

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра космічної радіофізики

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**



Леонід ЧОРНОГОР

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 року

Кваліфікаційна робота магістра

на тему:

**«КВАЗІПЕРІОДИЧНІ ЗБУРЕННЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ВИКЛИКАНІ  
СОНЯЧНИМ ЗАТЕМНЕННЯМ 8 КВІТНЯ 2024 року»**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66

Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,

Освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»



КАЛАНТИРЯ Антон Олегович



Керівник доктор філософії,  
доцент, Микита ШЕВЕЛІВ

Харків 2024 рік

## Реферат

Калантиря А.О., Квазіперіодичні збурення геомагнітного поля, викликані сонячним затемненням 8 квітня 2024 року, Кваліфікаційна робота магістра, Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2024, 30 сторінок, 6 ілюстрацій, 40 джерел посилання.

В даній роботі було розглянуто квазіперіодичні збурення геомагнітного поля, викликані сонячним затемненням 8 квітня 2024 року.

Для цього було розглянуто основні характеристики сонячного затемнення, використанні сигнали навігаційних супутників, які отримані на станціях розміщених в Американському регіоні. Будуть згадані основні відомості про іоносферу, та сонячне затемнення.

*Ключові слова:* сонячне затемнення, геомагнітний ефект, аперіодичний ефект, квазіперіодичне збурення, флуктуації рівня.

## Abstract

Kalantyrina A.O., *Quasi-Periodic Disturbances of the Geomagnetic Field Caused by the Solar Eclipse on April 8, 2024*, Master Thesis, Department of Space Radio Physics, School of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Systems, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2024, 30 pages, 6 illustrations, 40 references.

This study investigates quasi-periodic geomagnetic field disturbances induced by the solar aftershock on April 8, 2024.

For this study, the primary feature of the solar aftershock was analyzed using navigation satellite signals recorded at stations within the American region. Fundamental information regarding the ionosphere and the solar eclipse will be developed.

*Keywords:* solar eclipse, geomagnetic effect, aperiodic effect, quasiperiodic disturbance, fluctuations level.

## Зміст

Вступ.....	4
Розділ 1. Аналітичний огляд.....	5
Розділ 2. Загальна інформація про сонячне затемнення.....	11
Розділ 3. Стан космічної погоди.....	12
Розділ 4. Засоби та методи досліджень.....	13
Розділ 5. Геомагнітний ефект сонячного затемнення.....	18
Висновки.....	19
Перелік використаних джерел.....	26

## ВСТУП

Проблема вивчення геомагнітних ефектів сонячних затемнень є однією з центральних тем сучасних сонячно-земних досліджень. Незважаючи на понад столітню історію аналізу впливу сонячних затемнень (СЗ) на геомагнітне поле, кожне затемнення виявляється унікальним через специфічні умови його спостереження. Це дає змогу як виявляти загальні закономірності геомагнітних явищ, так і детально аналізувати їхні особливості. На унікальність СЗ впливають такі фактори, як рівень сонячної активності, космічна погода, сезонність, географічні координати, часовий пояс, тип і фаза затемнення.

Сонячне затемнення, що відбудеться 8 квітня 2024 року, є надзвичайно цікавим об'єктом для наукових досліджень. Воно пройде через густонаселені та географічно різноманітні території американського регіону, що дозволить отримати значний обсяг даних для вивчення геомагнітних явищ. Особливий інтерес становлять квазіперіодичні збурення іоносфери, які виникають через змінний перерозподіл потоків плазми та вплив змінного сонячного випромінювання.

Вивчення цих явищ ґрунтується на аналізі даних магнітометричних станцій, супутникових вимірювань та двочастотних методів GPS-навігації. Такий підхід дозволяє визначити тимчасові й просторові залежності змін геомагнітного поля, а також виявити природу квазіперіодичних коливань.

Актуальність цієї теми обумовлена не лише науковою цінністю, але й практичним значенням. Розуміння впливу сонячної активності на магнітосферу сприятиме прогнозуванню космічної погоди, допоможе запобігати збоєм у роботі систем навігації та зв'язку, а також сприятиме створенню більш точних моделей взаємодії Сонця та Землі. Унікальні умови затемнення 8 квітня 2024 року надають виняткові можливості для дослідження квазіперіодичних збурень, що підкреслює його значущість для геофізичних і космічних досліджень.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Сонячне затемнення (СЗ) належить до порівняно рідкісних високоенергетичних джерел, здатних збурювати всі підсистеми в системі Земля (внутрішні оболонки) – атмосфера – іоносфера – магнітосфера та геофізичні поля [1]. Одним із них є геомагнітне поле.

Автор [2] уперше описав збурення геомагнітного поля протягом СЗ 18 травня 1901 р. Цей же автор вивчив варіації магнітного поля, які супроводжували СЗ 21 серпня 1914 р. і 29 травня 1919 р. [3, 4].

У роботі [5] описано геомагнітний ефект, який мав місце протягом СЗ 21 серпня 1914 р.

Автором [6] вперше запропоновано можливий механізм геомагнітного ефекту, що супроводжує СЗ. При цьому передбачалося, що зменшення сонячної радіації призводить до зменшення концентрації електронів і, як наслідок, питомої провідності плазми на висотах динамо-області (90–150 км). Усе це спричиняє порушення системи іоносферних струмів і генерацію збурень геомагнітного поля.

Геомагнітний ефект СЗ 20 червня 1955 р. вивчав автор [7, 8].

Автор [9] вперше вивчив можливість генерації квазіперіодичних геомагнітних збурень (геомагнітних пульсацій). Для цього використовували результати вимірювань на восьми магнітних станціях протягом СЗ 20 червня 1955 р., 19 квітня 1958 р., 15 лютого 1961 р. і 5 лютого 1962 р. Встановлено факт зменшення амплітуди і частоти пульсацій.

Геомагнітний ефект СЗ також досліджувався в роботах [7, 10]. У [10] виявлено, що рівень Х-компоненти магнітного поля Землі зменшувався приблизно на 10 %. Важливо, що рівні різних компонент послаблювалися по-різному.

У роботі [11] проаналізовано варіації геомагнітного поля протягом СЗ 19 квітня 1958 р.

У [12] описано результати спостережень геомагнітного ефекту, що мав місце під час СЗ 12 листопада 1966 р. у Перу. Показано, що горизонтальна компонента збільшувалася до 30 нТл. На думку авторів [12], це відповідає теоретичним уявленням [6]. У роботі [13], викладено результати спостережень геомагнітного ефекту протягом СЗ 23 жовтня 1976 р. в Австралії. Показано, що величина ефекту досягала 5 нТл.

Автор роботи [14] описав результати досліджень геомагнітного ефекту впродовж СЗ 11 липня 1991 р. у Коста-Ріці. Встановлено, що зменшення рівня  $X$ -компоненти не перевищувало 5 нТл. Важливо, що знак геомагнітних збурень був протилежним знаку в теоретичній моделі [6].

У роботі [15] представлено результати спостережень геомагнітного ефекту СЗ 24 листопада 1995 р. у В'єтнамі. Встановлено, що горизонтальна компонента змінювалася в межах кількох десятків нанотесла.

Автори роботи [16] проаналізували геомагнітний та іоносферний ефекти СЗ 18 березня 1998 р., яке відбулося у Східній Азії. Показано, що затемнення супроводжувалося зменшенням кута схилення на  $1-2'$ .

У роботі [17] встановлено, що повне СЗ 22 липня 1990 р. у Фінляндії призвело до зменшення рівня всіх компонент геомагнітного поля на  $\Delta X \approx 2$  нТл,  $\Delta Y \approx -3$  нТл,  $\Delta Z \approx -1$  нТл.

Найповніше геомагнітний ефект СЗ вивчено для затемнення 11 серпня 1999 р. Цьому геофізичному явищу присвячено роботи [10, 18-22].

У роботі [21] за допомогою моделювання геомагнітного ефекту встановлено, що затемнення не змінило рівень  $X$ -компоненти, а рівень  $Y$ -компоненти трохи зменшився. Модельні дослідження для цього ж затемнення наведено в роботі [18].

Авторами [22] показано, що рівень  $Y$ -компоненти повинен був збільшитися на 8-10 нТл. У роботі [20] встановлено, що СЗ 11 серпня 1999 р. супроводжувалося зменшенням рівня  $X$ -компоненти на 5-8 нТл, збільшенням рівня  $Y$ -компоненти на 12-15 нТл. Результати спостережень ці автори доповнили модельними розрахунками.

Слід зазначити, що автори [23] стверджували, що СЗ 11 серпня 1999 р. не спричинило збурень геомагнітного поля.

У роботі [24] встановлено, що тільки в одній обсерваторії протягом СЗ 29 березня 2006 р. відзначалося зменшення рівня  $X$ -компоненти до 20 нТл. При цьому мало місце збільшення рівня  $Y$ -компоненти до 10 нТл.

Автори роботи [25] повідомляли, що СЗ 1 серпня 2008 р. призвело до зменшення рівня  $X$ -компоненти на 8–10 нТл, а також до збільшення на 0.8–1 нТл рівня  $Y$ -компоненти і магнітного нахилу на  $0.004$ – $0.009^\circ$ . Детальний аналіз геомагнітного ефекту СЗ 10 червня 2021 р. виконано автором [26]. Показано, що затемнення супроводжувалося зменшенням рівня  $X$ -компоненти на 15 високоширотних і середньоширотних магнітних станціях. Величина ефекту варіювалася від 35–36 нТл до 2–3 нТл залежно від місця розташування станції та фази СЗ. Рівень  $Y$ - і  $Z$ -компонент змінювався помітно менше. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності. Амплітуда коливань  $X$ -компоненти змінювалася від 0.4 нТл до 4.8 нТл при збільшенні фази СЗ від 0.147 до 0.943. Період переважного коливання становив  $40 \pm 2$  мкм. Результати оцінок добре узгоджуються з результатами спостережень. У роботі [27] описано результати детального аналізу геомагнітного ефекту СЗ 25 жовтня 2022 р., що спостерігався в Євро-Азійському регіоні в денний і передзахідний час. Встановлено, що СЗ супроводжувалося зменшенням рівня  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ -компонент на всіх 15 магнітних станціях. Найбільше зменшення рівня спостерігалось для  $X$ -компоненти. Крім стійкого аперіодичного ефекту, відмічалось збільшення розмаху флуктуацій рівня геомагнітного поля, що могло свідчити на комаль генерації квазі періодичних коливань у діапазоні атмосферних гравітаційних хвиль. У роботах [26, 27] побудовано регресії для залежності величини зменшення рівня  $X$ -компоненти від відносної площі затемнення диска Сонця.

Автори [28] описали особливості геомагнітного ефекту протягом СЗ 14 жовтня 2023 р. в Американському регіоні. Показано, що СЗ супроводжувалося аперіодичними та квазіперіодичними збуреннями всіх компонент геомагнітного

поля в глобальних масштабах (характерний розмір близько 8 тис. км). Найбільше збурювався рівень  $Y$ -компоненти, а найменше збурювався рівень  $Z$ -компоненти.

З наведеного короткого огляду літератури, присвяченій геомагнітному ефекту СЗ, випливає, що наразі у геофізиків немає єдиної думки з питання існування цього ефекту. Оpubліковані в літературі дані дуже суперечливі. Одні автори вважають, що геомагнітний ефект СЗ відсутній. Інші геофізики, і їх більшість, стверджують, що ефект має місце. Найчастіше, він проявляється у зменшенні рівня  $X$ -компоненти, рідше у варіаціях  $Y$ -компоненти. Суперечка точиться і про знак збурень. Важливо, що часові варіації рівнів геомагнітного поля часто повторюють зміни освітленості іоносфери, але в ряді випадків вони випереджали або відставали від зміни освітленості приблизно на 1 годину. Як і очікувалося, найбільші варіації рівнів геомагнітного поля спостерігалися в області повного СЗ. У міру віддалення від повної тіні величина ефекту зменшувалася, тим важче було пов'язати спостережувані варіації з настанням СЗ.

Пошук реакції геомагнітного поля на затемнення належить до складних і важких завдань. Можлива реакція на СЗ зазвичай маскується варіаціями іншої фізичної природи. Ба більше, величина і знак збурень геомагнітного поля істотно залежить від поточного стану космічної погоди, сезону, часу доби, місця розташування магнітної станції та, звісно ж, від значення фази СЗ. Усе це визначає актуальність дослідження реакції геомагнітного поля на кожне нове затемнення.

Це затемнення, яке дістало назву *Great North American Eclipse*, було повним (максимальна фаза дорівнювала 1.0566). СЗ спостерігалось над Тихим океаном, Мексикою, США та Канадою.

Спочатку описано загальні відомості про СЗ 8 квітня 2024 р., а також засоби і методи досліджень. Після досить детального аналізу стану космічної погоди викладено результати аналізу результатів спостережень за варіаціями геомагнітного поля. Слідом за обговоренням наведених результатів перераховано основні висновки роботи.

## РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

СЗ 139 сароса розпочалося 8 квітня 2024 року о 15:42:07 UT над Тихим океаном і завершилося о 20:52:13.8 UT над Атлантичним океаном. Максимальна фаза затемнення, що дорівнює  $M_{\max} \approx 1.056$ , спостерігалася в області з координатами  $25^{\circ}17.5' N$  та  $104^{\circ}07.2' W$ . Висота Сонця на момент максимального затемнення становила  $69.8^{\circ}$ , а азимут —  $149.4^{\circ}$ . Тривалість повної СЗ становила 4 хвилини 28,1 с. Ширина зони повної тіні досягла 197,5 км. External and Internal contact of umbra are following:  $U_1 = 16:38:44.4 UT$ ,  $U_2 = 16:41:01.7 UT$ ,  $U_3 = 19:53:13.9 UT$ ,  $U_4 = 19:55:29.1 UT$ . Повне сонячне затемнення було видиме в шести мексиканських штатах, п'ятнадцяти штатах США та шести канадських провінціях.

Траєкторія руху місячної тіні представлена на малюнку.

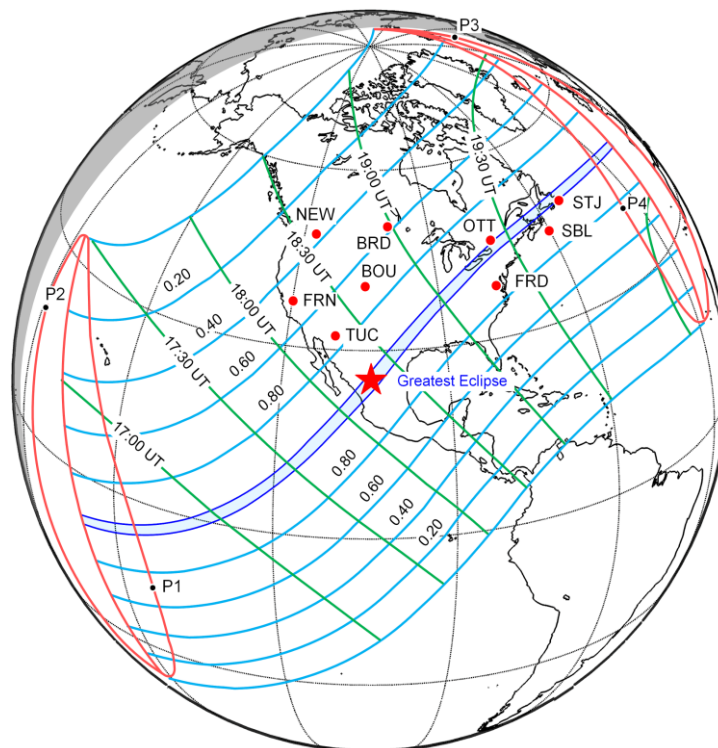


Рис. 2.1. Контурна карта розподілу станцій спостереження та зон повного і часткового сонячного затемнення.

### РОЗДІЛ 3. СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Пошуку ефектів СЗ у геомагнітному полі має передувати ретельний аналіз стану космічної погоди. Розроблено спеціальний формат, що характеризує стан космічної, що в усі дні, крім першої половини 8 квітня 2024 р., значення концентрації частинок  $n_{sw}$  сонячного вітру флуктували в межах  $(3-8) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Лише 8 квітня 2024 р. значення  $n_{sw}$  зростали від  $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  до  $15 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Це тривало не більше 10 годин (рис. 3.1).

Швидкість частинок  $V_{sw}$  сонячного вітру змінювалася від 360 км/с до 464 км/с. Температура  $T_{sw}$  частинок сонячного вітру з 5 квітня до першої половини дня 9 квітня 2024 р. флуктувала в межах  $(0.2-1.7) \cdot 10^5 \text{ К}$ . З 12:00 9 квітня 2024 р. приблизно до 14:00 10 квітня 2024 р. значення  $T_{sw}$  збільшувалися від  $0.2 \cdot 10^5 \text{ К}$  до  $2.8 \cdot 10^5 \text{ К}$ .

Динамічний тиск  $p_{sw}$  частинок сонячного вітру найчастіше флуктував від 1 нПа до 2 нПа. Лише в першій половині дня 8 квітня 2024 р. значення  $p_{sw}$  збільшувалися до 3.4 нПа.

Значення компонент  $B_y$  і  $B_z$  міжпланетного магнітного поля флуктували в межах від  $-6$  нТл до  $7$  нТл.

Сплески параметра Акасофу  $\sum_A$  зазвичай не перевищували  $6-7$  ГДж/с.

Значення індексу  $K_p$  не перевищували  $3.3$ , а в другій половині 8 квітня 2024 р. вони змінювалися від  $0.3$  до  $1$ . Значення  $D_{st}$ -індексу найчастіше флуктували в межах від  $0$  нТл до  $-30$  нТл.

Отже, стан космічної погоди був незбуреним і сприятливим для пошуку варіацій геомагнітного поля, пов'язаних із СЗ.

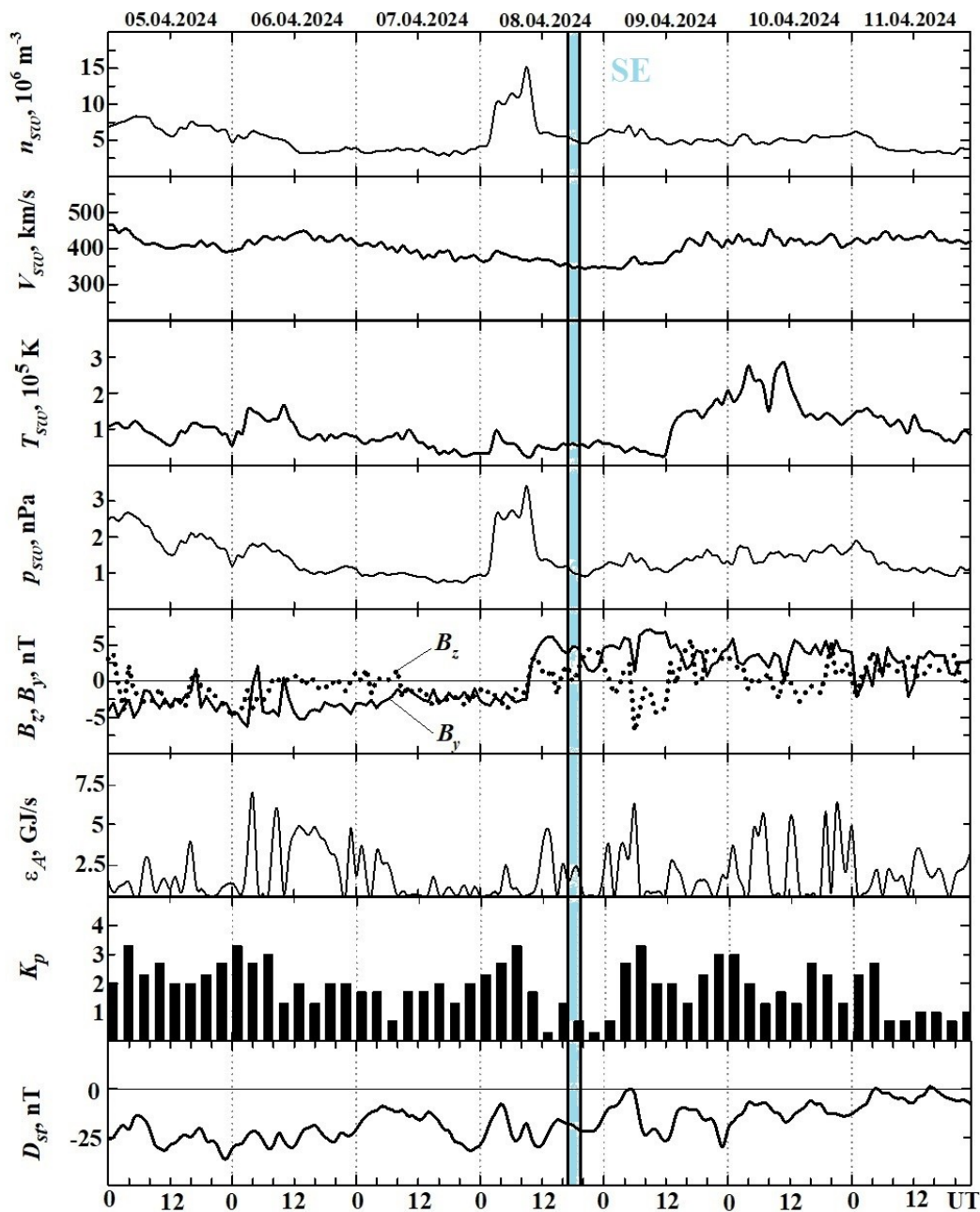


Рис. 3.1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряна густина  $n_{sw}$ , температура  $T_{sw}$ , радіальна швидкість  $V_{sw}$  частинок у сонячному вітрі, розрахований динамічний тиск  $p_{sw}$ , виміряні  $B_z$ - і  $B_y$  компоненти міжпланетного магнітного поля; розраховані значення енергії,  $\epsilon_A$ , яка переноситься в сонячному вітрі крізь магнітосферу Землі за одиницю часу;  $K_p$ -індекс і  $D_{st}$ -індекс (запозичено з бази даних <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) для 05 – 11 квітня, 2024 року. Дати показано над віссю абсцис зверху.

## РОЗДІЛ 4. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Аналізу підлягали часові варіації  $X$ -,  $Y$ - і  $Z$ -компонент (відповідні напрямом Північ–Південь, Захід–Схід і вертикальному напрямку) геомагнітного поля для низки американських і канадських магнітних станцій. Перелік цих станцій, що належали мережі INTERMAGNET, наведено в табл. 4.1. Проаналізовано дані для 5–11 квітня 2024 р. СЗ мало місце 8 квітня 2024 р. Решта днів використовувалися як контрольні.

**Таблиця 4.1. Загальні відомості про сонячне затемнення 08 квітня 2024 р.**

Станція	Координати	$t_1$	$t_m$	$t_2$	M	S, %	Схід сонця (UTC)	Захід сонцф (UTC)
	Широта Довжина							
St John's STJ Canada	47.5950°N 52.6770°W	18:39:30	19:45:53	20:47:50	0.99	99	08:51	22:16
Ottawa OTT Canada	45.4030°N 75.5520°W	18:11:43	19:25:10	20:35:05	0.99	99	10:26	23:44
Sable Island SBL Canada	43.9321°N 60.0095°W	18:31:51	19:41:24	20:46:08	0.90	89	09:24	22:34
Fredericksbu rg FRD USA	38.2100°N 77.3670°W	18:03:05	19:19:32	20:32:10	0.87	85	10:41	23:43
Tucson TUC USA	32.1700°N 110.7300°W	17:06:24	18:19:39	19:36:23	0.76	70	13:01	01:51
Boulder BOU USA	40.1400°N 105.2330°W	17:28:48	18:40:30	19:53:40	0.702	64	12:30	01:36
Brandon BRD Canada	49.8700°N 99.9739°W	17:52:45	18:58:15	20:35:05	0.58	49	11:58	01:30
Fresno FRN USA	37.0900°N 119.7200°W	17:13:03	18:15:35	19:21:23	0.50	40	13:32	02:32
Newport NEW USA	48.2700°N 117.1200°W	17:41:20	18:36:10	19:32:31	0.38	26	13:07	02:33

Роздільна здатність вихідних даних за амплітудою становить 0.1 нТл, а за часом вона дорівнює 1 хв.

Алгоритм обробки зводився до такого. Насамперед віднімалася постійна складова, оцінена для даних доби. Ця складова була різною на різних станціях. Отримані залежності  $X(t)$ ,  $Y(t)$  і  $Z(t)$  піддавалися ковзному усередненню на інтервалі часу 60 хв і будувалися залежності трендів, ■■■, ■■■ і ■■■. За цими залежностями визначали аперіодичний ефект СЗ. Крім цього, для виявлення можливого квазіперіодичного ефекту будували різниці між  $X(t)$  і ■■■,  $Y(t)$  і ■■■, а також  $Z(t)$  і ■■■.

Далі розглянемо приклади варіацій компонент міжпланетного магнітного поля для п'яти станцій, над якими фаза затемнення змінювалась від 0.99 до 0.5

## РОЗДІЛ 5. ГЕОМАГНІТНИЙ ЕФЕКТ СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ

Станція *STJ*. Варіації варіації трендів компонент  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  і  $\bar{Z}$ , а також флуктуацій  $\delta X$ ,  $\delta Y$  і  $\delta Z$  рівня цих компонент показано на Рис. 5.1.

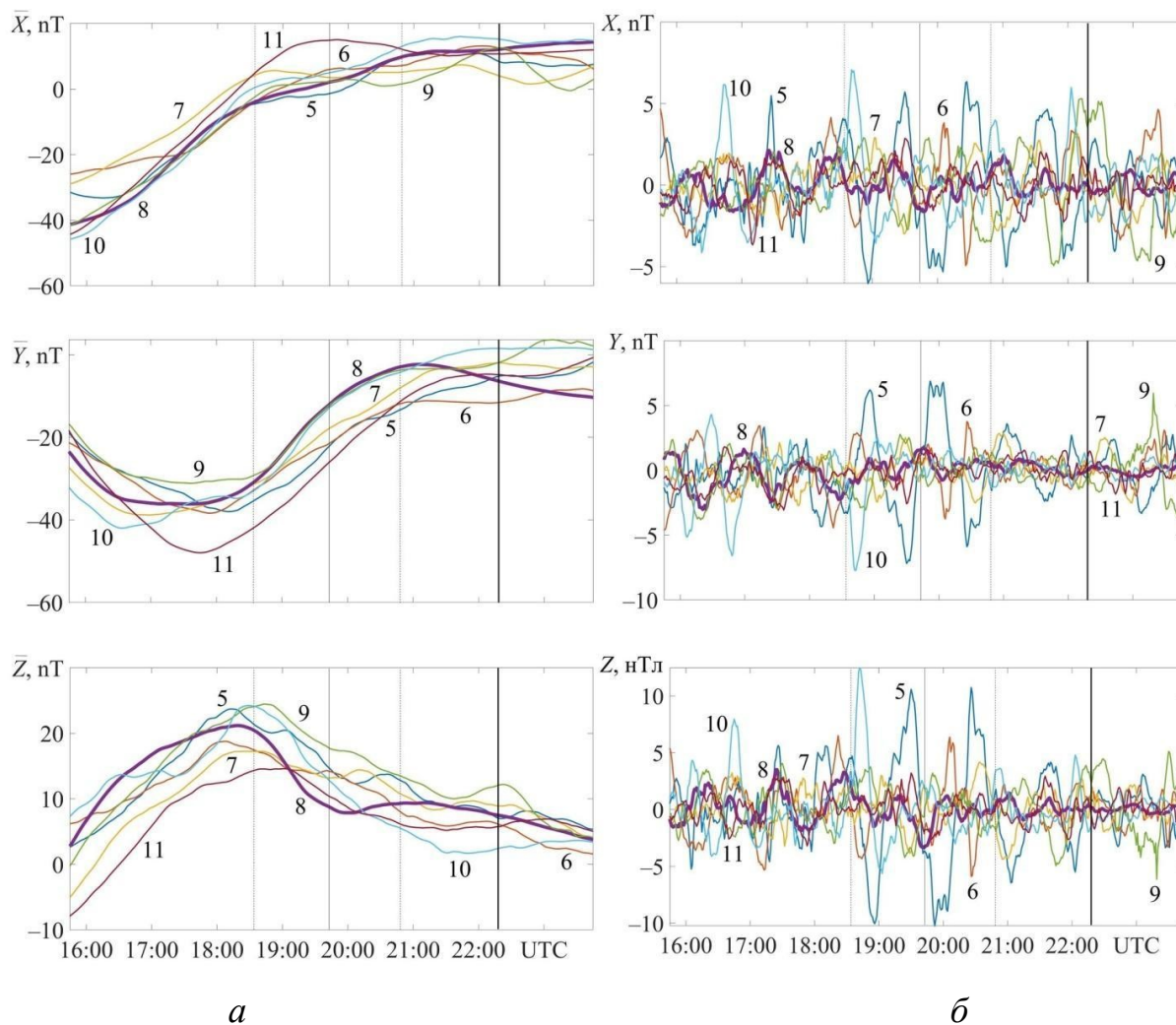


Рис. 5.1. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції *STJ* (максимальна фаза – 0.99; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 99%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія відображає максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією). (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024). 11.04.2024).

З Рис. 5.1 можна бачити, що протягом СЗ рівень  $\blacksquare$  зменшився приблизно на 8 нТл. Це тривало близько 130 хв. Помітно змінилася амплітуда флуктуацій  $\delta X$  та їхній період.

Ще до початку СЗ на рівні Землі значення тренда  $\blacksquare$  протягом 140 хв зменшувалися на 7 нТл. Під час СЗ значення  $\blacksquare$ , навпаки, збільшувалися до 7 нТл. Це тривало близько 160 хв. Після настання головної фази СЗ3 амплітуда флуктуацій  $\delta Y$  зменшувалася в кілька разів. Фактично відбулося придушення колювання з амплітудою близько 2 нТл і періодом  $T \approx 60$  хв, що існувало до затемнення.

Зменшення рівня тренда до 8 нТл почалося практично одночасно з початком затемнення і тривало близько 160 хв. СЗ також, як і для Y-компоненти, супроводжувалося придушенням колювання з амплітудою близько 2–3 нТл і періодом  $T \approx 60$  хв, що існувало до затемнення.

*Станція FRD.* Зменшення рівня  $\blacksquare$  до 3 нТл почалося приблизно через 30 хв після настання СЗ і тривало близько 130 хв (Рис. 5.2). Характер варіацій  $\delta X(t)$  протягом затемнення істотно не змінився.

Приблизно за 1.5 години до настання СЗ мало місце незначне (до 1 нТл) зменшення рівня  $\blacksquare$ , яке тривало близько 170 хв. В інтервалі часу 18:30–20:40 реєструвалося збільшення до 1.5 нТл значень  $\blacksquare$ . Варіації  $\delta Y(t)$  були незначними.

СЗ супроводжувалося зменшенням до 8 нТл рівня тренду  $\blacksquare$ , яке тривало не менше 170 хв, а також придушенням квазіперіодичного колювання  $\delta Z(t)$ .

*Станція BOU.* Протягом СЗ мало місце збільшення значень  $\blacksquare$  до 8 нТл з  $\Delta T \approx 155$  хв (Рис. 5.3).

Приблизно з 19:00 і до 22:30 відзначалося зменшення до 8 нТл. СЗ також помітно вплинуло на рівень флуктуацій  $\delta X(t)$ .

Зменшення значень тренду  $\blacksquare$  до 6 нТл почалося приблизно за 1.5 години до настання затемнення і тривало близько 180 хв. СЗ супроводжувалося придушенням флуктуацій  $\delta Y(t)$ .

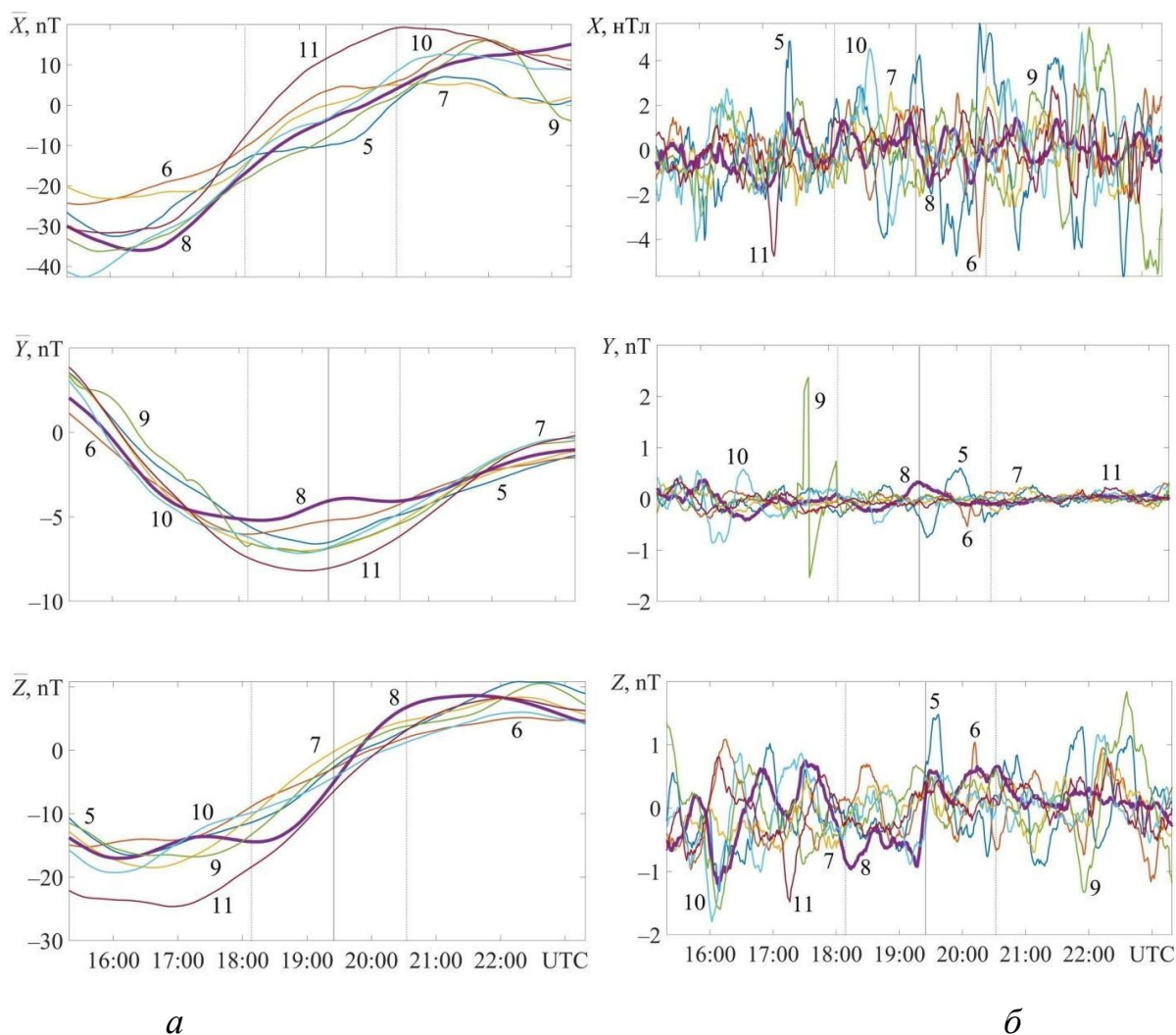
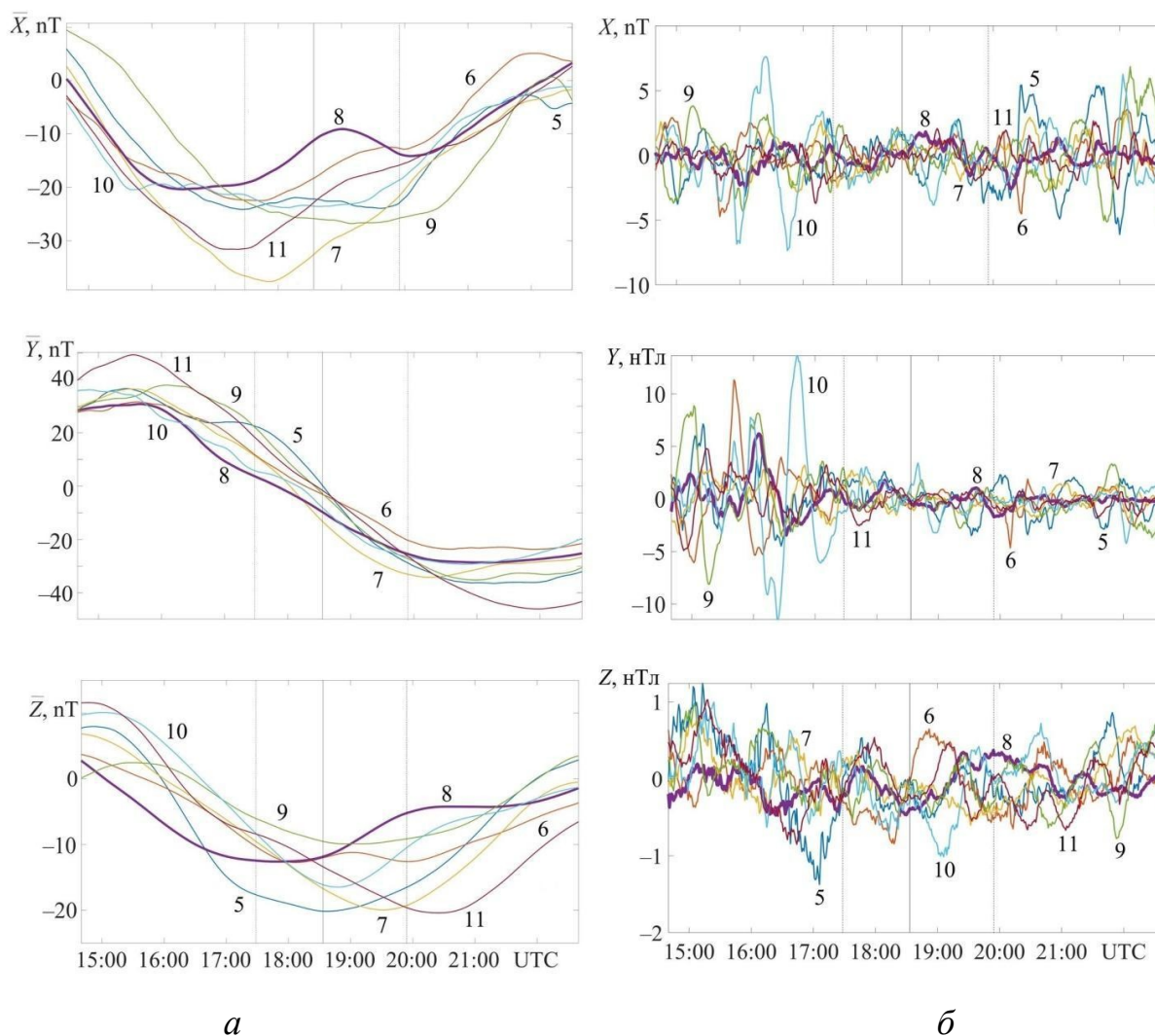


Рис. 5.2. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції FRD (максимальна фаза – 0.87; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 85%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

З 16:00 до 20:00 реєструвалося зменшення рівня  $Z$  до 4 нТл. З 18:40 до 21:00, навпаки, мало місце його збільшення до 3 нТл з  $\Delta T \approx 170$  хв. Характер варіацій  $\delta Z(t)$  несуттєво змінювався протягом СЗ.

*Станція ОТТ.* До початку СЗ з 15:30 до 17:30 відзначалося зменшення значень  $X$  до 9 нТл тривалістю близько 160 хв. Протягом СЗ спостерігалось збільшення  $X$  до 3 нТл, що тривало близько 160 хв. СЗ супроводжувалося

незначним зменшенням амплітуди та періоду коливань, що передували затемненню. Приблизно з 17:30 до 19:30 реєструвалося зменшення рівня  $Y$  до 8 нТл тривалістю  $\Delta T \approx 120$  хв. З 18:30 до 20:40 відзначалося збільшення тренду  $Y$  до 8 нТл тривалістю  $\Delta T \approx 130$  хв. Спостерігалось пригнічення квазіперіодичних коливань, що проявлялися перед затемненням.



*Рис. 5.3.* Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції BOU (максимальна фаза – 0.702; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 64%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

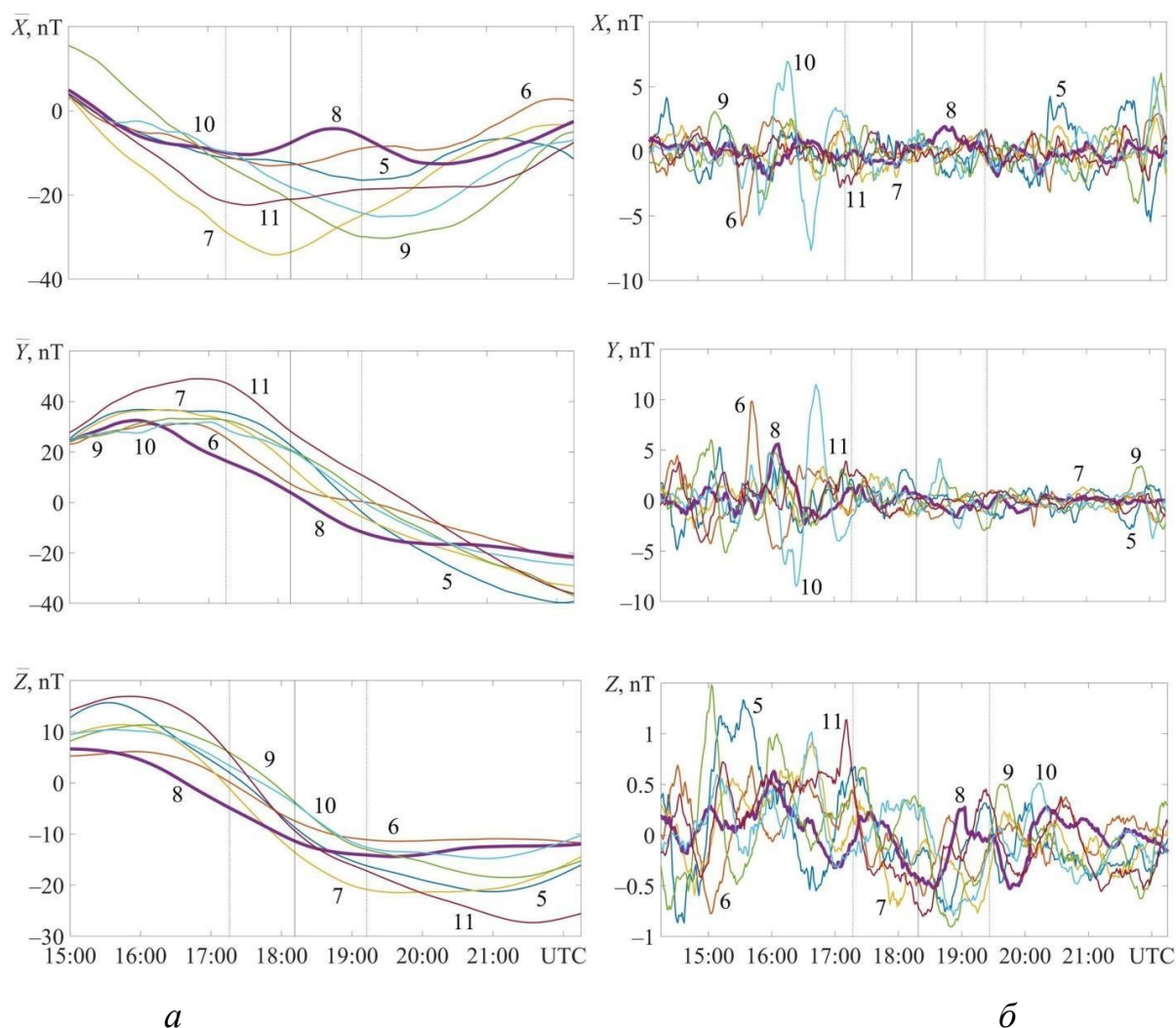


Рис. 5.4. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції FRN (максимальна фаза – 0.50; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 40%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Станція FRN. Часові варіації рівня  $\blacksquare$  були складними (Рис. 5.4).

З 16:30 і до 18:30 відзначалося його зменшення до 4 нТл. З 17:30 до 20:20 реєструвалося збільшення до 9 нТл. З 18:45 і до 22:00 рівень  $\blacksquare$  знову зменшувався до 8 нТл. Протягом СЗ зменшувався рівень флуктуацій  $\delta X(t)$ .

З 17:45 і до 20:40 рівень  $\blacksquare$  зменшувався до 4 нТл. СЗ супроводжувало придушення коливання, що існувало до затемнення.

Зменшення рівня  $\blacksquare$  до 4 нТл відзначалося з 16:45 і до 19:45. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності. Відзначалося збільшення амплітуди коливання з  $T \approx 80$  хв і  $\delta Z_a \approx 0.4$  нТл.

Станція NEW. Приблизно з 17:20 до 19:20 реєструвалося зменшення до 4 нТл рівня  $\blacksquare$  (Рис. 5.5). Протягом СЗ незначно зменшився рівень флуктуацій  $\delta X(t)$ .

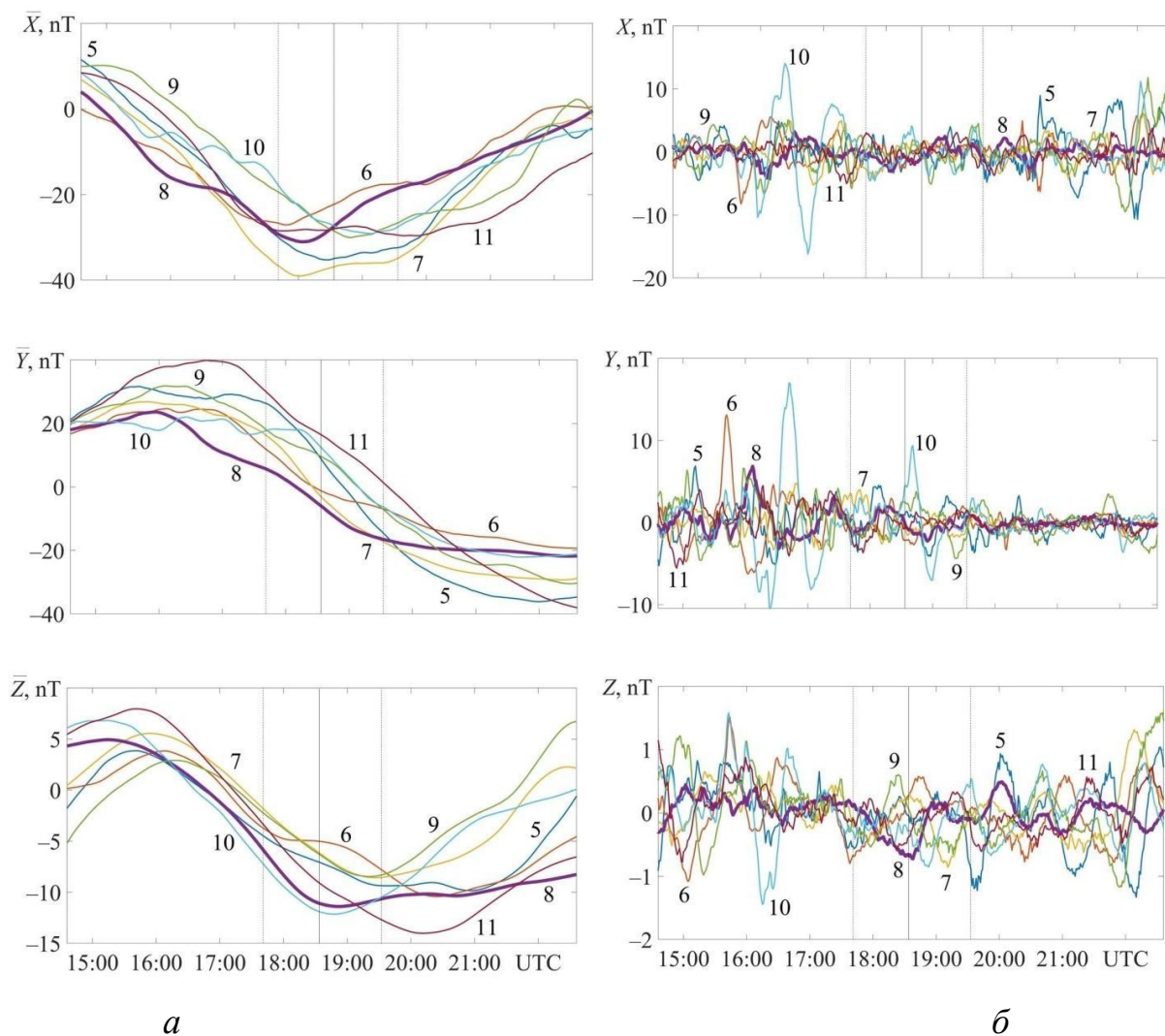


Рис. 5.5. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції NEW (максимальна фаза – 0.38; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 26%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Значення тренду ■ зменшувалися двічі. Перший раз з 16:00 до 17:45 на 5 нТл. Другий раз з 18:00 до 20:45 на 4 нТл. СЗ супроводжувалося придушенням коливання з  $T \approx 60-80$  хв і  $\delta Y_a \approx 3-4$  нТл.

Зменшення тренда ■ до 2.5 нТл відзначалося з 17:20 до 20:00. СЗ згенерувало коливання з  $T \approx 60$  хв і  $\delta Z_a \approx 0.3-0.5$  нТл.

Основні параметри аперіодичного збурення рівня компонент геомагнітного поля для всіх станцій наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Основні параметри аперіодичних змін рівня компонентів геомагнітного поля, супроводжуваних СЗ

Станція	$A_{\max}$ , %	$\otimes X_{\max}$ , нТл	$\otimes T$ , хв	$\otimes Y_{\max}$ , нТл	$\otimes T$ , хв	$\otimes Z_{\max}$ , нТл	$\otimes T$ , хв
STJ*	96	-8	130	-7 (7)	140 (160)	-8	160
OTT	96	-9 (3)	160 (160)	-8 (8)	120 (130)	-9	200
SBL*	84	-7	140	-1 (1)	120 (140)	-6	180
FRD	80	-3	130	-1 (1.5)	170 (110)	-8	170
TUC	68	-12 (10)	210 (175)	-8	200	-4 (4)	180 (180)
BOU	62	-8 (8)	210 (155)	-6	180	-4 (3)	240 (170)
BRD	48.5	-8 (5)	150 (160)	-6 (-4)	135 (165)	-6	145
FRN	40	-4 (9)	120 (175)	-4	175	-4	180
NEW	27	-4	120	-5 (-2)	105 (165)	-3	160

\*СЗ мало місце за 1-3 години до заходу Сонця на поверхні Землі.

## ВИСНОВКИ

Аналіз часових варіацій рівня  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  компонент геомагнітного поля, зареєстрованих на 9 станціях мережі станцій INTERMAGNET упродовж СЗ 8 квітня 2024 р. в Північноамериканському регіоні та в контрольні дні, показав таке.

1. СЗ супроводжувалося найчастіше зменшенням рівня всіх компонент геомагнітного поля. На низці станцій, крім зменшення рівня, мало місце їхнє збільшення в інших інтервалах часу. Величина збурень рівня всіх компонент геомагнітного поля зазвичай була порівнянною і не перевищувала приблизно 10 нТл. Тривалість збурень усіх компонент була близькою і зазвичай перебувала в межах 120–200 хв за тривалості СЗ близько 130–135 хв. Час запізнювання або випередження геомагнітного ефекту залежав від геометрії місячної тіні.

2. СЗ супроводжувалося придушенням коливання з періодом близько 60 хв і амплітудою 1–3 нТл, що існувало до затемнення.

3. При збільшенні фази СЗ спостерігалася тенденція до збільшення геомагнітного ефекту.

4. Підтверджено, що величина геомагнітного ефекту СЗ залежить не тільки від фази затемнення, а й від місця розташування магнітної станції, геометрії місячної тіні, стану іоносфери та системи іоносферних струмів.

5. Результати оцінок геомагнітного ефекту добре узгоджуються з результатами спостережень.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace*. (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University) [in Russian].
2. Bauer L. A. (1902). 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*. 7(4), 155–192. <https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>
3. Bauer L. A. (1920). Results and analysis of magnetic observations during the solar eclipse of May 29, 1919.—Summary I. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 25(3), 81—98. <https://doi.org/10.1029/TE025i003p00081>
4. Bauer L. A., Fisk H. W. (1916). On the results of some magnetic observations during the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 21(2), 57—86. <https://doi.org/10.1029/TE021i002p00057>
5. Chree C. (1915). Magnetic and electric observations at Kew Observatory relating to the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 20(2), 71—74. <https://doi.org/10.1029/TE020i002p00071>
6. Chapman S. (1933). The Effect of a Solar Eclipse on the Earth's Magnetic Field. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 38(3), 175—183. <https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>
7. Kato Y. (1964). The Effect on the Geomagnetic Micropulsation of the Solar Eclipse of 20 July 1963. *Science reports of the Tohoku University. Ser. 5, Geophysics*. 16(2), 49—62.
8. Kato Y., Ossaka J. (1956). The effect of the Solar Eclipse on the Sq current of the diurnal variation. *Science reports of the Tohoku University. Ser. 5, Geophysics*. 7(SUPPLEMENT), 21—29.
9. Kato Y. (1960). The effect on geomagnetic field of the solar eclipse of October 12, 1958. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, Geophysics*. 12(1).

10. Střeščík, J. (1999). The response of the 11 August 1999 total solar eclipse in the geomagnetic field, *Earth, Moon, and Planets*. 85(0), 561—566. <https://doi.org/10.1023/A:1017047627850>
11. Rikitake T., Uyeda T., Tanaoka I., Nakagawa E. (1958). Preliminary report on the effect of the solar eclipse on April, 19, 1958 on the Střeščík, J. (1999). The response of the 11 August 1999 total solar eclipse in the geomagnetic field, *Earth, Moon, and Planets*. 85(0), 561—566. <https://doi.org/10.1023/A:1017047627850>
12. Bomke H. A., Blake H. A., Harris A. K., Hulse W. H., Sheppard D. J., Giesecke A. A., Pantoja A. (1967). Recombination coefficient and coronal contribution to *E*-layer ionization from magnetic observations of a solar eclipse. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 72(23), 5913—5918. <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05913>
13. Lilley F. E. M., Woods D. V. (1977). Magnetic observations of the solar eclipse of 23 October 1976 in Australia. *Nature*. 266(5605), 823—824. <https://doi.org/10.1038/266823a0>
14. Brenes J., Leandro G., Fernández W. (1993). Variation of the geomagnetic field in Costa Rica during the total solar eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets*. 63, 105—117. <https://doi.org/10.1007/BF00575100>
15. Thoa N. T. K., Chau H. D., Hao T. Q., Tri P. V., Son V. T., Truong L. V., Nam V. H. (1997). Magnetic and ionospheric observations during the October 24, 1995 total solar eclipse in Vietnam. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 8(2), 155—164. [https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155\(ASEE\)](https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155(ASEE))
16. Walker G. O., Li T. Y. Y., Wong Y. W., Kikuchi T., Huang Y. N. (1991). Ionospheric and geomagnetic effects of the solar eclipse of 18 March 1988 in East Asia. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 53(1–2), 25—37. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90017-2)

17. Nevanlinna H., Häkkinen L. (1991). Geomagnetic Effect of the Total Solar Eclipse on July 22, 1990. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*. 43(4), 319—321. <https://doi.org/10.5636/jgg.43.319>
18. Curto J. J., Heilig B., Pinol M. (2006). Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 111(A7), A07312. <https://doi.org/10.1029/2005JA011499>
19. Heilig B., Csontos A., Kovacs P. (2001). The geomagnetic effect of the solar eclipse of 11 August, 1999. *Contribut. Geophys. Geod.* 31, 323—330.
20. Hvoždara M., Prigancová A. (2002). Geomagnetic effects due to an eclipse-induced low-conductivity ionospheric spot. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 107(A12), SIA 14-1—SIA 14-13. <https://doi.org/10.1029/2002JA009260>
21. Özcan O., Aydoğdu M. (2004). Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elaziğ-Turkey. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 66(11), 997—1000. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.009>
22. Malin S. R. C., Özcan O., Tank S. B., Tunçer M. K., Yazıcı-Çakin O. (2000). Geomagnetic signature of the 1999 August 11 total eclipse. *Geophys. J. Int.* 140(3), F13—F16. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.00061.x>
23. Korte M., Lühr H., Förster M., Haak V., Bencze P. (2001). Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 106(A9), 18563—18575. <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>
24. Onovughe E. V. (2013). Geomagnetic Diurnal Variation during the Total Solar Eclipse of 29 March 2006. *International Journal of Astronomy*. 2(4), 51—55. <https://doi.org/10.5923/j.astronomy.20130204.01>
25. Ladynin A. V., Semakov N. N., Khomutov S. Yu. (2011). Changes in the daily geomagnetic variation during the total solar eclipse of the 1 August 2008. *Russian Geology and Geophysics*. 52(3), 343—352.

<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.02.007>

26. Chernogor L. F. Geomagnetic Effect of the Solar Eclipse of June 10, 2021. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2022. 38, № 1. 11–24.
27. Chernogor L. F., Holub M. Yu. Geomagnetic Effect of the Solar Eclipse of October 25, 2022, in Eurasia. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. 40, № 3. 117–137.
28. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Rozumenko V. T. 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. [In press].