

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-06>

УДК 550:388

Л. Ф. Черногор, д. ф.-м. наук, проф.

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

В. Л. Дорохов, н. с.

e-mail: vasiliy.l.dorohov@karazin.ua

Є. Г. Жданко, аспірант, м. н. с.

e-mail: eugenezhd@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4612-4194>

Ю. Б. Милованов, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

e-mail: hobit1957@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0207-3329>

А. М. Цимбал, к. ф.-м. наук, доц.

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

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи,
4

ОСОБЛИВОСТІ ІОНОСФЕРНИХ ЕФЕКТІВ ЧАСТКОВОГО СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 25 ЖОВТНЯ 2022 р. ПОБЛИЗУ ВЕЧІРНЬОГО ТЕРМІНАТОРА

Актуальність. Іоносфера залишається основним каналом, який використовується засобами радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії. Параметри цього каналу суттєво залежать від впливу високоенергетичних джерел, що мають місце в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ). Одним із таких джерел є сонячне затемнення (СЗ). Актуальною задачею є дослідження особливостей реакції іоносфери на дію СЗ, що має місце поблизу моментів заходу Сонця.

Метою цієї роботи є опис результатів дослідження часових варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) в іоносфері, викликаних СЗ поблизу вечірнього термінатора.

Методи і методологія. У якості первинних даних використано результати вимірювання параметрів радіосигналів Глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) GPS на станції NVSK для шести супутників (G04, G07, G09, G16, G26 і G27). Похибка оцінки ПЕВ не перевищувала 1%.

Результати. Вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію ПЕВ на сонячне затемнення, що мало місце перед проходженням та в період проходження вечірнього термінатора. Встановлено, що СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі. Тривалість реакції сягала 120–180 хв. За максимальної фази СЗ дефіцит ПЕВ не перевищував 5 TECU або 33–36%. Величина дефіциту в цілому відстежувала зменшення фази СЗ та площі покриття диску Сонця. Є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія двох наступних джерел – сонячного затемнення та термінатора.

Висновки. Встановлено основні особливості іоносферних ефектів сонячного затемнення в період дії вечірнього термінатора.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: іоносфера, сонячне затемнення, повний електронний вміст, дефіцит ПЕВ, тривалість реакції, особливості іоносферних ефектів

Як цитувати: Черногор ЛФ, Дорохов ВЛ, Жданко ЄГ, Милованов ЮБ, Цимбал АМ. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. поблизу вечірнього термінатора. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023;39:69-78. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-06>

In cites: Chernogor LF, Dorokhov VL, Zhdanko YH, Mylovanov YuB, Tsymbal AM. Features of ionospheric effects from the partial solar eclipse of October 25, 2022, near the evening terminator. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 39:69-78. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-06>

ВСТУП

Іоносфера залишається основним каналом, який використовується засобами радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії. Параметри цього каналу суттєво залежать від високоенергетичних джерел, що впливають на іоносферу. Сонячне затемнення (СЗ) – високоенергетичне джерело, яке здатне викликати значні збурення у всіх підсистемах системи Земля –

атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) [1]. Якісно ефекти під час СЗ подібні ефектам, що спостерігаються під час заходу та сходу Сонця, але суттєво відрізняються за часовими та просторовими масштабами. Незважаючи на те, що іоносферні ефекти СЗ вивчаються близько 100 років, залишається невирішеною низка питань. До них належить таке питання: в чому полягають особливості СЗ у вечірній час, під час заходу Сонця та поблизу цієї події? Дослідження цих особливостей обумовлює актуальність роботи.

Для вивчення іоносферних ефектів СЗ застосовується цілий арсенал методів: вертикального [2–6] та похилого [7–9] зондування, некогерентного розсіяння [10–20], доплерівського зондування [21–23], ГНСС-технології [24–30] та інші [31–35].

Тільки сонячним затемненням, що мали місце у 2020 та 2021 рр. присвячено велику кількість робіт [6, 9, 27–29, 33, 36, 37]. Це підтверджує тезу про те, що кожне нове СЗ додає нові відомості про ефекти в системі ЗАІМ.

Мета роботи – опис результатів аналізу часових варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) у іоносфері, викликаних СЗ поблизу вечірнього термінатора.

Стаття побудована наступним чином. Після короткого опису загальних відомостей про СЗ 25 жовтня 2022 р., аналізу стану космічної погоди, методів та методології дослідження наведено результати аналізу часових варіацій ПЕВ. Після обговорення отриманих результатів викладено висновки.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

Часткове СЗ 25 жовтня 2022 р. спостерігалось на півночі та в Центральній Європі, на Близькому Сході, на Північному Сході Африки та в більшій частині Азії [<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEdecade/SEdecade2021.html>]. СЗ розпочалося над територією Ісландії о 08:59:10 UT (UT – тут і надалі всесвітній час), а закінчилося в районі Аравійського моря о 13:02:07. Найбільша фаза СЗ складала 0.8611.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Згідно з сайтами [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] і [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] стан космічної погоди був наступний. У день СЗ концентрація частинок у сонячному вітрі не перевищувала $(4-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Їхня швидкість була близькою до 350–450 км/с, температура – $0.5 \cdot 10^5 \text{ К}$, а обчислений динамічний тиск – 1 нПа.

Значення B_z -компоненти міжпланетного магнітного поля флюктували у межах $\pm(1-2) \text{ нТл}$.

Величина розрахованої функції Акасофу, що описує приплив енергії від сонячного вітру до магнітосфери, не перевищувала 1–2 ГДж/с.

Значення K_p -індексу у день СЗ не перевищували 2.

Значення D_{st} -індексу 25 жовтня 2022 р. флюктували у межах $\pm 5 \text{ нТл}$.

Наведені дані про параметри сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля свідчать про те, що стан космічної погоди був незбуреним, а значить, сприятливим для спостереження ефектів СЗ. У якості контрольних днів обрано 21 та 26 жовтня 2022 р., оскільки дні 22–24 жовтня 2022 р. були дещо збуреними.

МЕТОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

Для дослідження іоносферних ефектів використано ГНСС-технології, а саме дані вимірювань сигналів навігаційних супутників G04, G07, G09, G16, G26 і G27 на станції NVSK. Географічні координати станції: 54.840° пн. ш., 83.235° сх. д. Особливістю даних для цієї станції було те, що СЗ спостерігалось поблизу моментів часу проходження вечірнього термінатора. Траєкторії підіоносферних точок для вказаних супутників показано на Рис. 1.

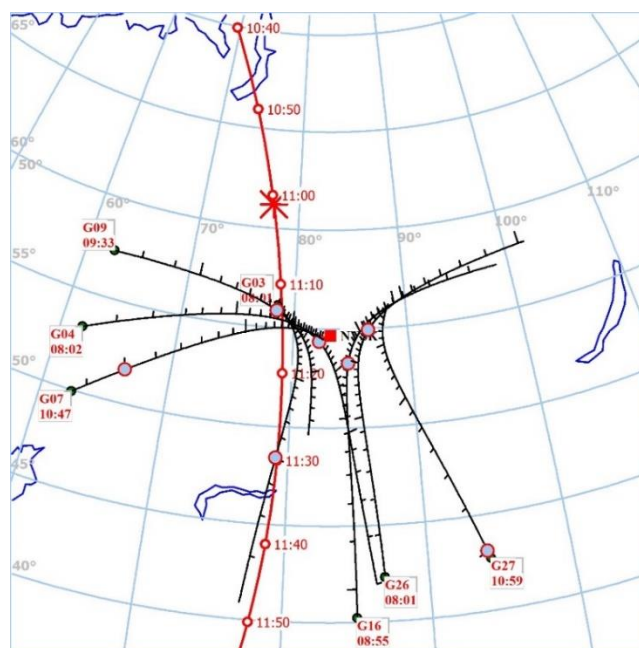


Рис. 1. Траєкторії підіоносферних точок для супутників G04, G07, G09, G16, G26 і G27. Червоним квадратом показано станцію NVSK.

Fig. 1. Trajectories of subionospheric points for the G04, G07, G09, G16, G26, and G27 satellites. Red square shows the NVSK station.

Дані вимірювань параметрів радіосигналів супутників за відомою методикою перетворювалися в часові залежності ПЕВ (див., наприклад, [10, 26–29]). Похибка отримання ПЕВ не перевищувала 0.1 TECU.

Дані про варіації ПЕВ, які супроводжували СЗ, співставлялися з даними про СЗ, а саме фазою M , відносно часткою площі диску Сонця A , покритого диском Місяця, відносно освітленістю E з урахуванням затемнення

$$E_m = E \left(1 - \frac{A}{100\%} \right).$$

Для оцінки цих параметрів СЗ використовувалася методика Ф. Бесселя [38]. Відносна освітленість $E = \cos \chi$ нормована на освітленість у підсонячній точці. Кут χ – це зенітний кут.

Аналізу підлягали часові варіації ПЕВ $N_V(t)$, очікуване значення ПЕВ N_{V0} , яке мало бути за відсутності затемнення, дефіцит ПЕВ $\Delta N_V = N_V - N_{V0}$, відносне зменшення ПЕВ $\delta_V = \Delta N_V / N_{V0}$, час запізнювання реакції Δt ПЕВ на СЗ та тривалість реакції ΔT .

Додамо, що параметри СЗ розраховані для висоти 450 км.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Супутник G04. Часові варіації $N_V(t)$ для 24–27 жовтня 2022 р. наведено на Рис. 2а. Із Рис. 2а видно, що СЗ мало місце приблизно за одну годину до заходу Сонця на поверхні Землі та закінчилося приблизно в момент заходу Сонця на висотах біля 100 км. Зменшення ПЕВ у порівнянні з контрольними днями розпочалося приблизно о 10:15 та продовжувалося й після заходу Сонця на поверхні Землі. Якщо за даними контрольних днів вважати, що $N_{V0} \approx 15$ TECU, $N_{V\min} \approx 10$ TECU, то $\Delta N_{V\min} \approx -5$ TECU, а $\delta_{V\min} \approx -0.33$. Час запізнювання реакції на СЗ складав не менше 30 хв, якщо його відраховувати від моменту закінчення затемнення. Тривалість реакції, певно, була не менше 180 хв, точніше її визначити не представляється можливим.

Супутник G07. СЗ закінчилося після заходу Сонця на поверхні Землі та продовжувалося близько 40 хв після цього на висотах іоносфери (Рис. 2б). Зменшення N_V розпочалося о 10:45 та закінчилось о 13:00, тобто

$\Delta T \approx 135$ хв. Найбільше значення дефіциту спостерігалось об 11:45. За $N_{V0} \approx 15$ TECU, $N_{V\min} \approx 10$ TECU, $\Delta N_{V\min} \approx -5$ TECU, а $\delta_{V\min} \approx -0.33$.

Супутник G09. СЗ закінчилося практично в момент заходу Сонця на поверхні Землі (Рис. 2в). Зменшення ПЕВ розпочалося приблизно о 10:20 та продовжувалося ще після 13:00. При цьому $\Delta T > 160$ хв.

Якщо $N_{V0} \approx 14$ TECU, $N_{V\min} \approx 9$ TECU, то $\Delta N_{V\min} \approx -5$ TECU, а $\delta_{V\min} \approx -0.36$. Значення $N_{V\min}$ мало місце об 11:50.

Супутник G16. Часткове затемнення закінчилося приблизно за 10 хв до заходу Сонця на поверхні нашої планети (Рис. 2є). Зменшення ПЕВ, що супроводжувало СЗ, тривало не менше 120 хв. У разі $N_{V0} \approx 12.5$ TECU, $N_{Vmin} \approx 10$ TECU, маємо $\Delta N_{Vmin} \approx -2.5$ TECU, а $\delta_{Vmin} \approx -0.20$. Значення N_{Vmin} спостерігалось об 11:35.

Супутник G26. СЗ закінчилося за 22 хв до заходу світила на поверхні Землі (Рис. 2д). Зменшення ПЕВ тривало з 10:30 до 13:00, тобто близько 150 хв. Якщо $N_{V0} \approx 12.5$ TECU, $N_{Vmin} \approx 10$ TECU, то $\Delta N_{Vmin} \approx -2.5$ TECU, а $\delta_{Vmin} \approx -0.2$. Значення N_{Vmin} реєструвалося приблизно об 11:15.

Супутник G27. Після заходу Сонця на поверхні Землі ПЕВ продовжував зменшуватися більше, ніж у контрольні дні (Рис. 2е). Ймовірно, що $N_{V0} \approx 12$ TECU, $N_{Vmin} \approx 10$ TECU, то $\Delta N_{Vmin} \approx -2$ TECU, а $\delta_{Vmin} \approx -0.17$. Тривалість ΔT не менше 120 хв. Значення N_{Vmin} мало місце об 11:50.

ОБГОВОРЕННЯ

Особливості іоносферних ефектів СЗ, що мали місце поблизу моментів часу проходження вечірнього термінатора, пов'язані, перш за все, з тим, що освітленість іоносфери суттєво зменшувалася при збільшенні кута χ . СЗ додатково зменшувало освітленість у цей період. Здавалося б, що іоносферні ефекти затемнення будуть априорі малими. Проте спостереження показали, що зменшення ПЕВ за $A_{max} \approx 91$ –93% сягало приблизно 20–36% (таблиця). Більше того, ефекти були помітними навіть за $A_{max} \approx 83\%$. Це означає, що СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в іоносфері, що призводять до цілком реєстрованих ефектів. Важливо, що іоносферні ефекти продовжувалися на тлі вечірнього зменшення ПЕВ і після закінчення затемнення. Тривалість реакції зазвичай перевищувала 120–180 хв. Така реакція іоносфери на СЗ в цілому була неочікуваною.

В майбутньому необхідно провести детальне фізико-математичне моделювання основних процесів в іоносфері, викликаних СЗ поблизу моментів проходження сонячного термінатора. Мабуть, має місце синергетична взаємодія двох високоенергетичних джерел – затемнення та термінатора [1].

Таблиця. Основні відомості про параметри збурень ПЕВ, що супроводжували СЗ, на станції NVSK.
Table. Basic information on the parameters of disturbances in TEC accompanying the SE at NVSK station.

Супутник	M_{max}	A_{max} , %	N_{V0} , TECU	N_{Vmin} , TECU	ΔN_{Vmin} , TECU	δ_{Vmin}	ΔT , хв
G09	0.944	92.8	14	9	-5	-0.36	> 160
G07	0.934	91.5	15	10	-5	-0.33	135
G04	0.931	91.3	15	10	-5	-0.33	> 180
G26	0.929	91	12.5	10	-2.5	-0.20	150
G16	0.926	90.6	12.5	10	-2.5	-0.20	> 120
G27	0.867	83.1	12	10	-2	-0.17	> 120

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію ПЕВ на сонячне затемнення, що мало місце перед проходженням та в період проходження вечірнього термінатора.
2. Встановлено, що СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі.
3. Тривалість реакції сягала 120–180 хв.
4. За максимальної фази СЗ дефіцит ПЕВ не перевищував 5 TECU або 33–36%. Величина дефіциту в цілому відстежувала зменшення фази СЗ та A_{max} .
5. Є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія двох наступних джерел – сонячного затемнення та термінатора.

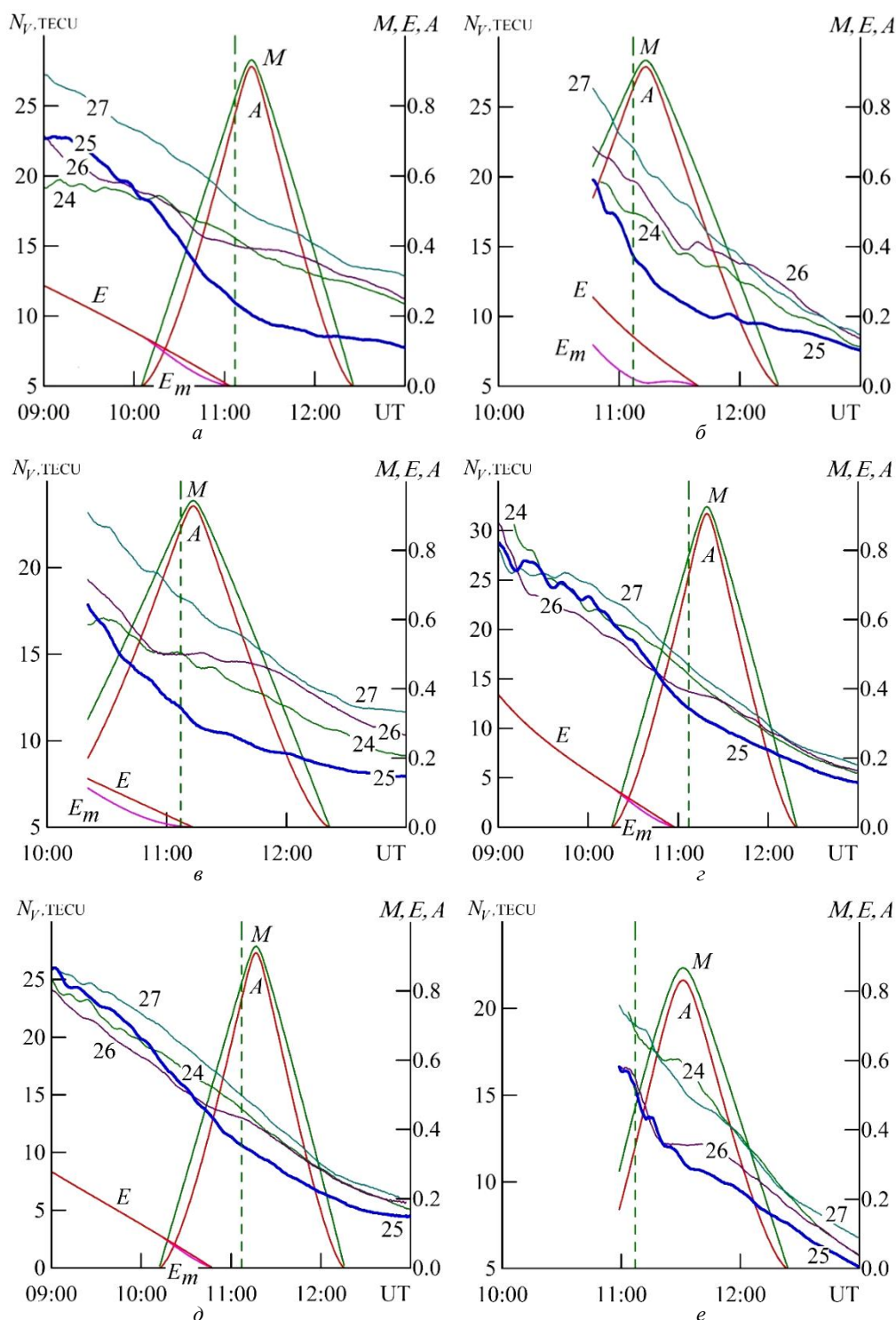


Рис. 2. Часові варіації ПЕВ для 24–27 жовтня 2022 р.: а – супутник G04, б – супутник G07, в – супутник G09, г – супутник G16, д – супутник G26, е – супутник G27. Номер біля лінії відповідає дню місяця. Вертикальною пунктирною лінією показано момент заходу Сонця на поверхні Землі. Зелена та червона трикутніоподібні криві – фаза затемнення та відносна затінена Місяцем площа диску Сонця, відповідно. Червона та рожева лінії відображають відносну освітленість без урахування СЗ та з його врахуванням.

Fig. 2. TEC temporal variations on October 24–27, 2022: a is G04 satellite, б is G07 satellite, в is G09 satellite, г is G16 satellite, д is G26 satellite, е is G27 satellite. The number next to the line corresponds to the day of the month. The vertical dotted line shows the moment of sunset on the Earth's surface. The green and red triangular curves are the eclipse magnitude and the relative area of the solar disk shaded by the Moon, respectively. The red and pink lines reflect the relative illumination without taking into account the SE and with it.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф. і Жданка С. Г. 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 частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 і 0122U001476).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор ЛФ. Фізичні ефекти сонячних затемнень в атмосфері та геокосмосі: Монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна; 2013. 480 с.
2. Черногор ЛФ, Барабаш ВВ. Відгук середньої іоносфери на сонячне затемнення 4 січня 2011 р. в Харкові: результати вертикального зондування. *Космічна наука і технологія*. 2011;17(4):41-52. <https://doi.org/10.15407/knit2011.04.041>
3. Гармаш КП, Леус СГ, Черногор ЛФ. Радіофізичні ефекти сонячного затемнення 4 січня 2011 р. на похилих радіотрасах. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2011;16(2):164-177.
4. Chernogor LF. Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2016;32(4):196-206.
5. Harjosuwito J, Husin A, Dear V, Muhamad J, Faturahman A, Bahar A, Erlansyah, Syetiawan A, Pradipta R. Ionosonde and GPS total electron content observations during the 26 December 2019 annular solar eclipse over Indonesia. *Ann. Geophys.* 2023;41:147-172. <https://doi.org/10.5194/angeo-41-147-2023>
6. Черногор ЛФ, Милованова ЛІ, Милованов ЮБ, Цимбал АМ, Луо Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері над Харковом: результати вертикального зондування. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2021;35:60-78. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-06>
7. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020;55(2):e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
8. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y. Ionospheric effects of the 5–6 January 2019 eclipse over the People's Republic of China: results from oblique sounding. *Ann. Geophys.* 2022;40:585-603. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-585-2022>
9. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, Zheng Y. Some Features of the Ionospheric Radio Wave Characteristics Over China Observed During the Solar Eclipse of 21 June 2020. *Radio Science*. 2022;57(10):e2022RS007492. <https://doi.org/10.1029/2022RS007492>
10. 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.
11. Григоренко ЕІ, Пазюра СО, Таран ВІ, Черногор ЛФ. Найсильніша геокосмічна буря 30–31 травня 2003 р.: результати вимірювань і моделювання. *Космічна наука і технологія*. 2005;11(3/4):20-37. <https://doi.org/10.15407/knit2005.03.020>
12. 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.
13. Chernogor LF, Grigorenko YeI, Lyashenko MV. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing*. 2011;32(11):3219-3229. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541509>
14. Домнін ІФ, Смельянов ЛЯ, Черногор ЛФ. Динаміка іоносферної плазми над Харковом під час сонячного затемнення 4 січня 2011 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2012;17(2):132-145.
15. Бурмака ВП, Домнін ІФ, Черногор ЛФ. Радіофізичні спостереження акустично-гравітаційних хвиль в іоносфері під час сонячного затемнення 4 січня 2011 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2012;17(4):344-352.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. Panasenکو SV, Otsuka Y, Van de Kamp M, Chernogor LF, Shinbori A, Tsugawa T, Nishioka M. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019;191:105051. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015>
20. Goncharenko LP, Erickson PJ, Zhang S-R, Galkin I, Coster AJ, Jonah OF. Ionospheric response to the solar eclipse of 21 August 2017 in Millstone Hill (42N) observations. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45:4601-4609. <https://doi.org/10.1029/2018GL077334>
21. Chernogor LF. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012;52(6):768-778.
22. Chernogor LF. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results: 2. Spectral Analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012;52(6):779-792.
23. 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.
24. Afraimovich EL, Kosogorov EA, Lesyuta OS. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002;64:1933-1941. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00221-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00221-3)
25. Afraimovich EL, Palamartchouk KS, Perevalova NP, Chernukhov VV, Likhnev 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>
26. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2020;36(6):37-64. <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.06.037>
27. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. у Заполяр'ї. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022;38(4):197-209. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.04.029>
28. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ, Дорохов ВЛ, Поднос ВА, Цимбал АМ, Шевелєв МБ. Варіації повного електронного вмісту в екваторіальній іоносфері, викликані сонячним затемненням 21 червня 2020 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2022;36:49-65. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-04>
29. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ, Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022;27(2):93-109. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093>
30. Coster AJ, Goncharenko L, Zhang SR, Erickson PJ, Rideout W, Vierinen J. GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017;44:12041-12048. <https://doi.org/10.1002/2017GL075774>
31. Aa E, Zhang S-R, Erickson PJ, Goncharenko LP, Coster AJ, Jonah OF, Lei J, Huang F, Dang T, Liu L. Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019. *J. Geophys. Res.-Space*. 2020;125:e2020JA028296. <https://doi.org/10.1029/2020JA028296>
32. Resende LCA, Zhu Y, Denardini CM, Chen SS, Chagas RAJ, Da Silva LA, Carmo CS, Moro J, Barros D, Nogueira PAB, Marchezi JP, Picanço GAS, Jauer P, Silva RP, Silva D, Carrasco JA, Wang C, Liu Z. A multi-instrumental and modeling analysis of the ionospheric responses to the solar eclipse on 14 December 2020 over the Brazilian region. *Ann. Geophys.* 2022;40:191-203. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-191-2022>
33. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Жданко ЄГ, Леус ЄГ, Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021;26(4):326-343. <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326>
34. 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.
35. Sun Y-Y, Chen C-H, Su X, Wang J, Yu T, Xu H-R, Liu J-Y. Occurrence of nighttime irregularities and their scale evolution in the ionosphere due to the solar eclipse over East Asia on 21 June 2020. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2023;128:e2022JA030936. <https://doi.org/10.1029/2022JA030936>
36. Черногор ЛФ, Гармаш КП. Іоносферні процеси протягом часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022;38(2):3-22. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.003>
37. Barad RK, Sripathi S, England SL. Multi-instrument observations of the ionospheric response to the 26 December 2019 solar eclipse over Indian and Southeast Asian longitudes. *J. Geophys. Res.-Space*. 2022;127:e2022JA030330. <https://doi.org/10.1029/2022JA030330>
38. Chauvenet W. *Manual of Spherical and Practical Astronomy*, 5-th ed. Vol.1. Philadelphia: J. B. Lippincott Co. 1891. Reprinted New York: Dover Publications; 1960. 704 p.

REFERENCES

1. Chernogor LF. Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University; 2013. 480 с.
2. 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. <https://doi.org/10.15407/knit2011.04.041>
3. Garmash KP, Leus SG, Chernogor LF. January 4, 2011 Solar Eclipse Effects over Radio Circuits at Oblique Incidence. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2011;16(2):164-177.
4. Chernogor LF. Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2016;32(4):196-206.
5. Harjosuwito J, Husin A, Dear V, Muhamad J, Faturahman A, Bahar A, Erlansyah, Syetiawan A, Pradipta R. Ionosonde and GPS total electron content observations during the 26 December 2019 annular solar eclipse over Indonesia. *Ann. Geophys.* 2023;41:147-172. <https://doi.org/10.5194/angeo-41-147-2023>
6. Chernogor LF, Mylovanova LI, Mylovanov YuB, Tsybmal 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;35:60-78. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-06>
7. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020;55(2):e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
8. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y. Ionospheric effects of the 5–6 January 2019 eclipse over the People's Republic of China: results from oblique sounding. *Ann. Geophys.* 2022;40:585-603. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-585-2022>
9. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, Zheng Y. Some Features of the Ionospheric Radio Wave Characteristics Over China Observed During the Solar Eclipse of 21 June 2020. *Radio Science*. 2022;57(10):e2022RS007492. <https://doi.org/10.1029/2022RS007492>
10. 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.
11. Grigorenko EI, Pazura SA, Taran VI, Chernogor LF. The severe geomagnetic storm on 30–31 May 2003: results of measurements and simulation. *Space Science and Technology*. 2005;11(3/4):20-37. <https://doi.org/10.15407/knit2005.03.020>
12. 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.
13. Chernogor LF, Grigorenko YeI, Lyashenko MV. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing*. 2011;32(11):3219-3229. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541509>
14. Domnin IF, Emelyanov 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.
15. Burmaka VP, Domnin IF, Chernogor LF. Radiophysical observations of acoustic-gravity waves in the ionosphere during solar eclipse of January 4, 2011. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2012;17(4):344-352.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Panasenko SV, Otsuka Y, Van de Kamp M, Chernogor LF, Shinbori A, Tsugawa T, Nishioka M. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019;191:105051. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015>
20. Goncharenko LP, Erickson PJ, Zhang S-R, Galkin I, Coster AJ, Jonah OF. Ionospheric response to the solar eclipse of 21 August 2017 in Millstone Hill (42N) observations. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45:4601-4609. <https://doi.org/10.1029/2018GL077334>
21. Chernogor LF. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012;52(6):768-778.
22. Chernogor LF. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results: 2. Spectral Analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012;52(6):779-792.

23. 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.
24. Afraimovich EL, Kosogorov EA, Lesyuta OS. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002;64:1933-1941. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00221-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00221-3)
25. 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>
26. Chernogor LF, Mylovanov YuB. Ionospheric effects of the August 11, 2018, solar eclipse over the People's Republic of China. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2020;36(6):274-290. <https://doi.org/10.3103/S0884591320060021>
27. Chernogor LF, Mylovanov YuB. Ionospheric Effects of the June 10, 2021, Solar Eclipse in the Arctic. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2022;38(4):197-209. <https://doi.org/10.3103/S088459132204002X>
28. Chernogor LF, Mylovanov YuB, Dorokhov VL, Podnos VA, Tsymbal AM, Shevelev MB. TEC variations in equatorial ionosphere during June 21, 2020 solar eclipse. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series «Radio Physics and Electronics»*. 2022;36:49-65. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-04>
29. Chernogor LF, Mylovanov YuB, Luo Y. Effects from the June 10, 2021 solar eclipse in the high-latitude ionosphere: results of GPS observations. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2022;27(2):93-109. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093>
30. Coster AJ, Goncharenko L, Zhang SR, Erickson PJ, Rideout W, Vierinen J. GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017;44:12041-12048. <https://doi.org/10.1002/2017GL075774>
31. Aa E, Zhang S-R, Erickson PJ, Goncharenko LP, Coster AJ, Jonah OF, Lei J, Huang F, Dang T, Liu L. Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019. *J. Geophys. Res.-Space*. 2020;125:e2020JA028296. <https://doi.org/10.1029/2020JA028296>
32. Resende LCA, Zhu Y, Denardini CM, Chen SS, Chagas RAJ, Da Silva LA, Carmo CS, Moro J, Barros D, Nogueira PAB, Marchezi JP, Picanço GAS, Jauer P, Silva RP, Silva D, Carrasco JA, Wang C, Liu Z. A multi-instrumental and modeling analysis of the ionospheric responses to the solar eclipse on 14 December 2020 over the Brazilian region. *Ann. Geophys.* 2022;40:191-203. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-191-2022>
33. 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 Physics and Radio Astronomy*. 2021;26(4):326-343. <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326>
34. 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.
35. Sun Y-Y, Chen C-H, Su X, Wang J, Yu T, Xu H-R, Liu J-Y. Occurrence of nighttime irregularities and their scale evolution in the ionosphere due to the solar eclipse over East Asia on 21 June 2020. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2023;128:e2022JA030936. <https://doi.org/10.1029/2022JA030936>
36. Chernogor LF, Garmash KP. Ionospheric processes during the 10 June 2021 partial Solar eclipse at Kharkiv. *Kinematics and physics of celestial bodies*. 2022;38(2):3-22. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.003>
37. Barad RK, Sripathi S, England SL. Multi-instrument observations of the ionospheric response to the 26 December 2019 solar eclipse over Indian and Southeast Asian longitudes. *J. Geophys. Res.-Space*. 2022;127:e2022JA030330. <https://doi.org/10.1029/2022JA030330>
38. Chauvenet W. *Manual of Spherical and Practical Astronomy*, 5-th ed. Vol.1. Philadelphia: J. B. Lippincott Co. 1891. Reprinted New York: Dover Publications; 1960. 704 p.

Стаття надійшла до редакції: 11 вересня 2023 р.

Рекомендовано до друку: 24 жовтня 2023 р.

FEATURES OF IONOSPHERIC EFFECTS FROM THE PARTIAL SOLAR ECLIPSE OF OCTOBER 25, 2022, NEAR THE EVENING TERMINATOR

L. F. Chernogor, V. L. Dorokhov, Y. H. Zhdanko, Yu. B. Mylovanov, A. M. Tsymbal
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svoboda Square, Kharkiv, 61022, Ukraine,

Urgency. The ionosphere remains the main channel used by radar, radio astronomy, radio navigation, communication links, and remote radio sounding. The parameters of this channel significantly depend on the influence of high-energy sources that take place in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere (EAIM)

system. One of these sources is a solar eclipse (SE). An urgent issue is to study the features of the ionospheric response to the SE action, which takes place near the moments of sunset.

The aim of this paper is to describe the results of studying the temporal variations in the total electron content (TEC) in the ionosphere caused by the SE near the evening terminator.

Methods and Methodology. The results of measuring the parameters of the radio signals from GPS Global Navigation Satellite System (GNSS) at the Novosibirsk station (NVSK) for six satellites (G04, G07, G09, G16, G26, and G27) were used as the initial data. The TEC estimation error did not exceed 1%.

Results. For the first time, the TEC response to a solar eclipse that occurred prior to and during the passage of the evening terminator was studied using GNSS technologies. It has been established that an SE triggers physical and chemical, and dynamic processes in the EAIM system, which ensure the continuation of the ionospheric response after the end of an eclipse and after sunset on the Earth's surface. The duration of the response reached 120–180 min. At the maximum magnitude of the SE, the TEC deficit did not exceed 5 TECU or 33–36%. The magnitude of the deficit most of the time tracked the decrease in the magnitude of the SE and the solar disk coverage area. There are grounds to believe that there was a synergistic interaction between the following two sources, the solar eclipse and the terminator.

Conclusions. The main features of ionospheric effects from the solar eclipse during the period of the evening terminator have been established.

KEY WORDS: ionosphere, solar eclipse, total electron content, TEC deficit, response duration, features of ionospheric effects

The article was received by the editors: September 11 2023.

The article is recommended for printing: October 24 2023