D. V., LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagn. Aeron.* vol. 53, is. 1, pp. 113–123. DOI: 10.1134/S0016793213010076
 22. LYASHENKO, M. V. and CHERNOGOR, L. F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation results and discussion. *Geomagn. Aeron.* vol. 53, is. 3, pp. 367–376. DOI: 10.1134/S0016793213020096
 23. PITOUT, F., BLELLY, P.-L. and ALCAYDÉ, D., 2013. High-latitude ionospheric response to the solar eclipse of 1 August 2008: EISCAT observations and TRANSCAR simulation. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 105–106, pp. 336–349. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.02.004
 24. CHEN, G., WU, C., HUANG, X., ZHAO, Z., ZHONG, D., QI, H., HUANG, L., QIAO, L. and WANG, J., 2015. Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 120, is. 4, pp. 3009–3020. DOI: 10.1002/2014JA020849
 25. ADEKOYA, B. J. and CHUKWUMA, V. U., 2016. Ionospheric F2 layer responses to total solar eclipses at low and mid-latitude. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 138–139, pp. 136–160. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.01.006
 26. CHERNOGOR, L. F., 2016. Atmosphere-ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomagn. Aeron.* vol. 56, is. 5, pp. 592–603. DOI: 10.1134/S0016793216050030
 27. CHERNOGOR, L. F., 2016. Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* vol. 32, is. 4, pp. 196–206. DOI: 10.3103/S0884591316040024
 28. MARLTON, G. J., WILLIAMS, P. D. and NICOLL, K. A., 2016. On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. *Phil. Trans. R. Soc. A.* vol. 374, is. 2077, id. 20150222. DOI: 10.1098/rsta.2015.0222
 29. URYADOV, V. P., KOLCHEV, A. A., VYBORNOV, F. I., SHUMAEV, V. V., EGOSHIN, A. I. and CHERNOV, A. G., 2016. Ionospheric effects of a solar eclipse of March 20, 2015 on oblique sounding paths in the Eurasian longitudinal sector. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 59, is. 6, pp. 431–441. DOI: 10.1007/s11141-016-9711-9
 30. VERHULST, T. G. W., SAPUNDJIEV, D. and STANKOV, S. M., 2016. High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Adv. Space Res.* vol. 57, is. 11, pp. 2407–2419. DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.009
 31. CHERNOGOR, L. F. and GARMASH, K. P., 2017. Magneto-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomagn. Aeron.* vol. 57, is. 1, pp. 72–83. DOI: 10.1134/S0016793216060062
 32. COSTER, A. J., GONCHARENKO, L., ZHANG, S.-R., ERICKSON, P. J., RIDEOUT, W. and VIERINEN, J., 2017. GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* vol. 44, is. 24, pp. 12041–12048. DOI: 10.1002/2017GL075774
 33. HUBA, J. D. and DROB, D., 2017. SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system. *Geophys. Res. Lett.* vol. 44, is. 12, pp. 5928–5935. DOI: 10.1002/2017GL073549
 34. STANKOV, S. M., BERGEOT, N., BERGHMANS, D., BOLSÉE, D., BRUYNINX, C., CHEVALIER, J. M., CLETTE, F., DE BACKER, H., DE KEYSER, J., D'HUYS, E., DOMINIQUE, M., LEMAIRE, J. F., MAGDALENIĆ, J., MARQUÉ, C., PEREIRA, N., PIERRARD, V., SAPUNDJIEV, D., SEATON, D. B., STEGEN, K., VAN DER LIN-

- DEN, R., VERHULST, T. G. W. and WEST, M. J., 2017. Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. *J. Space Weather Space Clim.* vol. 7, id. A19. DOI: 10.1051/swsc/2017017
35. ZHANG, S.-R., ERICKSON, P. J., GONCHARENKO, L. P., COSTER, A. J., RIDEOUT, W. and VIERINEN, J., 2017. Ionospheric bow waves and perturbations induced by the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* vol. 44, is. 24, pp. 12067–12073. DOI: 10.1002/2017GL076054
36. CHERNIAK, I. and ZAKHARENKOVA, I., 2018. Ionospheric total electron content response to the great American solar eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* vol. 45, is. 3, pp. 1199–1208. DOI: 10.1002/2017GL075989
37. DANG, T., LEI, J., WANG, W., BURNS, A., ZHANG, B. and ZHANG, S.-R., 2018. Suppression of the Polar Tongue of Ionization During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* vol. 45, is. 7, pp. 2918–2925. DOI: 10.1002/2018GL077328
38. DANG, T., LEI, J., WANG, W., ZHANG, B., BURNS, A., LE, H., WU, Q., RUAN, H., DOU, X. and WAN, W., 2018. Global responses of the coupled thermosphere and ionosphere system to the August 2017 Great American Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 123, is. 8, pp. 7040–7050. DOI: 10.1029/2018JA025566
39. CHERNOGOR, L. F., DOMNIN, I. F., EMELYANOV, L. YA. and LYASHENKO, M. V., 2019. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 182, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.016
40. 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
41. WANG, W., DANG, T., LEI, J., ZHANG, S., ZHANG, B. and BURNS, A., 2019. Physical processes driving the response of the F2 region ionosphere to the 21 August 2017 solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 124, is. 4, pp. 2978–2991. DOI: 10.1029/2018JA025479
42. 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
43. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., ZHDANKO, Y. H., LEUS, S. G. and PODNOS, V. A., 2020. Software and hardware system of multi-frequency oblique sounding the ionosphere. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Radio Physics and Electronics"*. is. 33, pp. 42–59. (in Ukrainian). DOI: 10.26565/2311-0872-2020-33-04
44. MARPLE JR., S. L., 1987. *Digital spectral analysis with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
45. CHERNOGOR, L. F., GARMASH, K. P., PODNOS, V. A. and TYRNOV O. F., 2013. The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio Physical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. In: S. A. ZASUKHA and O. P. FEDOROV, eds. *Space Project "Ionosat-Micro"*. Kyiv, Ukraine: Academperiodika Publ., pp. 160–182. (in Russian).
46. GOSSARD, E. E. and HOOKE, W. H., 1975. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves, their generation and propagation*. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Publ. Co.
47. CHERNOGOR, L. F., 2012. *Physics and Ecology of Distasters*. Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
48. CHERNOGOR, L. F., 2009. *Radio Physical and Geomagnetic Effects of Rocket Launches*. Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).

L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Y. H. Zhdanko,
S. G. Leus, and Y. Luo

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

FEATURES OF IONOSPHERIC EFFECTS FROM THE PARTIAL SOLAR ECLIPSE OVER THE CITY OF KHARKIV ON 10 JUNE 2021

Purpose: Solar eclipses pertain to high-energy sources of disturbance in the subsystems of the Sun–interplanetary–medium–magnetosphere–ionosphere–atmosphere–Earth and the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere systems. During the solar eclipse, the coupling between the subsystems in these systems activates, and the parameters of the dynamic processes become disturbed. Investigation of these processes contributes to understanding of the structure and dynamics of the subsystems. The ionospheric response to the solar eclipse depends on the season, local time, magnitude of the solar eclipse, phase of the solar cycle, the observation site, the state of space weather, etc. Therefore, the study of the effects, which each new solar eclipse has on the ionosphere remains an urgent geophysics and radio physics problem. The purpose of this paper is to describe the radio wave characteristics and ionospheric parameters, which accompanied the partial solar eclipse of 10 June 2021 over the City of Kharkiv.

Design/methodology/approach: To make observations, the means of the HF Doppler measurements at vertical and oblique incidence available at the V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory were employed. The data obtained at the “Lviv” Magnetic Observatory were used for making intercomparison.

Findings: The radiophysical observations have been made of the dynamic processes acting in the ionosphere during the solar eclipse of 10 June 2021 and on the reference days. The temporal variations in the Doppler frequency shift observed at vertical and oblique radio paths have been found to be, as a whole, similar. Generally speaking, the Doppler spectra over these radio propagation paths were different. Over the oblique radio paths, the number of rays was greater. The solar eclipse was accompanied by wave activity enhancement in the atmosphere and ionosphere. At least three wave trains were observed. The values of the

periods (about 5–12 min) and the relative amplitudes of perturbations in the electron density ($\delta_N \approx 0.3–0.6\%$) give evidence that the wave disturbances were caused by atmospheric gravity waves. The amplitude of the 6–8-min period geomagnetic variations has been estimated to be 0.5–1 nT. Approximately the same value has been recorded in the X component of the geomagnetic field at the nearest Magnetic Observatory. The aperiodic effect of the solar eclipse has appeared to be too small (less than 0.01 Hz) to be observed confidently. The smallness of the effect was predetermined

by an insignificant magnitude of the partial eclipse over the City of Kharkiv (no more than 0.11).

Conclusions: The features of the solar eclipse of 10 June 2021 include an insignificant magnitude of the aperiodic effect and an enhancement in wave activity in the atmosphere and ionosphere.

Key words: solar eclipse, ionosphere, Doppler spectrum, Doppler frequency shift, electron density, geomagnetic field, atmospheric gravity wave

Стаття надійшла до редакції 5.08.2021