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

___ _підпис

Леонід ЧОРНОГОР

«__»_____2024 року

Кваліфікаційна робота магістра на тему:

«Іоносферні ефекти сонячного затемнення 20 квітня 2023 р.»

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66

Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,

Освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»

ГРАБКО Тимофій Костянтинович

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, с.н.с. Милованов Юрій Борисович

Харків 2024

Анотація

Грабко Тимофій. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 20 квітня 2023 р. Кваліфікаційна робота магістра . Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2024, 11 рис., 32 сторінки, 11 посилань.

Актуальність роботи визначається необхідністю розширення знань про динамічні процеси в іоносфері, які суттєво впливають на роботу супутникових навігаційних систем та радіозв'язку.

Мета цієї роботи - дослідження іоносферних ефектів, викликаних сонячним затемненням 20 квітня 2023 року в екваторіальних та середніх широтах. *Методи дослідження* включають аналіз даних супутникових сигналів GNSS, зібраних на станціях спостереження вздовж шляху затемнення. Було використано вимірювання ПЕВ за допомогою двочастотних приймачів та побудовано часові залежності ключових параметрів. Для порівняння результатів застосовано дані контрольних днів із врахуванням впливу космічної погоди.

Ключові слова: сонячне затемнення, релаксація, повний електронний вміст, іоносфера, сигнали навігаційних супутників.

Abstract

Hrabko Tymofii, Ionospheric effects of the solar eclipse on April 20, 2023, Master's Thesis. Kharkiv, V. N. Karazin Kharkiv National University, Department of Space Radio Physics, Faculty of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Science, 2024, 11 figures, 32 pages, 11 references.

The relevance of the work is determined by the need to expand the knowledge about dynamic processes in the ionosphere, which significantly affect the operation of satellite navigation systems and radio communications. The goal of this work is to study the ionospheric effects caused by the solar eclipse on April 20, 2023 in equatorial and mid latitudes. The research methods include the analysis of GNSS satellite signal data collected at observation stations along the eclipse path. TEC measurements were taken using dual-frequency receivers, and time dependences of key parameters were constructed. To compare the results, data from control days were used, taking into account the influence of space weather.

Key words: solar eclipse, relaxation, total electron content, ionosphere, navigational satellites signals.

Зміст

ВСТУП 5

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД 6

1.1. Загальні відомості про сонячні затемнення 6

1.2. Дані о затемненні 6

1.3. Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень 8

1.4. Результати досліджень іноземних фахівців 9

1.5. Результати досліджень українських фахівців 10

1.6. Висновки до розділу 1 11

2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ 12

2.1. Глобальна система навігаційних супутників 12

2.2. Методи аналізу даних вимірювань 15

2.3. Стан космічної погоди 18

2.4. Висновки до розділу 2 20

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ 21

3.1. Загальна характеристика даних 21

3.2. Результати аналізу часових варіацій 22

3.3. Обговорення отриманих результатів 28

3.4. Висновки до розділу 3 29

ВИСНОВКИ 30

Список використаної літератури 32

Вступ

Сонячні затемнення — це рідкісні астрономічні явища, які привертають увагу як науковців, так і широкого загалу. Вони викликають тимчасове зменшення сонячної радіації, що має суттєвий вплив на іоносферу Землі — найвищий шар атмосфери, чутливий до змін сонячної активності. Зміни в іоносфері впливають на поширення радіохвиль, роботу супутникових систем навігації та зв’язку, що обумовлює актуальність їх вивчення.

Сонячне затемнення 20 квітня 2023 року мало гібридний характер і охоплювало різні широти, від полярних до екваторіальних регіонів. Це створило унікальну можливість дослідити реакцію іоносфери на такі швидкоплинні зміни, як затемнення Сонця.

Метою цієї роботи є дослідження впливу сонячного затемнення на іоносферу шляхом аналізу часових залежностей повного електронного вмісту (ПЕВ), отриманих за допомогою сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS).

Робота спрямована на визначення основних закономірностей іоносферних змін під час затемнення, часу релаксації після зникнення тіні Місяця та впливу широтних зон. Використання сучасних методів аналізу даних GNSS дозволяє забезпечити точність вимірювань.

Наукова і практична значущість роботи полягає у вдосконаленні знань про вплив сонячних затемнень на іоносферу, що сприятиме розвитку систем супутникової навігації та прогнозуванню космічної погоди.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальні відомості про сонячні затемнення

Сонячне затемнення − астрономічне явище, за якого Місяць проходить між Землею та Сонцем, частково або повністю перекриваючи його світло. Таке положення спричиняє падіння тіні Місяця на Землю, створюючи візуальний феномен затемнення.

Існують декілька видів затемнень:

Повне СЗ: Місяць повністю закриває диск Сонця. На Землі настає короткочасна ніч, залежно від місця спостереження можна побачити корону Сонця, яка є його зовнішньою атмосферою.

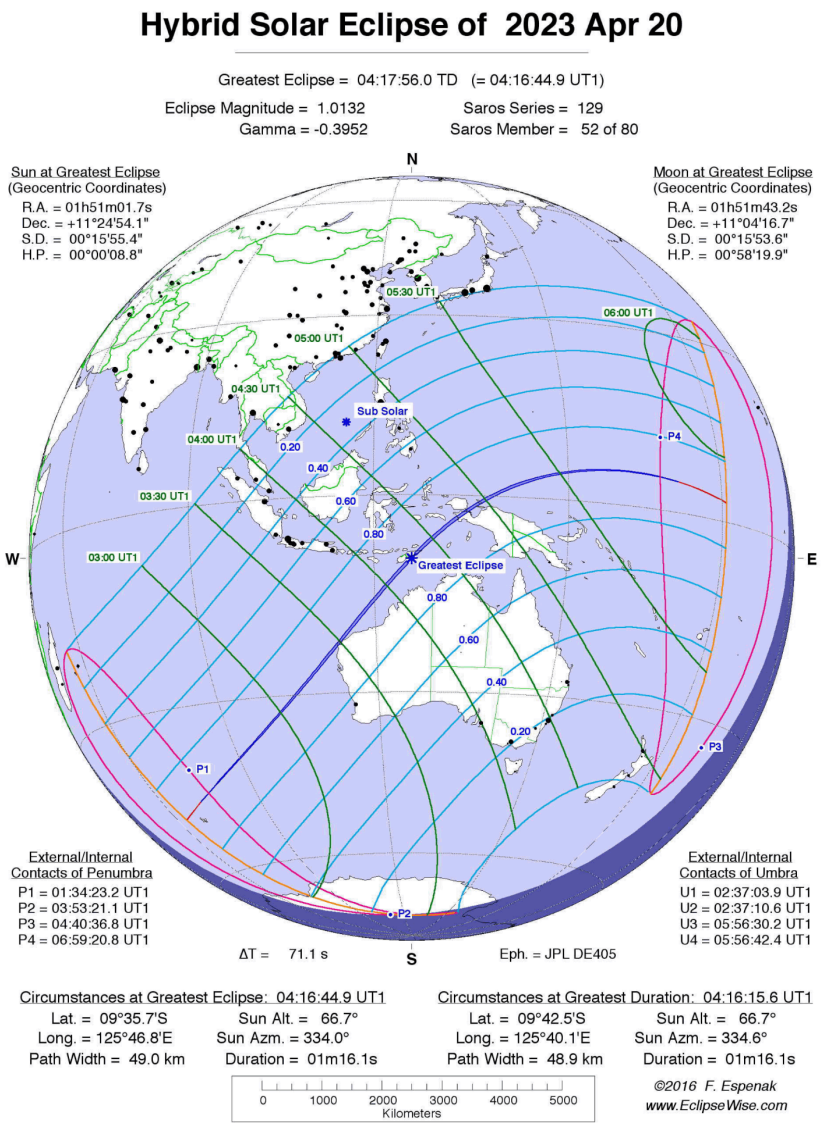
Часткове СЗ: Місяць частково закриває диск Сонця. Найбільш розповсюджена форма СЗ.

Кільцеподібне СЗ: Місяць закриває центр Сонця, залишаючи на краях яскраве кільце. Це відбувається, коли Місяць знаходиться на більшій відстані від Землі та його видимий діаметр менший за Сонце.

Гібридне СЗ: Тип затемнення, коли СЗ має вигляд повного та кільцеподібного на різних ділянках його шляху. Зазвичай починається з кільцеподібного, переходить в повне та закінчує знов кільцеподібним.

1.2 Дані о затемненні

Гібридне сонячне затемнення трапилось 129-го сароса 20 квітня 2023р. Часткове СЗ спостерігалося в північно-східній Азії, Ост-Індії, Австралії, Філіппінах, Новій Зеландії. Гібридне СЗ спостерігалося в Австралії, Тимор-Лешті, Індонезії (Західне Папуа та Папуа), рис. 1.



COURTESY OF *21ST CENTURY CANON OF SOLAR ECLIPSES*, FRED ESPENAK, ASTROPIXELS PUBLISHING, 2016

Рис.1. Географічні зони, де спостерігалося СЗ.

Часткове затемнення почалося о 01:34 UT та закінчилося о 06:59 UT. Гібридне затемнення почалося о 02:37 UT та закінчилося о 05:56 UT. Максимальна фаза затемнення - 04:16:45 UT з магнітудою 1.0132 та обскурацією 1.02657

Максимальна тривалість тотального затемнення − 76 секунд

1.3. Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень

Під час сонячних затемнень тимчасове блокування сонячної радіації має значний вплив на іоносферу Землі. Ці ефекти можна спостерігати в різних шарах іоносфери та вони мають наслідки для систем зв’язку та навігації, які залежать від умов іоносфери. Основні ефекти включають:

1. Зменшення електронної густини

Раптове зниження іонізації: іоносфера сильно залежить від сонячного ультрафіолетового і рентгенівського випромінювання, яке іонізує атмосферні частинки. Під час сонячного затемнення тимчасове зниження сонячної радіації призводить до швидкого зниження іонізації, особливо в D-шарі та E-шарі іоносфери. Це призводить до меншої електронної густини в уражених областях.

Відновлення після затемнення: після затемнення іонізація поступово відновлюється в міру повернення сонячних променів, але цей процес відновлення не є миттєвим, і реакція іоносфери може бути складною залежно від тривалості та місця затемнення.

2. Зміни температури

Охолодження іоносфери: зменшення сонячної енергії під час затемнення призводить до охолодження шарів іоносфери, що може знизити температуру на кілька градусів у F-області . Це охолодження впливає на хімію та динаміку іоносфери.

Вплив на атмосферні хвилі: зміни температури також можуть генерувати атмосферні гравітаційні хвилі, які поширюються через іоносферу, впливаючи на її структуру та поведінку навіть після затемнення.

3. Зміна поширення радіохвиль

Покращений зв'язок на низьких частотах: у міру зменшення густини електронів у D-шарі зменшується поглинання радіосигналу на низьких частотах (LF) і дуже низьких частотах (VLF).

Порушений високочастотний (HF) зв’язок: для високочастотних (HF) радіосигналів зменшення густини електронів може спричинити згасання сигналу, що робить ВЧ-зв’язок менш надійним під час і незабаром після затемнення. Відбивна здатність іоносфери послаблюється через зміни її показника заломлення.

Повний електронний вміст (ПЕВ) є ключовим параметром, який використовується для опису електронної густини іоносфери, і він представляє загальну кількість електронів, присутніх на певному шляху між двома точками, як правило, між супутником і наземним приймачем. ПЕВ важливий, оскільки він впливає на поширення радіосигналів, особливо тих, що використовуються в супутникових системах, таких як GPS.

1.4 Результати досліджень іноземних фахівців

Наукові дослідження, проведені під час сонячного затемнення 20 квітня 2023 року, допомогли зрозуміти вплив затемнень на іоносферу, особливо в контексті хвильових збурень та змін у розподілі іонів. Цей вплив досліджували міжнародні групи, як, наприклад, організація HamSCI, яка залучила радіоаматорів для фіксації іоносферних аномалій за допомогою низькочастотного радіообладнання. У цих дослідженнях спостерігали зниження густини іонів у шарах E і F іоносфери, що є типовою реакцією на зменшення ультрафіолетового випромінювання від Сонця під час затемнення. Це призвело до зміни характеристик поширення хвиль, які використовуються в комунікаціях на високих частотах (HF) та для передачі сигналів GPS.

1.5 Результати досліджень українських фахівців

У дослідженні співробітників кафедри космічної радіофізики ХНУ ім. В. Н. Каразіна, присвяченому впливу сонячного затемнення 20 квітня 2023 року на іоносферу, було проаналізовано зміни повного електронного вмісту (ПЕВ) у різних широтних зонах і в різний час доби. Дослідження виявило такі основні результати:

Було встановлено, що час релаксації іоносфери після затемнення залежить від ПЕВ, та в діапазоні від 10 TECU до 50 TECU є 30-15 хвилин, та при зростанні до 90 TECU зменшувався до декількох хвилин.

Виявлено, що збільшення площі затемнення Сонця на 10% призводить до зменшення ПЕВ приблизно на 0.6 TECU

Встановлено, що максимальне падіння ПЕВ під час затемнення становило 10-15 TECU

1.6 Висновки до розділу 1

На основі першого розділу можна сформулювати такі висновки:

Вплив сонячних затемнень на іоносферу:
Сонячні затемнення є значущими астрономічними подіями, які тимчасово зменшують інтенсивність сонячного випромінювання, викликаючи зміну щільності іонізації іоносфери. Це явище має помітний вплив на функціонування систем радіозв'язку та навігації.

Типи сонячних затемнень і їхні особливості:
Виділяються чотири основні типи затемнень: повне, часткове, кільцеподібне та гібридне. Їхні характеристики визначаються відстанню між Землею, Місяцем і Сонцем, що впливає на ступінь покриття сонячного диску.

Особливості сонячного затемнення 20 квітня 2023 року:
Це гібридне затемнення 129-го саросу, яке мало максимальну тривалість повного затемнення 76 секунд і спостерігалося в різних регіонах Азії, Австралії, Тимор-Лешті й Індонезії.

Іоносферні ефекти затемнень:
Під час затемнення спостерігаються зменшення густини електронів, охолодження іоносфери, зміни температури та хвильові збурення. Ці зміни впливають на поглинання і поширення радіосигналів.

Ці висновки підкреслюють значущість сонячних затемнень як природного експерименту для вивчення динамічних властивостей іоносфери та їхнього впливу на сучасні технології.

2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

2.1. Глобальна система навігаційних супутників

Глобальна система навігаційних супутників (GNSS) — це сукупність супутникових систем, які забезпечують визначення місця розташування, часу та швидкості руху об'єктів у будь-якій точці Землі. Основними компонентами GNSS є космічний сегмент (супутники), наземний сегмент (станції управління) та користувацьке обладнання (приймачі).

Основні глобальні навігаційні системи:

GPS (Global Positioning System):
Розроблена США, ця система з 31 супутників забезпечує найширше покриття та високу точність. Орбіти супутників GPS розташовані на висоті близько 20200 км.
Вона працює на основі передачі сигналів від супутників до приймачів, дозволяючи обчислити місцезнаходження з точністю до кількох метрів.
В даній роботі використовуються дані саме з цієї системи.

ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система):
Ця система є альтернативою GPS. GLONASS працює на аналогічних принципах і має глобальне покриття.

Galileo:
Європейська GNSS, яка була створена для забезпечення незалежності Європи у сфері супутникової навігації. Відома своєю високою точністю та інтеграцією з іншими системами.

BeiDou:

Китайська навігаційна система, яка охоплює як регіональне, так і глобальне покриття. Має розширений функціонал, включаючи підтримку коротких повідомлень.

Використання GNSS у дослідженні іоносфери:

GNSS є важливим інструментом для вивчення іоносфери, оскільки супутникові сигнали проходять крізь шари атмосфери, зокрема іоносферу, і зазнають впливу її параметрів.

Основні методи включають:

Визначення похилого повного електронного вмісту (ПЕВ) вздовж лінії супутник-приймач.

Моніторинг іоносферних аномалій: Дані GNSS використовуються для виявлення змін електронної густини, що можуть бути спричинені сонячними затемненнями, магнітними бурями або іншими космічними явищами.

Дослідження просторово-часових варіацій: GNSS дозволяє створювати тривимірні моделі іоносфери, які необхідні для прогнозування її впливу на системи зв’язку та навігації.

Значення для практики:

Завдяки GNSS стало можливим не лише точне позиціонування, але й глибоке розуміння динамічних процесів у іоносфері. Отримані дані мають важливе значення для прогнозування стану космічної погоди, забезпечення стабільності супутникових систем зв’язку та підвищення точності навігації.

Для вивчення реакції іоносфери на сонячно-земні взаємодії (СЗ) здійснюється вимірювання похилого параметра електронної щільності (ПЕВ) вздовж лінії "супутник-приймач". Для цього використовуються двочастотні GPS-приймачі, які реєструють сигнали від супутників на несучих частотах $f_1 = 1.57542$ ГГц і

f_2 = 1.22760 ГГц. Під час обробки сигналів фіксується час їх поширення від супутника до приймача. Цей показник називається псевдодальністю.

Псевдодальність визначають шляхом вимірювання часу поширення кодованого сигналу або зміни фази несучої радіохвилі на трасі "супутник-приймач". Основну систематичну похибку при оцінці ПЕВ вносить часовий зсув між вимірюваннями псевдодальностей на різних частотах. Для її корекції використовуються поправки DCB (Differential Code Biases). На основі псевдодальностей по коду розраховується фазова поправка. Завдяки цьому похибка ПЕВ не перевищує 0,1 TECU.

У процесі аналізу сигналів для оцінки реакції іоносфери вимірюється похилий ПЕВ. У спрощеній моделі вся іоносфера розглядається як тонка сферична оболонка з нульовою товщиною, що знаходиться на фіксованій висоті (від 350 до 450 км). Вважається, що ПЕВ формується в одній точці, яка є місцем перетину сигналу з іоносферною оболонкою. Ця точка називається іоносферною точкою (Ionosphere Pierce Point, IPP).

Проекція іоносферної точки на поверхню Землі визначає підіоносферну точку. Географічні координати цих точок збігаються. Під час руху супутників вимірювані іоносферні точки формують траєкторії, які називаються прольотами.

Станції, дані з яких використовуватимуться в цій роботі:

№	Станція	Широта	Довгота	Місцезнаходження
1	CEDU	−31.69	133.81	Ceduna, Australia
2	POHN	6.91	158.21	Pohnpei, FS of Micronesia

2.2. Методи аналізу даних вимірювань

Для отримання даних о реакції іоносфери на СЗ були використані дані вимірювань сигналів, які отримали станції поблизу шляху проходження сонячної тіні. На рис. 2 можна побачити слід місячної тіні та станції, поблизу яких він проходив.

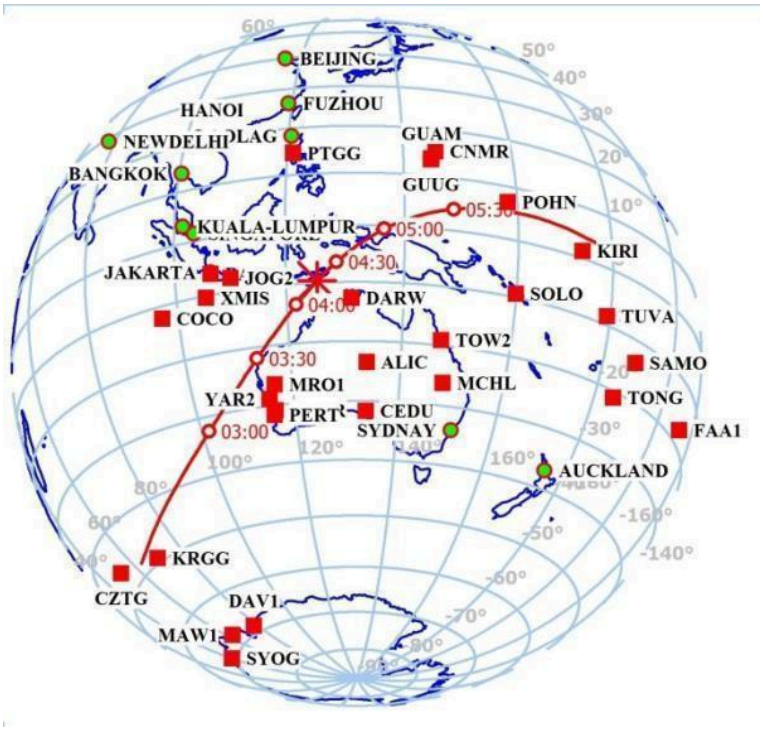


Рис. 2. Розташування станцій спостереження поблизу лінії проходження лунної тіні 20 квітня 2023 року.

Слід місячної тіні, фаза затемнення M, частка площі A сонячного диска, покрита Місяцем, а також відносна освітленість E і її значення з урахуванням затемнення визначаються методом Ф. Бесселя

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

При цьому

$$E = \cos\chi\,,$$

де χ – зенітний кут падіння сонячного випромінювання. Освітленість нормується на максимальну освітленість у підсонячній точці, найближчій до Сонця.

Величина ПЕВ залежить від кількості отриманої сонячної енергії та відсотка площі диска Сонця, закритого Місяцем під час затемнення (ступінь затемнення, *A*).

ПЕВ можна виразити через псевдодальності, виміряні за кодом Р і фазою Ф, з урахуванням похибки вимірювання, у наступному вигляді:

$$P_{1,2} = \rho + c\cdot \Delta t + I_{1,2} + T + d^{T}_{1,2} + d^{R}_{1,2}$$
$$\Phi_{1,2} = \rho + c\cdot\Delta t - I_{1,2} + T + \alpha_{1,2}$$

де

ρ – справжня дальність, м;

c – швидкість світла ≈ 299 792 458 м/с;

Δt – похибка в різниці часів приймача та передатчика, с;

I – іоносферна затримка, м;

T – тропосферна затримка, м;

d^{T}_{P} – поправка по коду для передатчика, м;

d^{R}_{P} – поправка по коду для приймача, м;

α – фазова невизначеність, постійна, м;

1,2 – номера радіоканалів L1 та L2.

Формула для повного (вертикального) електронного вмісту (ПЕВ) може бути записана у такій формі:

$$N_V = \frac{\lambda_1 \bullet L_1 - \lambda_2 \bullet L_2 - \overline{\Delta\alpha}}{40.35(f_2^{-2} - f_1^{-2})} cos\,(\psi)$$

де $\overline{\Delta\alpha}$ – розрахована фазова невизначеність; ψ – кут між напрямками супутник – приймач та нормаллю до F2 – сфері в точці виміру.

Аналізу підлягають такі параметри: Виміряний ПЕВ (Nv): величина, отримана під час експерименту. Очікуване значення ПЕВ (Nv_0): величина, яка мала б місце за відсутності сонячного затемнення. Дефіцит ПЕВ (ΔNv): різниця між виміряним і очікуваним значенням, визначається як:

$$\Delta N_V = N_V - N_{V0}.$$

Відносне значення дефіциту ПЕВ (δV): обчислюється за формулою: $\delta V = \Delta N_V / N_{V0}$. Час запізнювання реакції ПЕВ (Δt): інтервал часу між максимальною фазою сонячного затемнення (M_{max}) і моментом досягнення максимального дефіциту ПЕВ. Тривалість реакції (ΔT): загальний час, протягом якого спостерігається реакція іоносфери.

Для кожної точки вимірювань у шарі F2 іоносфери були розраховані параметри M, A. ΔN_V та E.

2.3. Стан космічної погоди

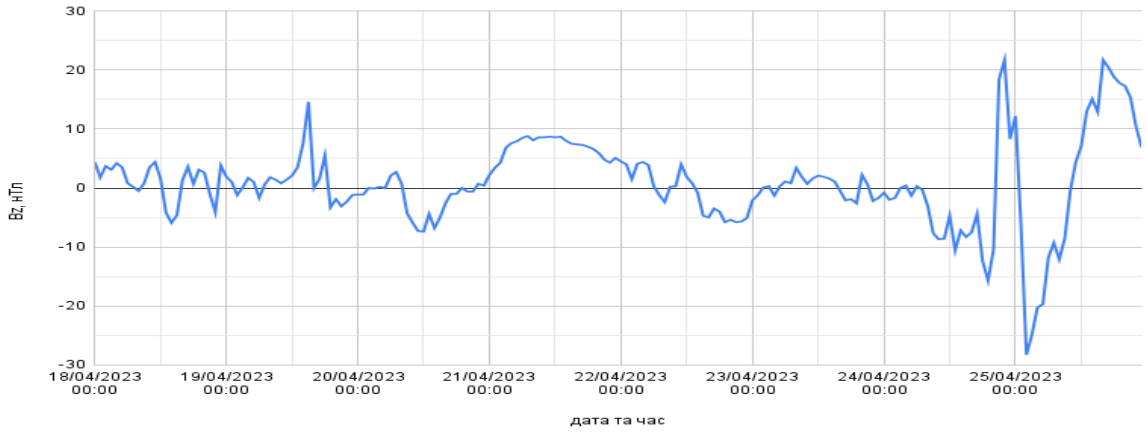


Рис. 3. Часова залежність компоненти індукції міжпланетного магнітного поля B_z в період від 18 до 26 квітня.

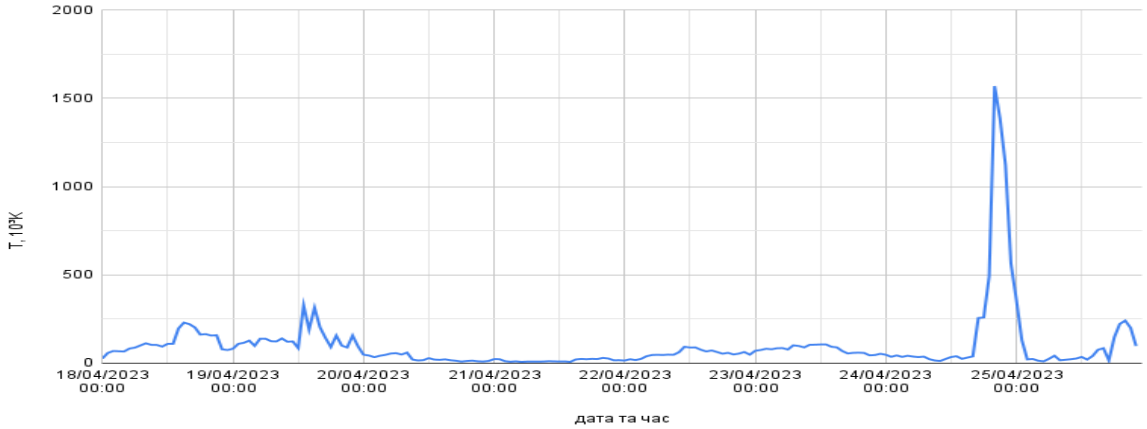


Рис. 4. Часова залежність температури сонячного вітра в період від 18 до 26 квітня.

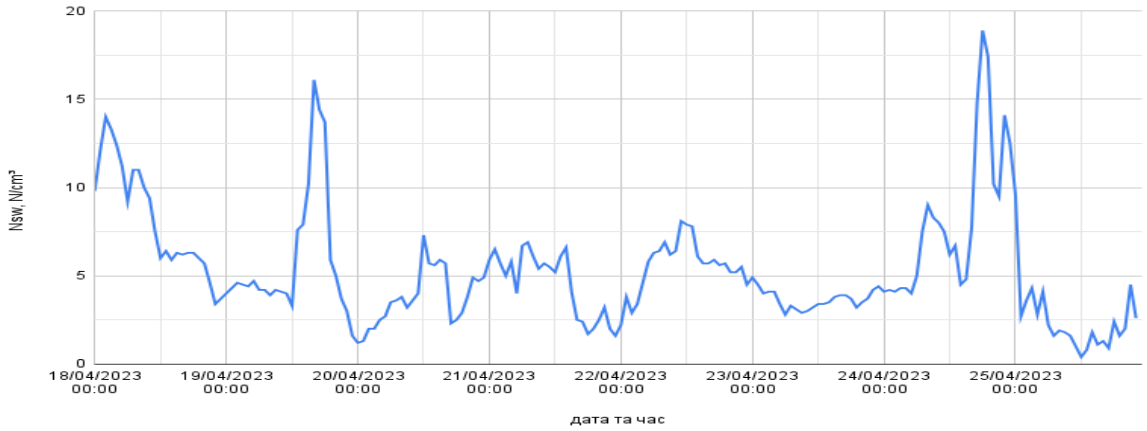


Рис. 5. Часова залежність концентрації частинок сонячного вітру в період від 18 до 26 квітня.

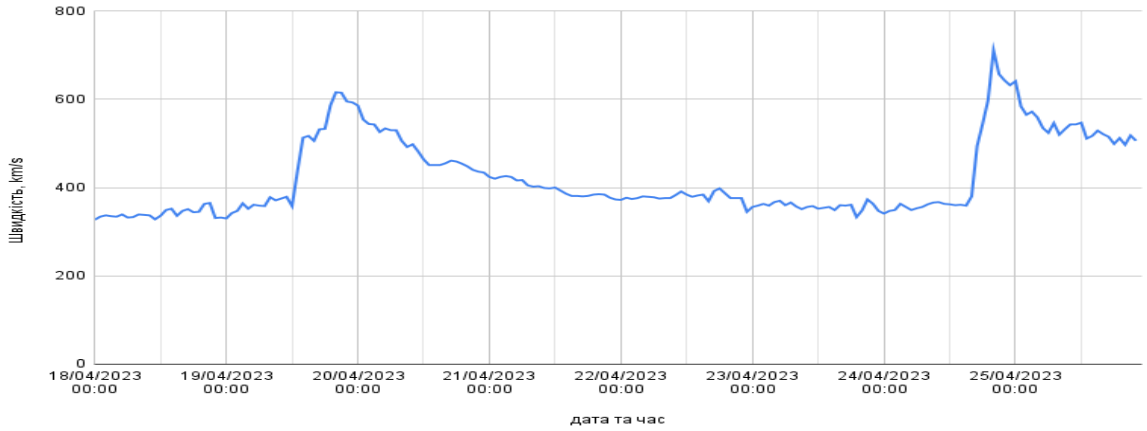


Рис. 6. Часова залежність швидкості сонячного вітру в період від 18 до 26 квітня.

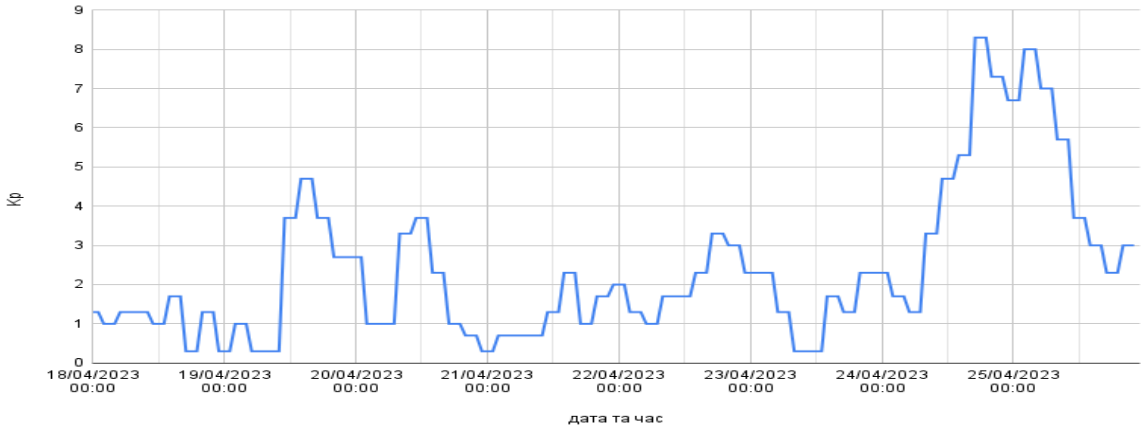


Рис. 7. Часова залежність індексу геомагнітного поля Кр в період від 18 до 26 квітня.

Значення B_z компоненти в період з 18 по 23 квітня приймали значення від -7.4 до +14.6 нТл, температура сонячного вітру змінювалася від 6.3 до $326.7 \cdot 10^3$ К, щільність частинок сонячного вітру змінювалася від 1.2 до $16.1 \cdot 10^6$ м$^{-3}$, швидкість частинок змінювалася від 324 до 616 км/с, індекс Кр приймав значення від 0.3 до 4.7. Візьмемо 18 та 22 квітня як контрольні дні. З цього можна прийти до висновку, що стан сонячної погоди був сприятливий для вивчення ефектів СЗ 20 квітня 2023 р.

2.4. Висновки до розділу 2

Густина іоносфери зазнає змін під впливом сонячної активності. У цьому дослідженні дані були зібрані під час сонячних збурень, оскільки цікавим є аналіз того, як варіації сонячної активності впливають на поведінку плазми в іоносфері.

Кожен промінь між супутником і приймачем описується такими параметрами: повним електронним вмістом (ПЕВ), азимутом, кутом місця та координатами підіоносферної точки. Ці дані дозволяють визначити часову залежність ПЕВ для всіх траєкторій супутник-приймач.

Результати оцінювання ПЕВ залежать від руху точки вимірювання в F2-шарі іоносфери, переміщення місячної тіні та обертання Землі навколо своєї осі.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Загальна характеристика даних

Нижче приводиться таблиця даних та розрахунків, де

№ – номер прольоту по порядку

N – значення ПЕВ в момент досягнення максимального дефіциту, TECU

N_{V0} – очікуване значення ПЕВ в момент досягнення максимального дефіциту за відсутності СЗ, TECU

ΔN - максимальний дефіцит ПЕВ

$\frac{N-N_{V0}}{N_{V0}}$ – відносне значення дефіциту ПЕВ

M – фаза затемнення, частина діаметра Сонця, закрита Місяцем

A – фаза затемнення, частина площі Сонця, закрита Місяцем. %

E – відносна освітленість точки виміру за відсутності СЗ

E_m – відносна освітленість точки виміру

Δt – час досягнення максимального дефіциту ПЕВ відносно максимальної фази затемнення, хв.

№	Станція	Супут-ник	N, TECU	N_{V0}, TECU	ΔN	$\frac{N-N_{V0}}{N_{V0}}$	M	A%	E	E_m	$\otimes t$, хв
1	CEDU	G07	38.6	53.8	15.2	−0.28	0.529	42.3	0.317	0.317	8.0
2	CEDU	G03	39.6	45.6	6	−0.13	0.355	24.0	0.525	0.525	7.5
3	CEDU	G04	38.3	44.1	5.8	−0.13	0.363	24.8	0.463	0.463	14.5
4	CEDU	G09	37.2	45.8	8.6	−0.19	0.434	32.0	0.487	0.487	11.5
5	CEDU	G06	37.5	41.1	3.6	−0.09	0.404	28.9	0.604	0.604	51.0
6	POHN	G01	86.2	90.7	4.5	−0.05	0.810	75.9	0.085	0.081	-20.0
7	POHN	G03	87.6	90.7	3.1	−0.03	0.951	93.8	0.134	0.130	7.5
8	POHN	G04	87.7	90.7	3	−0.03	0.884	85.3	0.096	0.094	9.0
9	POHN	G08	87.6	89.1	1.5	−0.02	0.973	96.6	0.054	0.053	-1.0

3.2. Результати аналізу часових варіацій

Затемнення тривало близько 4-х годин. Слід місячної тіні проходить на поверхні Землі в кількох тисячах кілометрів вранці від приполярних районів Антарктиди в південній частині Індійського океану і далі через середні широти рухається вздовж екватора в полуденний час і завершує свій шлях у західній частині Тихого океану.

Результати спостережень (див. рис. 4 – рис. 19) наведені контурними картами прольотів супутників та часовими залежностями ПЕВ у точках вимірювання щодо станцій спостереження. На рисунках літерами зазначені: фаза затемнення *M* (частина діаметра Сонця, закрита Місяцем), фаза затінення *A*% (частина площі Сонця, закрита Місяцем), відносні освітленості *E* та E_m.

У підсонячній точці Землі відносну освітленість вважаємо за E = 1. Зеленою та оливковою кривими на малюнках відповідно відзначені часові залежності ПЕВ у контрольні дні 18 та 22 квітня 2023 р. Крива з точок представляє розрахункові очікувані значення ПЕВ у припущенні відсутності затемнення. Часова залежність очікуваних значень ПЕВ обмежена на прольоті позитивною фазою затемнення M збільшеною на середній фіксований час релаксації іоносфери після закінчення затемнення. Вертикальні та горизонтальні відрізки на малюнку відображають вибір максимального значення дефіциту ПЕВ та час його досягнення щодо максимуму фази затемнення M. Місячна тінь на контурних картах відзначена безперервною червоною лінією з відмітками часу.

Наведемо деякі результати аналізу.

Станція CEDU:

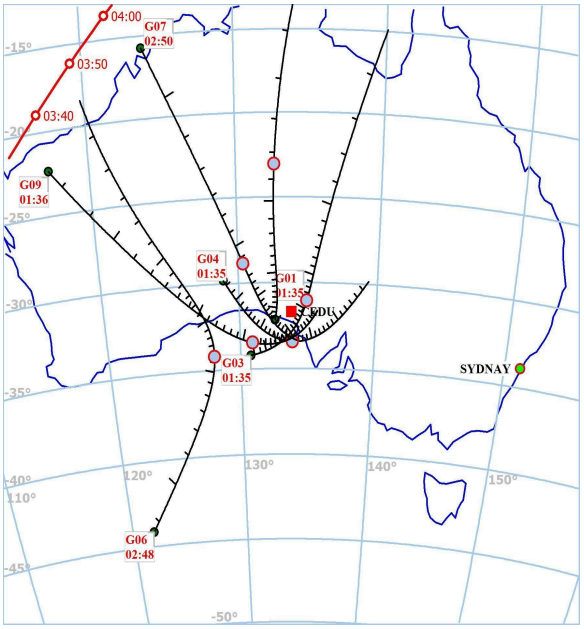
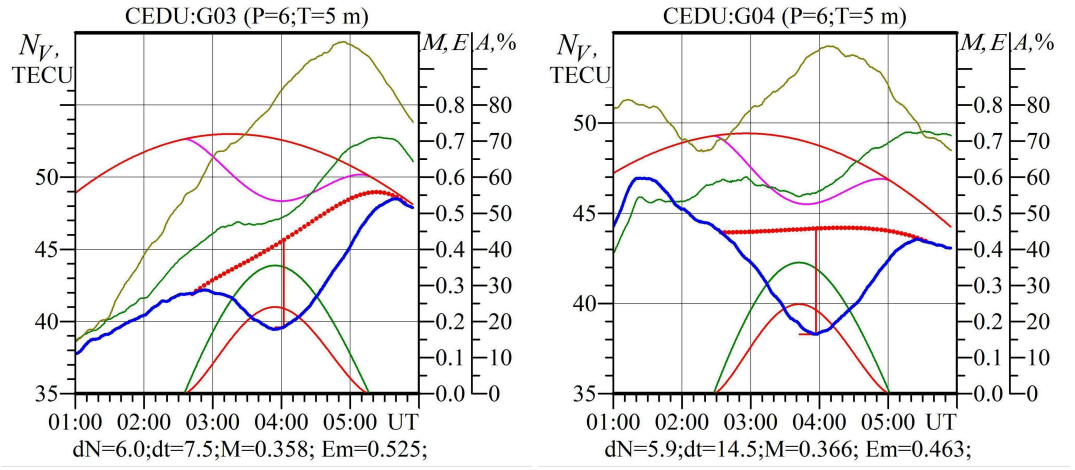
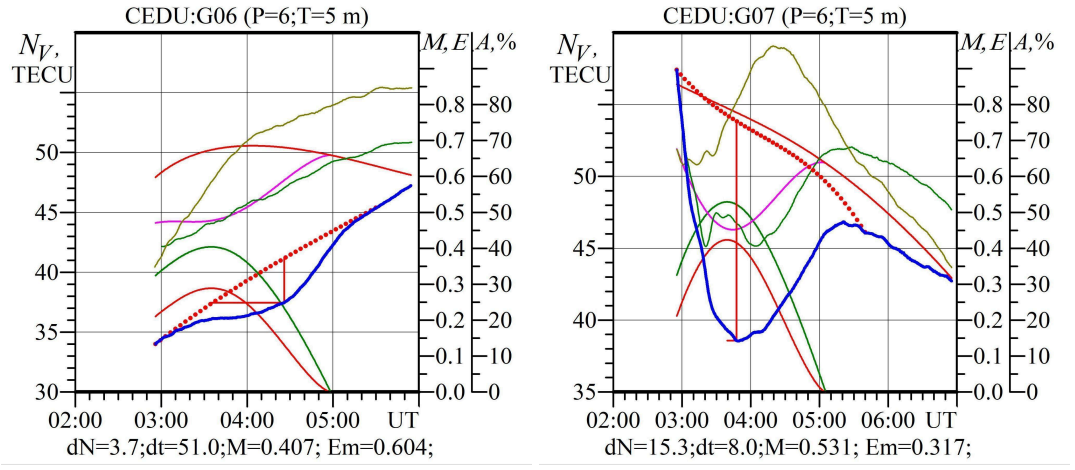


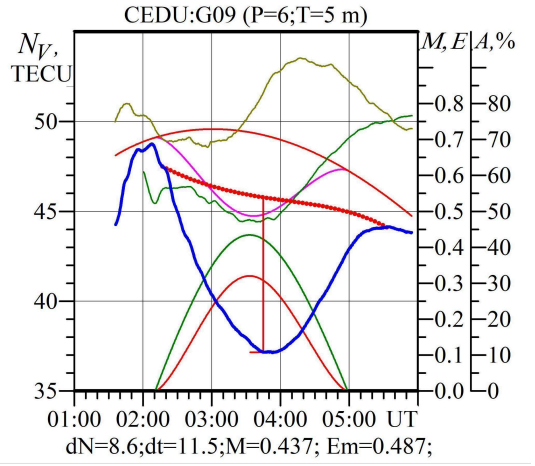
Рис. 8. Контурна мапа прольотів супутників GPS відносно станції CEDU



(а) (б)



(в) (г)



(д)

Рис. 9. Часові залежності ПЕВ вздовж прольотів супутників (а) G03, (б) G04, (в) G06, (г) G07, (д) G09 відносно станції CEDU

Станція розташована в Австралії, основна фаза затемнення прийшлася вдень, приблизно в 13 - 14 годин по місцевому часу.

Для прольоту супутника G03 (рис. 9а) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становила $E_m \approx 0.525$. Максимум фази затемнення досяг $M = 0.355$ і максимальний дефіцит ПЕВ ставив $\Delta N_V = -6$ TECU, час релаксації складав 7.5 хв.

Для прольоту супутника G04 (рис. 9б) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ прийняла значеня $E_m \approx 0.463$. Максимум фази затемнення досяг $M = 0.363$ і максимальний дефіцит ПЕВ становить $\Delta N_V = -5.8$ TECU, час релаксації складав 14.5 хв.

Для прольоту супутника G06 (рис. 9в) відносна освітленість в момент досягнення максимального

дефіциту ПЕВ рівнялась $E_m \approx 0.604$. Максимум фази затемнення досяг $M = 0.404$ і максимальний дефіцит ПЕВ ставив $\Delta N_V = -3.6$ TECU, час релаксації складав 51 хв.

Для прольоту супутника G07 (рис. 9г) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становить $E_m \approx 0.317$. Максимум фази затемнення становить $M = 0.529$ і максимальний дефіцит ПЕВ дорівнюється $\Delta N_V = -15.2$ TECU, час релаксації складав 8 хв.

Для прольоту супутника G09 (рис. 9д) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становить $E_m \approx 0.487$. Максимум фази затемнення досяг $M = 0.434$ і максимальний дефіцит ПЕВ ставив $\Delta N_V = -8.6$ TECU, час релаксації складав 11.5 хв. Рівень ПЕВ був 35 - 40 TECU.

Станція POHN:

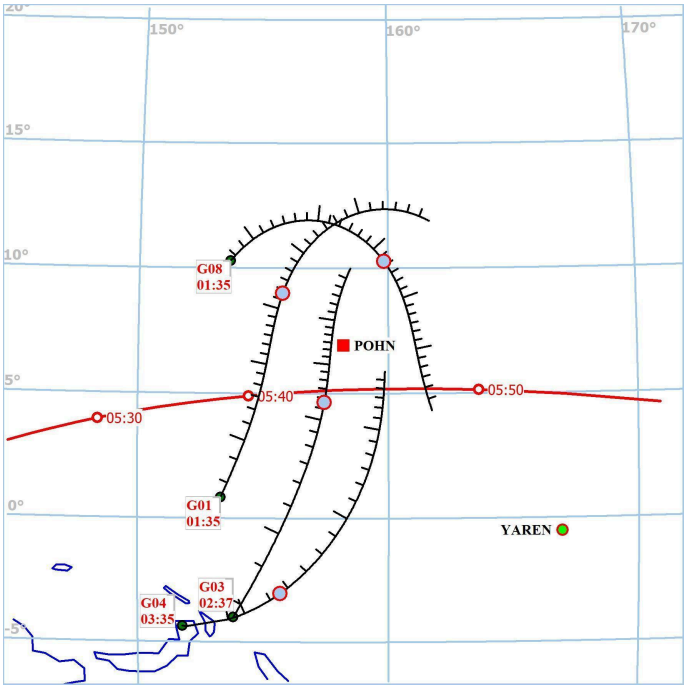
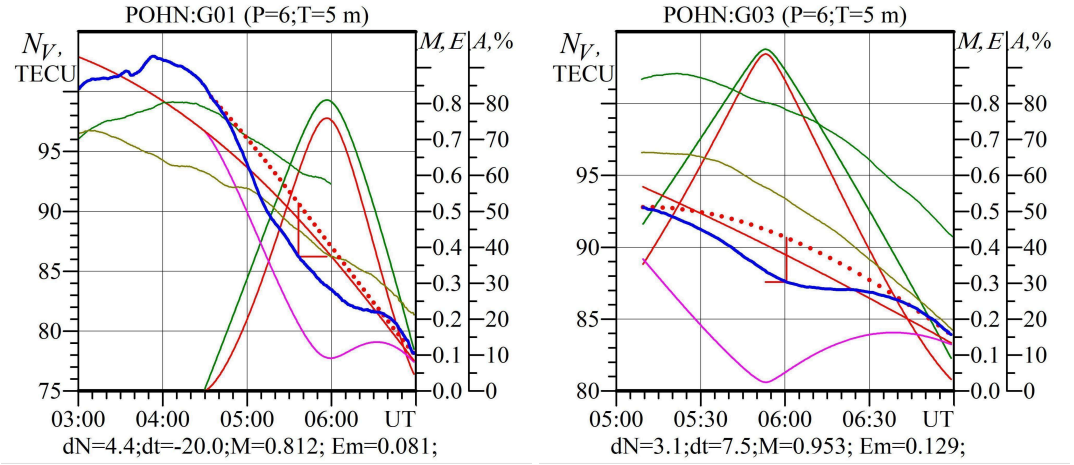
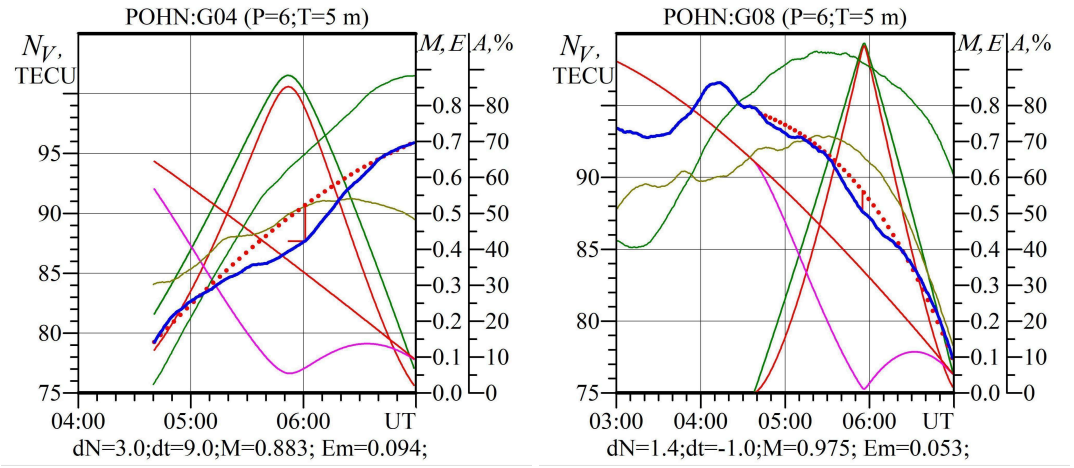


Рис. 10. Контурна мапа прольотів супутників GPS відносно станції POHN



(а) (б)



(в) (г)

Рис. 11. Часові залежності ПЕВ вздовж прольотів супутників (а) G01, (б) G03, (в) G04, (г) G08 відносно станції POHN

Станція розташована на острові Понпеї в Мікронезії, основна фаза затемнення прийшлася вдень, приблизно в 16 – 17 годин по місцевому часу.

Для прольоту супутника G01 (рис. 11а) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становить $E_m \approx 0.081$. Максимум фази затемнення досяг $M = 0.81$ і максимальний дефіцит ПЕВ ставив $\Delta N_V = -4.5$ TECU, час релаксації складав 20 хв.

Для прольоту супутника G03 (рис. 11б) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становила $E_m \approx 0.13$. Максимум фази затемнення досяг $M = 0.951$ і максимальний дефіцит ПЕВ ставив $\Delta N_V = -3.1$ TECU, час релаксації складав 7.5 хв.

Для прольоту супутника G04 (рис. 11в) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становить $E_m \approx 0.094$. Максимум фази

затемнення досяг M = 0.884 і максимальний дефіцит ПЕВ ставив ΔN_V = −3 TECU, час релаксації складав 9 хв.

Для прольоту супутника G08 (рис. 11г) відносна освітленість в момент досягнення максимального дефіциту ПЕВ становить $E_m \approx 0.053$. Максимум фази затемнення досяг M = 0.973 і максимальний дефіцит ПЕВ ставив ΔN_V = −1.5 TECU, час релаксації складав 1 хв.

В цій точці можна було спостерігати майже повне СЗ, також рівень ПЕВ був достатньо високим, близько 90 TECU завдяки спостереженню вдень. Можна відмітити, що час релаксації заметно менший, ніж виміряний біля станції CEDU.

Зі збільшенням фази затемнення M при русі точки вимірювання ПЕВ вздовж прольоту, значення ПЕВ зменшуються, та демонструє дефіцит в порівнянні з необуреними значеннями. Але при зменшенні значення фази затемнення до $M = 0$ пряма дія СЗ на F2 шар іоносфери припиняється. Після деякого часу властивості іоносфери відновлюються або настає релаксація. Цей час характеризує інерційні властивості іоносфери. Час релаксації залежить від параметрів атмосфери та іоносфери, зокрема, від величини ПЕВ та динаміки F2 шару.

3.3. Обговорення отриманих результатів

У цій роботі було проведено аналіз часових змін ПЕВ в іоносфері з використанням даних, отриманих за допомогою GPS-станцій та супутників у контрольні дні та в день сонячного збурення 20 квітня 2023 року. Космічна погода цього дня сприяла дослідженню ПЕВ. Аналіз даних здійснювався на станціях POHN та CEDU за допомогою різних супутників.

Часові залежності ПЕВ у контрольні дні дозволяють побудувати очікувану поведінку ПЕВ за умови відсутності сонячного збурення та визначити дефіцит ПЕВ.

Особливістю цього затемнення було проходження тіні через полярну, середньоширотну та екваторіальну області.

У районах затемнення було зафіксовано зниження ПЕВ у порівнянні з контрольними днями, що відповідає теоретичним очікуванням.

Станція POHN, розташована ближче до екватора, зазнала меншого відносного дефіциту ПЕВ порівняно зі станцією CEDU, розташованою в середніх широтах. Час релаксації знижується з ростом значення ПЕВ.

3.4. Висновки до розділу 3

Вплив сонячного затемнення на ПЕВ:

Сонячне затемнення 20 квітня 2023 року викликало помітне зниження повного електронного вмісту в іоносфері, максимальні значення дефіциту ПЕВ спостерігалися під час основної фази затемнення.

Особливості просторово-часових варіацій:

Зі збільшенням фази затемнення (*M*) значення ПЕВ поступово зменшувалося, досягаючи мінімуму після найбільшої фази затемнення. Після завершення затемнення ПЕВ поступово відновлювався, в залежності від часу релаксації, який переважно залежить від загального рівня ПЕВ, з більшими значеннями якого час релаксації знижується.

Різниця в реакції за широтами:

У середньоширотній зоні (станція CEDU) спостерігався більш значний дефіцит ПЕВ (до −15.2 TECU), порівняно з екваторіальними регіонами (станція POHN), де дефіцит не перевищував −4.5 TECU.

Вплив космічної погоди:

Дослідження проводилися за сприятливих умов космічної погоди, що дозволило чітко зафіксувати вплив сонячного затемнення без значних перешкод від сонячної активності.

ВИСНОВКИ

Вплив сонячних затемнень на іоносферу:

Сонячне затемнення 20 квітня 2023 року спричинило значні зміни в іоносфері, зокрема, в повному електронному вмісті (ПЕВ). Під час основної фази затемнення спостерігалося значне зниження ПЕВ, що є типовою реакцією іоносфери на тимчасове зменшення сонячної радіації.

Зміни в ПЕВ залежали від фази затемнення, географічного розташування станцій та часу доби. Станції, що знаходились в різних широтних зонах, демонстрували різний рівень дефіциту ПЕВ.

Динаміка іоносферних змін:

Після завершення затемнення спостерігалося поступове відновлення ПЕВ, яке залежало від місця та часу спостереження. Час релаксації іоносфери після затемнення був різним для різних регіонів і становив від кількох хвилин до 51 хвилини.

Використання GNSS для дослідження іоносфери:

Використання даних глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) є ефективним методом для вивчення іоносферних змін, викликаних сонячними затемненнями. Спостереження за сигналами з супутників дозволяє отримувати точні вимірювання ПЕВ і аналізувати його варіації.

Космічна погода і її вплив на дослідження:

Дослідження було проведено в період сприятливої космічної погоди, що дозволило мінімізувати вплив інших космічних явищ на іоносферу. Це зробило можливим точне визначення змін ПЕВ, спричинених саме сонячним затемненням.

Практичне значення результатів:

Результати дослідження мають важливе значення для покращення моделей іоносферних процесів та для підвищення точності навігаційних систем, таких як GPS, що залежать від стану іоносфери.

Знання про реакцію іоносфери на сонячні затемнення можуть бути використані для прогнозування ефектів космічної погоди, що дозволить своєчасно реагувати на можливі збої в роботі супутникових систем і зв'язку.

Ці висновки демонструють важливість вивчення впливу сонячних затемнень на іоносферу для розвитку точних методів моніторингу та прогнозування стану космічної погоди, а також для покращення сучасних навігаційних та комунікаційних систем.

Використана література

1. Fred Espenak - Solar Eclipse Prime
2. HamSCI
3. NASA - GPS
4. NASA - OMNI 2
5. NASA - GNSS
6. Verhulst T. G. W., Stankov S. M. The importance of the threedimensional geometry of solar eclipses for analysis of the impact on the ionosphere. 2018 42nd COSPAR Scientific Assembly, Pasadena, California, USA, Abstract id. C1.1 79 18.
7. ЧОРНОГОР Л. Ф. Фізичні ефекти сонячних затемнень у атмосфері та геокосмосі: Монографія. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. – 386 с.123
8. Чорногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. 27, № 2. С. 93—109.123
9. Чорногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Дорохов В. Л., Поднос В. А., Цимбал А. М., Шевелев М. Б. 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—65.123
10. Чорногор Л. Ф., Милованова Л. І., Милованов Ю. Б., Цимбал А. М., Luo 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.
11. Л. Ф. Чорногор, Ю. Б. Милованов Космічна фізика, Кінематика і фізика небесних тіл том 39 №4 2023 Глобальні варіації повного електронного вмісту в екваторіальній іоносфері протягом кільцеподібного сонячного затемнення 21 червня 2020 р.