

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-06>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР¹, д.ф.-м. наук, проф.

e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

Л. І. МИЛОВАНОВА¹, інж.

e-mail: lidatext@gmail.com

Ю. Б. МИЛОВАНОВ¹, к.ф.-м. наук, старший науковий співробітник

e-mail: hobit1957@gmail.com

А. М. ЦИМБАЛ¹, к.ф.-м. наук, доц.

e-mail: A.Tsymbal@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

Y. LUO, аспірант

e-mail: yiyangluo@163.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна, 61022, м. Харків, м-н Свободи, 4

ЕФЕКТИ СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 10 ЧЕРВНЯ 2021 р. В ІОНОСФЕРІ НАД ХАРКОВОМ: РЕЗУЛЬТАТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ

Актуальність. Іоносферні ефекти сонячних затемнень (СЗ) вивчаються понад 100 років. Дослідження активізувалися в 1960–1970 рр., коли широко стали використовуватися ракетні та супутникові методи, мережа іонозондів, радарі некогерентного розсіяння. Встановлено основні закономірності прояву СЗ в іоносфері: зменшення концентрації електронів, температур електронів, іонів і нейтралів, зміна динамічного режиму, генерація акустико-гравітаційних хвиль. Поряд із закономірностями, що повторюються, мають місце й особливості, властиві даному СЗ. З цієї причини вивчення ефектів кожного нового затемнення є актуальною задачею.

Мета цієї роботи – виклад результатів аналізу параметрів іонограм, зареєстрованих за допомогою цифрового іонозонда, розміщеного в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна.

Методи і методологія. Для спостереження за станом іоносфери використовувався несерійний цифровий іонозонд, розроблений у ХНУ імені В. Н. Каразіна. Розміщений в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (49°38' пн. ш., 36°20' сх. д.). Методика обробки зводилася до наступного. Після побудови часових рядів для частот f_oF2 та f_{min} , а також діючої висоти відбиття, обчислювався тренд і різниця вихідного ряду та тренду. За значеннями $f_oF2(t)$ визначалися концентрація електронів $N(t)$ та її приріст $\Delta N(t)$. Для визначення спектрального складу проводився системний спектральний аналіз залежностей $\Delta N(t)$.

Результати. Виявлено максимальне зменшення концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери на 3.7–3.8%. Це значення виявилось дуже близьким до розрахункового 3.5–3.8%. Встановлено, що час запізнювання спостереження мінімального значення концентрації електронів по відношенню до максимального значення фази затемнення становило 12.5 хв, що дуже близько до розрахункового часу 12.8 хв. За часом запізнювання оцінений коефіцієнт лінійної рекомбінації ($1.3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) і швидкість іоноутворення ($3.8\text{--}3.9 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$). СЗ супроводжувалося генерацією квазіперіодичних коливань концентрації електронів і діючої висоти шару F2 з періодом 10–15 хв і амплітудами 1.7–4% та 9.1–11.4% відповідно. Протягом СЗ у 3–4 рази зменшився рівень флуктуацій мінімальної спостережуваної на іонограмах частоти. Крім того, мало місце зменшення усереднених значень f_{min} від 3 до 2.85 МГц (на 5%), що свідчило про зменшення поглинання радіохвилі та концентрації електронів у нижній іоносфері (висоти менше 100 км). За оцінками це зменшення складало близько 2% (з даних спостережень 2.2%).

Висновки. Часткове СЗ з дуже невеликими максимальними значеннями фази (0.112) та відносної площі покриття диска Сонця (4.4%) призвело до ряду спостережуваних за допомогою іонозонда ефектів в іоносфері.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сонячне затемнення, іоносфера, іонозонд, діюча висота, концентрація електронів, максимальне зменшення, квазіперіодичні коливання

Як цитувати: Черногор ЛФ, Милованова ЛІ, Милованов ЮБ, Цимбал АМ, Луо Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері над Харковом: результати вертикального зондування. Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021;35:64-83. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-06>

In cites: Chernogor LF, Mylovanova LI, Mylovanov YuB, Tsymbal AM, Luo Y. Effects from the June 10, 2021 solar eclipse in the ionosphere over Kharkiv: results from ionosonde measurements. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2021;35:64-83. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-06>

© Черногор Л. Ф., Милованова Л. І., Милованов Ю. Б., Цимбал А. М., Луо Y., 2021

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

ВСТУП

Іоносферні ефекти сонячних затемнень (СЗ) вивчаються понад 100 років [1, 2]. Дослідження активізувалися в 1960–1970 рр., коли широко стали використовуватися ракетні та супутникові методи, мережа іонозондів, радарі некогерентного розсіяння [3–11]. У 1990–2000-і рр. з'явилися і стали активно використовуватися GPS-технології [12, 13].

Встановлено основні закономірності прояву СЗ в іоносфері: зменшення концентрації електронів, температур електронів, іонів і нейтралів, зміна динамічного режиму, генерація акустико-гравітаційних хвиль [14–58]. Поряд із закономірностями, що повторюються, мають місце й особливості, властиві даному СЗ [59]. З цієї причини вивчення ефектів кожного нового затемнення є актуальною задачею.

Якісно новий рівень досліджень ефектів СЗ став можливим після формулювання в 1980-х рр. Л. Ф. Черногором основ системної парадигми (див., наприклад, [60–64]). Згідно цієї парадигми, потоки енергії, речовини і випромінювань “зверху” призводять до активізації процесів у системі Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (внутрішні оболонки) (СМСМІАЗ), а потоки “знизу” – до активізації процесів у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ). Важливо, що системи СМСМІАЗ і ЗАІМ – відкриті динамічні стохастичні та нелінійні. У таких системах мають місце нетривіальні взаємодії підсистем: змінюваність регулярних і випадкових процесів, самоорганізація та динамічний (детермінований) хаос, тригерні вивільнення енергії і т.п. [60–64].

СЗ – одне із високоенергетичних джерел, що впливають на підсистеми в системі СМСМІАЗ.

Особливістю затемнення 10 червня 2021 р. для процесів над Харковом була незначна фаза затемнення $M \approx 0.11$. Тим не менш, ефекти СЗ у підсистемах системи СМСМІАЗ виявлені й описані в роботах [65–70].

В роботі [65] аналізується тепловий ефект в приземній атмосфері. Автор [66] описав ефект конвекції в приземній атмосфері. У роботах [67, 68] викладаються результати дослідження геомагнітного ефекту в широкому діапазоні широт. У статтях [69, 70] описані іоносферні ефекти СЗ.

Мета цієї роботи – виклад результатів аналізу параметрів іонограмм, зареєстрованих за допомогою цифрового іонозонда, розміщеного в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

Кільцеподібне СЗ мало максимальну фазу ($M \geq 0.90$) у високих широтах (Рис. 1). Затемнення почалося над Канадою, перемістилося через Атлантичний океан, Гренландію, Північний полюс, північну частину Європи й Азії. Часткове СЗ спостерігалось аж до Італії, Греції, півдня України, Монголії та Китаю.

Фаза затемнення в Харкові не перевищувала 0.112. При цьому затінена частина площі диска A становила близько 4.4%. Затемнення почалося о 10:42 UT і закінчилося о 12:12 UT (UT – всесвітній час).

Цим моментам всесвітнього часу відповідає поясний час 13:42 і 15:12. Максимальна фаза затемнення відзначалася об 11:28 UT або о 14:28 поясного часу.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для виділення ефектів СЗ важливо знати стан іоносфери, який визначається станом космічної погоди. Останній аналізувався на підставі даних сайтів [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] і [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Для подальшого дослідження суттєво те, що 10 червня 2021 р. після 00:00 UT спостерігався раптовий початок досить слабкої магнітної бурі [69]. Значення Dst -індексу при цьому не перевищувало 8 нТл, а Kp -індексу – 1. Поблизу опівдня значення Dst -індексу опустилося до –33 нТл і закінчилася головна фаза магнітної бурі. Далі відзначалася фаза відновлення, яка тривала 10, 11 і 12 червня 2021 г. Індекс Kp збільшувався до 3–4.

Замість сусіднього дня 11 червня 2021 р., який виявився збуреним, у якості контрольного вибрано день 24 червня 2021 р.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для спостереження за станом іоносфери використовувався несерійний цифровий іонозонд, розроблений у ХНУ імені В. Н. Каразіна. Іонозонд розміщено в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (49°38' пн. ш., 36°20' сх. д.).

Основні параметри іонозонда наступні: потужність радіопередавального пристрою – 1.5 кВт, тривалість імпульсу – 100 мкс, частота повторення імпульсів – 125 Гц, коефіцієнт підсилення антени 1–10 в залежності від частоти. Похибка вимірювання частоти – не більше 20 кГц, висоти – не більше 2.1 км.

Частота реєстрації – 1 іонограма за 1 хв.

Методика обробки зводилася до наступного. Після побудови часових рядів для частот f_oF2 та f_{min} , а також діючої висоти відбиття, обчислювався тренд і різниця вихідного ряду та тренду. За значеннями $f_oF2(t)$ визначалася концентрація електронів $N(t)$ та її приріст $\Delta N(t)$. Для визначення спектрального складу проводився системний спектральний аналіз залежностей $\Delta N(t)$, описаний у роботі [71].

Для порівняння аналізувалися дані спостережень, крім дня з СЗ, також для сусіднього дня 11 червня 2021 р. Поведінка параметрів іонограм для звичайної та незвичайної компонент радіохвилі була дуже схожою. Тому далі будуть описані варіації діючої висоти і концентрації електронів, отримані з використанням звичайної компоненти радіохвилі.

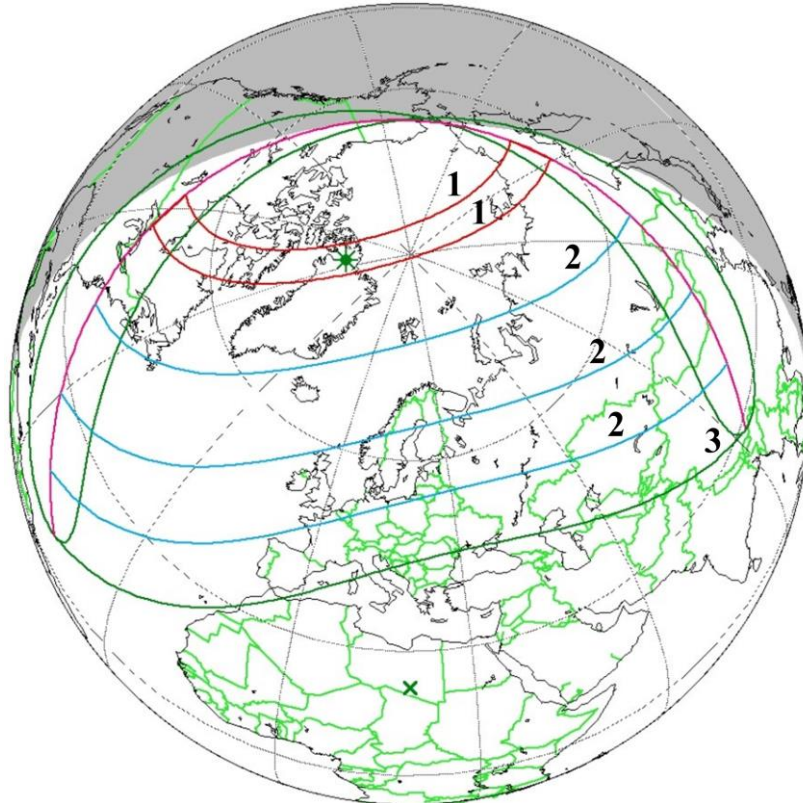


Рис. 1. Карта сонячного затемнення. Лінії, що позначені цифрою 1 показують на територію кільцеподібного затемнення, 2 – часткового затемнення, 3 – межа затемнення. Зірочкою відмічена точка на поверхні Землі, найближча до осі найбільшого затемнення [<http://eclipsewise.com/solar/SEprime/2001-2100/SE2021Jun10Aprime.html>]

Fig. 1. Solar eclipse map. The lines marked 1 indicate the territory of the annular eclipse, 2 is the partial eclipse, 3 is the boundary of the eclipse. An asterisk symbol marks the point on the Earth's surface closest to the axis of the greatest eclipse [<http://eclipsewise.com/solar/SEprime/2001-2100/SE2021Jun10Aprime.html>]

ПРИКЛАДИ ІОНОГРАМ

На Рис. 2 і 3 наведені приклади іонограм, зареєстровані як до, так і протягом СЗ. З Рис. 2 можна бачити, що іонограма відповідає типовому незбуреному стану іоносфери в денний час. Спостерігалось відбиття від шарів F1 та F2, подвійне променезаломлення (звичайна зліва та незвичайна справа поляризації радіохвилі), дворазове відбиття радіохвилі. Діючі висоти шарів F1 та F2 склали близько 230 та 320 км відповідно. Для дворазово відбитої радіохвилі діюча висота шару F2 дорівнювала ~ 500 км. Із-за присутності шару Es область E спостерігалась на частотах до 3.1 МГц. Шар Es займав діапазон частот 3.3–5.25 МГц.

Протягом СЗ іонограма суттєво відрізнялася (див. Рис. 3). Менш чітко реєструвався сигнал як від шару F1, так і від шару F2. Діючі висоти цих шарів склали 210 і 425 км. Майже зник сигнал від радіохвилі незвичайної поляризації. Не спостерігалось дворазове відбиття радіохвилі.

ВАРІАЦІЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ

Часові варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери показані на Рис. 4. З Рис. 4 можна бачити, що приблизно з 11:30 (тут і далі поясний час) концентрація електронів N почала зменшуватися від $5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. У момент початку СЗ вона була близька до $3.2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Зменшення мало місце приблизно до 14:45, після чого N збільшувалося від $2.8 \cdot 10^{11}$ до $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. На плавний хід залежності $N(t)$ (тренду $\bar{N}(t)$) накладалися випадкові флуктуації $\Delta N(t)$, які представлені на Рис. 5. З Рис. 5 видно, що варіації концентрації електронів часто були квазіперіодичними з періодом 45–60 хв. Протягом СЗ квазіперіод зменшився до 10–15 хв. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ΔN_a змінювалася від $0.05 \cdot 10^{11}$ до $0.15 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. При цьому відносна амплітуда $\delta_{Na} = \Delta N_a / \bar{N} \approx 1.7\text{--}4\%$.

У сусідній день, 11 червня 2021 р., значення N збільшувалися до 11:00, досягаючи $5.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (див. Рис. 4). Потім протягом 70 хв спостерігалось зменшення \bar{N} . З 12:15 і до 13:10 відзначався сплеск \bar{N} , після якого почалося збільшення \bar{N} , яке тривало до 14:20. Далі \bar{N} , флюктууючи, стрімко зменшувалося до $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

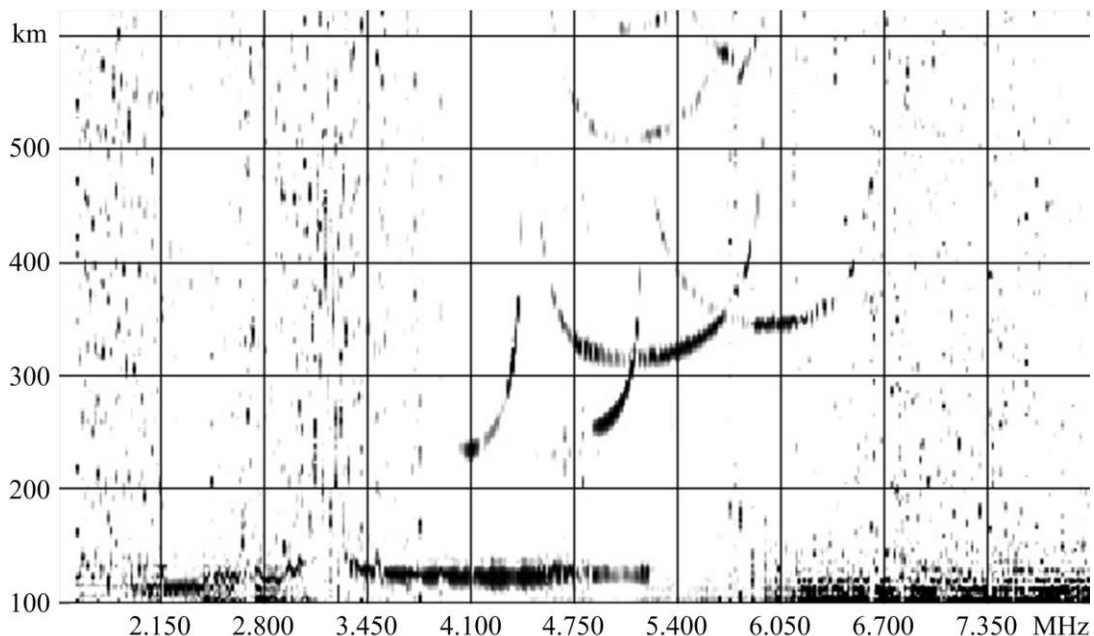


Рис. 2. Приклад іонограми, зареєстрованої до СЗ 10 червня 2021 р. об 11:55:00 поясного часу
Fig. 2. Example of the ionogram registered before the SE of the June 10, 2021 at 11:55:00 local time

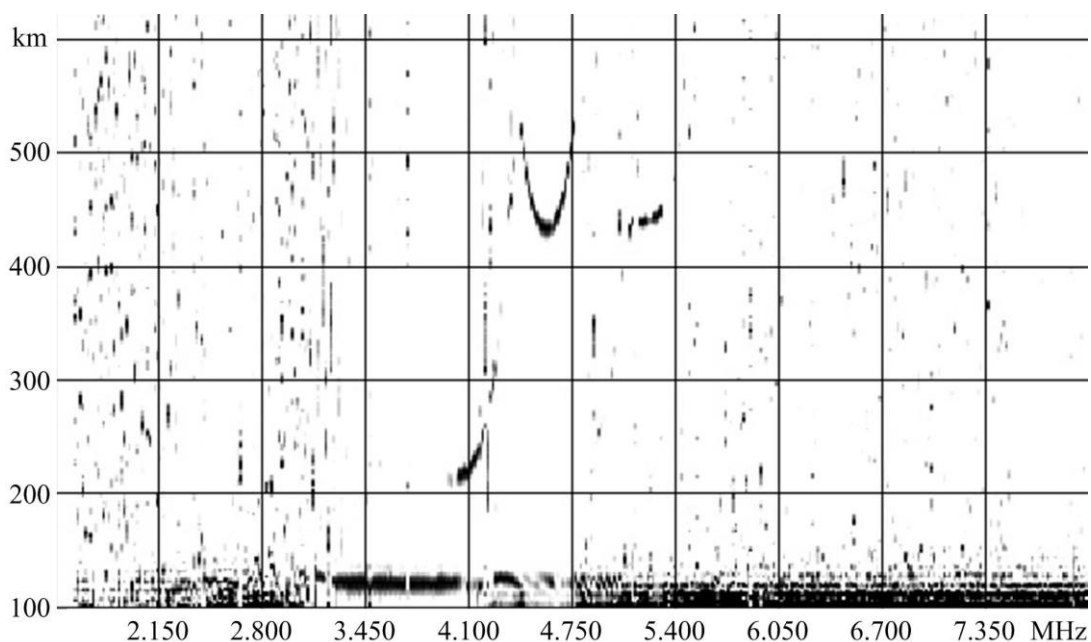


Рис. 3. Приклад іонограми, зареєстрованої поблизу максимальної фази СЗ 10 червня о 14:27:00 поясного часу
Fig. 3. Example of the ionogram registered near the maximum magnitude of the SE of the June 10 at 14:27:00 local time

Варіації $\Delta N(t)$ в цей день також були квазіперіодичними (див. Рис. 5). Їх період становив 60–100 хв, а амплітуда $(0.1\text{--}0.6) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. При $\bar{N} \approx (4\text{--}5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ маємо $\delta_{Na} \approx 2\text{--}12\%$.

У контрольний день 24 червня 2021 р. флюктуації N були меншими, ніж флюктуації 11 червня 2021 р., але дещо більшими за флюктуації 10 червня 2021 р. (див. Рис. 5). Варіації трендів \bar{N} в цілому були схожими, але

10 червня 2021 р. протягом СЗ спостерігалася западина в залежності $\bar{N}(t)$ в інтервалі часу 13:45–16:15 (див. Рис. 4). Вона мала місце впродовж майже години після закінчення СЗ.

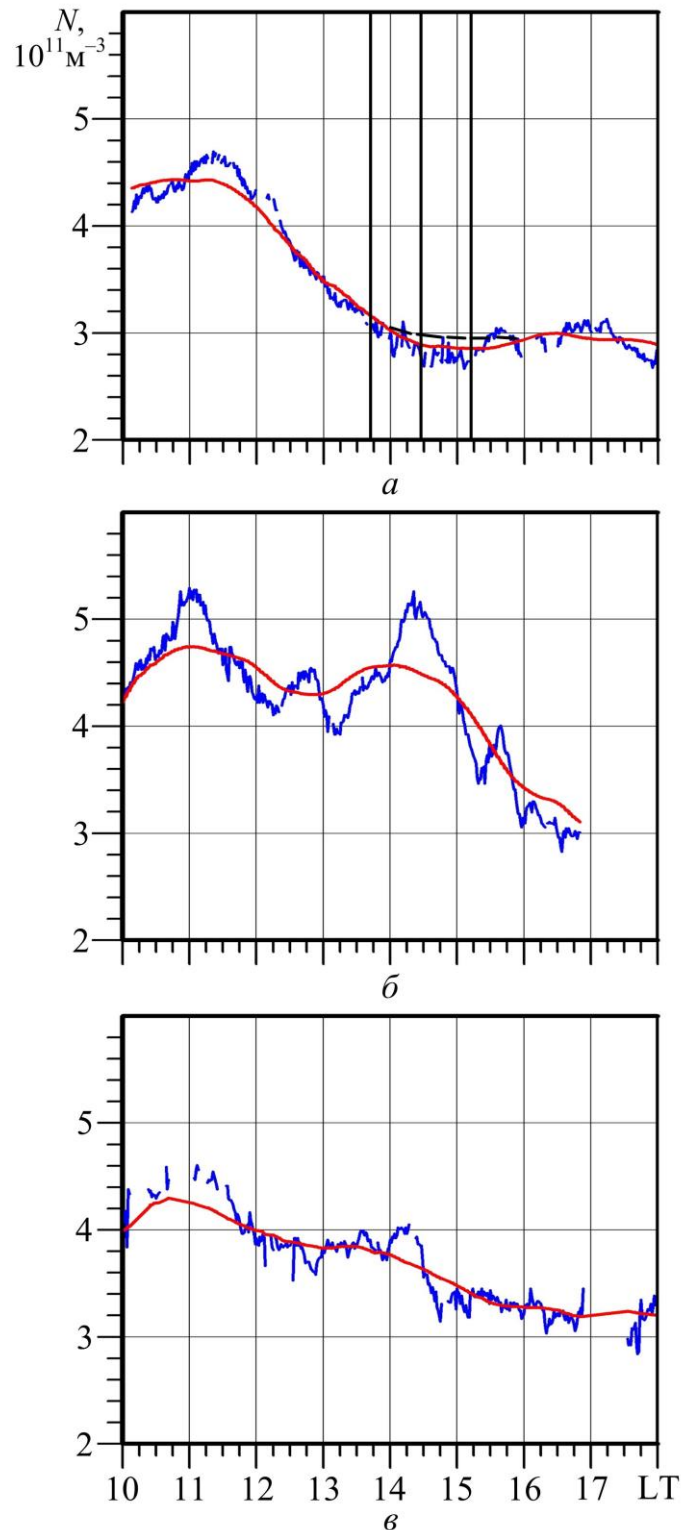


Рис. 4. Часова залежність концентрації електронів у F2-шарі. Суцільні лінії – ковзна середня за 120 хв: *a* – 10 червня 2021 р.; *б* – 11 червня 2021 р.; *в* – 24 червня 2021 р. Вертикальними лініями тут і далі показані моменти початку, максимальної фази та закінчення СЗ. Пунктирною лінією показана очікувана залежність за відсутності СЗ

Fig. 4. Time dependence of the electron density in the F2-layer. Solid lines are 120-min moving average: *a* is of the June 10, 2021; *б* is of the June 11, 2021; *в* is of the June 24, 2021. Vertical lines hereinafter show the moments of the beginning, maximum phase and end of the SE. The dashed line shows the expected dependence in the absence of the SE

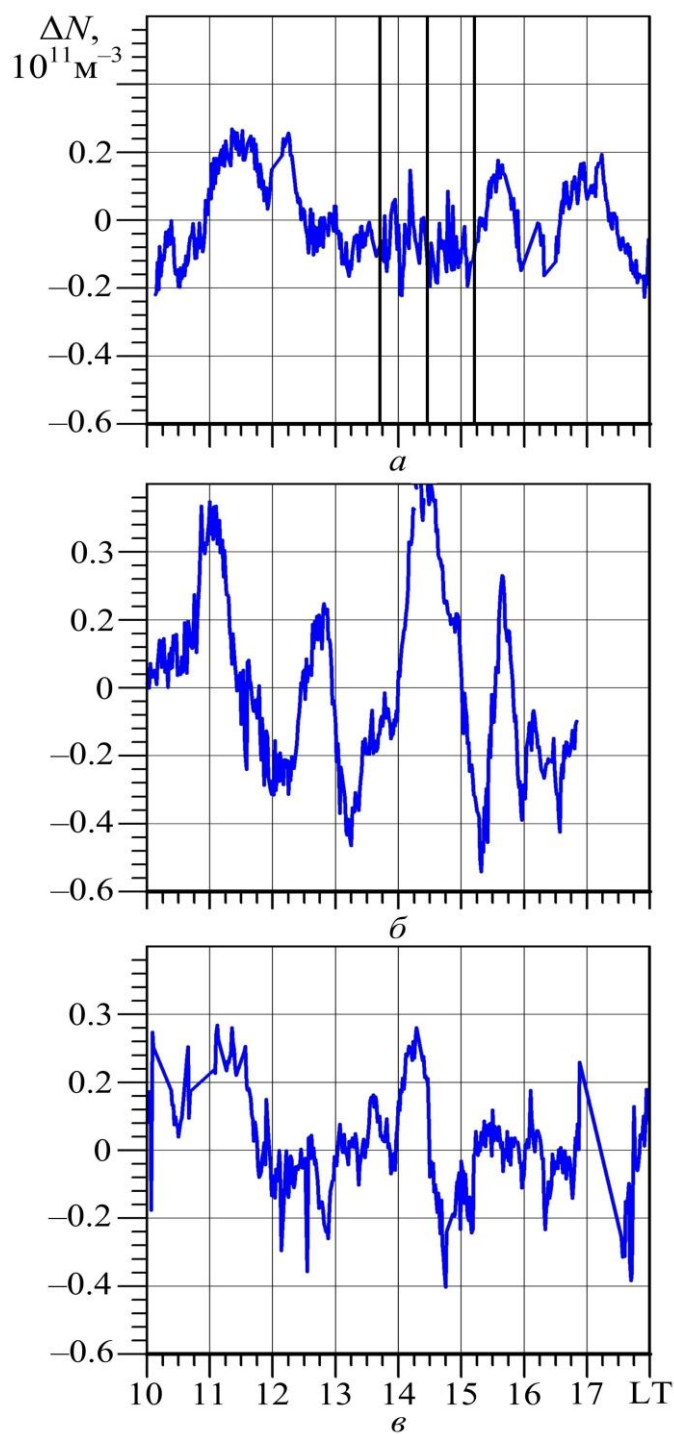


Рис. 5. Часова залежність варіацій концентрації електронів у F2-шарі: *a* – 10 червня 2021 р.;
б – 11 червня 2021 р.; *в* – 24 червня 2021 р.

Fig. 5. Time dependence of the electron density in the F2-layer: *a* is of the June 10, 2021; *б* is of the June 11, 2021; *в* is of the June 24, 2021

ВАРІАЦІЇ ДІЮЧОЇ ВИСОТИ ШАРУ F2

Часові варіації діючої висоти z_v шару F2 звичайної поляризації наведені на Рис. 6. З Рис. 6 видно, що висота z_v сильно флюктувала, особливо сильними флюктуації були 10 червня 2021 р. протягом СЗ. Усереднені значення $\overline{z_v}$ (тренду) спочатку збільшувалися від ~ 320 до 480 км. Максимальне

значення спостерігалося приблизно о 14:30, тобто поблизу максимальної фази затемнення. Далі значення \bar{z}_v зменшувалися від 380 до 330 км.

Приріст Δz_v був відносно невеликим (± 10 км) до 13:00 (Рис. 7). Протягом СЗ амплітуда квазіперіодичних з періодом ~ 10 –15 хв коливань Δz_{v0} збільшувалася до 40–50 км. При $\bar{z}_v \approx 400$ км відносна амплітуда складала близько 9.1–11.4%. Після закінчення затемнення амплітуда варіацій поступово зменшувалася до 20 км.

11 червня 2021 р. поведінка \bar{z}_v була іншою (див. Рис. 6). Величина варіацій \bar{z}_v не перевищувала 25 км. З 13:00 і до 15:00, на відміну від 10 червня 2021 р., \bar{z}_v спадала від 370 до 320 км.

Приріст Δz_v з 11:00 до 17:00 мав вигляд квазіперіодичних варіацій з періодом 30–60 хв і амплітудою 10–30 км (див. Рис. 7). При $\bar{z}_v \approx 350$ км відносна амплітуда становила 2.9–8.6%.

Часові варіації трендів \bar{z}_v 10 та 24 червня 2021 р. суттєво відрізнялися в інтервалі часу 13:00–16:00. Різниця сягала 90 км (див. Рис. 6). Флуктуації Δz_v 10 та 24 червня 2021 р. якісно були подібними (див. Рис. 7).

ВАРІАЦІЇ МІНІМАЛЬНОЇ СПОСТЕРЕЖУВАНОЇ ЧАСТОТИ

Часові варіації мінімальної спостережуваної на іонограмах частоти f_{\min} показані на Рис. 8, з якого можна бачити, що ця частота сильно флуктуувала в діапазоні частот 2–3.4 МГц. Усереднене значення $\overline{f_{\min}}(t)$ (тренду) змінювалося від 2.6 до 3.07, а потім до 2.12 МГц. Протягом СЗ $\overline{f_{\min}}$ зменшувалося від 3.0 до 2.85 МГц.

Приріст Δf_{\min} також сильно флуктуував у межах від -0.9 до 0.5 МГц (Рис. 9). Протягом СЗ рівень флуктуації значно зменшився (від -0.2 до 0.2 МГц).

11 червня 2021 р. флуктуації f_{\min} також були значними (від 2.2 до 3.4–3.6 МГц) (див. Рис. 8). Тренд $\overline{f_{\min}}(t)$ спочатку зменшувався від 2.8 до 2.6 МГц, що спостерігалося об 11:30, а потім збільшувався практично до 3 МГц о 13:50. Далі відзначалося його зменшення до 2.4 МГц.

Приріст Δf_{\min} сильно флуктуував і 11 червня 2021 р.: від -0.6 до 0.6–0.7 МГц. З 13:42 до 15:12 рівень флуктуації становив від -0.4 до 0.4 МГц, тобто більше, ніж у день СЗ (див. Рис. 9).

Тренди частоти $\overline{f_{\min}}$ і її флуктуації (див. Рис. 8 і 9) 10 та 24 червня 2021 р. якісно майже не відрізнялися.

ОБГОВОРЕННЯ

Порівняння іонограм, параметрів іонограм $f_{o,x}F2$, $z_{v o,x}$ і f_{\min} , а також часових залежностей $N(t)$, $\Delta N(t)$, $z_v(t)$, $\Delta z_v(t)$, $f_{\min}(t)$ і $\Delta f_{\min}(t)$ показало, що вони помітно відрізнялися 10 і 24 червня 2021 р. Слід мати на увазі, що вдень 11 червня 2021 р. іоносфера була злегка збурена, оскільки при цьому зазначалася слабка магнітна буря. Як відомо, іоносферна, магнітна, а також атмосферна й електрична бурі є проявом єдиного процесу, іменованого геокосмічною бурею [72, 73].

Зменшення концентрації електронів. Відмінності в N в інтервалі часу 13:42–15:12, швидше за все, пов'язані з СЗ. Так, затемнення призвело до максимального зменшення \bar{N} на $1.11 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ при очікуваному за відсутності затемнення $\bar{N} \approx (2.9\text{--}3.0) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Тоді $\Delta N / \bar{N} \approx 3.7\text{--}3.8\%$. Порівняємо це з теоретичної оцінкою. Якщо знехтувати процесами переносу в максимумі шару F2 поблизу моменту часу настання максимальної фази затемнення, то стаціонарне рівняння балансу для N набуває простого вигляду:

$$q = \beta N, \quad (1)$$

де $q = q_0(B + \xi)$, q_0 і $q_0\xi$ – швидкості іонізації за рахунок диска Сонця та його корони, $B = 1 - A$ – відносна незакрита частина диска Сонця, β – коефіцієнт лінійної рекомбінації. За відсутності СЗ

$$q_0(1 + \xi) = \beta_0 N_0. \quad (2)$$

Тут β_0 і N_0 – коефіцієнт лінійної рекомбінації та концентрація електронів за відсутності збурень.

З (1) і (2) при $\beta \approx \beta_0$ маємо:

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N_0} = 1 - \frac{N}{N_0} = \frac{1 - B}{1 + \xi} = \frac{A}{1 + \xi}. \quad (3)$$

Для Харкова $1 - B = A = 4.4\%$. Значення ξ априорі невідомо. Ймовірно, воно залежить від активності Сонця. За даними роботи [59] приймемо $\xi = 1.15\text{--}1.25$. Тоді з (3) маємо $\delta_N = (3.5\text{--}3.8)\%$, що дуже близько до значення, отриманого зі спостережень (3.7–3.8)%.

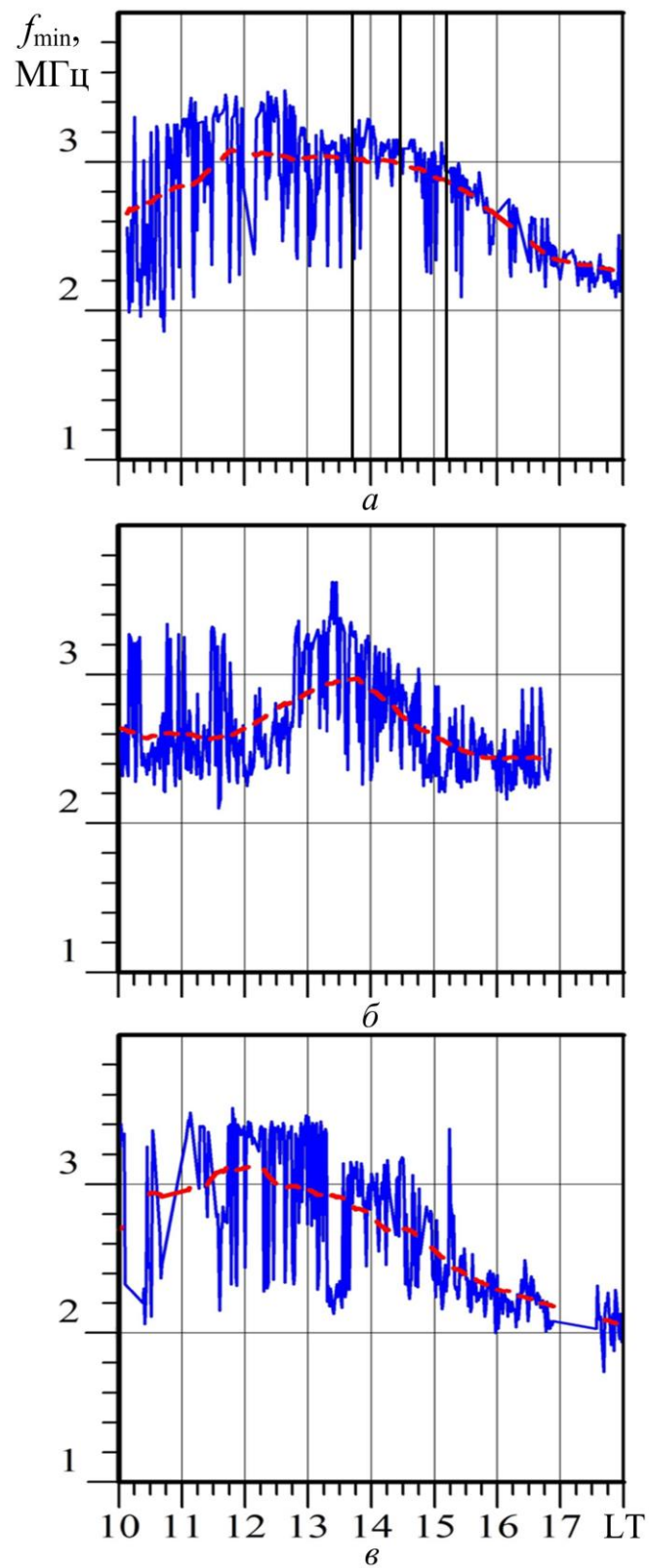


Рис. 6. Часова залежність мінімальної частоти відбитого сигналу. Переривчасті лінії – ковзна середня за 120 хв: *a* – 10 червня 2021 р.; *б* – 11 червня 2021 р.; *в* – 24 червня 2021 р.
 Fig. 6. Time dependence of the minimum frequency of the signal reflected. Dashed lines are 120-min moving average: *a* is of the June 10, 2021; *б* is of the June 11, 2021; *в* is of the June 24, 2021

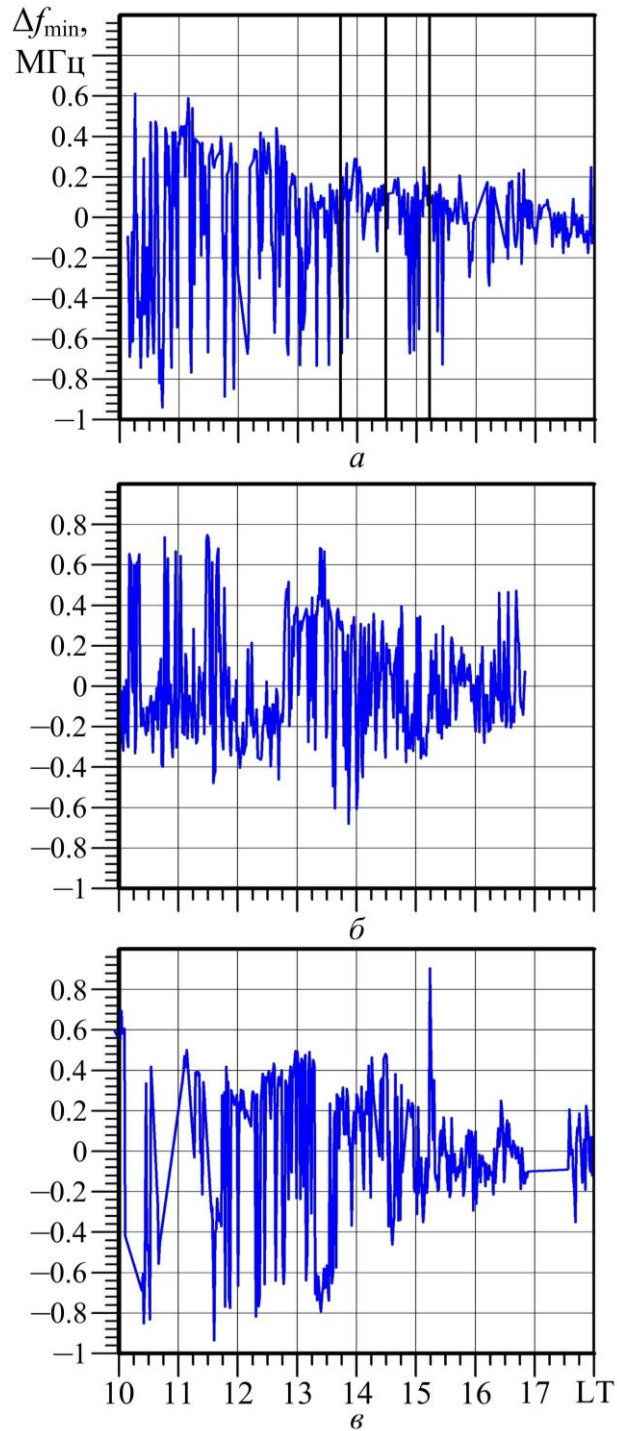


Рис. 7. Часова залежність варіацій мінімальної частоти відбитого сигналу: *a* – 10 червня 2021 р.;
б – 11 червня 2021 р.; *в* – 24 червня 2021 р.

Fig. 7. Time dependence of variations of the minimum frequency of the signal reflected: *a* is of the June 10, 2021; *б* is of the June 11, 2021; *в* is of the June 24, 2021

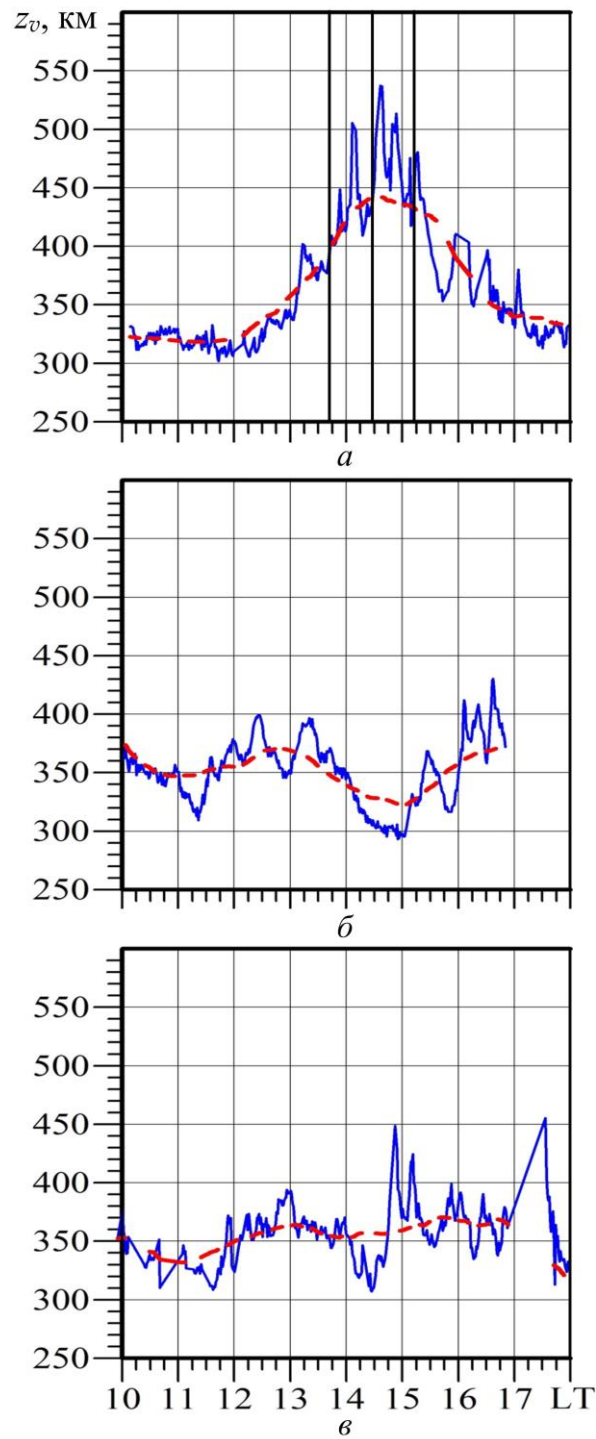


Рис. 8. Часова залежність діючої висоти F2-шару іоносфери. Переривчасті лінії – ковзна середня за 120 хв: *a* – 10 червня 2021 р.; *б* – 11 червня 2021 р.; *в* – 24 червня 2021 р.
 Fig. 8. Time dependence of the virtual height of the F2-layer of the ionosphere. Dashed lines are 120-min moving average: *a* is of the June 10, 2021; *б* is of the June 11, 2021; *в* is of the June 24, 2021

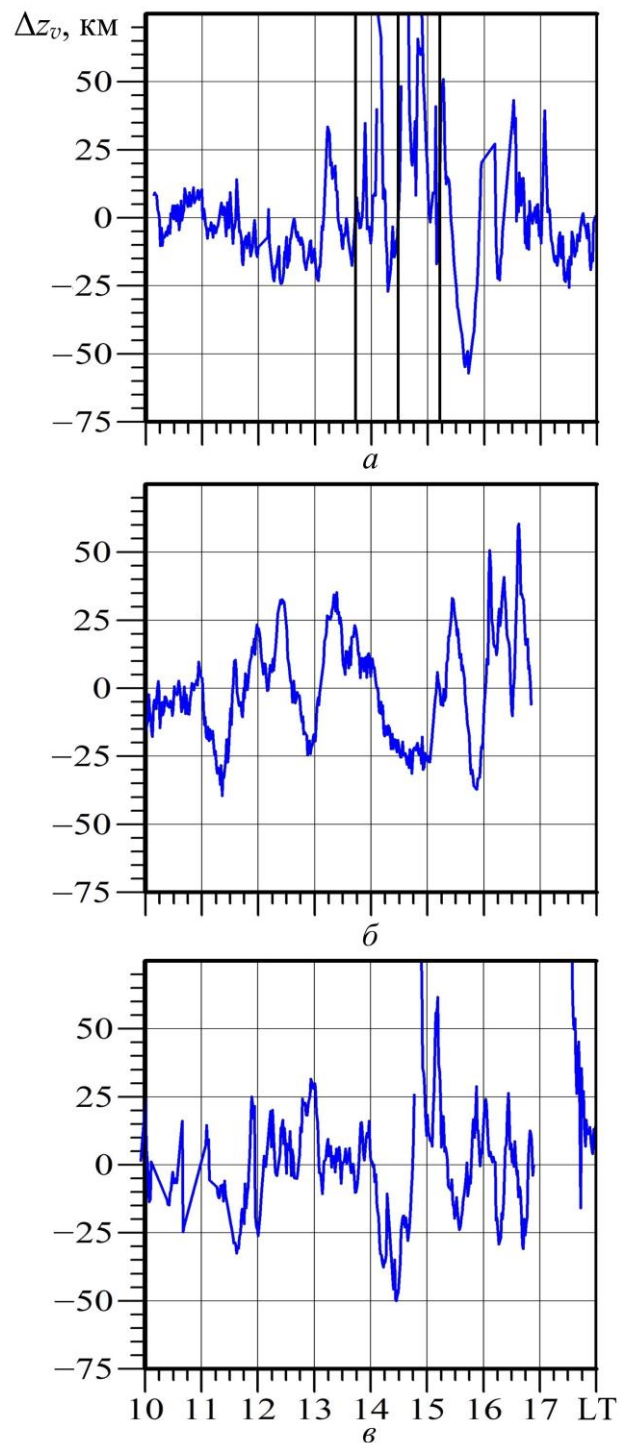


Рис. 9. Часова залежність варіацій діючої висоти F2-шару іоносфери: *a* – 10 червня 2021 р.; *б* – 11 червня 2021 р.; *в* – 24 червня 2021 р.

Fig. 9. Time dependence of variations in the virtual height of the F2-layer of the ionosphere: *a* is of the June 10, 2021; *б* is of the June 11, 2021; *в* is of the June 24, 2021

Зауважимо, що максимальне зменшення \bar{N} спостерігалось о 14:40.5, тобто через час $\tau \approx 12.5$ хв після настання максимальної фази СЗ. Час $\tau = \beta^{-1}$. Поблизу висоти максимуму шару F2, яка протягом СЗ була близько 250 км, значення $\beta \approx 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ [74, 75]. Тоді розрахункове значення $\tau \approx 12.8$ хв, що дуже близько до спостережуваного ($\tau \approx 12.5$ хв).

Додамо, що час запізнювання, близький до $\tau \approx 12.5$ хв, протягом СЗ неодноразово рееструвалося за допомогою мережі іонозондів, радара некогерентного розсіяння та інших засобів [59]. Це означає, що спостережуване зменшення N протягом часу СЗ дійсно викликано затемненням.

Знаючи β_0 і $N_0 \approx (2.9-3.0) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, можна оцінити швидкість іоноутворення $\beta_0 N_0 \approx (3.8-3.9) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Квазіперіодичні варіації. З Рис. 5 видно, що до настання СЗ і після нього період квазіперіодичних варіацій був досить великим: 40–60 хв. Протягом СЗ він становив 10–15 хв. У сусідній день також $T \approx 60-100$ хв. Є всі підстави вважати, що протягом СЗ генерувалися квазіперіодичні варіації концентрації електронів з відносно невеликим періодом (10–15 хв) і амплітудою 1.7–4%. Підтвердимо це за даними вимірів діючої висоти шару F2 (див. Рис. 7). Протягом СЗ мали місце квазіперіодичні варіації z_v з таким же періодом 10–15 хв і амплітудою 40–50 км (відносною амплітудою 9.1–11.4%). 11 червня 2021 р. період становив 30–60 хв, а $\delta_N \approx 2.9-8.6\%$.

Варіації мінімальної спостережуваної частоти. Протягом СЗ у варіаціях f_{\min} спостерігалось два ефекта, які були відсутні в сусідній день. По-перше, у 3–4 рази зменшився рівень флуктуацій f_{\min} (див. Рис. 9). По-друге, протягом СЗ помітно зменшилися значення $\overline{f_{\min}}$ від 3 до 2.85 МГц (на 5%) (див. Рис. 8). Це зменшення також свідчить про зменшення протягом СЗ значень N у нижній іоносфері ($z \leq 100$ км). Знаючи $\overline{f_{\min}} \approx 2.85$ МГц, $\overline{f_{\min o}} \approx 3$ МГц і гірчастоту електронів $f_B \approx 1.5$ МГц за співвідношенням з роботи [76] можна оцінити δ_N . Воно виявилось близько 2.2%.

За розрахунками

$$\delta_N = 1 - \sqrt{\frac{B + \xi}{1 + \xi}} \approx 2.0\%.$$

Як видно, результати спостережень дають близьке (2.2%) значення до розрахункового (2.0%).

Додамо, що відмінності у поведінці трендів \overline{N} , z_v і $\overline{f_{\min}}$ 10 та 24 червня були суттєвими до 16:15–16:30. Це може свідчити про те, що ефекти СЗ продовжувалися протягом цілої години після закінчення затемнення. Подібні ефекти ми спостерігали і впродовж інших СЗ [59].

Таким чином, часткове СЗ з дуже невеликими максимальними значеннями фази (0.112) та відносною площі покриття диска Сонця (4.4%) призвело до ряду спостережуваних за допомогою іонозонда ефектів в іоносфері.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Іонозондові спостереження за станом іоносфери в день СЗ і в контрольний день дозволили виявити ряд ефектів, обумовлених затемненням.

1. Виявлено максимальне зменшення концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери на 3.7–3.8%. Це значення виявилось дуже близьким до розрахункового 3.5–3.8%.

2. Встановлено, що час запізнювання спостереження мінімального значення концентрації електронів по відношенню до максимального значення фази затемнення становило 12.5 хв, що дуже близько до розрахункового часу 12.8 хв. За часом запізнювання оцінений коефіцієнт лінійної рекомбінації ($1.3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) і швидкість іоноутворення $(3.8-3.9) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

3. СЗ супроводжувалося генерацією квазіперіодичних коливань концентрації електронів і діючої висоти шару F2 з періодом 10–15 хв і амплітудами 1.7–4% та 9.1–11.4% відповідно.

4. Протягом СЗ у 3–4 рази зменшився рівень флуктуацій мінімальної спостережуваної на іонограмах частоти. Крім того, мало місце зменшення усереднених значень $\overline{f_{\min}}$ від 3 до 2.85 МГц (на 5%), що свідчило про зменшення поглинання радіохвилі та концентрації електронів у нижній іоносфері (висоти менше 100 км). За оцінками це зменшення склало близько 2% (з даних спостережень 2.2%).

5. Реакція на СЗ спостерігалася, швидше за все, і після його закінчення протягом ~ 1 години.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф. виконано в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Також робота Черногора Л. Ф. та Цимбала А. М. частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Eccles WH. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. 1912;69:109-117.
2. Mimno HR, Wang PH. Continuous Kennelley-Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer). *Proc. Inst. Radio Engrs*. 1933;21:529-545.
3. Васильев КН, Велешин АС, Косенков АР. Ионосферный эффект солнечного затмения 15 февраля 1961 г. по наблюдениям в Москве. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961;1(2):277-278.
4. Гришкевич ЛВ, Васин ВА. 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):949-954.
5. Данилкин НП, Коченова НА, Свечников АМ. Состояние ионосферы над Ростовом-на-Дону в период солнечного затмения 15 февраля 1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961;1(4):612-615.
6. Суханова РД. Ионосферный эффект солнечного затмения 15.02.1961 г. по наблюдениям в Солехарде. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961;1(6):1066-1067.
7. Шапиро БС, Шашунькина ВМ. Движения в области F ионосферы над Тбилиси в период затмения 15.02.1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961;1(5):760-765.
8. Шашунькина ВМ, Турбин РИ. Предварительные результаты наблюдений ионосферного эффекта солнечного затмения 15.02.1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961;1(5):835-838.
9. Evans JV. An F region eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965;70(1):131-142. <https://doi.org/10.1029/JZ070i001p00131>
10. Klobuchar JA, Whitney HE. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965;70(5):1254-1257. <https://doi.org/10.1029/JZ070i005p01254>
11. Hunter AN, Holman BK, Feldgate DG, Kelleher R. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature*. 1974;250:205-206. <https://doi.org/10.1038/250205a0>
12. Afraimovich EL, Palamartchouk KS, Perevalova NP, Chernukhov VV, Lukhnev AV, Zalutsky VT. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998;25(4):465-468. <https://doi.org/10.1029/98GL00186>
13. Афраймович ЭЛ, Перевалова НП. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
14. Bertin F, Hughes KA, Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1977;39(4):457-461. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(77\)90153-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(77)90153-2)
15. Sen Gupta A, Goel GK, Mathur BS. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980;42(11/12):907-909. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90107-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90107-5)
16. Cohen EA. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 1984;19(3):769-777. <https://doi.org/10.1029/RS019i003p00769>
17. Salah JE, Oliver WL, Foster JC, Holt JM. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 1986;91(A2):1651-1660. <https://doi.org/10.1029/JA091iA02p01651>
18. Cheng K, Huang YN, Chen SW. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992;97(A1):103-111. <https://doi.org/10.1029/91JA02409>
19. Huang CR, Liu CH, Yeh KC, Lin KH, Tsai WH, Yeh HC, Liu JY. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1999;104(A1):79-94. <https://doi.org/10.1029/98JA02531>
20. Борисов ББ, Егоров ДА, Егоров НЕ, Колесник АГ, Колесник СА, Мельчинов ВП, Нагорский ПМ, Парфенов СС, Решетников ДД, Смирнов ВФ, Степанов АЕ, Тарашук ЮЕ, Тельпуховский ЕД, Цыбикиев ББ, Шинкеев БМ. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000;40(3):94-103.
21. Гоков АМ, Черногор ЛФ. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000;5(4):348-360.
22. Костров ЛС, Черногор ЛФ. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствовавших затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000;5(4):361-371.
23. Черногор ЛФ. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000;5(4):371-376.
24. Урядов ВП, Леонов АМ, Понятов АА, Бойко ГН, Терентьев СП. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000;43(8):682-686.
25. Farges T, Jodogne JC, Bamford R, Roux YLe, Gauthier F, Vila PM, Altadill D, Sole JG, 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):915-924. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00195-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00195-4)
26. Акимов ЛА, Григоренко ЕИ, Таран ВИ, Тырнов ОФ, Черногор ЛФ. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2002;(2):25-63.

27. Акимов ЛА, Григоренко ЕИ, Таран ВИ, Черногор ЛФ. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005;(3):55-70.
28. Акимов ЛА, Боговский ВК, Григоренко ЕИ, Таран ВИ, Черногор ЛФ. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005;45(4):526-551.
29. Афраймович ЭЛ, Воейков СВ, Перевалова НП, Водяников ВВ, Гордиенко ГИ, Литвинов ЮГ, Яковец АФ. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007;47(4):491-500.
30. Беликович ВВ, Вяхирев ВД, Калинина ЕЕ, Терещенко ВД, Черняков СМ, Терещенко ВА. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008;48(1):103-108.
31. Бурмака ВП, Лысенко ВН, Ляшенко МВ, Черногор ЛФ. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2007;13(6):74-86. <https://doi.org/10.15407/knit2007.06.074>
32. Adeniyi JO, Radicella SM, Adimula IA, Willoughby AA, Oladipo OA, Olawepo O. Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station. *J. Geophys. Res.* 2007;112:A06314. <https://doi.org/10.1029/2006JA012197>
33. Tomas AT, Luhr H, Forster M, Rentz S, Rother M. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 2007;112:A06303. <https://doi.org/10.1029/2006JA012168>
34. 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. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5543-2007>
35. Григоренко ЕИ, Ляшенко МВ, Черногор ЛФ. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008;48(3):350-364.
36. Le H, Liu L, Yue X, Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Annales Geophysicae*. 2008;26:107-116. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-107-2008>
37. Кашеев СБ, Зализовский АВ, Колосков АВ, Галушко ВГ, Пикулик ИИ, Ямпольский ЮМ, Куркин ВИ, Литовкин ГИ, Орлов АИ. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009;14(4):353-366. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/500>
38. Ковалев АА, Колесник АГ, Колесник СА, Колмаков АА, Латыпов РР. Ионосферные эффекты солнечных затмений на средних широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2009;49(4):500-506.
39. Le H, Liu L, Yue X, Wan W, Ning B. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses. *J. Geophys. Res.* 2009;114(A7):A07308. <https://doi.org/10.1029/2009JA014072>
40. Акимов АЛ, Черногор ЛФ. Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008 г. в приземной атмосфере. *Кинематика и физика небесных тел*. 2010;26(3):58-74. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73243>
41. Черногор ЛФ. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2010;50(1):100-110.
42. Черногор ЛФ. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2010;50(3):361-376.
43. 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. <https://doi.org/10.1029/2010JA015530>
44. Черногор ЛФ, Барабаш ВВ. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011;17(4):41-52. <https://doi.org/10.15407/knit2011.04.041>
45. 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. <https://doi.org/10.1029/2010JA016305>
46. Гармаш КП, Леус СГ, Черногор ЛФ. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011;16(2):164-176. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/442>
47. Домнин ИФ, Емельянов ЛЯ, Черногор ЛФ. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012;17(2):132-145.
48. Черногор ЛФ. Динамические процессы в приземной атмосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2011;47(1):84-95.
49. Черногор ЛФ. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012;52(6):807-817.

50. Черногор ЛФ. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный анализ. Геомагнетизм и аэронавигация. 2012;52(6):818-831.
51. Бурмака ВП, Черногор ЛФ. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты наблюдений волновых возмущений в ионосфере. Геомагнетизм и аэронавигация. 2013;53(4):509-521.
52. Черногор ЛФ. Физические процессы в средней ионосфере, сопровождавшие солнечное затмение в Харькове 4 января 2011 г. Геомагнетизм и аэронавигация. 2013;53(1):22-34.
53. Домнин ИФ, Емельянов ЛЯ, Котов ДВ, Ляшенко МВ, Черногор ЛФ. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений методом некогерентного рассеяния. Геомагнетизм и аэронавигация. 2013;53(1):119-129.
54. Lyashenko MV, Chernogor LF. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion. Geomagnetism and Aeronomy. 2013;53(3):367-376. <https://doi.org/10.1134/S0016793213020096>
55. Chernogor LF, Grigorenko YeI, Lyashenko MV. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. International Journal of Remote Sensing. 2014;32(11):3219-3229. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541509>
56. Domnin IF, Emelyanov LY, Lyashenko MV, Chernogor LF. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. Geomagnetism and Aeronomy. 2014;54(5):583-592. <https://doi.org/10.1134/S0016793214040112>
57. Черногор ЛФ, Барабаш ВВ. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. Радиофизика и радиоастрономия. 2015;20(4):311-331. <https://doi.org/10.15407/rpra20.04.311>
58. Черногор ЛФ. Волновые процессы в ионосфере над Европой, сопровождавшие солнечное затмение 20 марта 2015 г. Кинематика и физика небесных тел. 2016;32(4):60-72. <http://kfmt.mao.kiev.ua/ru/archive/2016/4/5>
59. Черногор ЛФ. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина; 2013. 480 с.
60. Черногор ЛФ. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. Радиофизика и радиоастрономия. 2003;8(1):59-106. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/797/435>
61. Черногор ЛФ. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. Нелинейный мир. 2006;4(12):655-697.
62. Черногор ЛФ. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2. Нелинейный мир. 2007;5(4):198-231.
63. Chernogor LF, Rozumenko VT. Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. Radio Phys. Radio Astron. 2008;13(2):120-137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563/134>
64. Chernogor LF. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. International Journal of Remote Sensing. 2011;32(11):3199-3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
65. Черногор ЛФ. Тепловый эффект солнечного затемнения 10 червня 2021 р. в приземній атмосфері. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021;37(6):34-48. <https://doi.org/10.15407/kfmt2021.06.003>
66. Черногор ЛФ. Эффект конвекции в приземной атмосфере протягом сонячних затемнень 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021;37(6):19-33. <https://doi.org/10.15407/kfmt2021.06.003>
67. Черногор ЛФ. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021. (У друці).
68. Черногор ЛФ, Голуб МЮ, Луо Y, Цимбал АМ, Шевелев МБ. Варіації геомагнітного поля, що супроводжували сонячне затемнення 10 червня 2021 р. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021;34:63-78. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-07>
69. Черногор ЛФ, Гармаш КП. Іоносферні процеси протягом часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021. (У друці).
70. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Жданко ЄГ, Леус СГ, Луо Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. Радиофизика і радиоастрономия. 2021;26(4). (У друці).
71. Черногор ЛФ. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. Геомагнетизм и аэронавигация. 2008;48(5):681-702.
72. Черногор ЛФ, Домнин ИФ. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
73. Черногор ЛФ. Фізика геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2021;27(1(128)):3-77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>
74. Брюнелли БЕ, Намгаладзе АЛ. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
75. Schunk RW, Nagy A. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. Cambridge University Press; 2000. 554 p.
76. Черногор ЛФ. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015. 544 с.

REFERENCES

1. Eccles WH. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. 1912;69:109-117.
2. Mimno HR, Wang PH. Continuous Kennelley-Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer). *Proc. Inst. Radio Engrs*. 1933;21:529-545.
3. Vasiliev KN, Veleshin AS, Kosenkov AR. Ionospheric effects of the solar eclipse of February 15, 1961, according to the Moscow observations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1961;1(2):277-278. (In Russian).
4. Grishkevich LV, Vasin VA. On the effects of the ionosphere observed during a solar eclipse of December 02, 1956, and December 02, 1961, in Gorky. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1961;1(6):949-954. (In Russian).
5. Danilkin NP, Kochenova NA, Svechnikov AM. State of the ionosphere over Rostov-on-Don during the solar eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1961;1(4):612-615. (In Russian).
6. Sukhanova RD. Ionospheric effects of the solar eclipse of February 15, 1961, on observations to the Salekhard. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1961;1(6):1066-1067. (In Russian).
7. Shapiro BS, Shashunkina VM. Movement in the F region of the ionosphere over Tbilisi during the eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1961;1(5):760-765. (In Russian).
8. Shashunkina VM, Turbin RI. Preliminary observations of ionospheric effects of solar eclipse of February 15, 1961. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1961;1(5):835-838. (In Russian).
9. Evans JV. An F region eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965;70(1):131-142. <https://doi.org/10.1029/JZ070i001p00131>
10. Klobuchar JA, Whitney HE. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965;70(5):1254-1257. <https://doi.org/10.1029/JZ070i005p01254>
11. Hunter AN, Holman BK, Feldgate DG, Kelleher R. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature*. 1974;250:205-206. <https://doi.org/10.1038/250205a0>
12. Afraimovich EL, Palamartchouk KS, Perevalova NP, Chernukhov VV, Lukhnev AV, Zalutsky VT. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998;25(4):465-468. <https://doi.org/10.1029/98GL00186>
13. Afraimovich EL, Perevalova NP. GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere. Irkutsk: Solar-Terrestrial Physics Institute SD RAS: SI SC RRS ESSC SD RAMS; 2006. 479 p. (In Russian).
14. Bertin F, Hughes KA, Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1977;39(4):457-461. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(77\)90153-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(77)90153-2)
15. Sen Gupta A, Goel GK, Mathur BS. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980;42(11/12):907-909. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90107-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90107-5)
16. Cohen EA. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 1984;19(3):769-777. <https://doi.org/10.1029/RS019i003p00769>
17. Salah JE, Oliver WL, Foster JC, Holt JM. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 1986;91(A2):1651-1660. <https://doi.org/10.1029/JA091iA02p01651>
18. Cheng K, Huang YN, Chen SW. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992;97(A1):103-111. <https://doi.org/10.1029/91JA02409>
19. Huang CR, Liu CH, Yeh KC, Lin KH, Tsai WH, Yeh HC, Liu JY. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1999;104(A1):79-94. <https://doi.org/10.1029/98JA02531>
20. Borisov BB, Yegorov DA, Yegorov NE, Kolesnik AG, Kolesnik SA, Melchinov VP, Nagorskiy PM, Parfenov SS, Reshetnikov DD, Smirnov VF, Stepanov AE, Tarashchuk YE, Telpuhovskiy ED, Tsybikov BB, Shinkevich BM. A comprehensive experimental study of the reaction of the ionosphere on solar eclipse March 9, 1997. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2000;40(3):94-103. (In Russian).
21. Gokov AM, Chernogor LF. Processes in Lower Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio phys. radio astron.* 2000;5(4):348-360. (In Russian).
22. Kostrov LS, Chernogor LF. Processes in Bottomside Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio phys. radio astron.* 2000;5(4):361-371. (In Russian).
23. Chernogor LF. Magnetosphere Electron Precipitation Induced by a Solar Eclipse. *Radio phys. radio astron.* 2000;5(4):371-376. (In Russian).
24. Uryadov VP, Leonov AM, Ponyatov AA, Boiko GN, Terent'ev SP. Variations in the Characteristics of a HF Signal over an Oblique Sounding Path during the Solar Eclipse on August 11, 1999. *Radiophys. Quant. El.* 2000;43:614-618. <https://doi.org/10.1023/A:1004801201847>
25. Farges T, Jodogne JC, Bamford R, Roux YLe, Gauthier F, Vila PM, Altadill D, Sole JG, 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):915-924. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00195-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00195-4)
26. Akimov LA, Grigorenko EI, Taran VI, Tyrnov OF, Chernogor LF. 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*. 2002;(2):25-63. (In Russian).

27. Akimov LA, Grigorenko EI, Taran VI, Chernogor LF. Features atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003: The results of the optical and radio physical observations in Kharkov. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2005;(3):55-70. (In Russian).
28. Akimov LA, Bogovskii VK, Grigorenko EI, Taran VI, Chernogor LF. Atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005;45(4):494-518. (In Russian).
29. Afraimovich EL, Voeykov SV, Perevalova NP, Vodyannikov VV, Gordienko GI, Litvinov YuG, Yakovets AF. Ionospheric effects of the March 29, 2006, solar eclipse over Kazakhstan. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2007;47(4):461-469. <https://doi.org/10.1134/S0016793207040068>
30. Belikovich VV, Vyakhirev VD, Kalinina EE, Tereshchenko VD, Chernyakov SM, Tereshchenko VA. Ionospheric response to the partial solar eclipse of March 29, 2006, according to the observations at Nizhni Novgorod and Murmansk. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008;48(1):98-103. <https://doi.org/10.1134/S0016793208010118>
31. Burmaka VP, Lysenko VN, Lyashenko MV, Chernogor LF. Tropospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 1. Observations. *Space Science and Technology*. 2007;13(6):74-86. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/knit2007.06.074>
32. Adeniyi JO, Radicella SM, Adimula IA, Willoughby AA, Oladipo OA, Olawepo O. Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station. *J. Geophys. Res.* 2007;112:A06314. <https://doi.org/10.1029/2006JA012197>
33. Tomas AT, Luhr H, Forster M, Rentz S, Rother M. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 2007;112:A06303. <https://doi.org/10.1029/2006JA012168>
34. 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. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5543-2007>
35. Grigorenko EI, Lyashenko MV, Chernogor LF. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008;48(3):337-351. <https://doi.org/10.1134/S0016793208030092>
36. Le H, Liu L, Yue X, Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Annales Geophysicae*. 2008;26:107-116. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-107-2008>
37. Kascheev SB, Zalizovski AV, Koloskov AV, Galushko VG, Pikulik II, Yampolski YM, Kurkin VI, Litovkin GI, Orlov AI. Frequency Variations of HF Signals at Long-Range Radio Paths during a Solar Eclipse. *Radio phys. radio astron.* 2009;14(4):353-366. (In Russian). <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/500>
38. Kovalev AA, Kolesnik AG, Kolesnik SA, Kolmakov AA, Latypov RR. Ionospheric effects of solar eclipses at midlatitudes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009;49(4):476-482. <https://doi.org/10.1134/S0016793209040070>
39. Le H, Liu L, Yue X, Wan W, Ning B. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses. *J. Geophys. Res.* 2009;114(A7):A07308. <https://doi.org/10.1029/2009JA014072>
40. Akimov AL, Chernogor LF. Effects of the solar eclipse of August 1, 2008 on the Earth's lower atmosphere. *Kinematics and physics of celestial bodies*. 2010;26(3):135-145. <https://doi.org/10.3103/S0884591310030050>
41. Chernogor LF. 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):96-106. <https://doi.org/10.1134/S0016793210010111>
42. Chernogor LF. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010;50(3):346-361. <https://doi.org/10.1134/S0016793210030096>
43. 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. <https://doi.org/10.1029/2010JA015530>
44. Chernogor LF, Barabash VV. The response of the middle ionosphere to the solar eclipse of 4 January 2011 in Kharkiv: some results of vertical sounding. *Space Science and Technology*. 2011;17(4):41-52. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/knit2011.04.041>
45. 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. <https://doi.org/10.1029/2010JA016305>
46. Garmash KP, Leus SG, Chernogor LF. Radiophysical effects of the January 4, 2011 solar eclipse as observed in the parameters of obliquely propagating HF signals. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2011;2(4):325-337. <https://doi.org/10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.50>
47. Domnin IF, Yemel'yanov LYa, Chernogor LF. The Dynamics of Ionosphere Plasma over Kharkiv during the Solar Eclipse of January 4, 2011. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2012;17(2):132-145.
48. Chernogor LF. Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011;47(1):77-86. <https://doi.org/10.1134/S000143381101004X>

49. Chernogor LF. Effects of solar eclipses in the ionosphere: doppler sounding results: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012;52(6):768-778. <https://doi.org/10.1134/S0016793212050039>
50. Chernogor LF. Effects of solar eclipses in the ionosphere: doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012;52(6):779-792. <https://doi.org/10.1134/S0016793212050040>
51. Burmaka VP, Chernogor LF. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation Results of Wave Disturbances in the Ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013;53(4):479-491. <https://doi.org/10.1134/S001679321304004X>
52. Chernogor LF. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013;53(1):19-31. <https://doi.org/10.1134/S0016793213010052>
53. Domnin IF, Yemel'yanov LYa, Kotov DV, Lyashenko MV, Chernogor LF. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of Incoherent Scatter Observations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013;53(1):113-123. <https://doi.org/10.1134/S0016793213010076>
54. Lyashenko MV, Chernogor LF. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013;53(3):367-376. <https://doi.org/10.1134/S0016793213020096>
55. Chernogor LF, Grigorenko YeI, Lyashenko MV. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing*. 2014;32(11):3219-3229. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541509>
56. Domnin IF, Emelyanov LY, Lyashenko MV, Chernogor LF. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014;54(5):583-592. <https://doi.org/10.1134/S0016793214040112>
57. Chernogor LF, Barabash VV. The Effects of Solar Eclipse of March 20, 2015 over Ionosphere of Europe: Ionosonde Observations. *Radiophysics and Radio Astronomy*. 2015;20(4):311-331. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/rpra20.04.311>
58. Chernogor LF. Propagating waves and processes associated with the March 20, 2015 solar eclipse in the ionosphere over Europe. *Kinematics and physics of celestial bodies*. 2016;32(4):60-72. (In Russian). <http://kfnt.mao.kiev.ua/en/archive/2016/4/5>
59. Chernogor LF. Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University; 2013. 480 c. (In Russian).
60. Chernogor LF. Physics of the Earth, atmosphere and geocosmos in the light of the systemic paradigm. *Radiophysics and Radio Astronomy*. 2003;8(1):59-106. (In Russian). <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/797/435>
61. Chernogor LF. Earth–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere as Opened Dynamic Nonlinear Physical System. 1. *Nelinejnyj mir*. 2006;4(12):655–697. (In Russian).
62. Chernogor LF. Earth–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere as Opened Dynamic Nonlinear Physical System. 2. *Nelinejnyj mir*. 2007;5(4):198–231. (In Russian).
63. Chernogor LF, Rozumenko VT. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron*. 2008;13(2):120-137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563/134>
64. Chernogor LF. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. *International Journal of Remote Sensing*. 2011;32(11):3199-3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
65. Chernogor LF. Thermal effect of the 10 June 2021 Annular Solar Eclipse in the Atmospheric Surface Layer. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2021;37(6):34-48. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.06.003>
66. Chernogor LF. Convection Effect in the Atmospheric Surface Layer in the Course of Solar Eclipses of 20 March 2015 and 10 June 2021. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2021;37(6):19-33. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.06.003>
67. Chernogor LF. Geomagnetic effect of the solar eclipse on June 10, 2021. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2021. (In press).
68. Chernogor LF, Holub MYu, Luo Y, Tsymbal AM, Shevelev MB. Variations in the Geomagnetic Field That Accompanied the 10 June 2021 Solar Eclipse. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”*. 2021;34:63-78. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-07> (In Ukrainian).
69. Chernogor LF, Garmash KP. Ionospheric Processes During the 10 June 2021 Partial Solar Eclipse at Kharkiv. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2021. (In press).
70. Chernogor LF, Garmash KP, Zhdanko YH, Leus SG, Luo Y. Features of ionospheric effects from the partial solar eclipse over the city of Kharkiv on 10 June 2021. *Radio Phys. Radio Astron*. 2021;26(4). (In Ukrainian). (In press).
71. Chernogor LF. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008;48(5):652–673. <https://doi.org/10.1134/S0016793208050101>
72. Chernogor LF, Domnin IF. Physics of geospace storms: Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine; 2014. 408 p. (In Russian).
73. Chernogor LF. Physics of Geospace Storms. *Space Science and Technology*. 2021;27(1(128)):3-77. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>

74. Bryunelli BE, Namgaladze AA. Fizika ionosfery (Ionospheric Physics). Moscow: Nauka, 1988. 528 p.
75. Schunk RW, Nagy A. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. Cambridge University Press; 2000. 554 p.
76. Chernogor LF. Fizika moshchnogo radioizlucheniya v geokosmose (Physics of High-Power Radio Emission in Geospace): Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University; 2015. 544 p.

Стаття надійшла до редакції: 27 вересня 2021 р.

Рекомендовано до друку: 10 листопада 2021 р.

EFFECTS FROM THE JUNE 10, 2021 SOLAR ECLIPSE IN THE IONOSPHERE OVER KHARKIV: RESULTS FROM IONOSONDE MEASUREMENTS

L. F. Chernogor, L. I. Mylovanova, Yu. B. Mylovanov, A. M. Tsymbal, Y. Luo,
V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, 61022, Kharkiv, Svobody Square, 4

Background. Ionospheric effects from solar eclipses (SEs) have been studied for over a century. The studies intensified in the 1960–1970, when rockets, satellites, ionosonde networks, and incoherent scatter radars became actively involved in the investigations. The following basic features of SEs displayed in the ionosphere have been established: a decrease in the electron density and the electron, ion, and neutral temperatures, changes in the dynamics of the ionosphere, and the generation of acoustic and atmospheric gravity waves. The recurring regular features are observed together with the features pertaining to each individual SE. Therefore, the study of the effects of each new solar eclipse is an urgent task.

The purpose of this paper is to present the results of analysis of the ionogram measurements acquired by the digisonde located at the Radiophysical Observatory, V. N. Karazin Kharkiv National University.

Techniques and Methodology. The observations of the state of the ionosphere were made using the digisonde specifically developed by the V. N. Karazin Kharkiv National University and located at the V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory (49°38' N, 36°20' E). The data processing included the following. First, the time series of critical F2-layer frequencies, f_oF2 , of the minimum frequency, f_{min} , observed on an ionogram, and of the virtual height were plotted. Second, the trends and the differences between the initial series and the trends were calculated. Third, given the $f_oF2(t)$ values, the electron densities $N(t)$ and their increments $\Delta N(t)$ were calculated, and fourth, the systems spectral analysis of $\Delta N(t)$ dependences was conducted to determine the spectral content.

Results. A maximum decrease of 3.7–3.8% in the F2 peak electron density has been detected. This value agrees very well with the calculated value of 3.5–3.8%. The time delay between the minimum in the electron density observed and the maximum value of the phase of the solar eclipse was determined to be 12.5 min, which is in good agreement with the calculated value of 12.8 min. The time delay suggests that the linear loss coefficient was $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and the production rate was $(3.8\text{--}3.9) \times 10^8 \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. The SE was associated with the generation of quasi-periodic oscillations in the electron density and the F2 layer virtual height, within the period range of 10–15 min, and with amplitudes of 1.7–4% and 9.1–11.4%, respectively. The fluctuations in the minimum frequency observed on the ionograms showed a factor of 3–4 times decrease in the course of the SE. In addition, a decrease in the averaged values $\overline{f_{min}}$ was observed to occur from 3 to 2.85 MHz (by 5%), which suggested that the radio wave attenuation by absorption decreased due to a decrease in the lower-ionosphere electron density below 100 km altitude. This decrease was estimated to be about 2%, while the decrease determined from the observations gave 2.2%.

Conclusions. The partial solar eclipse with a very small value of the maximum magnitude (0.112) and obscuration of 4.4% acted to produce a few effects observed in the ionosphere with the ionosonde.

KEY WORDS: solar eclipse, ionosphere, ionosonde, virtual height, electron density, maximum decrease, quasi-periodic oscillation

The article was received by the editors: September 27 2021.

The article is recommended for printing: November 10 2021.