

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-40-01>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, д. ф.-м. наук, проф.

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

В. О. БЕССАРАБОВА

e-mail: valeriabess24@gmail.com

М. Ю. ГОЛУБ

e-mail: marya160588@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7900-1484>

Ю. Б. МИЛОВАНОВ, к. ф.-м. наук, с.н.с.

e-mail: hobit1957@gmail.com

М. Б. ШЕВЕЛЕВ, доктор філософії, с.н.с.

e-mail: mykyta.b.shevelev@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-9841-0789>

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

МАГНІТО-ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ ЧАСТКОВОГО СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 25 ЖОВТНЯ 2022 Р. НАД УКРАЇНОЮ

Актуальність. Навколоземне середовище, що входить до системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ), є основним функціонуючим радіоканалом. Він використовується системами радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування, радіоастрономії. Система ЗАІМ і радіоканал рідко знаходяться у спокійному стані. Час від часу вони збурюються високоенергетичними джерелами. Одним із них є сонячне затемнення (СЗ). І хоча збурення системи ЗАІМ сонячним затемненням досліджується більше ста років, вивчення всієї сукупності ефектів у цій системі залишається актуальною задачею. Це пов'язано з тим, що ефекти СЗ суттєво залежать від фази затемнення, стану космічної погоди, положення у циклі сонячної активності, пори року, часу доби, географічних координат тощо.

Мета роботи – опис результатів дослідження часових варіацій компонент геомагнітного поля та повного електронного вмісту (ПЕВ) у іоносфері, що супроводжували часткове СЗ 25 жовтня 2022 р. над Україною.

Методи і методологія. У якості вихідних даних використано результати реєстрації X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля на станції Львів і результати вимірювання параметрів радіосигналів Глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) у Харкові. Часове розрізнення складало 1 хв. Похибка вимірювання рівня геомагнітних компонент – 0.1 нТл, а ПЕВ – 0.1 TECU.

Результати. СЗ над Україною викликало аперіодичні збурення компонент геомагнітного поля, які сягали 2 – 3 нТл. Найбільше збурення спостерігалось у X-компоненті, а найменше – у Z-компоненті. Тривалість збурення складала 80 – 100 хв. СЗ супроводжувалося квазіперіодичними збуреннями компонент геомагнітного поля. Амплітуда коливань з періодом 30 ± 5 хв тривалістю 70 – 80 хв сягала 2 нТл. СЗ викликало зменшення ПЕВ від ~24 до ~18 TECU. Час запізнювання реакції ПЕВ на СЗ складав близько 14 хв. Лінійний коефіцієнт рекомбінації в середньому був близьким до $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Результати оцінки магнітного та іоносферного ефектів добре узгоджуються з результатами спостережень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сонячне затемнення, геомагнітний ефект, аперіодичне збурення, квазіперіодичне збурення, іоносферний ефект, час запізнювання, тривалість збурення

Як цитувати: Чорногор ЛФ, Бессарабова ВО, Голуб МЮ, Милованов ЮБ, Шевелев МБ. Магніто-іоносферні ефекти часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. над Україною. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024, 40. 7-17
<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-40-01>

In cites: Chernogor LF, Bessarabova VO, Holub MYu, Mylovanov YuB, Shevelev MB. Magnetic-ionospheric effects of partial solar eclipse of October 25, 2022 over Ukraine. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2024, 40, 7-17 (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-40-01>

ВСТУП

Навколоземне середовище, що входить до системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ), є основним функціонуючим радіоканалом. Він використовується системами радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування, радіоастрономії. Система ЗАІМ і радіоканал рідко знаходяться у спокійному стані. Час від часу вони збурюються високоенергетичними джерелами. Одним із них є сонячне затемнення (СЗ). Сонячне затемнення (СЗ) належить до рідкісних, але таких, що систематично повторюються,

явищ природи [1]. Воно здатне викликати значні збурення всіх підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) та геофізичних полів.

Ефекти ЗАІМ у геомагнітному полі досліджуються з 1901 р. [2]. Короткий огляд геомагнітних ефектів наведено у роботі [3].

У геофізиків немає одностайної думки про ефекти СЗ в геомагнітному полі. Дехто з дослідників вважає, що геомагнітний ефект СЗ взагалі не проявляється [4].

Іоносферні ефекти СЗ вивчалися близько 100 років. Цим ефектам присвячена велика кількість робіт і монографія [1].

У цілому іоносферні ефекти СЗ подібні ефектам, що супроводжують настання ночі, але суттєво відрізняються за своїми просторово-часовими параметрами. Доведено, що реакція іоносфери суттєво залежить від фази СЗ, положення у циклі сонячної активності, географічних координат, стану космічної погоди, часу доби, пори року тощо. Можна впевнено стверджувати, що немає однакової реакції середовища на два подібних СЗ [1].

Все це обумовлює актуальність дослідження реакції системи ЗАІМ та географічних полів на кожне нове СЗ.

Мета роботи – опис результатів дослідження часових варіацій компонент геомагнітного поля та повного електронного вмісту (ПЕВ), що супроводжували часткове СЗ 25 жовтня 2022 р. над Україною.

Ефектам СЗ 25 жовтня 2022 р. присвячено окремі роботи [5–8]. У роботі [5] з використанням іонозондових вимірювань досліджено часові варіації частоти f_oF_2 та концентрації електронів N шару F_2 іоносфери. Обґрунтовано, що СЗ призвело до активізації іоносферно-плазмосферної взаємодії.

Особливості ефектів СЗ 25 жовтня 2022 р. у ранковий час у високоширотній іоносфері описано авторами [6]. Встановлено, що мала місце очікувана тенденція до збільшення дефіциту ПЕВ при збільшенні відносної площі покриття диску Сонця.

У роботі [7] обговорюються особливості СЗ 25 жовтня 2022 р., що мали місце у період проходження вечірнього сонячного термінатору. Встановлено, що затемнення запускає фізично-хімічні та динамічні процеси у системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення СЗ та заходу Сонця на поверхні Землі.

Геомагнітний ефект СЗ 25 жовтня 2022 р. описано в роботі [8]. Встановлено, що затемнення призвело до збурень рівня всіх компонент геомагнітного поля. Підтверджено, що мала місце тенденція до збільшення варіацій рівня при збільшенні площі покриття диску Сонця.

ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

СЗ 124 сароса спостерігалось 25 жовтня 2022 р. в Європі, на Близькому Сході, у Центральній Азії, Західному Сибіру та на Північному Заході Африки [[<https://science.nasa.gov/eclipses/future-eclipses/>]]. Розпочалося СЗ в Ісландії (географічні координати: 66°28' пн.ш., 18°57' з.д.) о 08:58:20 UT, а закінчилося в районі Аравійського моря (17°35' пн.ш., 66°31' сх.д.) о 13:02:16 UT (UT – тут і далі всесвітній час). Найбільша фаза часткового СЗ $M_{\max} \approx 0.8623$ відмічалася у місцевості з координатами 61°36' пн.ш., 77°24' сх.д.

На території України $M_{\max} \approx 0.53 - 0.73$, а відносна площа покриття диску Сонця $A_{\max} \approx 43 - 66\%$.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для коректного виділення ефектів СЗ необхідним є ретельний аналіз стану космічної погоди. Такий аналіз виконано у роботах [4–8]. Тут лише відмітимо, 25 жовтня 2022 р., у день СЗ, стан космічної погоди був незбуреним і цілком сприятливим для спостереження геомагнітного та іоносферного ефектів СЗ. В той же час дні з 21 до 24 жовтня 2022 р. були дещо збуреними. Тому у якості контрольних днів обрано 20 та 26 жовтня 2022 р.

МЕТОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

Для виявлення геомагнітного ефекту СЗ використовувалися часові варіації рівня X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля, зареєстровані на українській станції Львів і представлені у базі даних світової мережі INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/>]. Географічні координати станції: 49°54' пн.ш., 23°45' сх.д. Розрізнявальна здатність за часом – 1 хв, а за амплітудою – 0.1 нТл. СЗ розпочалося о 09:20, а закінчилося об 11:42. Максимальна фаза затемнення на станції Львів $M_{\max} \approx 0.530$, а $A_{\max} \approx 43\%$ мали місце о 10:31. Аналізу часових варіацій рівня усіх трьох компонент передувало видалення постійної складової та отримання варіацій $X(t)$, $Y(t)$ і $Z(t)$. Потім обчислювався на інтервалі часу 60 хв ковзний тренд $\bar{X}$, $\bar{Y}$ і $\bar{Z}$, крок ковзання – 1 хв. Ці дані використовувалися для виявлення аперіодичного ефекту СЗ. Для пошуку квазіперіодичних збурень обчислювалася різниця $\delta X = X - \bar{X}$, $\delta Y = Y - \bar{Y}$, $\delta Z = Z - \bar{Z}$. Залежності $\delta X(t)$, $\delta Y(t)$ і $\delta Z(t)$ далі підлягали системному спектральному аналізу.

Для виявлення іоносферного ефекту СЗ використано ГНСС-технології. Вимірювання виконано у Харкові, на території ХНУ імені В. Н. Каразіна, та у Радіофізичній обсерваторії. Географічні координати пункту

вимірювань: $50^{\circ}00'$ пн.ш., $36^{\circ}10'$ сх.д., обсерваторії – $50^{\circ}00'$ пн.ш., $36^{\circ}13'$ сх.д. Аналізу підлягали часові варіації ПЕВ $N_v(t)$, очікуване незбурене значення $N_{v0}(t)$, дефіцит ПЕВ $\Delta N_v = N_v - N_{v0}$, відносне зменшення ПЕВ $\delta_v = \Delta N_v / N_{v0}$, тривалість реакції ПЕВ ΔT та час запізнювання Δt реакції ПЕВ на затемнення. Параметри СЗ обчислені для висоти 350 км. Розрізнявальна здатність за часом – 1 хв, похибка оцінки ПЕВ – 0.1 TECU.

МАГНІТНИЙ ЕФЕКТ СЗ

Аперіодичний ефект. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент для дня з СЗ та контрольних днів показано на Рис. 1. Із рисунку видно, що згладжені значення рівня (тренд) X -компоненти у інтервалі часу 09:45 – 11:35 зменшилися до 3 нТл. Повторне зменшення $\bar{X}$ до 2 нТл спостерігалось з 11:35 – 12:30.

Рівень тренду $\bar{Y}$ зменшувався двічі. Спочатку до 2 нТл з 08:00 до 10:00, а потім до 8 нТл з 10:00 до 12:30.

Зменшення рівня Z -компонента до 2 нТл спостерігалось в інтервалі часу з 10:00 до 11:45.

Квазіперіодичні збурення. Часові варіації флуктуацій $\delta X(t) = X(t) - \bar{X}(t)$ наведено на Рис. 2. Видно, що й у день СЗ, й у контрольні дні часові варіації були переважно хаотичними. Теж саме можна сказати і про варіації $\delta Y(t)$ і $\delta Z(t)$. Про наявність ефекту СЗ у варіаціях δX , δY і δZ можуть свідчити результати системного спектрального аналізу (ССА).

Результати ССА. Спектральний аналіз у діапазоні періодів $T = 2 - 180$ хв показав, що 25 жовтня 2022 р. у спектрі $\Delta X(t)$ найбільшу амплітуду X_a (до 2 нТл) мало коливання з $T = 30 \pm 5$ хв. Це коливання розпочалося після початку СЗ на рівні Землі. Дещо меншу (до 1 нТл) амплітуду мало коливання з періодом 70 ± 10 хв (Рис. 3). Воно розпочалося приблизно о 09:25 та тривало впродовж часу $\Delta T \approx 70$ хв.

Коливання з періодом 30 ± 5 хв мало амплітуду $Y_a \approx 1.5 - 2$ нТл та тривалість близько 70 – 80 хв. Воно спостерігалось з 09:25.

Варіації рівня Z -компонента зі змінною амплітудою від 1 до 3 нТл мало місце з 09:25 до 11:00.

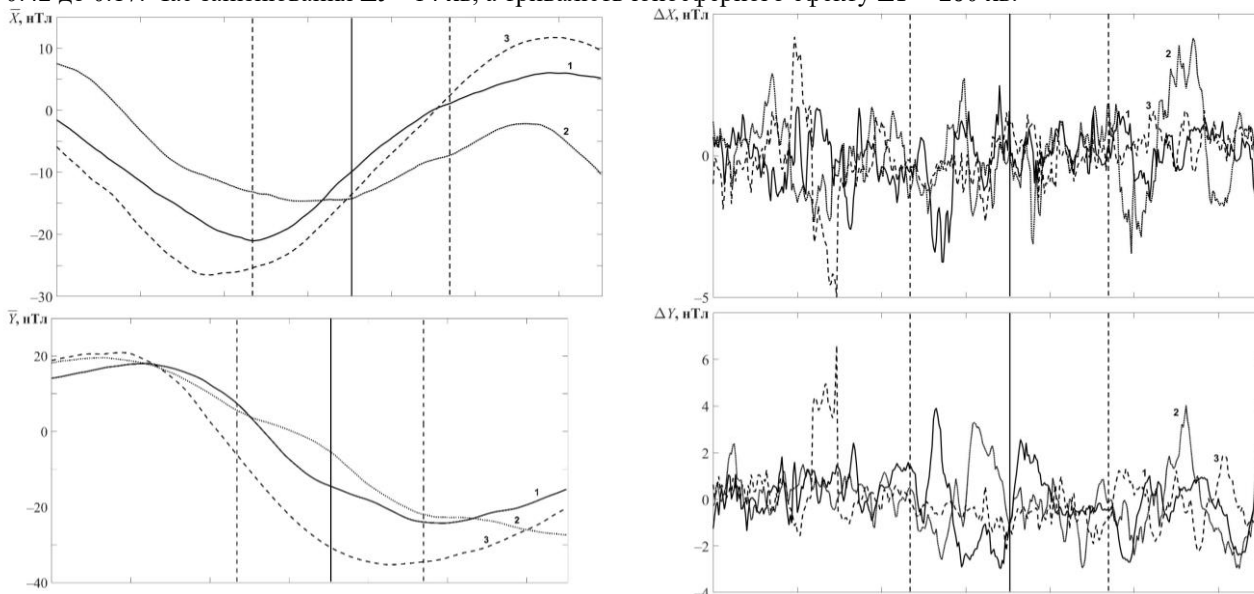
Додамо, що у контрольні дні подібні коливання не спостерігалися (Рис. 4, 5).

ІОНОСФЕРНИЙ ЕФЕКТ СЗ

Спочатку розглянемо часові варіації ПЕВ на станції BFN1, супутник G09 (Рис. 6). Траєкторія супутника показана на Рис. 7. СЗ мало місце поблизу опівдня. Із Рис. 6 видно, що зменшення ПЕВ від 27.5 TECU до 18 TECU розпочалося практично в момент настання затемнення. Точками на Рис. 6 показано очікувані варіації $N_v(t)$ за відсутності СЗ. Якщо $N_{v0} \approx 24$ TECU, то $\Delta N_v \approx 6$ TECU, а $\delta_v = \Delta N_v / N_{v0} \approx -0.25$. Значення N_{vmin} спостерігалось з часом запізнювання $\Delta t \approx 17$ хв після настання фази затемнення $M_{max} \approx 0.729$ та $A_{max} \approx 65.9\%$. При цьому відносна освітленість зменшувалася від 0.42 до 0.18, тобто більше ніж вдвічі. Тривалість збурення ПЕВ $\Delta T = 180$ хв.

Додамо, що у контрольні дні 24, 26 та 27 жовтня 2022 р. варіації $N_v(t)$ були більш-менш монотонними (див. Рис. 6).

Часові варіації ПЕВ на станції BMHR, супутник G09 наведено на Рис. 8. Видно, що за $M_{max} \approx 0.729$ та $A_{max} \approx 65.9\%$, розрахованих для місця вимірювання ПЕВ у F_2 іоносфери N шару. Дефіцит $\Delta N_v \approx -6.2$ TECU, $N_v \approx 18$ TECU, а очікуване значення $N_{v0} \approx -0.242$ TECU. Тоді $\delta_v \approx -0.256$. Відносна освітленість за M_{max} зменшувалася від 0.42 до 0.17. Час запізнювання $\Delta t \approx 14$ хв, а тривалість іоносферного ефекту $\Delta T = 200$ хв.



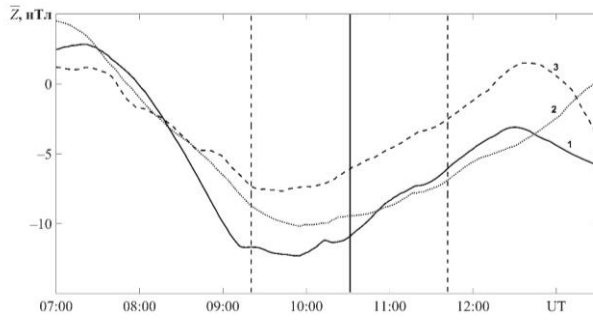


Рис. 1. Часові варіації рівня X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ розраховані для поверхні Землі. (1–день СЗ 25.10.2022 р, 2–контрольний день 20.10.2022 р, 3–контрольний день 26. 10.2023 р).

Fig. 1. Temporal variations in the level of the X-, Y- and Z-components of the geomagnetic field. The dashed vertical lines indicate the moments of beginning and end of SE, the solid vertical line – at the moment of the maximum phase of SE. The SE moments are calculated for the Earth's surface. (1–day of SE 10.25.2022, 2– reference day 10.20.2022, 3– reference day 10.26.2022).

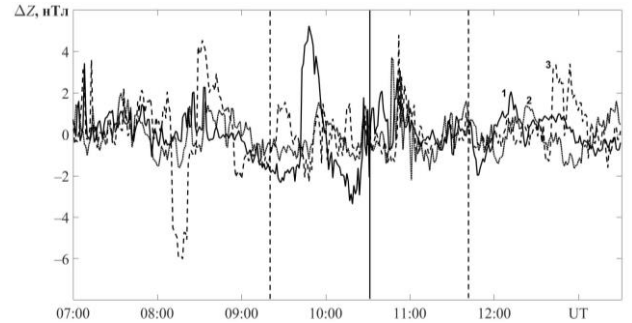
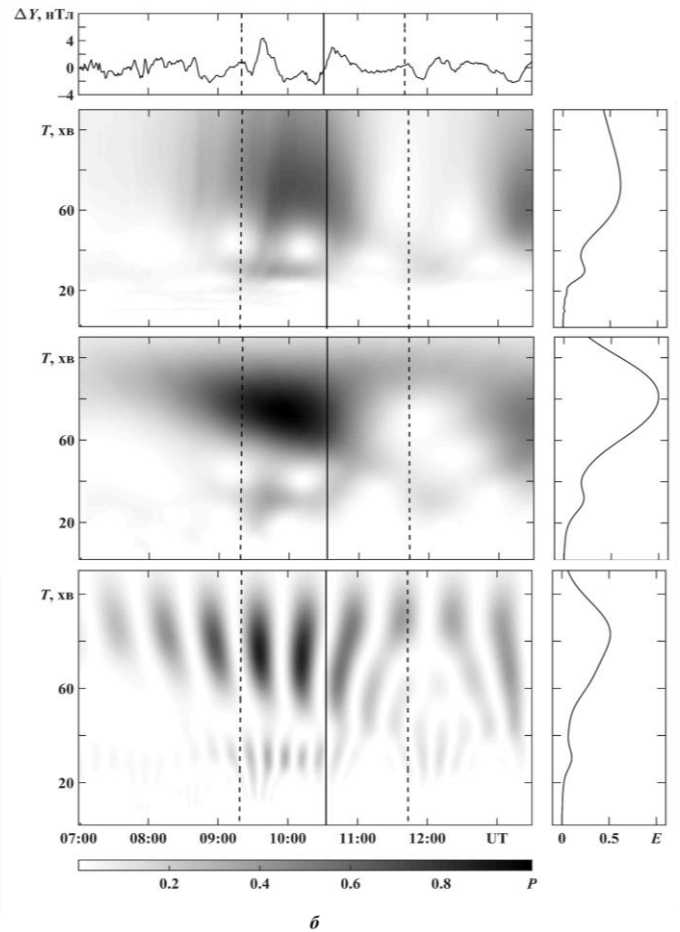
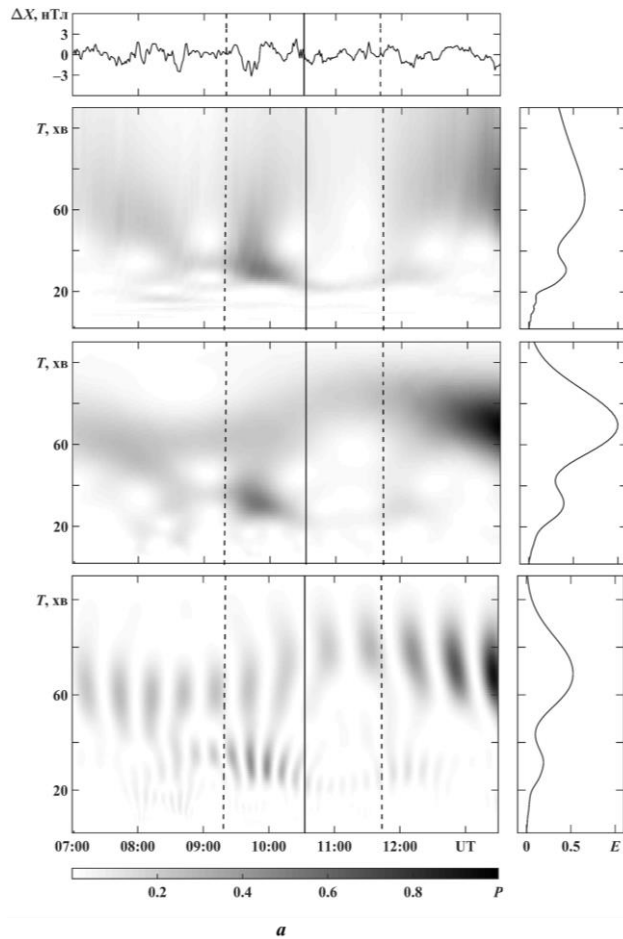


Рис. 2. Часові варіації рівня флуктуацій X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ розраховані для поверхні Землі. (1–день СЗ 25.10.2022 р, 2–контрольний день 20.10.2022 р, 3–контрольний день 26. 10.2023 р).

Fig. 2. Temporal variations in the fluctuation level of the X-, Y- and Z-components of the geomagnetic field. The dashed vertical lines indicate the moments of beginning and end of SE, the solid vertical line – at the moment of the maximum phase of SE. The SE moments are calculated for the Earth's surface. (1–day of SE 10.25.2022, 2– reference day 10.20.2022, 3– reference day 10.26.2022).



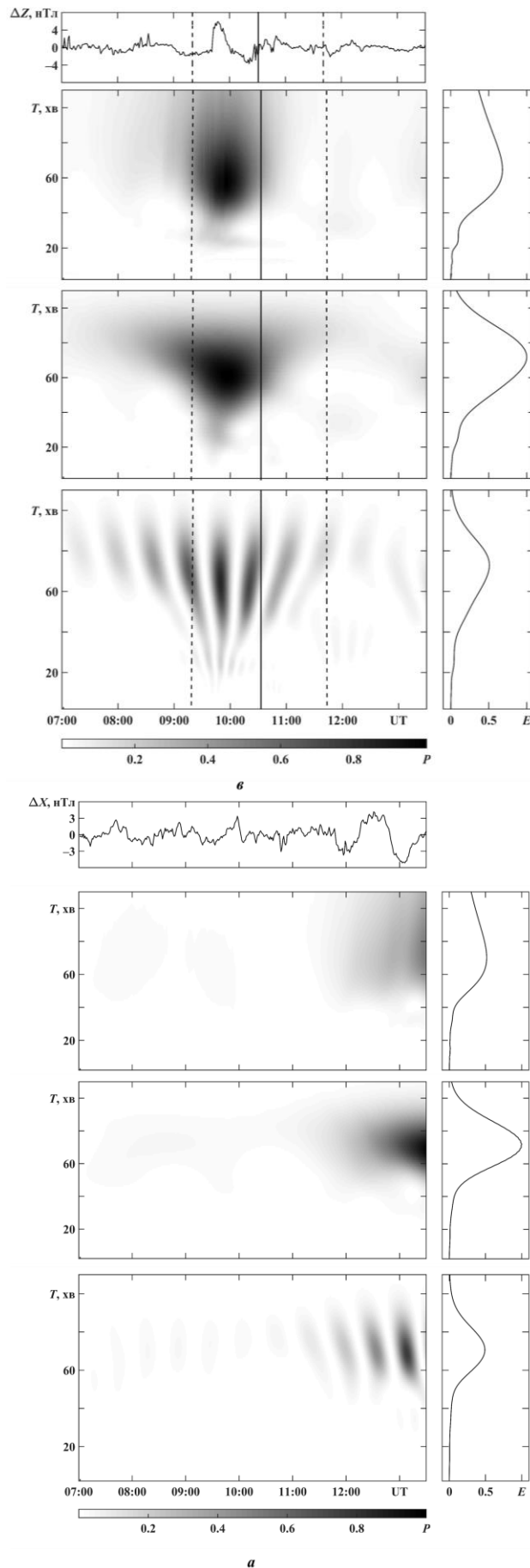


Рис. 3. Результати системного спектрального аналізу часових залежностей компонент геомагнітного поля протягом сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р., отриманих після видалення тренду на інтервалі 90 хв, фільтрації на інтервалі від 2 до 90 хв:

a – X -компонента; b – Y -компонента; c – Z -компонента.

Тут і далі панелі зверху вниз: хвильова форма, результати віконного,

адаптивного перетворень Фур'є та вейвлет-перетворення.

Праворуч показано енергограми (розподіл нормованої енергії E за періодами). P – інтенсивність сигналу.

Штриховані вертикальні лінії – моменти початку й закінчення СЗ;

суцільна вертикальна лінія – максимальна фаза СЗ.

Моменти СЗ розраховані для поверхні Землі.

Fig. 3. The results of the system spectral analysis of the time dependences

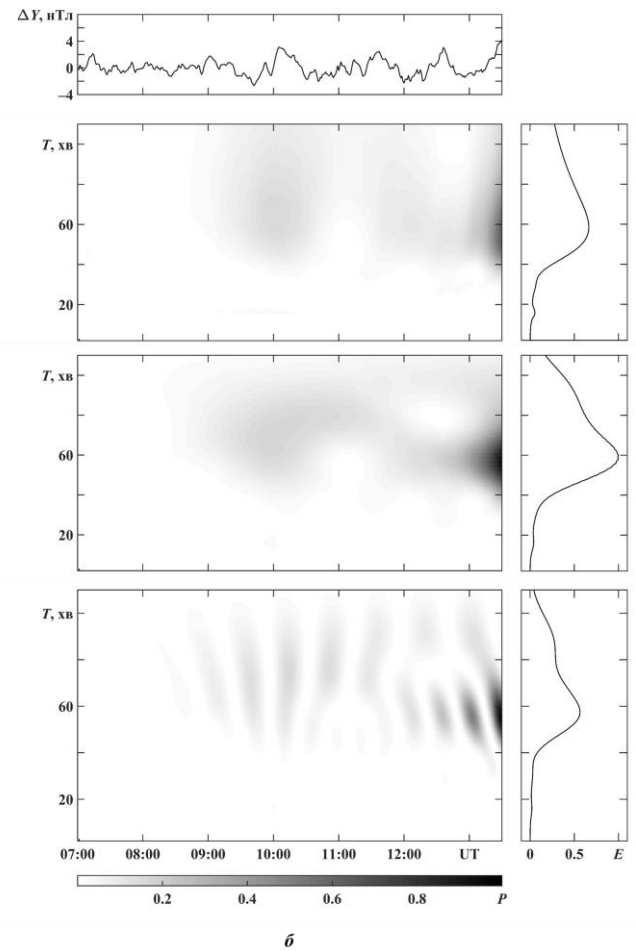
of the components of the geomagnetic field during the solar eclipse on October 25, 2022,

obtained after removing the trend at an interval of 90 min, filtering at an interval from 2 to 90 min:

a – X -component; b – Y -component; c – Z -component.

Here and then panels from top to bottom: waveform, short-time Fourier transform, adaptive Fourier and wavelet transforms.

Energy diagrams are shown on the right (distribution of normalized energy E by periods). P is signal intensity. The dashed vertical lines are the moments of the beginning and end of the SE; solid vertical line – maximum SE phase. SE moments are calculated for the Earth's surface.



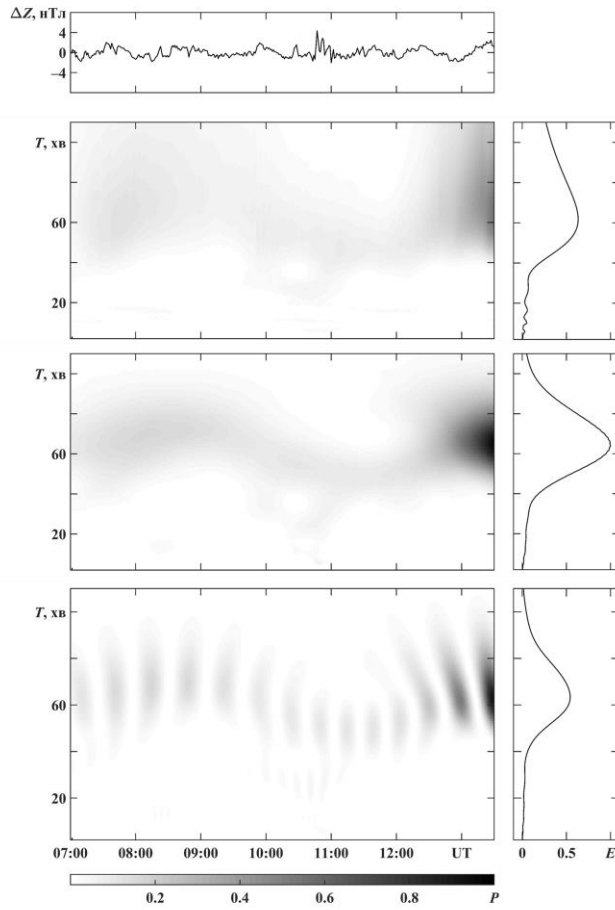
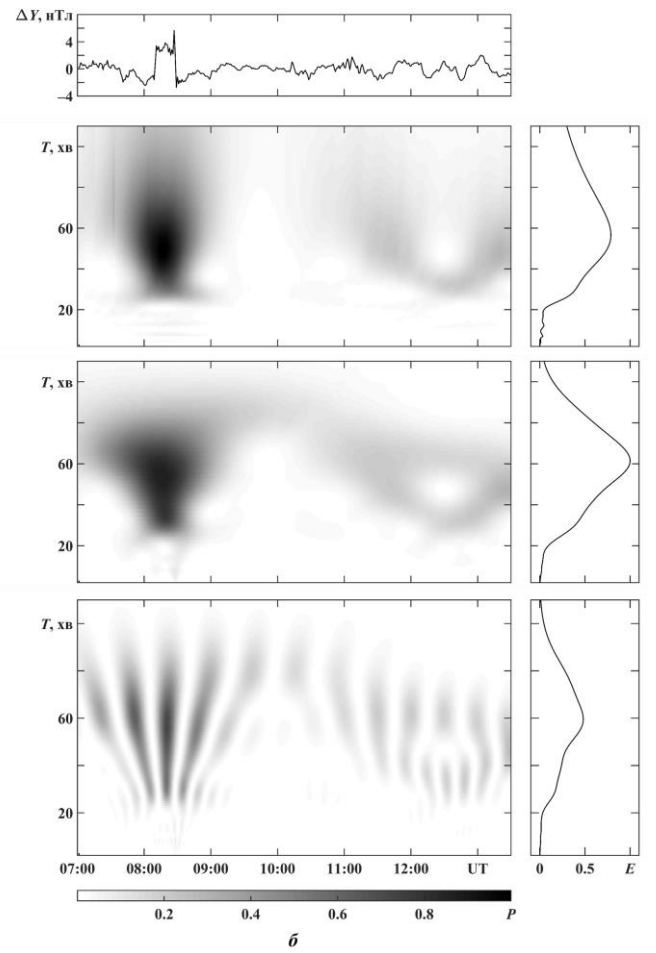
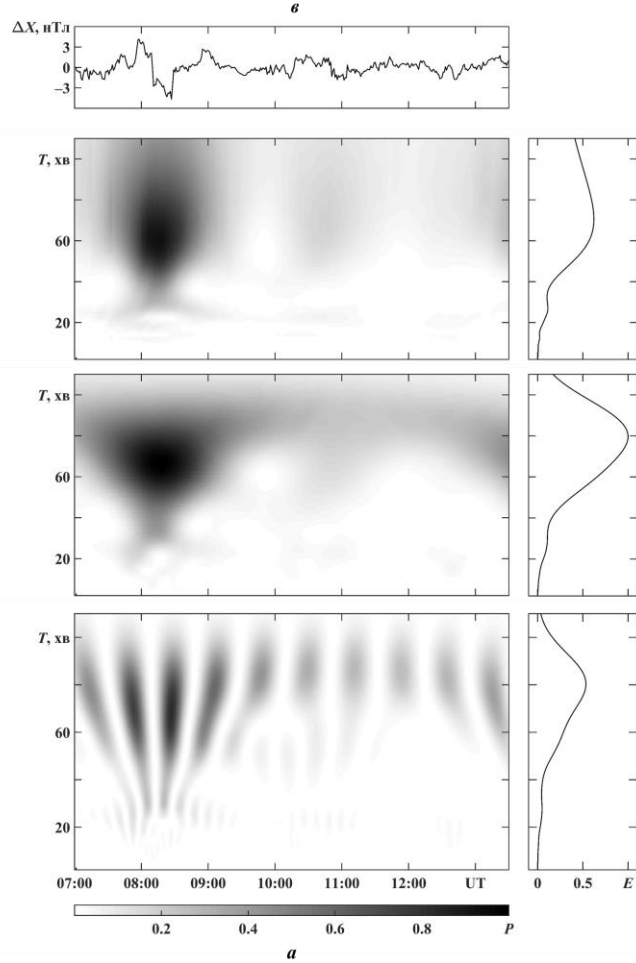


Рис. 4. Те саме, що й на Рис. 3,
для 20 жовтня 2022 р.

Fig. 4. The same as in Fig. 3,
for October 20, 2022.



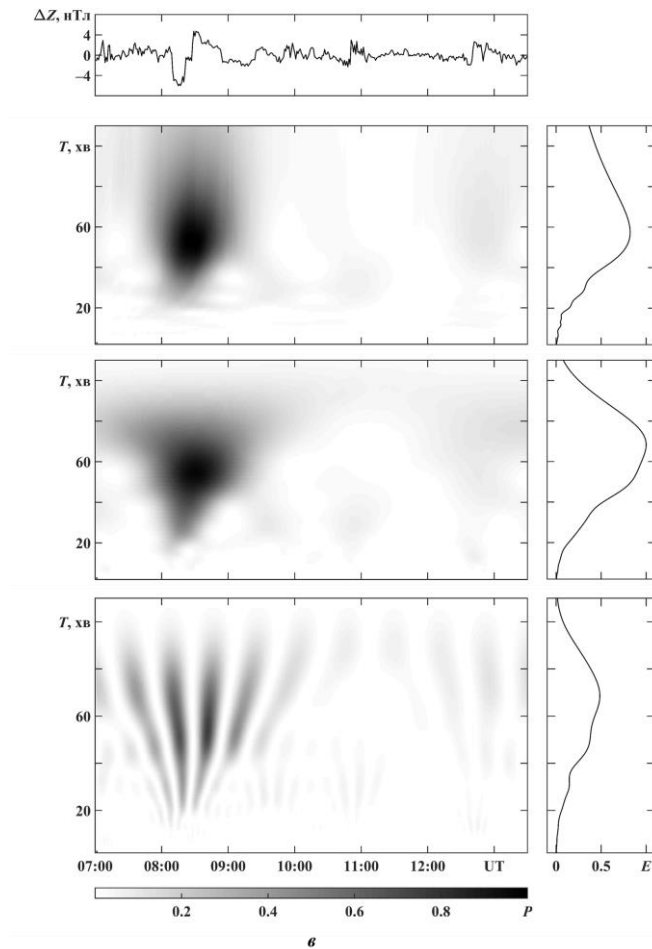


Рис. 5. Те саме, що й на Рис. 3, для 26 жовтня 2022 р.

Fig. 5. The same as in Fig. 3, for October 26, 2022.

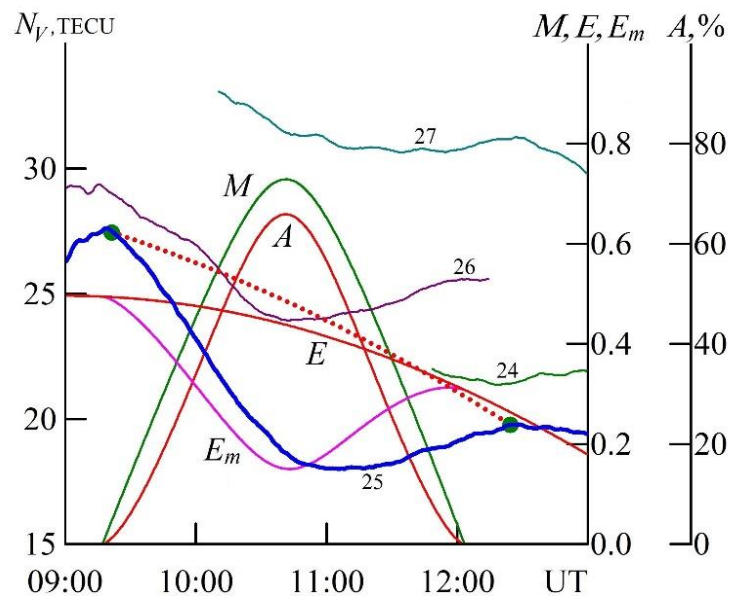


Рис. 6. Часові варіації ПЕВ для станції BFN1, супутник G09. Числами біля кривих позначено дні жовтня 2022 р. M , E , E_m , та A – фаза затемнення, відносна освітленість, відносна освітленість з урахуванням затемнення та площі покриття, відповідно.

Fig. 6. TEC temporal variations for the BFN1 station, G09 satellite. Numbers near the curves represent the days of October 2022. M , E , E_m , and A are the eclipse magnitude, relative illumination, relative illumination with the obscuration taken into account and obscuration area, respectively.

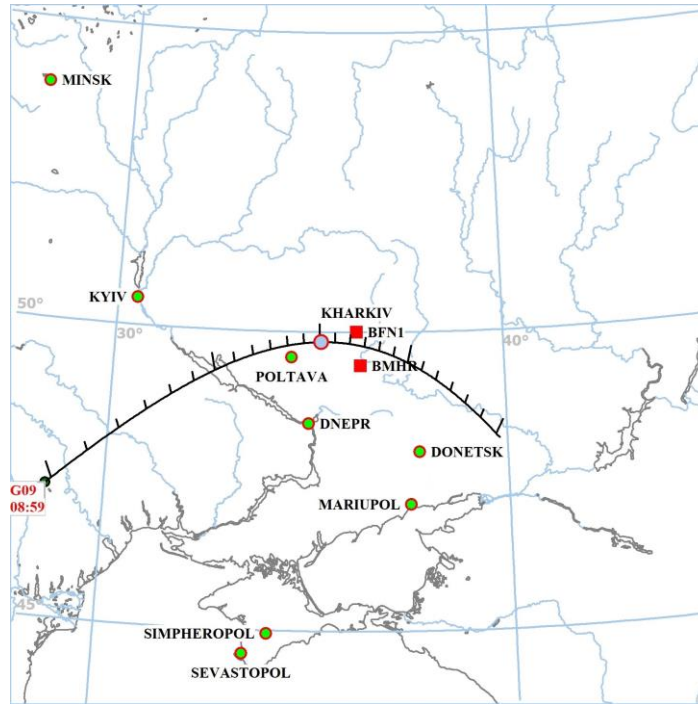


Рис. 7. Карта прольоту супутника G09 відносно станцій BFN1 та BMHR. Номер супутника та час початку прольоту показано у квадраті. Сірий кружок позначає точку вимірювання. Риски вздовж траєкторії відмічають час з кроком 10 хв.
 Fig. 7. Map of the satellite G09 overflight with respect to the BFN1 and BMHR stations. Satellite number and overflight start time are shown in a square. Gray circle indicates the measurement point. The marks on the trajectory line show the time in 10 minute increments.

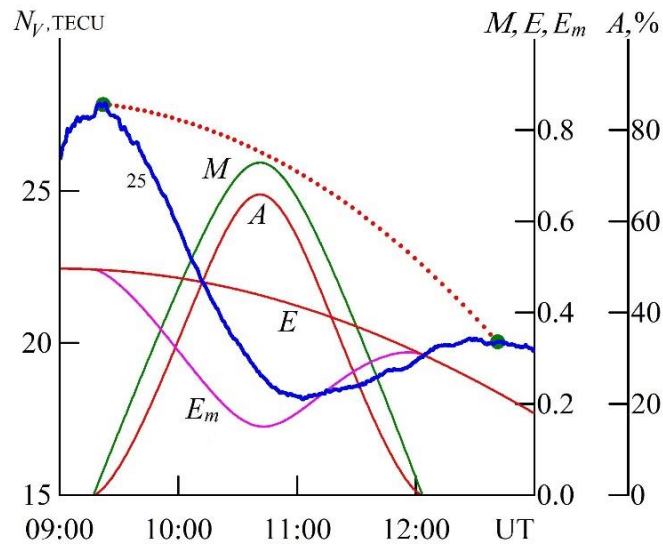


Рис. 8. Часові варіації ПЕВ для станції BMHR, супутник G09. Синя крива відповідає 25 жовтня 2022 р. M , E , E_m , та A – фаза затемнення, відносна освітленість, відносна освітленість з урахуванням затемнення та площа покриття, відповідно.

Fig. 8. TEC temporal variations for the BMHR station, G09 satellite. Blue curve corresponds to October 25, 2022. M , E , E_m , and A are the eclipse magnitude, relative illumination, relative illumination with the obscuration taken into account and obscuration area, respectively.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕНЬ

Збурення концентрації електронів. Як і у роботі [3] відносно збурення концентрації електронів N у динамо-області за $A_{\max}$ дається наступним співвідношенням

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{1 - A_{\max}}. \quad (1)$$

Тут N_0 – незбурене значення концентрації електронів. За $A_{\max} = 43\%$ для Львова маємо $N_{\min}/N_0 \approx 0.75$, а $\delta_{N_{\max}} = N_{\min}/N_0 - 1 \approx -0.25$.

Геомагнітний ефект. Аперіодичне збурення компонент геомагнітного поля викликається аперіодичним збуренням компонент тензора електропровідності на висотах динамо-області атмосфери, який залежить від збурення N . Варіації компонент тензора призводять до варіацій густини іоносферного струму j , який є джерелом збурення геомагнітного поля.

Наприклад, для збурення X -компоненти справедливе наступне співвідношення [3]:

$$\Delta X_{cal} = \mu_0 \Delta J_y = \mu_0 j_{y0} \delta_{Nmax} H, \quad (2)$$

де μ_0 – магнітна стала, ΔJ_y – інтегральна густина y -компоненти іоносферного струму, J_{y0} – незбурене значення y -компоненти густини струму, H – висота однорідної атмосфери на висоті $z \approx 150$ км. За типового значення у денний час $j_{y0} \approx (4 - 6) \cdot 10^{-7}$ А/м² із (2) маємо $\Delta X_{cal} \approx -(1.9 - 2.8)$ нТл. Це значення дуже близьке до вимірюваного $-(2 - 3)$ нТл.

Далі розглянемо квазіперіодичний ефект СЗ у геомагнітному полі. Джерелом цього ефекту є квазіперіодичні збурення системи іоносферних струмів під дією атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ). Ця хвиля захоплює іони, які коливаються у полі хвилі, електрони при цьому замагнічені. Амплітуда швидкості коливань

$$v = v_s \frac{\Delta p}{p_0} \approx v_s \delta_{Na}, \quad (3)$$

де $\Delta p/p_0$ – відносне збурення тиску у полі АГХ, v_s – швидкість звуку на висотах динамо-області атмосфери, δ_{Na} – відносна амплітуда збурень N . Тоді амплітуда квазіперіодичних збурень з урахуванням (3):

$$X_a = \frac{1}{2} \mu_0 e N_0 \delta_{Na} v_s H. \quad (4)$$

Тут e – заряд електрона. За типових значень $N_0 \approx 10^{11}$ м⁻³, $v_s \approx 360$ м/с, $H \approx 15$ км та $\delta_{Na} \approx 1.5 - 2.5\%$ із (4) маємо $X_a \approx 0.8 - 1.4$ нТл, що близько до результату, отриманого із спостережень (~ 1 нТл).

Іоносферний ефект. Із виразу (1) для $A_{max} \approx 66\%$ отримаємо, що $N_{min}/N_0 \approx 0.58$, а $\delta_{Nmax} \approx -0.42$. Для δ_v маємо оцінку:

$$\delta_{vcal} = \frac{\Delta N_v}{N_{v0}} \approx \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \frac{\Delta z_2}{\Delta z_1}, \quad (5)$$

де $\left(\frac{\Delta N}{N_0} \right) \approx \delta_{Nmax}$, Δz_1 – товщина шару іоносфери, що дає основний внесок у ПЕВ N_{v0} ,

Δz_2 – товщина шару іоносфери, збуреної СЗ. За $\delta_{Nmax} \approx -0.42$, $\Delta z_1 \approx 300$ км, $\Delta z_2 \approx 200$ км маємо $\delta_{vcal} \approx -0.28$.

При цьому $\Delta N_{vcal} \approx -6.7$ TECU, тобто $\Delta N_{vcal} < \Delta N_v$, а $\delta_{vcal} < \delta_v$. Це може бути пов'язано з тим, що при оцінках не враховувалася іоносферно-плазмосферна взаємодія, описана у роботі [5]. Ця взаємодія призводить до часткової компенсації зменшення N і N_v під час СЗ за рахунок потоків електронів у F-область іоносфери із плазмосфери.

Знаючи час запізнювання ПЕВ $\Delta t \approx 14$ хв, можна оцінити середнє значення лінійного коефіцієнта рекомбінації: $\beta = \Delta t^{-1} \approx 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Таке значення добре узгоджується з відомими результатами [9, 10].

ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз часових варіацій усіх компонент геомагнітного поля показав, що СЗ супроводжувалося зменшенням рівня цих компонент на декілька нанотесла. Ефект СЗ найбільше виражено у X -компоненті, а найменше – у Z -компоненті. Така поведінка була подібною до поведінки під час інших затемнень [3].

Крім аперіодичного геомагнітного ефекту, мав місце квазіперіодичний ефект. Значення квазіперіоду було близько 30 хв, $\delta_{Na} \approx 1.5 - 2.5\%$. Є всі підстави вважати, що квазіперіодичний ефект викликався генерацією та поширенням АГХ. Саме АГХ мають такі періоди та амплітуди [11].

Результати оцінки геомагнітного ефекту близькі до результатів спостережень. Це свідчить про те, що геомагнітний ефект був результатом збурення системи іоносферних струмів на висотах $\sim 100 - 150$ км [12].

Результатами оцінки іоносферного ефекту також добре погодилися з результатами спостережень.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз часових варіацій рівня трьох компонент геомагнітного поля та ПЕВ дозволив зробити наступні висновки.

1. СЗ над Україною викликало аперіодичні збурення компонент геомагнітного поля, які сягали 2 – 3 нТл. Найбільше збурення спостерігалось у X -компоненті, а найменше – у Z -компоненті. Тривалість збурення складала 80 – 100 хв.

2. СЗ супроводжувалося квазіперіодичними збуреннями компонент геомагнітного поля. Амплітуда коливань з періодом 30 ± 5 хв тривалістю 70 – 80 хв сягала 2 нТл.
3. СЗ викликало зменшення ПЕВ від ~ 24 до ~ 18 TECU. Час запізнювання реакції ПЕВ на СЗ складав близько 14 хв. Лінійний коефіцієнт рекомбінації в середньому був близьким до $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.
4. Результати оцінки магнітного та іоносферного ефектів добре узгоджуються з результатами спостережень.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Л. Ф. Чорногора, М. Ю. Голуб, Ю. Б. Милованова та М. Б. Шевелева виконувались за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476, 0124U000478, 0124U000461).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chernogor LF., Holub MYu., Rozumenko VT. Main Features of the Geomagnetic Effect of the October 14, 2023 Annular Solar Eclipse over the Americas // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2024. – Volume 265. – id:106354. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106354>
2. Bauer LA, Results of international magnetic observations made during the total solar eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipses. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1902, 7 (4): 155–192. <https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>
3. Чорногор ЛФ, Геомагнітний ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2022, 38(1): 16–34. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.016>
4. Korte M, Lühr H, Förster M, Haak V, Bencze P. Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect? Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2001, 106 (A9): 18563–18575. <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>
5. Emelyanov LYa, Bogomaz OV, Chernogor LF, Domnin IF, Response of the mid-latitude ionosphere to the solar eclipse on 25 October 2022: Results of F2-layer vertical sounding. Advances in Space Research. 2024, 73 (5): 2338–2354. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.12.034>
6. Чорногор ЛФ, Милованов ЮБ, Особливості високоширотних іоносферних ефектів сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. у ранковий час. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. [У друці].
7. Чорногор 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
8. Чорногор ЛФ, Голуб МЮ, Геомагнітний ефект сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024, 40 [У друці].
9. Schunk RW, Nagy A, Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. – Cambridge University Press. 2000, 554 p.
10. Gossard EE., Hooke WH, Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation. Elsevier Scientific Publishing Company. 1975, 456 p.
11. Chapman S, The Effect of a Solar Eclipse on the Earth's Magnetic Field. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1933, 38(3): 175–183. <https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>

REFERENCES

1. Chernogor LF., Holub MYu., Rozumenko VT. Main Features of the Geomagnetic Effect of the October 14, 2023 Annular Solar Eclipse over the Americas // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2024. – Volume 265. – id:106354. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106354>
2. Bauer LA, Results of international magnetic observations made during the total solar eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipses. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1902, 7 (4): 155–192. <https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>
3. Chernogor LF, Geomagnetic Effect of the Solar Eclipse on June 10, 2021. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2022, 38(1):16–34. <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.016> [In Ukrainian].
4. Korte M, Lühr H, Förster M, Haak V, Bencze P. Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect? Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2001, 106 (A9): 18563–18575. <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>
5. Emelyanov LYa, Bogomaz OV, Chernogor LF, Domnin IF, Response of the mid-latitude ionosphere to the solar eclipse on 25 October 2022: Results of F2-layer vertical sounding. Advances in Space Research. 2024, 73 (5): 2338–2354. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.12.034>

6. Chernogor LF, Mylovanov YuB, Features of the high-latitude ionospheric effects of the solar eclipse on October 25, 2022 in the morning. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. [In Press]. [In Ukrainian].
7. 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"*. 2023, 39: 69–78 [In Ukrainian].
8. Chernogor LF, Holub MYu, Geomagnetic effect of the October 25, 2022 solar eclipse in the Eurasian region. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. [In Press]. [In Ukrainian].
9. Schunk RW, Nagy A, *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. – Cambridge University Press. 2000, 554 p.
10. Gossard EE., Hooke WH, *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation*. Elsevier Scientific Publishing Company. 1975, 456 p.
11. Chapman S, The Effect of a Solar Eclipse on the Earth's Magnetic Field. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1933, 38(3): 175–183. <https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>

Стаття надійшла до редакції: 5 березня 2024 р.

Рекомендовано до друку: 19 квітня 2024 р.

MAGNETIC-IONOSPHERIC EFFECTS OF PARTIAL SOLAR ECLIPSE OF OCTOBER 25, 2022 OVER UKRAINE

L. F. Chernogor, V. O. Bessarabova, M. Yu. Holub, Yu. B. Mylovanov, M. B. Shevelev
V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, 61022, Kharkiv, Svoboda Square, 4

Urgency. The near-Earth environment, which is part of the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere (EAIM) system, is the main functioning radio channel. It is used by radio communications, radio navigation, radar, remote sensing, and radio astronomy systems. The EAIM system and radio channel are rarely in a quiet state. From time to time they become disturbed by high energy sources. One of them is a solar eclipse (SE). Although the disturbance of the EAIM system by a solar eclipse has been studied for more than a hundred years, the study of the entire set of effects in this system remains an urgent task. This is due to the fact that the effects of an SE significantly depend on the eclipse magnitude, the state of space weather, position in the solar activity cycle, time of year, time of day, geographic coordinates, etc.

The aim of this paper is to describe the results of the study of temporal variations in the components of the geomagnetic field and total electron content (TEC) in the ionosphere that accompanied the partial SE on October 25, 2022 over Ukraine.

Methods and Methodology. The registration results of X-, Y- and Z-components of the geomagnetic field at the Lviv station and the results of measuring the parameters of radio signals from the Global Navigation Satellite System in Kharkiv were used as initial data. Temporal resolution was 1 min. The error in measuring the level of geomagnetic components is 0.1 nT, and for TEC it is 0.1 TECU.

Results. The SE over Ukraine caused aperiodic disturbances in the components of the geomagnetic field, which reached 2–3 nT. The greatest disturbance was observed in the X-component, and the smallest in the Z-component. The duration of the disturbance was 80–100 min. The SE was accompanied by quasi-periodic disturbances of the geomagnetic field components. The amplitude of oscillations with a period of 30 ± 5 min and a duration of 70–80 min reached 2 nT. The SE caused a decrease in TEC from ~ 24 to ~ 18 TECU. The delay time of the TEC response to the SE was about 14 min. On average, the linear recombination coefficient was close to $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The results of the assessment of magnetic and ionospheric effects are in good agreement with the observational results.

KEY WORDS: solar eclipse, geomagnetic effect, aperiodic disturbance, quasi-periodic disturbance, ionospheric effect, delay time, disturbance duration.

The article was received by the editors: March 5 2024

The article is recommended for printing: April 19 2024