

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.003>

УДК 550.388

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш

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

Іоносферні процеси протягом часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р.

Сонячне затемнення (СЗ) надає дослідникові унікальну можливість простежити за динамікою системи Земля (її внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера та варіаціями геофізичних полів на інтервалі часу в декілька годин. Збурення в цій системі, викликані різними СЗ, істотно відрізняються. Параметри цих збурень залежать від часу настання СЗ, стану космічної погоди, сезону, положення в циклі сонячної активності, географічних координат і величини покриття диска Сонця. Слід мати на увазі, що для кожного затемнення притаманні свої індивідуальні особливості. Мета даної роботи — аналіз результатів іонозондових спостережень збурень в іоносфері над Харковом, які супроводжували СЗ 10 червня 2021 р. Протягом СЗ в Харкові максимальна фаза становила $M_{\max} = 0.112$, а відносна площа покриття — $A_{\max} = 4.4\%$. Затемнення розпочалося о 10:42 UT (13:42 LT), а закінчилося о 12:12 UT (15:12 LT). Максимальна фаза мала місце об 11:28 UT (14:28 LT). Для вивчення особливостей варіацій діючих висот і частот, які спостерігались під час СЗ, використано цифровий іонозонд, розташований у Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Проведено аналіз стану космічної погоди. В інтервалі часу спостереження СЗ, а також у контрольні моменти часу 6 та 9 червня 2021 р. стан космічної погоди був сприятливим для спостереження хвильових збурень, про що свідчить індекс $K_p = 0.3$. Проаналізовано висотно-частотні характеристики вертикального зондування іоносфери та встановлено особливості іоносферних процесів, які супроводжували часткове СЗ та яких не було у контрольний день. СЗ супроводжувалося підсиленням хвильової активності в іоносфері. Цуги, які

спостерігалися на висоті максимуму шару F_2 , мали період 5 і 14 хв і відносну амплітуду коливань концентрації електронів 0.6 і 1.25 % відповідно. На висоті 240 км відносна амплітуда хвиль з періодом приблизно 14 хв збільшувалася до 3 %. Період 14 хв мають атмосферні гравітаційні хвилі, а період 5 хв — хвилі електромагнітної природи. Виявлено різке та значне збільшення від 380 до 560 км діючої висоти відбиття радіохвилі поблизу моменту найбільшої фази СЗ. Виявлено слабке (до 3.3 %) зменшення концентрації електронів, яке запізнювалося по відношенню до максимальної фази затемнення приблизно на 12.5 хв. Оцінено коефіцієнт втрат електронів ($1.33 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$) і швидкість іоноутворення ($3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ c}^{-1}$).

Ключові слова: сонячне затемнення, іонозонд, особливості іоносферних процесів, квазіперіодичне збурення, аперіодичне збурення, параметри іоносфери.

ВСТУП

Сонячне затемнення (СЗ) надає дослідникові унікальну можливість простежити за динамікою системи Земля (її внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера та варіаціями геофізичних полів на інтервалі часу в кілька годин [18]. Збурення в цій системі, викликані різними СЗ, істотно відрізняються. Параметри цих збурень залежать від часу настання СЗ, стану космічної погоди, сезону, положення в циклі сонячної активності, географічних координат і ступеня покриття диска Сонця [18].

Дослідження ефектів сонячного затемнення (СЗ) в іоносфері мають столітню історію. Перші радіофізичні спостереження ефектів СЗ були виконані ще в 1912 р. [44]. Спочатку вивчався вплив затемнень на поширення радіохвиль в іоносфері. Починаючи із затемнення 31 серпня 1932 р., стали вивчатися динамічні процеси в іоносфері, які супроводжували затемнення [57]. Найпоширенішим методом спостереження був метод вертикального зондування, який використовує іоносферні станції (іонозонди) [8, 11, 12, 16, 22, 23]. Арсенал використовуваних методів значно розширився в 1960-х рр. Стали широко використовуватися супутникові та ракетні методи [3, 25, 41, 51, 53], метод некогерентного розсіяння [1, 2, 7, 13, 26, 29, 42, 43, 45, 49, 56, 58], а також ціла низка інших методів [5, 7, 14, 17, 20, 24, 27, 28, 30—32, 34—40, 46, 48, 50, 52, 54, 55].

У цих роботах описано зменшення концентрації електронів у всіх областях іоносфери, зменшення температур електронів та іонів, зміну швидкості руху плазми, потоків плазми та тепла, генерацію хвильових збурень у верхній іоносфері та інші ефекти, що супроводжували СЗ з різними фазами в різних регіонах земної кулі.

Результати іонозондових спостережень минулих років представлені в роботах [8, 11, 12, 16, 22, 23]. Серед сучасних робіт наведемо дослідження [4, 5, 15, 19, 20, 24].

Іонозондові спостереження показали, що СЗ супроводжуються низкою стійких ефектів: зменшенням концентрації електронів N , збільшенням діючої висоти відбиття, запізненням зменшень N відносно моменту досягнення максимальної фази затемнення, а також генерацією квазіперіодичних (хвильових) збурень в іоносфері. Водночас слід мати на увазі, що кожному затемненню притаманні свої індивідуальні особливості. Наприклад, специфікою СЗ 20 березня 2015 р. було те, що воно відбувалося на тлі релаксуючої геокосмічної бурі, яка розпочалася 17 березня 2015 р. [19, 20].

Мета даної роботи — аналіз результатів іонозондових спостережень збурень в іоносфері над Харковом, що супроводжували СЗ 10 червня 2021 р.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

Особливістю СЗ 10 червня 2021 р. було те, що воно належало до кільцеподібних. Функція покриття на рівні Землі не перевищувала 89 %, а фаза $M = 0.943$. Це мало місце над островом Гренландія з 10:33:16 UT до 10:36:56 UT (тут і далі — час всесвітній).

Почалося затемнення над територією Канади о 08:12:20, а закінчилося о 13:11:19 (табл. 1). Кільцеподібне СЗ спостерігалось з 09:49:50

Таблиця 1. Загальні відомості про сонячне затемнення

Явище	Час UT
Момент початку СЗ	08:12:20
Момент першої появи кільцевого СЗ на земній кулі	09:49:50
Момент настання максимальної фази СЗ	10:41:54
Момент крайньої появи кільцеподібного СЗ на земній кулі	11:33:43
Момент закінчення СЗ	13:11:19

до 11:33:43. Місячна тінь поступово переміщувалася від Канади в Атлантичний океан, Північний Льодовитий океан, Північний полюс, північну частину Європи й Азії. Тінь простягалася до нижньої частини Італії, Греції, України, захопила більшу частину Росії, а також Монголію та Китай.

Для СЗ в Харкові $M_{\max} = 0.11$ (точніше 0.112), а $A_{\max} = 4.4\%$. Затемнення розпочалось о 10:42 UT (13:42 LT), а закінчилося о 12:12 UT (15:12 LT). Максимальна фаза мала місце об 11:28 UT (14:28 LT).

ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для вивчення особливостей варіацій діючих висот і частот, які спостерігалися під час СЗ, використано цифровий іонозонд, розташований у Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Зондувальні радіоімпульси тривалістю 100 мкс із частотою надходження 125 Гц, несучою частотою на сітці із 400 частот, рівномірно розподілених у діапазоні 1.5...8 МГц або 1...16 МГц, і потужністю до 1.5 кВт у імпульсі випромінюються кінцевим ширококутовим радіочастотним підсилювачем потужності передавача «Бриг-2» через антену типу «вертикальний ромб» із коефіцієнтом підсилення 1...10 у залежності від частоти. Радіоприймальний пристрій на базі доробленого приймача IC-R75 під керуванням спеціального контролерного блоку змінює частоту прийому синхронно зі зміною частоти зондувальних радіоімпульсів. Контролерний блок також здійснює оцифровування прийнятого сигналу в діапазоні діючих висот 100...625 км і передачу даних на збереження до зовнішнього комп'ютера. Крок за частотою складає 11...12 кГц, за висотою — 2.1 км. Похибка оцінки критичних частот іоносферних шарів зазвичай не перевищувала 20 кГц.

Для оцінки періодів коливань застосовувався системний спектральний аналіз, описаний у роботі [33].

Аналіз стану космічної погоди проведено авторами на основі даних, які надано сайтами [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] та [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>].

Концентрація протонів у сонячному вітрі варіювала від $5 \cdot 10^6$ до $(25...30) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ 7 та 12 червня 2021 р. (рис. 1). Швидкість протонів збільшувалася від 350 до 500...550 км/с 7 і 8 червня 2021 р. Різкий сплеск у варіаціях температури протонів від $0.2 \cdot 10^5$ до $4.5 \cdot 10^5 \text{ К}$ спостерігався о другій половині доби 7 червня 2021 р. Значення варіацій тиску частинок переважно лежали у межах від 1 до 5...6 нПа, вони реєструвались у тих же проміжках часу, що й варіації концентрації протонів. Горизонтальна та вертикальна складові міжпланетного магнітного поля (B_y і B_z) флюктуювали від 5...8 до -5...-8 нТл. 7, 11 і 12 червня 2021 р. компонент B_z змінював знак на протилежний. Це призводило до геомагнітних збурень і слабкої магнітної бурі. Сплески функції Акасофу A_A від значень порядку 1 до 8...13 ГДж/с спостерігалися 7, 11 і 12 червня 2021 р. Індекс K_p одночасно зі сплесками основних параметрів збільшувався від 0...1 до 3...4. З 6 на 7 червня та з середини доби 10 до 12 червня 2021 р. реєструвалось зменшення індексу D_{st} до -10...-33 нТл, що свідчило про слабку магнітну бурю.

В інтервалі часу спостереження СЗ, а також у контрольні моменти часу 6 та 9 червня 2021 р. стан космічної погоди був сприятливим для спостереження хвильових збурень, про що свідчить індекс $K_p = 0.3$.

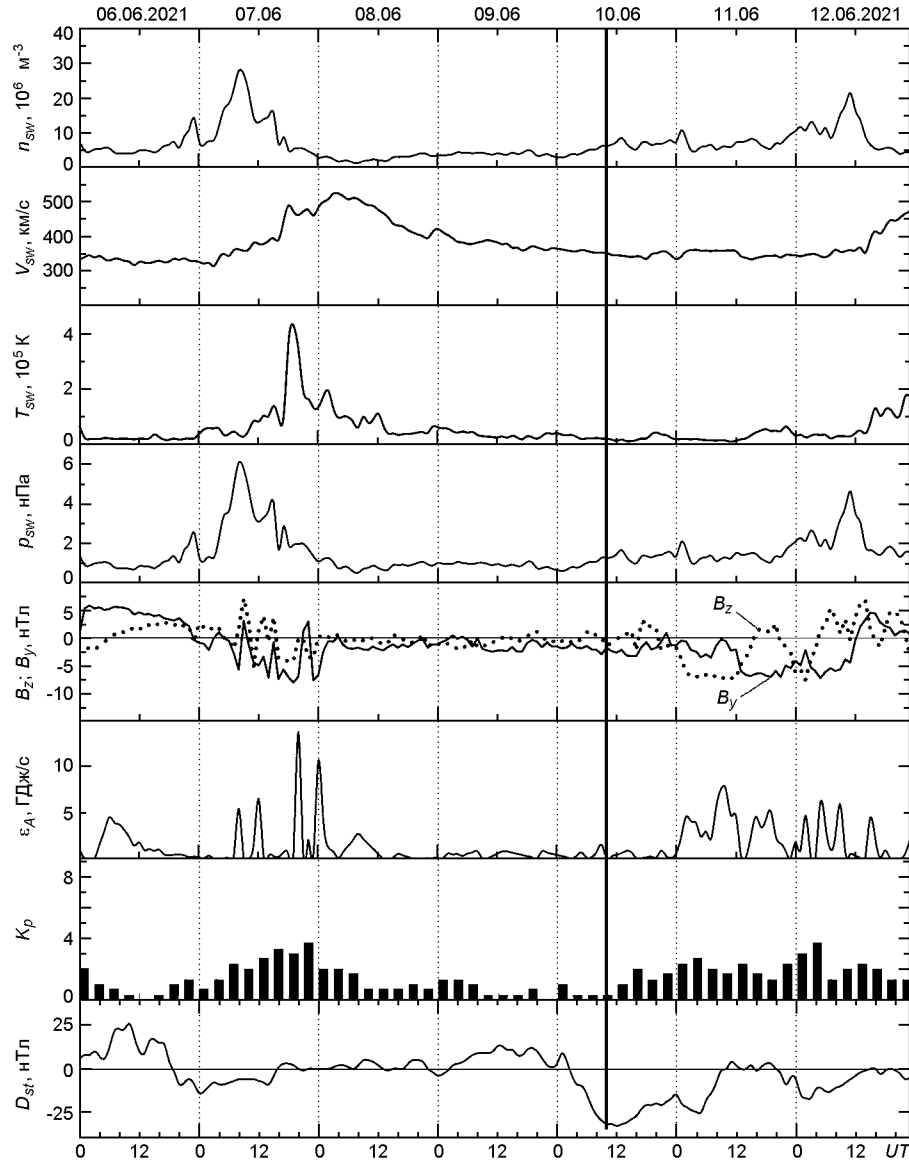


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} (за даними сайту <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>) та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля (за даними супутника ACE); розрахованих значень енергії ϵ_A , яка передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу; індексів K_p та D_{st} (за даними сайту <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/>) за період 06—12 червня 2021 р. Вертикальною лінією показано момент головної фази СЗ

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Варіації параметрів іонограм. Реєстрація іонограм 10 червня 2021 р. розпочалась о 10:08 (тут і далі час київський літній $t = UT + 3$ год) з періодичністю одна іонограма за хвилину, а закінчилась о 18:08. З початку реєстрації був наявний сильний спорадичний шар E_s типу c

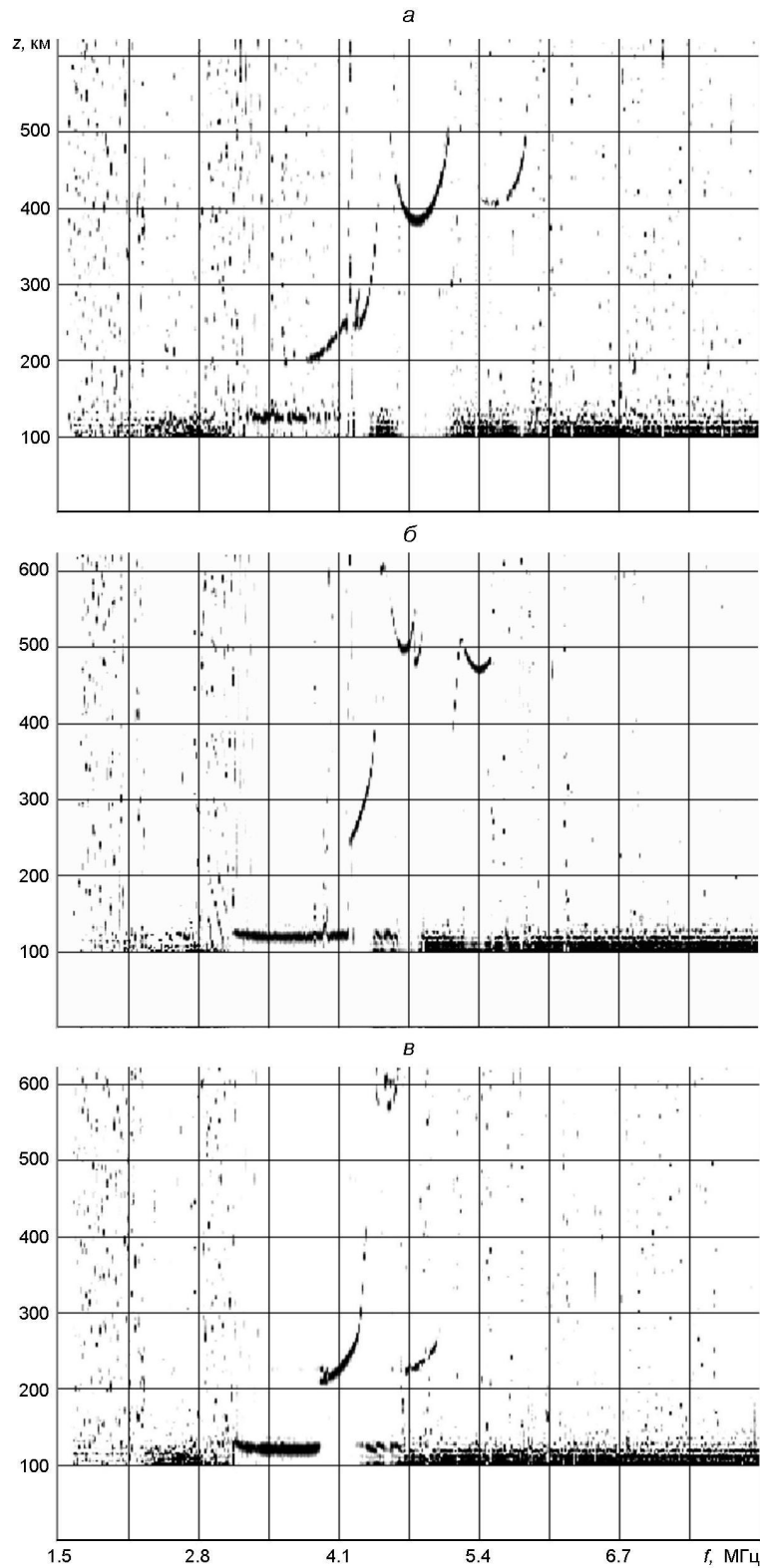


Рис. 2. Приклади іонограм, які демонструють: *а* — прояви РІЗ у діапазоні частот 4.2... 4.3 МГц, *б* — V-подібного сліду в діапазоні частот 4.5... 5 МГц, *в* — різке збільшення діючої висоти до 560 км у діапазоні частот 4.5... 4.6 МГц поблизу максимальної фази СЗ

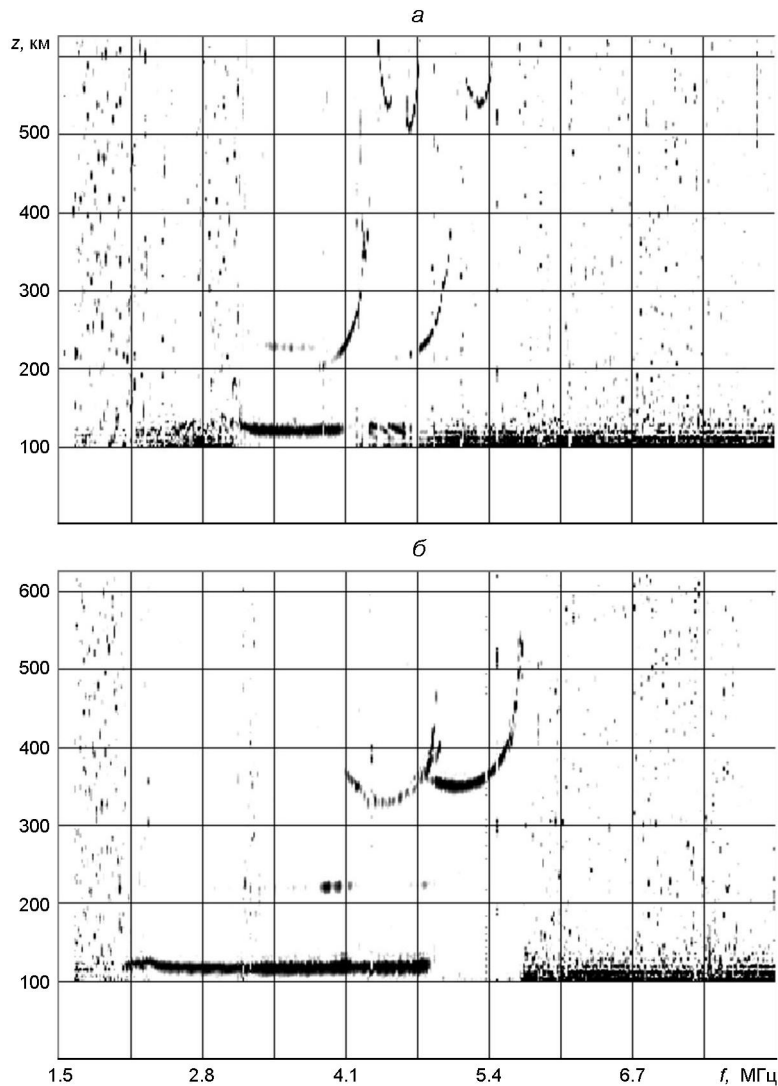


Рис. 3. Приклади іонограм, які демонструють: *а* — розшарування плазми та різке збільшення діючої висоти поблизу максимальної фази СЗ; *б* — прояв РІЗ у діапазоні частот 4.8...5.0 МГц

(f_oE_s 7.5...8 МГц, f_bE_s 4.2...4.5 МГц), який екранував шар F_1 , що лежав вище, і частково — F_2 . Повне екранування відбиттів від F -області спостерігалось від 12:00 до 12:10. Далі шар E_s поступово почав слабшати. До 13:00 f_oE_s зменшилася до 5.2 МГц, а f_bE_s — до 4 МГц. До моменту початку затемнення о 13:30 f_oE_s та f_bE_s зменшились до 3.5 МГц, що дозволило спостерігати під час затемнення частково шар F_1 і повністю — F_2 .

Приблизно від 13:30 на діючій висоті близько 300 км за частот 4.2...4.3 МГц у сліді шару F_1 з'явилося викривлення, характерне для проходження рухомих іоносферних збурень (РІЗ) — злам сліду, який рухається з часом вниз (рис. 2а). Ці викривлення сліду шару F_1 на діючих висотах 300...400 км при частотах 4...4.5 МГц періодично виникали аж до закінчення затемнення — до 15:20...15:30.

Приблизно від 14:10 у сліді шару F_2 (діючі висоти 450...500 км, частоти 4.5...5 МГц) також виникали викривлення, характерні для проходження РІЗ (злам сліду та розшарування) та наявності горизонтального градієнта електронної щільності (V-подібні сліди) (рис. 2б). Дані процеси в F_2 -сліді спостерігались приблизно до 14:40.

Діюча висота F_2 -сліду о 13:30 мала значення 380 км. Приблизно від 13:50 спостерігається її збільшення, до 14:35 вона досягла максимального значення близько 560 км (рис. 2в). Далі мало місце її поступове зменшення, та о 15:05 вона зменшилась до 430 км.

О 14:39 спостерігалось також суттєве збільшення діючої висоти до 530 км та розшарування іоносферного шару F_2 (рис. 3а). Підкреслимо, що ці ефекти, як і попередні, мали місце поблизу максимальної фази СЗ.

Від 15:30 знову почав підсилюватися спорадичний шар E_s та до 15:40 критична частота f_oE_s збільшилась до 5...5.5 МГц, а частота екранування f_bE_s — до 4.5...5 МГц. У результаті на іонограмах до 17:30...17:35 спостерігався лише незначний (5...10 %) фрагмент сліду шару F_2 поблизу критичної частоти. Також від 16:00 до 16:10 та від 16:20 до 16:25 мало місце повне екранування відбиттів від F -області.

Слід також згадати про появу від 17:20 до 17:30 на сліді шару F_2 (діюча висота приблизно 400 км, частоти 4.5...5 МГц) викривлень, які свідчили про проходження РІЗ і наявність нахилу рівня відбиття (рис. 3б).

Варіації критичної частоти шару F_2 . Часові залежності критичної частоти f_oF_2 для дня зі СЗ, контрольного дня 11 червня 2021 р. та моделі IRI-2016 наведено на рис. 4. Видно, що згідно з модельними уявленнями у ранковий і денний час значення f_oF_2 збільшуються приблизно до 6.2 МГц. Максимальне значення 6.2 МГц має місце біля 12:00. Потім частота f_oF_2 зменшується до 5.4 МГц, що очікується приблизно о 16:00...17:00. Далі має місце передвечірній максимум f_oF_2 5.8 МГц о 21:00.

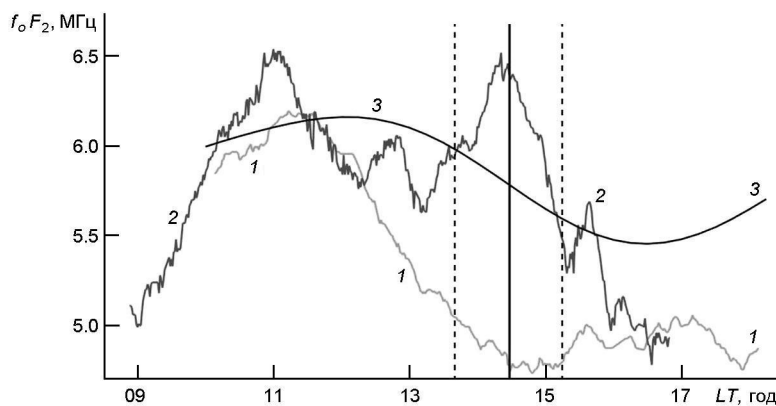


Рис. 4. Часові залежності критичної частоти f_oF_2 : 1 — 10 червня 2021 р., 2 — 11 червня 2021 р., 3 — модель IRI-2016 [https://ccmc.gsfc.nasa.gov]. Вертикальними лініями показано моменти початку, максимальної фази (суцільна лінія) та закінчення СЗ

Залежність f_oF_2 у контрольний день 11 червня 2021 р. якісно повторювала модельну залежність f_oF_2 (див. рис. 4). Частота зменшувалась в інтервалі часу 11:00...14:00. На плавний хід f_oF_2 накладалися флуктуації. Максимальне значення f_oF_2 6.5 МГц спостерігалось приблизно о 11:00 і 14:15. Мінімальне значення 5.6 МГц відмічалось біля 13:15.

У день СЗ частота f_oF_2 збільшувалась приблизно до 11:10. Потім вона слабо змінювалась протягом 30 хв. При цьому $f_oF_{2\max}$ 6.2 МГц. Від 11:40 і до 15:15 спостерігалася тенденція до її зменшення від 6.2 до 4.8 МГц. Далі мало місце збільшення частоти від 4.8 до 5 МГц, за яким наставали її флуктуації з середнім періодом близько 14 хв і амплітудою f_a 30 кГц.

Протягом СЗ спостерігались квазіперіодичні варіації f_oF_2 з середнім періодом близько 14 хв і амплітудою f_a 25...30 кГц. Крім того, в інтервалі часу 14:40...14:55 відзначалось зменшення f_oF_2 на 80 кГц. Від 15:15 до 15:40 також спостерігались слабкі квазіперіодичні варіації f_oF_2 з періодом T 5 хв.

Висотно-часові варіації концентрації електронів. Часові залежності висоти z_m максимуму шару F_2 та концентрації електронів на висотах 200, 220, 240 км і на висоті максимуму іонізації шару F_2 представлено на рис. 5. Видно, що під час СЗ мали місце квазіперіодичні варіації як висоти z_m , так і концентрації електронів N . Важливо, що найбільша амплітуда квазіперіодичних збурень N спостерігалась на висоті 240 км. Відносна амплітуда коливань висоти z_m становила 8...16 км або 3.2...6.4 %, а концентрації електронів — 3 %. Крім того, впродовж СЗ спостерігалось збільшення висоти z_m приблизно на 20 км, або на 8 %, а також максимальне зменшення концентрації елек-

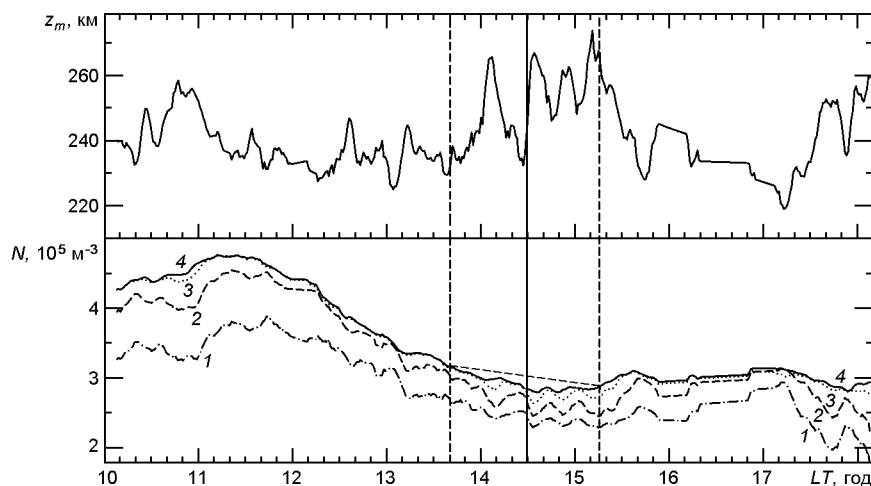


Рис. 5. Часові залежності висоти максимуму шару F_2 та концентрації електронів на різних висотах: 1 — 200 км; 2 — 220 км; 3 — 240 км; 4 — на висоті максимуму іонізації шару F_2 . Штрихова лінія — очікувані варіації концентрації електронів при відсутності сонячного затемнення

тронів на 10^4 м^{-3} , або на 3.3 %. Є всі підстави вважати, що квазіперіодичні та аперіодичні процеси пов'язані зі СЗ.

ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо основні особливості процесів у іоносфері, які супроводжували СЗ 10 червня 2021 р.

Поведінку частоти f_oF_2 та концентрації електронів у максимумі шару F_2 протягом СЗ неодноразово описано в літературі (див., наприклад, [18]). По мірі збільшення функції покриття диску Сонця $A(t)$ концентрація електронів N зменшується. Мінімальне значення N_{\min} спостерігається не при A_{\max} , а запізнюється на час $t_0 \approx 15$ хв. Далі величина N збільшується до вихідного значення N_0 . У реальному випадку на таку ідеалізовану поведінку $N(t)$ накладаються добові варіації та випадкові флуктуації, зокрема квазіперіодичні збурення, викликані СЗ.

Протягом СЗ 10 червня 2021 р. із запізненням $t_0 \approx 12.5$ хв спостерігалось мінімальне значення $f_oF_{2 \min} \approx 4.74$ МГц, чому відповідала концентрація $N_{\min} \approx 2.77 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Перша особливість іоносферних ефектів СЗ така. Поблизу півдня, за незначної функції покриття $A \approx 4.4$ %, процеси переносу на висоті максимуму N в шарі F_2 були малосуттєвими. При цьому для N справедливий лінійний закон рекомбінації [6, 59]:

$$\frac{dN}{dt} = q - N = q_0(1 - A(t)) - q_c N, \quad (1)$$

де $q = q_0(1 - A(t)) - q_c$, q_0 та q_c — швидкості іоноутворення за рахунок диску Сонця та його корони, q_c — коефіцієнт втрат. Тут $t_0 \approx 15$ хв. Оскільки характерний час зміни $A(t)$ близький до $t_A \approx 44 \dots 46$ хв, а $t_0 \approx 12.5$ хв, у виразі (1) покладемо $dN/dt = 0$. Поблизу моменту часу t_{\min} , де $N = N_{\min}$, справедливе співвідношення

$$q_0(1 - A_{\max}) - q_c N_{\min} = 0. \quad (2)$$

Внесок сонячної корони в іонізацію атмосфери описано в низці робіт (див., наприклад, [18]). Припустимо, що $q_c / q_0 \approx 0.25$. Тоді з (2) маємо

$$q_0 = \frac{N_{\min}}{1 - A_{\max}}. \quad (3)$$

При значеннях $t_0^{-1} \approx 1.33 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ і $A_{\max} \approx 0.044$ із (3) отримуємо, що $q_0 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Оцінімо далі відносне зменшення N у момент максимального покриття диску Сонця. З (1) випливає, що до СЗ

$$q_0 - q_c - N_0. \quad (4)$$

При $A = A_{\max}$

$$q_0(1 - A_{\max}) - q_c - N. \quad (5)$$

З (4) і (5) отримаємо, що

$$\frac{N}{N_0} = \frac{q_0(1 - A_{\max}) - q_c}{q_0 - q_c} = \frac{1 - A_{\max}}{1}. \quad (6)$$

При $A_{\max} = 0.044$ і $q_c = 0.25$ маємо $N/N_0 = 0.965$, а $N = N/N_0 - 1 = -0.035 = -3.5\%$.

За даними спостережень зменшення N поблизу максимальної фази дорівнювало близько 80 кГц. Тоді при $f_oF_{2\min} = 4.8$ МГц маємо

$$N_e = \frac{2 f_o F_2}{f_o F_{2\min}} = 0.033 = 3.3\%.$$

Видно, що N_e близьке до розрахункового значення $N = -3.5\%$.

Обговоримо далі квазіперіодичні варіації f_oF_2 , які спостерігались у інтервалах часу 13:50...14:55, 15:15...15:40 та 15:50...17:15. Для першого та третього цугів амплітуда коливань $f_a = 30$ кГц і $T = 14$ хв.

При цьому відносна амплітуда коливань N становила $N_a = 1.25\%$. Для другого цуга $T = 5$ хв і $f_a = 16$ кГц, а $N_a = 0.6\%$.

Судячи з величини періоду $T = 14$ хв, перший і третій цуги були викликані впливом на іоносферу атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) [10]. Через дуже незначну фазу СЗ ($M_{\max} = 0.11$) мало ймовірно, що АГХ генерувалися над місцем спостереження. Скоріш за все, вони згенеровані там, де фаза СЗ була близькою до максимальної (0.94). При цьому відстань між місцем генерації та пунктом спостереження була близькою до 2000 км. Поширення АГХ мало місце в атмосферному хвилеводі, вісь якого лежала на висоті близько 240 км [18, 20]. Про це свідчать амплітуди збурень N . Саме на цій висоті амплітуда була максимальною.

Що стосується коливань з $T = 5$ хв, то вони могли мати електродинамічну природу.

У виникненні квазіперіодичних процесів, які були відсутні в контрольний день, полягає друга особливість іоносферних процесів, які супроводжували описуване затемнення.

Третя особливість полягає у значному збільшенні від 380 до 560 км діючої висоти відбиття поблизу моменту часу настання максимальної фази СЗ. Враховуючи, що $M_{\max} = 0.11$, це видається дивним і важкозрозумілим. Найімовірніше, при цьому суттєво зменшився висотний градієнт dN/dz у максимумі шару F_2 . Справжня висота відбиття збільшувалася всього на 20 км (8%).

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У роботі проаналізовано висотно-частотні характеристики вертикального зондування іоносфери та встановлено особливості іоносферних процесів, які супроводжували часткове СЗ та були відсутні в контрольний день.

1. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності в іоносфері. Спостережувані цуги мали період 5 і 14 хв і відносну амплітуду коливань концентрації електронів 0.6 і 1.25 % відповідно. Період 14 хв мають АГХ, а період 5 хв — хвилі електромагнітної природи.

2. Виявлено різке та значне збільшення від 380 до 560 км діючої висоти відбиття радіохвилі поблизу моменту найбільшої фази СЗ.

3. Виявлено слабе (до 3.3 %) зменшення концентрації електронів, яке запізнюється по відношенню до максимальної фази затемнення приблизно на 12.5 хв.

4. Оцінено коефіцієнт втрат електронів ($1.33 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) і швидкість іоноутворення ($3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$).

5. Установлено, що СЗ супроводжувалося квазіперіодичними та аперіодичними варіаціями концентрації електронів, а також висоти максимуму шару F_2 . Амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів становила 3 %. Збільшення висоти шару F_2 досягало 20 км, або 8 %. Амплітуда квазіперіодичних варіацій висоти шару F_2 становила 8...16 км або 3.2...6.4 %.

Роботу виконано при фінансовій підтримці Національного фонду досліджень України, проект 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

1. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Комплексные радиопизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2002. № 2. С. 25—63.
2. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиопизических наблюдений в Харькове. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 3. С. 55—70.
3. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Перевалова Н. П., Водяников В. В., Гордиенко Г. И., Литвинов Ю. Г., Яковец А. Ф. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. 47, № 4. С. 491—500.
4. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинина Е. Е., Терещенко В. Д., Черняев С. М., Терещенко В. А. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. 48, № 1. С. 103—108.

5. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е., Колесник А. Г., Колесник С. А., Мельчинов В. П., Нагорский П. М., Парфенов С. С., Решетников Д. Д., Смирнов В. Ф., Степанов А. Е., Тарашук Ю. Е., Тельпуховский Е. Д., Цыбиков Б. Б., Шинкевич Б. М. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000. 40, № 3. С. 94—103.
6. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1987. 528 с.
7. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2007. 13, № 6. С. 74—86. DOI: 10.15407/knit2007.06.074
8. Васильев К. Н., Велешин А. С., Косенков А. Р. Ионосферный эффект солнечного затмения 15 февраля 1961 г. по наблюдениям в Москве. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 2. С. 277—278.
9. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. 5, № 4. С. 348—360.
10. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. Москва: Мир, 1978. 532 с.
11. Гришкевич Л. В., Васин В. А. Об эффектах в ионосфере, наблюдавшихся в периоды солнечных затмений 02.12.1956 г. и 15.02.1961 г. в Горьком. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 6. С. 949—954.
12. Данилкин Н. П., Коченова Н. А., Свечников А. М. Состояние ионосферы над Ростовом-на-Дону в период солнечного затмения 15 февраля 1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 4. С. 612—615.
13. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. 17, № 2. С. 132—145.
14. Кащеев С. Б., Зализовский А. В., Колосков А. В., Галушко В. Г., Пикулик И. И., Ямпольский Ю. М., Куркин В. И., Литовкин Г. И., Орлов А. И. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009. 14, № 4. С. 353—366.
15. Ковалев А. А., Колесник А. Г., Колесник С. А. Ионосферные эффекты солнечных затмений на средних широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2009. 49, № 4. С. 500—506.
16. Суханова Р. Д. Ионосферный эффект солнечного затмения 15.02.1961 г. по наблюдениям в Солехарде. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 6. С. 1066—1067.
17. Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000. 43, № 8. С. 682—686.
18. Черногор Л. Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
19. Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере над Европой, сопровождавшие солнечное затмение 20 марта 2015 г. *Кинематика и физика небес. тел*. 2016. 32, № 4. С. 60—72.
20. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011. 17, № 4. С. 41—52. DOI: 10.15407/knit2011.04.041
21. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. 20, № 4. С. 311—331.

22. Шапиро Б. С., Шашунькина В. М. Движения в области F ионосферы над Тбилиси в период затмения 15.02.1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 5. С. 760—765.
23. Шашунькина В. М., Турбин Р. И. Предварительные результаты наблюдений ионосферного эффекта солнечного затмения 15.II.1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. 1, № 5. С. 835—838.
24. Adeniyi J. O., Radicella S. M., Adimula I. A., Willoughby A. A., Oladipo O. A., Olawepo O. Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station. *J. Geophys. Res.* 2007. 112. A06314. DOI:10.1029/2006JA012197.
25. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Chernukhov V. V., Lukhnev A. V., Zalutsky V. T. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25, № 4. P. 465—468. DOI: 10.1029/98GL00186
26. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. Atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005. 45, № 4. P. 494—518.
27. Akimov A. L., Chernogor L. F. Effects of the solar eclipse of August 1, 2008 on the Earth's lower atmosphere. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2010. 26, № 3. P. 135—145. DOI: 10.3103/S0884591310030050
28. Bertin F., Hughes K. A., Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973. *J. Atmos. Terr. Phys.* 39, № 4. P. 457—461. DOI: 10.1016/0021-9169(77)90153-2.
29. Burmaka V. P., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. 53, № 4. P. 479 — 491. DOI: 10.1134/S001679321304004X
30. Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., Li N. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 2011. 116. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305.
31. Chen G., Zhao Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li T., Huang S., Li N. Enhancement and HF doppler observations of sporadic E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* 2010. 115. A09325. DOI:10.1029/2010JA015530.
32. Cheng K., Huang Y. N., Chen S.W. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992. 97, № A1. P. 103—111. DOI: 10.1029/91JA02409
33. Chernogor L. F. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. 48, № 5. P. 652—673. DOI: 10.1134/S0016793208050101
34. Chernogor L. F. Variations in the amplitude and phase of VLF radiowaves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. 50, № 1. P. 96—106. DOI: 10.1134/S0016793210010111
35. Chernogor L. F. Wave response of the ionosphere to the partial solar eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. 50, № 3. P. 346—361. DOI: 10.1134/S0016793210030096
36. Chernogor L. F. Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Phys.* 2011. 47, № 1. P. 77—86. DOI: 10.1134/S000143381101004X
37. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. 52, № 6. P. 768—778. DOI: 10.1134/S0016793212050039
38. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012. 52, № 6. P. 779—792. DOI: 10.1134/S0016793212050040

39. Chernogor L. F. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. 53, № 1. P. 19—31. DOI: 10.1134/S0016793213010052
40. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *Inter. J. Remote Sensing*. 2014. 32, № 11. P. 3219—3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509
41. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 1984. 19, № 3. P. 769—777. DOI: 10.1029/RS019i003p00769
42. Domnin I. F., Emelyanov L. Y., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. 54, № 5. P. 583—592. DOI: 10.1134/S0016793214040112
43. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. 53, № 1. P. 113—123. DOI: 10.1134/S0016793213010076
44. Eccles W. H. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. 1912. 69. P. 109—117.
45. Evans J. V. An F region eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965. 70, № 1. P. 131—142. DOI: 10.1029/JZ070i001p00131
46. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R., Roux Y. Le., Gauthier F., Vila P. M., Altadill D., Sole J. G., Miro G. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001. 63, № 9. P. 915—924. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00195-4
47. Founda D., Melas D., Lykoudis S., Lisaridis I., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Petrakis M., Zerefos C. The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece. *Atmos. Chem. Phys.* 2007. 7. 5543—5553. DOI: 10.5194/acp-7-5543-2007
48. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F. Radiophysical effects of the January 4, 2011 solar eclipse as observed in the parameters of obliquely propagating HF signals. *Radio Phys. and Radio Astron.* 2011. 2, № 4. P. 325—337. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.50
49. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. 48, № 3. P. 337—351.
50. Huang C. R., Liu C. H., Yeh K. C., Lin K. H., Tsai W. H., Yeh H. C., Liu J. Y. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1999. 104, № A1. P. 79—94. DOI: 10.1029/98JA02531
51. Hunter A. N., Holman B. K., Feldgate D. G., Kelleher R. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature*. 1974. 250. P. 205—206. DOI: 10.1038/250205a0
52. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., Cander Lj. R. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2008. 70, № 6. P. 836—853. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.02.016
53. Klobuchar J. A., Whitney H. E. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965. 70, № 5. P. 1254—1257. DOI: 10.1029/JZ070i005p01254
54. Le H., Liu L., Yue X., Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Ann. Geophys.* 2008. 26. P. 107—116. DOI: 10.5194/angeo-26-107-2008

55. Le H., Liu L., Yue X., Wan W., Ning B. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 2009. 114, № A7. A07308. DOI: 10.1029/2009JA014072
56. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. 53, № 3. P. 367—376. DOI: 10.1134/S0016793213020096
57. Mimmo H. R., Wang P. H. Continuous Kennelley — Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer). *Proc. Inst. Radio Engrs.* 1933. 21. P. 529—545.
58. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 1986. 91, № A2. P. 1651—1660. DOI: 10.1029/JA091iA02p01651
59. Schunk R. W., Nagy A. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry.* — Cambridge University Press, 2000. 554 p.
60. Sen Gupta A., Goel G. K., Mathur B. S. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980. 42. № 11/12. P. 907—909. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90107-5
61. Tomás A. T., Lühr H., Förster M., Rentz S., Rother M. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 2007. 112. A06303, DOI:10.1029/2006JA012168

REFERENCES

1. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Tyrnov O. F., Chernogor L. F. (2002). Integrated radio physical and optical studies of dynamic processes in the atmosphere and geospace caused by the solar eclipse of August 11, 1999. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* (2), 25—63 [in Russian].
2. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Features atmospheric and ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003: The results of the optical and radio physical observations in Kharkov. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* (3), 55—70 [in Russian].
3. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P., Vodyannikov V. V., Gordienko G. I., Litvinov Yu. G., Yakovets A. F. (2007). Ionospheric effects of the solar eclipse of March 29, 2006, over Kazakhstan. *Geomagnetism and Aeronomy.* 47(4), 461—469 [in Russian].
4. Belikovich V. V., Vyakhirev V. D., Kalinina Ye. Ye., Tereshchenko V. D., Chernyaev S. M., Tereshchenko V. A. (2007). Response of the ionosphere on the partial solar eclipse March 29, 2006 observed in Nizhny Novgorod and Murmansk. *Geomagnetism and Aeronomy.* 48(1), 103—108 [in Russian].
5. Borisov B. B., Yegorov D. A., Yegorov N. E., Kolesnik A. G., Kolesnik S. A., Melchinov V. P., Nagorskiy P. M., Parfenov S. S., Reshetnikov D. D., Smirnov V. F., Stepanov A. E., Tarashchuk Y. E., Telpuhovskiy E. D., Tsybikov B. B., Shinkevich B. M. (2000). A comprehensive experimental study of the reaction of the ionosphere on solar eclipse March 9, 1997. *Geomagnetism and Aeronomy.* 40(3), 94—103 [in Russian].
6. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. (1987). *Physics of the ionosphere.* (Moscow: Nauka Publ.) [in Russian].
7. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2007). Atmospheric and ionospheric effects of the partial solar eclipse of October 3, 2005, in Kharkiv. 1. The results of observation. *Kosmichna nauka i tekhnologiya.* 13(6), 74—86 [in Russian]. DOI: 10.15407/knit2007.06.074
8. Vasiliev K. N., Veleshin A. S., Kosenkov A. R. (1961). Ionospheric effects of the solar eclipse of February 15, 1961, according to the Moscow observations. *Geomagnetism*

- and Aeronomy*. 1(2), 277—278 [in Russian].
9. Gokov A. M., Chernogor L. F., (2000). Processes in lower ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.* 5(4), 348—360 [in Russian].
 10. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975) *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation* (Developments in Atmospheric Science). (Elsevier Scientific Pub. Co.).
 11. Grishkevich L. V., Vasin V. A. (1961). On the effects of the ionosphere observed during a solar eclipse of December 02, 1956, and December 02, 1961, in Gorky. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1(6), 949—954 [in Russian].
 12. Danilkin N. P., Kochenova N. A., Svechnikov A. M. (1961). State of the ionosphere over Rostov-on-Don during the solar eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1(4), 612—615 [in Russian].
 13. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2012). The dynamics of ionosphere plasma over Kharkiv during the solar eclipse of January 4, 2011. *Radio Phys. Radio Astron.* 17(2), 132—145 [in Russian].
 14. Kascheev S. B., Zalizovski A. V., Koloskov A. V., Galushko V. G., Pikulik I. I., Yampolski Y. M., Kurkin V. I., Litovkin G. I., Orlov A. I. (2009). Frequency variations of HF signals at long-range radio paths during a solar eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.* 14(4), 353—366 [in Russian].
 15. Kovalev A. A., Kolesnik A. G., Kolesnik S. A. (2009). Ionospheric effects of the solar eclipse in the middle latitudes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 49(4), 500—506 [in Russian].
 16. Sukhanova R. D. (1961). Ionospheric effects of the solar eclipse of February 15, 1961, on observations to the Salekhard. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1(6), 1066—1067 [in Russian].
 17. Uryadov V. P., Leonov A. M., Ponyatov A. A. (2000). On variations of the characteristics of the HF signal on a line oblique sounding during the solar eclipse of August 11, 1999. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 43(8), 682—686 [in Russian].
 18. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace*. (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University) [in Russian].
 19. Chernogor L. F. (2016). Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 32(4), 196—206. DOI: 10.3103/S0884591316040024
 20. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2011). The response of the middle ionosphere to the solar eclipse of January 4, 2011 over Kharkiv: Some results of vertical sounding. *Space Sci. Tech.* 17(4), 41—52 [in Russian].
 21. Chernogor L. F., Barabash V. V. The effects of solar eclipse of March 20, 2015 over ionosphere of Europe: Ionosonde observations. *Radio Phys. and Radio Astron.* 20(4), 311—331 [In Russian]. DOI: 10.15407/rpra20.04.311
 22. Shapiro B. S., Shashunkina V. M. (1961). Movement in the F region of the ionosphere over Tbilisi during the eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1(5), 760—765 [in Russian].
 23. Shashunkina V. M., Turbin R. I. (1961). Preliminary observations of ionospheric effects of solar eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1(5), 835—838 [in Russian].
 24. Adeniyi J. O., Radicella S. M., Adimula I. A., Willoughby A. A., Oladipo O. A., Olawepo O. (2007). Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station. *J. Geophys. Res.* 112(A6), id. A06314. DOI: 10.1029/2006JA012197
 25. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Chemukhov V. V., Lukhnev A. V., Zalutsky V. T. (1998). Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 25(4), 465—468.

DOI: 10.1029/98GL00186

26. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Atmospheric—ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 45(4), 494—518.
27. Akimov A. L., Chernogor L. F. (2010). Effects of the solar eclipse of August 1, 2008 on the Earth's lower atmosphere. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 26(3), 135—145.
28. Bertin F., Hughes K. A., Kersley L. (1977). Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973. *J. Atmos. Terr. Phys.* 39(4), 457—461.
DOI: 10.1016/0021-9169(77)90153-2
29. Burmaka V. P., Chernogor L. F. (2013). Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 53(4), 479—491.
30. Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., Li N. (2011). Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 116(A6), id. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
31. Chen G., Zhao Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li T., Huang S., Li N. (2010). Enhancement and HF Doppler observations of sporadic-E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* 115(A9), id. A09325. DOI: 10.1029/2010JA015530
32. Cheng K., Huang Y.-N., Chen S.-W. (1992). Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 97(A1), 103—111. DOI: 10.1029/91JA02409
33. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 48(5), 652—673.
34. Chernogor L. F. (2010). Variations in the amplitude and phase of VLF radio waves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. 50(1), 96—106.
35. Chernogor L. F. (2010). Wave response of the ionosphere to the partial polar eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy*. 50(3), 346—361.
DOI: 10.1134/S0016793210030096
36. Chernogor L. F. (2011). Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Phys.* 47(1), 77—86. DOI: 10.1134/S000143381101004X
37. Chernogor L. F. (2012). Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 52(6), 768—778. DOI: 10.1134/S0016793212050040
38. Chernogor L. F. (2012). Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 52(6), 779—792.
DOI: 10.1134/S0016793212050040
39. Chernogor L. F. (2013). Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 53(1), 19—31. DOI: 10.1134/S0016793213010052
40. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V. (2011). Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *Int. J. Remote Sens.* 32(11), 3219—3229.
DOI: 10.1080/01431161.2010.541509
41. Cohen E. A. (1984). The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 19(3), 769—777.
DOI: 10.1029/RS019i003p00769
42. Domnin I. F., Emel'yanov L. Y., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2014). Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54(5), 583—592.

43. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2013). Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkiv: 1. Results of Incoherent Scatter Observations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 53(1), 113—123.
44. Eccles W. H. (1912). Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. 69, 109—117.
45. Evans J. V. (1965). An F region eclipse. *J. Geophys. Res.* 70(1), 131—142.
DOI: 10.1029/JZ070i001p00131
46. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R., Roux Y. Le., Gauthier F., Vila P. M., Altadill D., Sole J. G., Miro G. (2001). Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 63(9), 915—924.
DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00195-4
47. Founda D., Melas D., Lykoudis S., Lisaridis I., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Petrakis M., Zerefos C. (2007). The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 5543—5553.
DOI: 10.5194/acp-7-5543-2007
48. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F. (2011). Radiophysical effects of the January 4, 2011 solar eclipse as observed in the parameters of obliquely propagating HF signals. *Radio Phys. Radio Astron.* 2(4), 325—337.
DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.50
49. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, 48(3), 337—351.
50. Huang C. R., Liu C. H., Yeh K. C., Lin K. H., Tsai W. H., Yeh H. C., Liu J. Y. (1999). A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 104(A1), 79—94. DOI: 10.1029/98JA02531
51. Hunter A. N., Holman B. K., Fieldgate D. G., Kelleher R. (1974). Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature*. 250(5463), 205—206. DOI: 10.1038/250205a0
52. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., Cander Lj. R. (2008). Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 70 (6), 836—853. DOI:10.1016/j.jastp.2007.02.016
53. Klobuchar J. A., Whitney H. E. (1965). Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 70(5), 1254—1257.
DOI: 10.1029/JZ070i005p01254
54. Le H., Liu L., Yue X., Wan W. (2008). The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Ann. Geophys.* 26(1), 107—116.
DOI: 10.5194/angeo-26-107-2008
55. Le H., Liu L., Yue X., Wan W., Ning B. (2009). Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 114(A7), id. A07308.
DOI: 10.1029/2009JA014072
56. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2013). Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkiv: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy*. 53(3), 367—376.
57. Mimno H. R., Wang P. H. (1933). Continuous Kennelley-Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer). *Proc. Inst. Radio Engrs.* 21, 529—545.
58. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M., Emery B. A., Roble R. G. (1986). Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 91(A2), 1651—1660. DOI: 10.1029/JA091iA02p01651
59. Schunk R. W., Nagy A. (2000). *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. (Cambridge: Cambridge University Press).

60. Sen Gupta A., Goel G. K., Mathur B. S. (1980). Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 42(11/12), 907—909. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90107-5
61. Tomás A. T., Lühr H., Förster M., Rentz S., Rother M. (2007). Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 112(A6), id. A06303. DOI: 10.1029/2006JA012168

L. F. Chernogor, K. P. Garmash

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

IONOSPHERIC PROCESSES DURING THE 10 JUNE 2021 PARTIAL SOLAR ECLIPSE AT KHARKIV

A solar eclipse provides the researcher with a rare opportunity to follow the dynamics of the Earth (its internal spheres) — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system and variations in the geophysical fields over an interval of a few hours. The disturbances in this system, which are caused by different solar eclipses, are significantly different. The parameters of these disturbances depend on the solar eclipse first contact, the state of space weather, season, the phase of the solar cycle, geographic coordinates, and eclipse obscuration. It should be noted that individual solar eclipses show their own characteristics. The purpose of this paper is to analyze the results of ionosonde observations of the ionospheric disturbances that accompanied the 10 June 2021 solar eclipse at the City of Kharkiv. The maximum phase, M_{\max} , of the solar eclipse at the City of Kharkiv was observed to be ~ 0.11 (more precisely 0.112), and eclipse obscuration, A_{\max} , to be $\sim 4.4\%$. The first contact occurred at 10:42 UT (13:42 LT) and the fourth contact at 12:12 UT (15:12 LT). The maximum phase happened at 11:28 UT (14:28 LT). To study the features of the variations in the virtual heights and the frequencies, we have used the digital ionosonde located at the V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory. The state of space weather has been analyzed. During the solar eclipse and over the reference time intervals on 6 and 9 June 2021, the state of space weather was conducive to observing wave disturbances, which is supported by the magnetic activity index $K_p = 0.3$. The measurements of signal amplitude vs. frequency and vs. height taken at vertical incidence have been analyzed and the features of the ionospheric processes that accompanied the partial solar eclipse and were absent on the reference days has been determined. The solar eclipse was accompanied by an enhancement in wave activity in the ionosphere. The wave trains observed near the ionospheric F_2 peak height showed periods of 5 min and 14 min and the 0.6 % and 1.25 % amplitudes of the oscillations in the electron density, respectively. At 240 km, the amplitude of the oscillation with 14-min period increased by 3 %. The 14-min period pertains to atmospheric gravity waves, and the 5-min period to waves of electromagnetic nature. A sharp and considerable increase (from 380 to 560 km) in the virtual height was detected around the instant of greatest eclipse. A weak (equal to or less than 3.3 %) decrease in the electron density that lagged behind the maximum phase of the solar eclipse by 12.5 min was revealed. The loss of electrons rate has been estimated to be $1.33 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, and the electron-ion pair production rate to be $3 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Key words: solar eclipse, ionosonde, ionospheric process features, quasi-periodic disturbance, aperiodic disturbance, ionospheric parameters

Стаття надійшла до редакції 03.08.2021

Після доопрацювання 03.08.2021

Прийнята до друку 16.12.2021