

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

«30» листопада 2024 року

Кваліфікаційна робота магістра
на тему:

**«Варіації повного електронного вмісту в іоносфері під час сонячного
затемнення 25 жовтня 2022 р.»**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66

Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,

Освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»



НЕРОД Арсеній Сергійович

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



Харків 2024

Нерод А.С. Варіації повного електронного вмісту в іоносфері під час сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. / А.С. Нерод – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. – 35 с.

В даній роботі було розглянуто вплив сонячного затемнення (СЗ) 25 жовтня 2022 року на динаміку повного електронного вмісту (ПЕВ) та на іоносферу Землі. Для цього було розглянуто основні характеристики сонячного затемнення, використанні сигнали навігаційних супутників, які отримані на станціях розміщених у Європі та Україні. Будуть згадані основні відомості про іоносферу, та сонячне затемнення.

Скористувалися методиками вимірювань дефіциту ПЕВ та методиками дослідження іоносфери за допомогою Глобальної навігаційної супутникової системи.

14 іл., 3 табл., 14 бібл., 35 с.

Nerod A.S. Variations of the total electronic content in the ionosphere during the solar eclipse of October 25, 2022 / A.S. Nerod – Kh.: Kharkiv V. N. Karazin National University, 2024. – 35 p.

In this work, the influence of the solar eclipse on October 25, 2022 on the dynamics of total electronic content (TEC) and on the Earth's ionosphere was considered. For this, the main characteristics of the solar eclipse were considered, using signals from navigation satellites received at stations located in Europe and Ukraine. Basic information about the ionosphere and solar eclipse will be mentioned.

We will use methods of measuring TEC deficit and methods of studying the ionosphere using the Global Navigation Satellite System.

14 Figures, 3 Tables, 14 References, 35 c.

Зміст

ВСТУП.....	4
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	8
1.1. Загальні відомості про сонячні затемнення.....	8
1.2. Відомості про затемнення 25 жовтня 2022 року.....	9
1.3. Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень.....	13
1.4. Результати досліджень іноземних фахівців.....	15
1.5. Результати досліджень українських фахівців.....	16
1.6. Висновки до розділу 1.....	17
2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ.....	18
2.1. Глобальна система навігаційних супутників.....	18
2.2. Методи аналізу даних вимірювань.....	20
2.3. Висновки до розділу 2.....	22
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
3.1. Загальна характеристика даних.....	23
3.2. Результати аналізу часових варіацій.....	24
3.3. Обговорення отриманих результатів.....	32
3.4. Висновки до розділу 3.....	32
ВИСНОВКИ.....	33
Список використаної літератури.....	34

Вступ

Сонячне затемнення (СЗ) - це глобальні збурення, які змінюють властивості іоносфери. Такі явища можуть заважати роботі радіосигналів і навігаційних систем.

Саме верхній шар атмосфери містить іони та вільні електрони. Під час сонячного затемнення, сонячне світло не потрапляє в іоносферу у звичайному режимі, що може призвести до зміни концентрації іонів та електронів і зміни їхніх властивостей:

- зменшення концентрації електронів
- зміна температури
- зміна щільності йонів
- зміна провідності іоносфери

Концентрація іонів та електронів змінюється, змінюється рух іонів та електронів і змінюється їхній рух. Ці зміни можуть вплинути на поширення радіохвиль і спричинити серйозні спотворення та перебої у зв'язку.

Фазове затемнення - це явище втрати або зсуву фази радіосигналів при проходженні через іоносферу, викликане неоднорідністю шару іоносфери. Це пояснюється тим, що коливання концентрації електронів та інші іоносферні умови призводять до різних фаз для різних частин сигналу.

Ефекти СЗ в іоносфері спостерігаються вченими протягом 100 років. Для цього досліджується спотворення СЗ характеристик радіохвиль, а після винаходу методу вертикального зондування та супутникових методів спостереження дослідження отримали новий поштовх.

Метою роботи є збір даних повного електричного вмісту (ПЕВ) з іоносферних станцій під час СЗ 25 жовтня 2022 року, моделювання іоносферних процесів під час СЗ та отримати результати досліджень різних варіацій ПЕВ під час самого затемнення. Одиниця виміру прийнята $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Повний електронний вміст (ПЕВ) – це кількість електронів у циліндричному стовпі з площею поперечного перерізу 1 квадратний метр, який простягається від супутника до приймача.

Дефіцитом ПЕВ являється зниження кількості електронів у циліндричному стовпі іоносфери, що розташований між супутником і приймачем на Землі. Це явище виникає через тимчасові зміни в концентрації електронів у верхніх шарах атмосфери, зокрема в іоносфері.

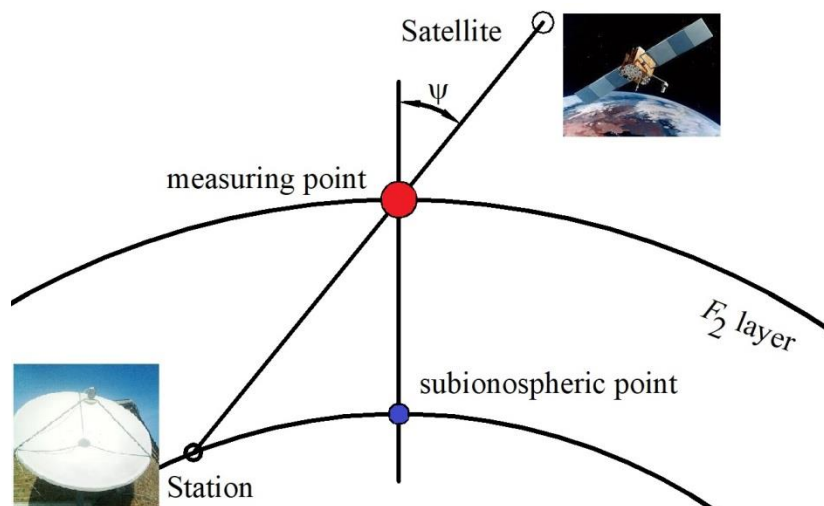


Рис. 1. Схема визначення точки вимірювання повного електронного вмісту.

Іоносфера — це шар атмосфери на висоті приблизно від 60 до 1000 км, який містить значну кількість заряджених частинок (іонів та електронів), що утворюються під дією сонячної радіації. Завдяки цим зарядженим частинкам іоносфера має унікальні електромагнітні властивості: вона може відбивати, заломлювати та поглинати радіохвилі. Це дозволяє використовувати іоносферу для передачі радіосигналів на великі відстані.

Радіохвилею є електромагнітна хвиля з довжиною хвилі від 1 мм до кількох кілометрів, яка поширюється у просторі. Вона складається з коливань електричного і магнітного полів, які перпендикулярні одне одному та напрямку поширення хвилі. Процес збору інформації про Землю, атмосферу або космічний простір за допомогою супутників, які обертаються навколо Землі або

перебувають на орбітах інших космічних тіл являється супутниковими вимірюваннями.

Важливі етапи дослідження:

- Вивчення впливу СЗ 25 жовтня 2022 року на динаміку ПЕВ
- Дослідження механізмів, що обумовлюють варіації ПЕВ в іоносфері
- Оцінка впливу варіацій ПЕВ на роботу радіосистем та супутникового зв'язку.

СЗ має помітний вплив на динаміку ПЕВ в іоносфері. Основні зміни відбуваються внаслідок зниження іонізації в іоносфері, що впливає на властивості та поширення радіохвиль. Наслідками можуть бути: зміна відбивної здатності іоносфери, аномальні ефекти, зміна параметрів, посилення процесів рекомбінацій тощо.

Оскільки під час затемнення іонізація в іоносфері знижується, затемнення впливає на роботу радіосистем, особливо тих, які працюють на довгих і середніх хвилях. Це змінює відбивну здатність іоносфери, внаслідок чого відстані поширення радіосигналів стають більшими або меншими. Оскільки кількість заряджених частинок зменшується, швидкість поглинання радіохвиль також знижується, що покращує дальність і якість передачі, залежно від частоти. Водночас у таких радіосистемах можуть спостерігатися аномалії сигналу, наприклад, зміни його рівня і стабільності, що може створити проблеми для зв'язку, навігації та радіолокації, особливо в районах, яких безпосередньо торкнулося затемнення.

Під час затемнення ПЕВ в іоносфері зменшується через зниження іонізації молекул і атомів в іоносфері, спричиненого зменшенням ультрафіолетового випромінювання від Сонця. Зменшення ПЕВ починається незадовго до повного затемнення, коли тінь Місяця починає закривати Сонце, і сягає максимуму в

момент тотальності. Залежно від тривалості та площі затемнення ПЕВ зменшується на 30 – 50 % порівняно зі звичайними денними умовами.

Вплив затемнення на повний електронний вміст (ПЕВ) вимірюється за допомогою спостережень GPS та інших GNSS (глобальних навігаційних супутникових систем). Під час затемнення інтенсивність сонячного випромінювання зменшується, що впливає на іоносферу Землі. По сигналам з GNSS можна розрахувати кількість електронів на шляху між супутником і приймачем на землі. Ці дані допоможуть визначити, як затемнення вплине на розподіл ПЕВ у конкретному районі.

Сигнали з GNSS передають час поширення радіохвилі. Точка вимірювання ПЕС, іоносферна точка, знаходиться в іоносфері, в шарі F_2 . Проекції іоносферної точки вимірювання на поверхню Землі ми можемо спостерігати на контурних картах, і ми називаємо їх «прольоти».

Дефіцит повного електронного вмісту (ПЕВ) описує зниження кількості електронів в іоносфері, що може впливати на радіосигнали, супутниковий зв'язок та GPS-навігацію. Дефіцит ПЕВ може виникати під час затемнення, оскільки затінення Сонця знижує рівень іонізації, спричиненої сонячним випромінюванням, що призводить до зменшення концентрації електронів в іоносфері. Це явище особливо помітне під час фази повного затемнення, коли сонячне світло повністю блокується, і, відповідно, рівень іонізації різко знижується. Відносне максимальне зменшення ПЕВ може сягати 20 – 30%.

Відносна освітленість (відношення поточної освітленості до максимальної можливої освітленості в цій точці в певний момент часу) допомагає оцінити, наскільки освітлення під час затемнення або інших природних явищ відрізняється від нормального денного рівня.

Кожне сонячне затемнення є причиною регулярних і нерегулярних ефектів, які притаманні лише цьому затемненню. Кожне СЗ є особливості у

потіканні процесів, які залежать від фази затемнення, пори року, стану космічної погоди, часу доби тощо.

1. Аналітичний огляд

1.1 Загальні відомості про сонячні затемнення

Затемнення - це явище, за якого одне небесне тіло загороджує світло іншого, спричиняючи тимчасове зменшення яскравості або зміну форми небесного тіла.

Затемнення відбувається, коли Місяць загороджує Сонце і його світло не досягає земної поверхні. Це відбувається тільки тоді, коли Місяць перебуває між Сонцем і Землею. Сонячні затемнення можуть бути повними або частковими, залежно від того, наскільки повно Місяць загороджує Сонце.

Крім того, що затемнення є важливою подією для наукових досліджень, вони мають культурне значення для багатьох народів і культур.

Хоча роздільна здатність телескопів може бути недостатньою, щоб побачити зірки окремо, затемнення однієї зірки іншою спостерігається як зміна яскравості змінної зірки, що затьмарюється. Через великі відмінності в кутових розмірах темної матерії замість терміна «затьмарення» використовуються інші визначення:

- Покриття зірки планетою (супутником, кільцем тощо), якщо кутовий діаметр темного тіла значно перевищує кутовий діаметр зірки.

- Якщо кутовий діаметр освітлювального тіла набагато більший, ніж об'єкта, що покриває, то це явище називається транзитом. Меркурій і Венера перетинають диск Сонячної системи, а супутники – диск планети.

1.2. Відомості про затемнення

Часткове сонячне затемнення 124 сароса відбулося 25 жовтня 2022 р. СЗ спостерігалося в Європі, на Близькому Сході, у Центральній Азії, Західному Сибіру та на Північному Сході Африки.

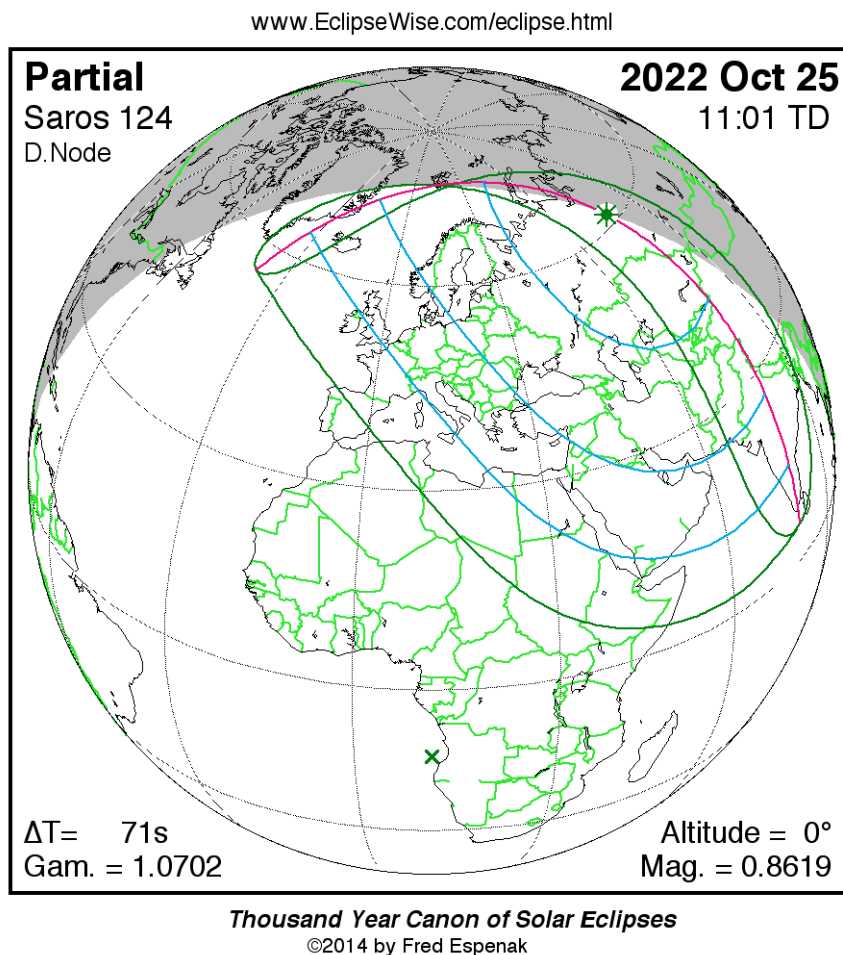


Рис.2. Схема руху часткового СЗ 25 жовтня 2022р.

Затемнення почалося в Ісландії о 08:58 ($66^\circ 28'N$, $18^\circ 57'E$) і закінчилося в Аравійському морі о 13:02 ($17^\circ 35'N$, $66^\circ 31'E$).

В Україні він розпочався після 12:00 UTC+3 і на більшій частині її території завершився до 15:00. У момент фази максимуму Сонце перебувало на висоті 25° над горизонтом (м. Чернігів) до 31° (південь Одеської області).

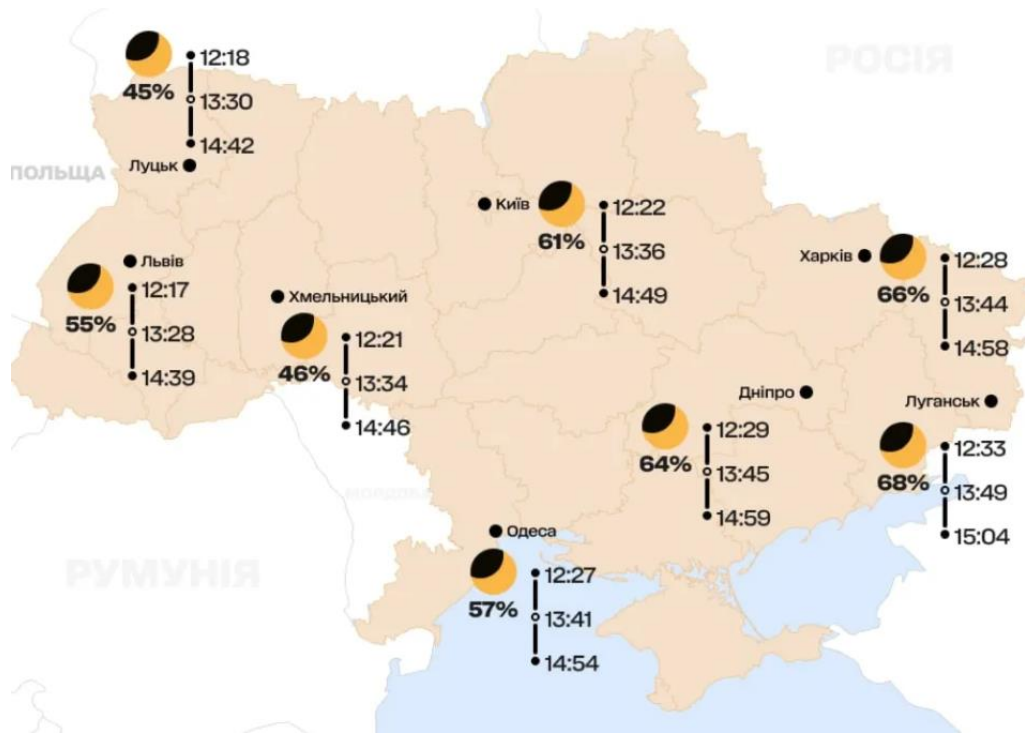


Рис.3. Карта СЗ 25 жовтня 2022 року в Україні з фазою затемнення

Залежно від того, наскільки Місяць закриває СЗ, СЗ можна розділити на повне, часткове і кільцеве. У першому випадку на СЗ є точка, яка повністю перекриває Сонце, у другому – такої точки немає. У кільцевих СЗ диск Місяця не може повністю перекрити диск Сонця через малий відносний діаметр (кутову величину, що змінюється). Такі затемнення відбуваються 2 – 5 разів на рік.

Маючи коротке описання основних оптичних характеристик СЗ, можна вже давати початкову характеристику затемнення, яке було 25 жовтня 2022 року. Воно не було ні повним, ні кільцевим: у всій зоні видимості воно виглядало як часткове. Незважаючи на це, його можна було побачити з фазами більше 50%, що було найбільшим показником за останні роки.

21 та 22 жовтня 2022 р. концентрація частинок n_{sw} сонячного вітру, флюктууючи, збільшувалася від $5 \cdot 10^6$ до $22.4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Після 17:00 UT 22 жовтня 2022 р. n_{sw} різко зменшувалась. З 24 до 26 жовтня 2022 р. мало місце зростання n_{sw} від $4 \cdot 10^6$ до $16 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, а потім знову його зменшення. У день СЗ $n_{sw} \approx (4...5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

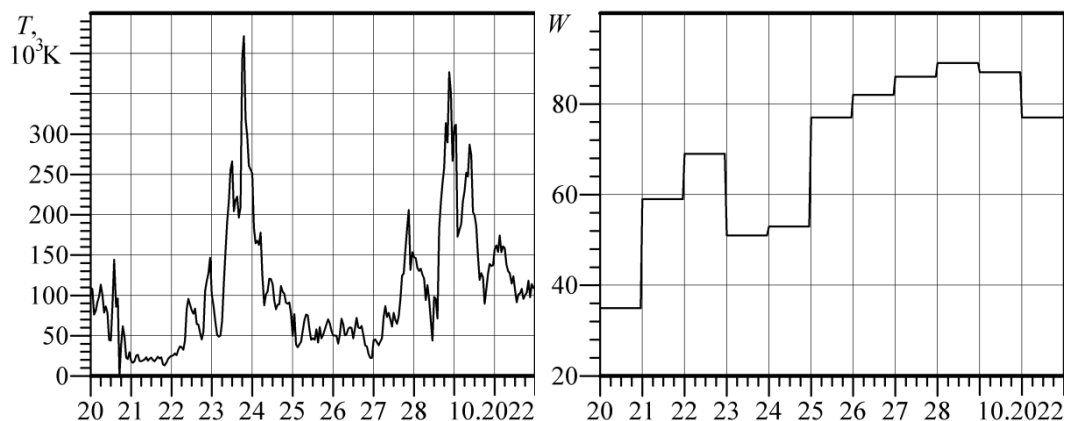
Швидкість v_{sw} частинок сонячного вітру 21 та 22 жовтня 2022 р. варіювала у межах 350...400 км/с. 23 та 24 жовтня 2022 р. вона зростала до 550...560 км/с. Потім v_{sw} спадала приблизно до 350 км/с.

Сплески тиску p_{sw} частинок сонячного вітру до 5 нПа спостерігалися 22 жовтня 2022 р. та до 5.3 нПа 23 жовтня 2022 р. У день затемнення $p_{sw} \approx 1$ нПа.

Температура T_{sw} частинок сонячного вітру різко зростала до $2 \cdot 10^5$ К приблизно о 23:00 22 жовтня 2022 р. та до $3.5 \cdot 10^5$ К 23 жовтня 2022 р. Після цього вона спадала до $(0.5...1) \cdot 10^5$ К 24–26 жовтня 2022 р. У день СЗ $T_{sw} \approx 0.5 \cdot 10^5$ К.

Значення рівня B_z -компоненту міжпланетного магнітного поля зменшувалися до -10.2 нТл 23 жовтня 2022 р. Додатні значення B_z не перевищували 6.9 нТл. 25 жовтня 2022 р. значення B_z -компоненту флуктуювали у межах $\pm(1...2)$ нТл.

Стан космічної погоди можна спостерігати на графіках нижче (рис. 4).



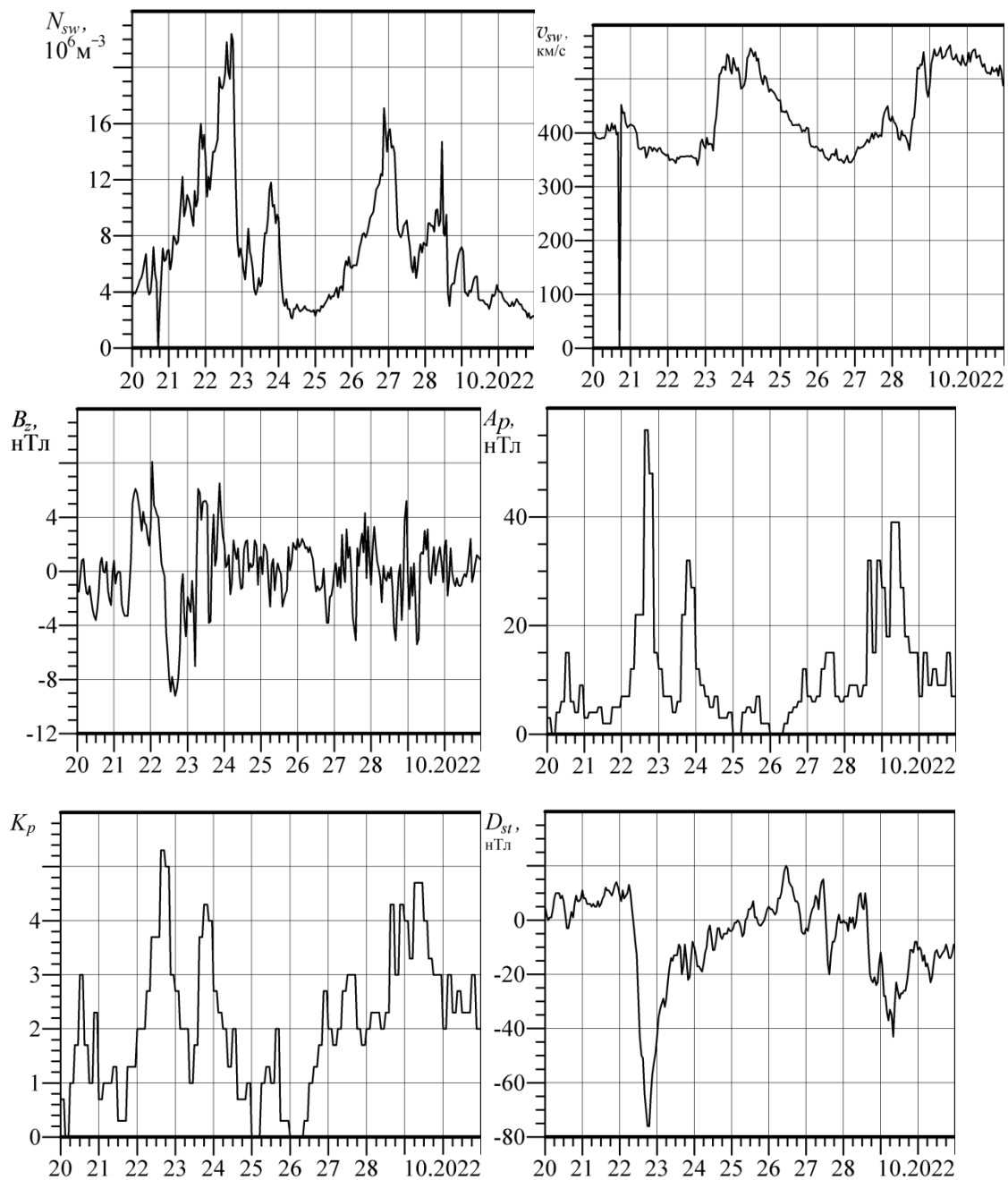


Рис. 4. Часова залежність параметрів космічної погоди з 20 жовтня по 30 жовтня 2022 р.

Аналіз параметрів міжпланетного магнітного поля та сонячного вітру свідчить про те, що умови космічної погоди 20 – 30 жовтня 2022 року були сприятливими для вивчення ефектів СЗ.

Результат оцінки ПЕВ залежить від руху точки вимірювання в F_2 -шарі іоносфери, руху місячної тіні та обертання Землі навколо своєї вісі. Кожен

промінь супутник-приймач характеризується такими характеристиками: ПЕВ, азимут, кут місця та координатою підіоносферної точки.

1.3. Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень

Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень, як і було згадано, включають зниження іонізації, зміни у поширенні радіохвиль, зниження температури іоносфери та вплив на радіокомунікації. Ці ефекти є наслідком зменшення сонячного випромінювання, яке досягає атмосфери Землі, коли Місяць закриває Сонце.

Таблиця 1. Іоносферні ефекти під час затемнення 25 жовтня 2022 року

Зменшення щільності електронів	У регіонах, де затемнення було видиме, було зафіксовано зниження щільності електронів у верхніх шарах іоносфери (особливо в F -шарі). Це відбулося через зменшення ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, яке створює іони в іоносфері
Зміна радіохвильового поширення	Було відзначено тимчасові зміни у поширенні радіохвиль середніх та коротких хвиль. Це вплинуло на радіозв'язок, особливо на частотах, які залежать від іоносферного відбиття (від 3 до 30 МГц). У деяких місцях могли виникнути короточасні збої у зв'язку
Зміни критичної частоти F -шару	Зміни критичної частоти F -шару: У період затемнення критична частота шару F знизилася, що також вплинуло на умови поширення радіосигналів. Це спостерігалось як зменшення діапазону частот, на яких іоносфера могла відбивати радіохвилі

Відновлення після затемнення	Після завершення затемнення іонізація і температура іоносфери поступово відновлювалися, що супроводжувалося поверненням до звичайного режиму поширення радіохвиль
---------------------------------	---

Для вивчення впливу СЗ на іоносферу використовуються дані вимірювань сигналів навігаційних супутників, отримані на близьких до місячної тіні станціях. Технології з використанням Глобальної навігаційної супутникової системи давно й успішно використовуються для діагностики іоносферних процесів.

Огляд варіацій ПЕВ під час сонячних затемнень включає аналіз декількох конкретних випадків, коли спостереження показали значні зміни в іоносфері.

Розглянемо два приклади досліджень попередніх сонячних затемнень:

1) СЗ 21 Серпня 2017 року у США

Це було повне СЗ, під час якого спостерігалось різке зниження ПЕВ в діапазоні від 30% до 50%, в зоні повного затемнення. Найбільше зниження було зафіксовано в шарі F_2 .

2) СЗ 11 серпня 1999 року у Європі

В ході досліджень виявили зниження ПЕВ на 20 – 40% в регіонах, де спостерігалось повне затемнення. Зменшення кількості електронів в іоносфері було спричинене зниженням рівня ультрафіолетового випромінювання від Сонця.

Залежно від розподілу за висотою концентрації заряджених частинок N іоносферу поділяють області D , E і F :

- Область слабкої іонізації – D обмежується висотою приблизно 90 км, та концентрацією $N_{max} \sim 10^2 - 10^3 \text{ см}^{-3}$.

- Область E (до 120 км) характеризується щільністю плазми $N_{max} \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$, а у F ділянці $N \sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$.

- Область F поділяється на 2 межі: F_1 (до 200 км), F_2 (до 400 км).

Науковці в різних країнах використовували це затемнення як можливість для досліджень впливу затемнень на іоносферу. Зокрема, спостереження за іоносферними змінами проводили за допомогою GPS-технологій, радіозондування та інших інструментів, що дозволяють аналізувати іонізаційні процеси.

1.4. Результати досліджень іноземних фахівців

Дослідження іоносферних ефектів сонячних затемнень проводилися багатьма науковцями по всьому світу, оскільки затемнення має вплив на властивості верхніх шарів атмосфери, особливо на іоносферу, де радіохвилі зазнають змін через взаємодію з зарядженими частинками.

Під час сонячного затемнення спостерігається значне зниження температури в іоносфері та зменшення концентрації електронів у шарі F . Це пов'язано з тим, що сонячне випромінювання, яке підтримує іонізацію, тимчасово припиняється в зоні тіні. Багато досліджень показують, що під час затемнення відбуваються суттєві зміни в умовах поширення радіохвиль, особливо на низьких та середніх частотах. Це можна пояснити зменшенням концентрації іонів та електронів, що призводить до змін рефракційних умов для радіохвиль. Використання даних з GPS-систем та інших супутників дозволило науковцям відстежувати зміни у структурі іоносфери з великою точністю.

Вплив затемнення на іоносферу може відрізнятись залежно від географічного положення. Наприклад, у полярних широтах ефект затемнення на іоносферу може бути менш вираженим через вже наявні магнітні аномалії, в той час як в екваторіальних регіонах, де іоносфера є особливо активною, зміни можуть бути більш суттєвими. В Європі 1999 року, науковці зафіксували суттєві зміни в іоносфері, зокрема зменшення електронної щільності на 20 – 30% у шарі F . А 2017 року в США, використовуючи дані GPS та радіолокаційні

вимірювання, дослідники відзначили значне зниження ПЕВ, а також аномалії в поширенні радіохвиль на середніх частотах.

1.5. Результати досліджень українських фахівців

Сонячне затемнення 25 жовтня 2022 року привернуло увагу багатьох українських науковців, але особливий внесок зробив професор Л. Ф. Черногор, завідувач кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. В його роботі наведено загальні відомості про затемнення: їхню природу, вплив, структуру та різновиди. Окремо розглядаються умови космічної погоди та фактори, що сприяють спостереженню ефектів затемнень. Значним досягненням є також використання інструментів та методів для дослідження впливу затемнень на іоносферу за допомогою даних, отриманих від навігаційних супутників.

Наразі, можна виділити такі важливі отримані параметри:

– Максимальне зниження ПЕВ у високих широтах було зафіксовано на 18...33 хвилини після досягнення максимальної фази затемнення і затримувалося в середньому на 23 ± 6.6 хв.

– Концентрація частинок у сонячному вітрі флукутувала в межах $(2...17) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

– Швидкість й температура змінювалися відповідно в межах 350...550 км/с і $(2.5...20) \cdot 10^4 \text{ К}$

– Максимальне зменшення ПЕВ складало 1.6...4.1 TECU.

– В середньому тривалість реакції іоносфери на СЗ становила 145 ± 11 хвилин, що перевищувало тривалість сонячного затемнення.

1.6. Висновки до розділу 1

Кожне сонячне затемнення запускає низку фізичних і хімічних процесів в іоносфері. Особливо важливо вивчити вплив на *F*-шар іоносфери. Отримані результати є наступними:

- СЗ спричиняє охолодження атмосфери та іоносфери, зменшуючи концентрацію *N* електронів в іоносфері;
- СЗ 25 жовтня 2022 року вважається частковим;
- СЗ включає блокування сонячної радіації;
- Максимальне зниження ПЕВ у високих широтах було зафіксовано на 18...33 хвилини після досягнення максимальної фази затемнення, і загальний час впливу затемнення на іоносферу складав в середньому 145 хвилин, що перевищувало тривалість самого затемнення.
- СЗ 25 жовтня 2022 року мало значний вплив на іоносферу, зокрема на її *F*-шар.
- СЗ активізує потоки плазми і фотоелектронів, викликаючи міграційні процеси з однієї півкулі в іншу, посилення горизонтальних вітрів, спрямованих у бік більш холодних частин атмосфери, порушення іоносферної провідності, електричних полів і струмів, порушення ефекту, що призводить до нестабільності ПЕВ в іоносферній плазмі.

Всі ці висновки відносяться до часткового сонячного затемнення, що стався 25 жовтня 2022 року.

2. Засоби та методи

2.1. Глобальна система навігаційних супутників

З розвитком технологій для дослідження іоносфери використовували різні методи, такі як томографія, фотографія, радіозондування тощо. Кожен із цих методів має свої переваги для певних цілей. Однак нині найбільш зручним методом для визначення повного електронного вмісту (ПЕВ) є використання даних глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

До таких систем належать GPS, ГЛОНАСС, Galileo тощо, і всі вони використовують супутникові мережі, що включають супутники, наземні станції та приймачі. Іоносферні зміни можуть впливати на сигнали цих систем, що призводить до їх варіацій і знижує точність роботи навігаційних систем.

У даній роботі використовуються дані з GPS – системи глобального позиціонування, яка забезпечує точну інформацію про місцезнаходження і час в будь-якій точці Землі або поблизу неї. Ця система включає 32 супутника, що обертаються на високих орбітах. Кожен супутник передає сигнали, які приймає наземний приймач. Дані сигналів дозволяють приймачам визначати своє місцезнаходження, а наземні станції відстежують і коригують положення та час супутників. Хоча основна мета GPS полягає у наданні послуг навігації, геодезисти, радіофізики і фізики використовують ці системи для проведення досліджень іоносфери.

Активніше застосовуються дані з ГНСС, таких як GPS та ГЛОНАСС, для визначення ПЕВ в іоносфері Землі. Для обробки використовуються файли у форматі RINEX, які оптимізовані для зменшення обсягу збережених даних незалежно від кількості спостережень, проведених певним приймачем. Формат кожного файлу містить допоміжну інформацію що розташовується на початку файлу.

Для виявлення реакції іоносфери вимірюється похилий ПЕВ вздовж променя супутник-приймач. Реєстрація сигналів від супутників здійснюється

двочастотними приймачами. Несучі частоти радіоканалів становлять $f_1 = 1.575$ ГГц и $f_2 = 1.227$ ГГц. Для визначення псевдодальності вимірюють час поширення кодованого сигналу, або набіг фази несучої радіохвилі на трасі GPS супутник – приймач.

Основною систематичною похибкою при оцінці ПЕВ за допомогою приймача є зміщення часу між двома вимірами псевдодальностей GPS на різних частотах. Для корекції цієї похибки в псевдодальностях, отриманих за кодом, використовують поправки DCB (Differential Code Biases). За допомогою кодових псевдодальностей розраховується фазова поправка для уточнення псевдодальностей, визначених за фазою. В результаті, похибка у вимірюванні ПЕВ не перевищує 0.1 TECU.

Під час обробки сигналів для визначення реакції іоносфери на СЗ вимірюється похилий ПЕВ. У спрощеній моделі вся іоносфера розглядається як сферичний шар нульової товщини, що знаходиться на висоті від 350 до 450 км. Вважається, що ПЕВ, виміряне вздовж траєкторії сигналу, формується в одній точці, де цей сигнал перетинає сферичний шар. Цю точку назвемо іоносферною точкою.

Для виявлення реакції іоносфери на часткове СЗ 25 жовтня 2022 року, використовувалися такі станції, що наведено в табл. 2:

Таблиця 2. Список використаних станцій спостереження за навігаційними супутниками

№	Станція	Широта	Довгота	Місцезнаходження
1	POLV	49°603'пн.ш.	34°543'сх.д.	Полтава, Україна
2	KIR0	67°858'пн.ш.	20°966'сх.д.	Кіруна, Швеція

Для відображення точок вимірювання ПЕВ для кожного супутника на контурній мапі наносилися траєкторії під іоносферних точок. Кожен проліт супутника розпочинався з назви супутника та часу початку радіовидимості або початку розрахункового періоду. Вздовж прольоту супутника наносилася шкала часу з кроком 10 хв і 1 год. Похибка оцінки ПЕВ зазвичай не перевищує 0.1 TECU.

2.2. Методи аналізу даних вимірювань

Для отримання даних про вплив СЗ використовувалися дані вимірювань сигналів навігаційних супутників, отримані на станціях, розташованих поблизу місячного сліду (тіні) з максимальною фазою затемнення. Траєкторію руху місячної тіні над земною поверхнею наведена на (рис. 5).

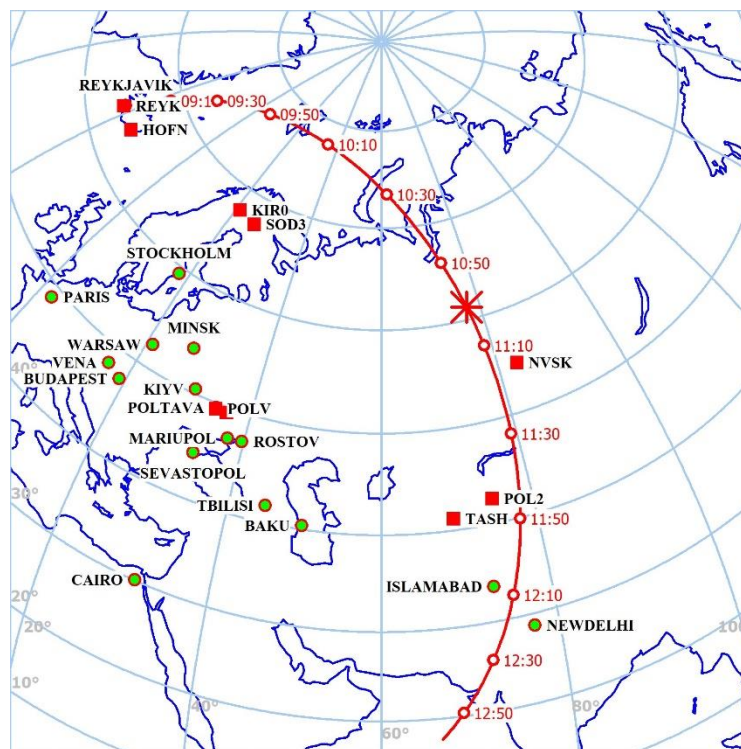


Рис. 5. Контурна мапа траєкторії руху місячної тіні

Для вивчення впливу СЗ на іоносферу було використано дані вимірювань сигналів навігаційних супутників, отримані на близьких до місячної тіні станціях.

Для аналізу СЗ використовуються: слід місячної тіні, фаза затемнення M (eclipse magnitude – частка діаметра Сонця, яка закрита Місяцем), A (eclipse obscuration – частка площі Сонця, покритої диском Місяця), відносна освітленість E та відносна освітленість з урахуванням СЗ

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

$$E = \cos\chi,$$

де χ – зенітний кут падіння сонячного випромінювання на F_2 - шар іоносфери.

Величина ПЕВ залежить від отримуваної сонячної енергії та відносної площі покриття диска Сонця Місяцем при затемненні A . Визначимо ПЕВ по псевдодальності по коду (P) та фазі (F) з урахуванням похибки:

$$P_{1,2} = \rho + c \cdot \Delta t + I_{1,2} + T + d_{1,2}^T + d_{1,2}^R,$$

$$F_{1,2} = \rho + c \cdot \Delta t - I_{1,2} + T + \alpha_{1,2},$$

де

c – швидкість світла $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с;

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

I – іоносферна затримка, м;

T – тропосферна затримка, м;

ρ – справжня дальність, м;

d_P^T – поправка по коду для передатчика, м;

d_P^R – поправка по коду для приймача, м;

α – фазова невизначеність, постійна, м;

Кінцева формула для ПЕВ набуває такий вигляд

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

де

$\overline{\Delta\alpha}$ – середня розрахована фазова невизначеність, м;

ψ – кут між напрямками супутник – приймач та нормаллю до F_2 – шару іоносфери в точці вимірювання ПЕВ, рад;

L1 та L2 – псевдодальності по фазі, цикли.

Аналізу підлягають виміряне ПЕВ (N_V), очікуване значення ПЕВ (N_{V0}), яке було б за відсутності сонячного затемнення.

Визначимо дефіцит ПЕВ таким чином

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

Тоді відносне значення дефіциту ПЕВ складе

$$\delta_V = \frac{\Delta N_V}{N_{V0}}.$$

2.3. Висновки до розділу 2

Використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), зокрема GPS, дозволяє ефективно досліджувати повний електронний вміст (ПЕВ) іоносфери під час сонячного затемнення. Система GPS забезпечує високу точність вимірювань ПЕВ завдяки двочастотним приймачам, що дозволяють коригувати систематичні похибки за допомогою диференціальних кодових поправок (DCB). Для розрахунку ПЕВ та положення супутника на орбіті використовуються реєстрації у форматі даних RINEX.

Метод передбачає вимірювання похилого ПЕВ вздовж траєкторії супутник-приймач, розглядаючи іоносферу як сферу на висоті 350 – 450 км. Точність ПЕВ не перевищує 0.1 TECU, що забезпечує надійність результатів. Вплив сонячного затемнення на ПЕВ пов'язаний зі змінами сонячної енергії та ступенем покриття сонячного диска Місяцем.

Це дослідження показує, що фаза затемнення впливає на ПЕВ в іоносфері та що стан космічної погоди був сприятливим для вивчення явища затемнення.

Під час затемнення інтенсивність сонячного випромінювання зменшується, що впливає на процеси іонізації в іоносфері та знижує ПЕВ. Ступінь цього зниження залежить від фази затемнення, тобто від того, наскільки сонячний диск закритий Місяцем. Чим більша фаза затемнення, то сильнішою зазвичай є зміна ПЕВ.

3. Результати досліджень

3.1. Загальна характеристика даних

Дані, які використовуються для дослідження сонячних затемнень, отримуються зі супутників, що оснащені сучасними інструментами для моніторингу сонячної активності. Ці супутники збирають інформацію про радіовипромінювання, магнітне поле та інші фізичні параметри, пов'язані з Сонцем. Розглянемо дані навігаційних супутників станцій POLV(Полтава, Україна) та KIRO (Кіруна, Швеція) (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунки параметрів відклику іоносфери зі станцій під час дослідження СЗ

Станція	Супутник	N	N_{V0}	ΔN	Δt	M
POLV	G04	22.5	17.0	-5.5	15	0.749
POLV	G07	23.1	18.2	-4.9	17	0.63
POLV	G09	22.3	17.5	-4.8	19	0.7
POLV	G26	17.9	15.4	-2.5	15	0.81
KIRO	G04	17.5	15.8	-1.7	16	0.75
KIRO	G09	18.9	15.5	-3.4	25	0.699
KIRO	G26	20.1	15.1	-2.0	19.5	0.83

N – вимірний ПЕВ, TECU

N_{V0} – очікуване значення ПЕВ, TECU

ΔN – максимальний дефіцит ПЕВ

Δt – затримка часу між максимальною фазою затемнення та максимального досягнутого дефіциту ПЕВ, хв

M – фаза затемнення (частина діаметру сонця, яка перекрита місяцем)

3.2. Результати аналізу часових варіацій

Часові залежності ПЕВ побудовано уздовж траєкторії іоносферних точок для супутників поточного угруповання щодо станції POLV та KIRO. Графіки підписані номером супутника. Криві на графіку відзначені числами 24, 25, 26 та 27, що відповідає дню місяця. 24, 26 та 27 жовтня є контрольні дні. Вони використовуються в розрахунку очікуваного ПЕВ в разі відсутності СЗ. Літерами “ M ” і “ E , E_m ” і відзначені тимчасові залежності фази затемнення та рівень освітленості в точці вимірювання ПЕВ, на висоті F_2 - шару іоносфери. a – eclipse obscuration (доля площі сонячного диску, який перекритий місяцем); E – відносна освітленість точки виміру (доля енергії, яка отримується від сонця); E_m – освітленість у присутності затемнення.

Вертикальні лінії відзначають час сходу Сонця на поверхні Землі.

Станція POLV (м. Полтава, Україна)

На рис.6 наведена контурна мапа прольотів.

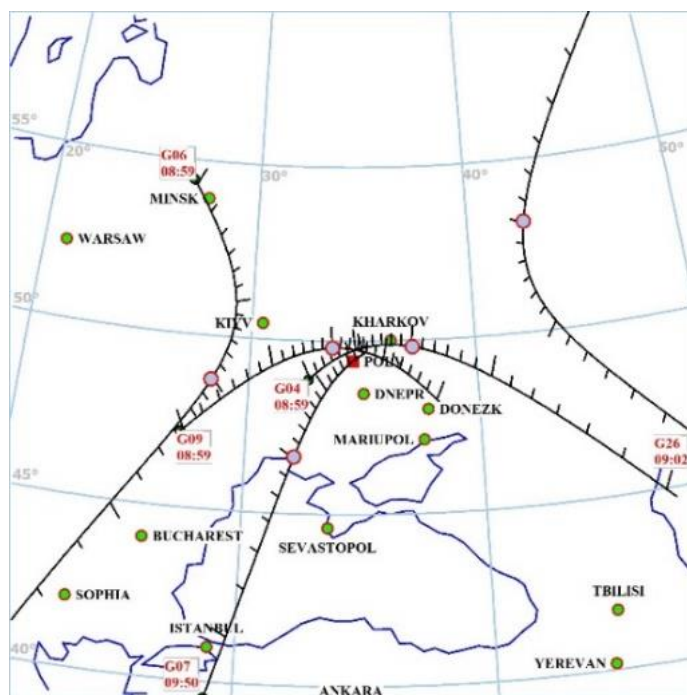


Рис. 6. Контурна мапа прольотів супутників відносно станції POLV

Станція POLV, супутник G04.

З рис. 7. Можна побачити, що після початку сонячного затемнення значення ПЕВ зменшувався від 23 до 17 TECU. З 09:30 UT до 11:00 UT іоносферна точка рухалася на північ, де потім змінила рух на південь-схід, що можна бачити по показникам зміни ПЕВ.

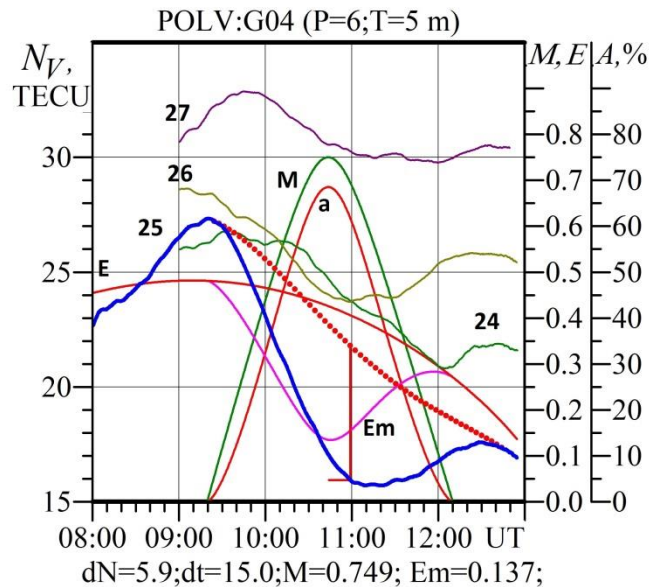


Рис. 7. Часові залежності ПЕВ для прольоту супутника G04 відносно станції POLV 25 жовтня 2022 року

На графіку фази затемнення можна побачити, що $A_{\max} \approx 68\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 160 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.75$, $t \approx 15$ хв. $N_V \approx 16$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 22$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно, $\Delta N_V = -6$ TECU. Після, приблизно, 12:10 UT показники ПЕВ певний час почали стабілізуватися. Час релаксації тривав приблизно 40 хв.

Станція POLV, супутник G07. З рис. 8. можна побачити, що після початку СЗ значення ПЕВ поступово зменшувався від 31...19 TECU.

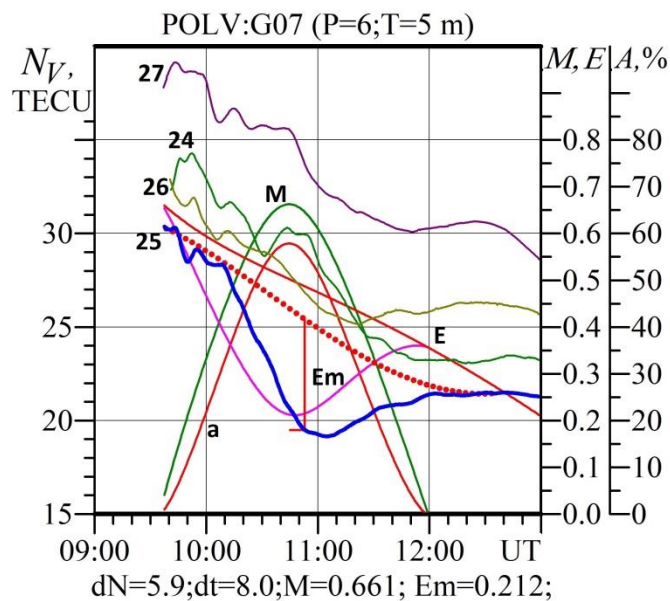


Рис. 8. Часові залежності ПЕВ супутника G07 відносно станції POLV

З 10:00 UT до 11:00 UT іоносферна точка рухалася на північ-схід, що відображається подальшим зменшенням ПЕВ. Це є наслідок нахилу Землі до площина орбіти. У той час обертання планети наближає полуденну годину, що приводить до збільшення ПЕВ. У інтервалі часу з 09:40 UT до 10:20 UT можна спостерігати конфлікт цих двох процесів у вигляді коливань ПЕВ, де обертання планети на захід збільшує ПЕВ в точці вимірювання, і навпаки іоносферна точка, рухаючись на північ, намагається зменшити показник ПЕВ. На графіку фази затемнення видно, що $A_{max} \approx 57\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 141 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.66$, $t = 8$ хв. $N_V \approx 19$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 25$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно складає $\Delta N_V = 19 - 25 = -6$ TECU. Після активної фази затемнення $M > 0$ у 12:00 UT значення ПЕВ відновлювалося протягом певного часу, та цей час релаксації був приблизно 30 хвилин. Цей час, напевно, залежить від стану F_2 слою на певній висоті.

Станція POLV, супутник G09. З рис. 9 можна побачити, що після початку СЗ значення ПЕВ змінювалися від 24 до 20 TECU.

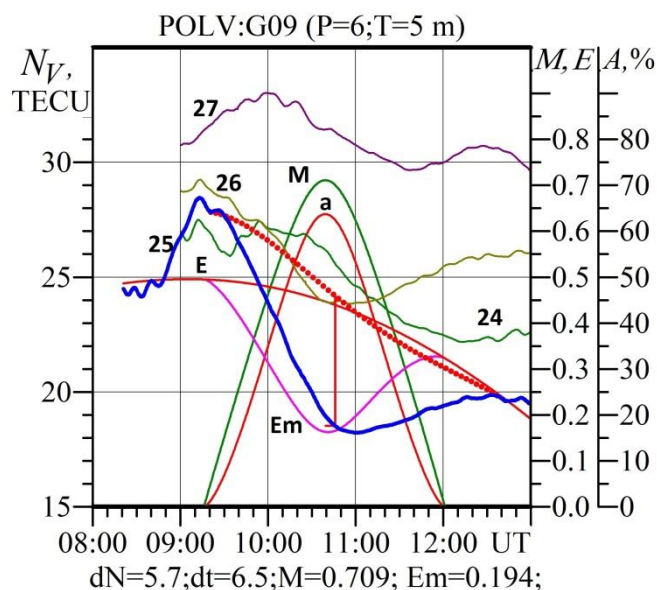


Рис. 9. Часові залежності ПЕВ супутника G09 відносно станції POLV

Можна спостерігати, що з 09:00 UT до 11:20 UT точка зміни рухалася на північ-схід, де спостерігається зменшення показників ПЕВ, але змінивши напрям, значення почали стабілізуватися. На графіку фази затемнення можна побачити, що $A_{\max} \approx 65\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 160 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.71$, $t = 6.5$ хв. $N_V \approx 18$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 24$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно дорівнюється $\Delta N_V = -6$ TECU. Час релаксації тривав приблизно 30 хвилин.

Станція POLV, супутник G26. З рис. 10 можна побачити, що після початку СЗ значення ПЕВ змінювалися від 25 до 15 TECU.

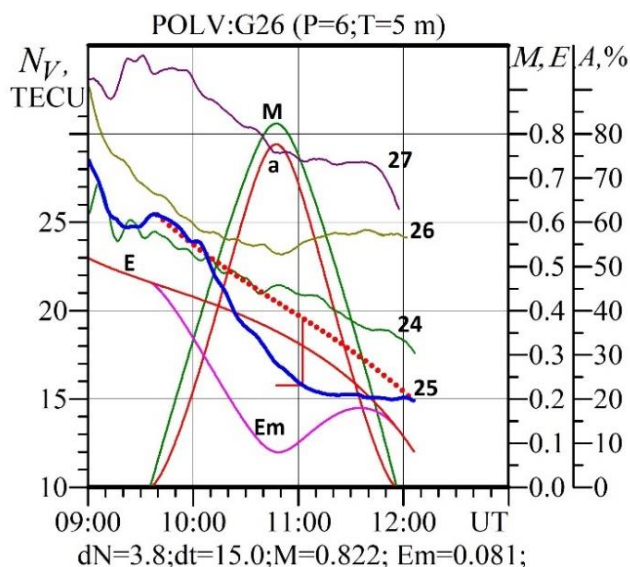


Рис. 10. Часові залежності ПЕВ супутника G26 відносно станції POLV

Можна спостерігати, що з 09:00 UT до 11:00 UT точка зміни рухалася на північ-захід, де спостерігається стрімке зменшення показників ПЕВ, але змінивши напрям на північ, значення перестали зменшуватися, але не почали повертати свої значення. $A_{\max} = 78\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 130 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.82$, $t = 15$ хв. $N_V \approx 16$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 20$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно, $\Delta N_V = 16 - 20 = -4$ TECU. У зв'язку з тим, що супутник мав іншу траєкторію прольоту, то були потрібні його дані з 09:00, коли супутник знаходився ближче за все до широти станції та інших супутників. Час релаксації під час СЗ тривав, приблизно, 20 хвилин.

Станція KIR0 (м. Кіруна, Швеція)

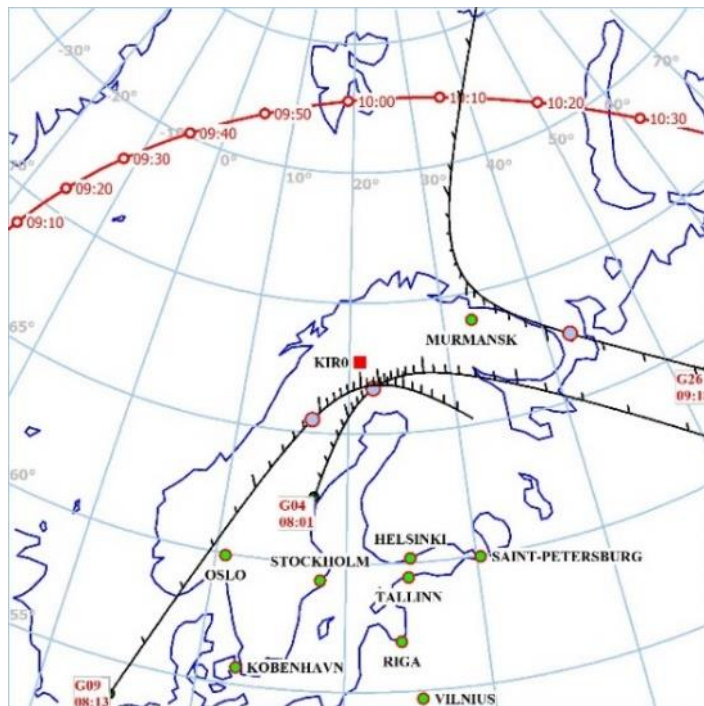


Рис. 11. Мапа прольотів супутників відносно станції KIR0

Станція KIR0, супутник G04. З рис. 12 можна побачити, що після початку СЗ значення ПЕВ змінювалися від 19 до 13 TECU.

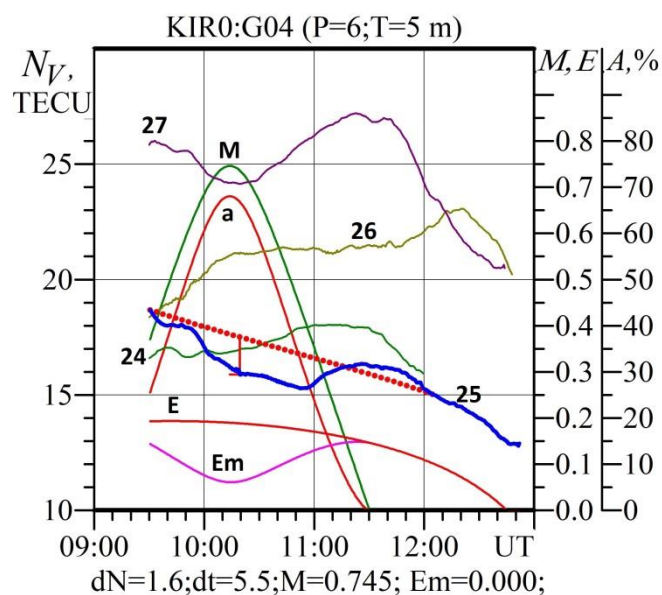


Рис. 12. Часові залежності ПЕВ вздовж прольоту супутника G04 відносно станції KIR0 для 25 жовтня 2022 року.

Можна спостерігати, що з 08:00 UT точка зміни рухалася на північ, а змінивши напрям на схід з напрямком руху місячної тіні, приблизно, з 09:30 UT

значення ПЕВ почали зменшуватися. На графіку фази затемнення можна побачити, що $A_{\max} \approx 76\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 130 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.75$, $t = 5.5$ хв. $N_V \approx 16$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 18$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно, $\Delta N_V = -2$ TECU. По даним графікам час релаксації становив, приблизно, 20 хв.

Станція KIR0, супутник G09. З рис. 13 можна побачити, що після початку СЗ значення ПЕВ змінювалися від 19 до 16 TECU.

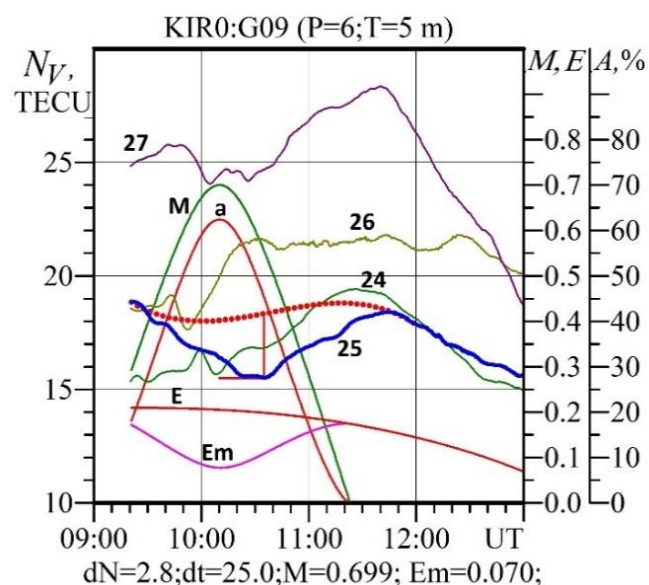


Рис. 13. Часові залежності ПЕВ для прольоту супутника G09 відносно станції KIR0. 25 жовтня 2022 року.

Можна спостерігати, що з 08:13 UT точка зміни рухалася на північ з нахилом до сходу, а з 09:20 UT до 10:40 UT, змінивши напрям на схід, то показник ПЕВ почав змінюватися. На графіку фази затемнення можна побачити, що $A_{\max} \approx 75\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 120 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.7$, $t = 25$ хв. $N_V \approx 16$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 19$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно,

$\Delta N_V = -3$ TECU Час релаксації становить 60 хв, що показує складність стабілізації параметрів ПЕВ.

Станція KIRO, супутник G26. З рис. 14 можна побачити, що після початку СЗ значення ПЕВ змінювалися від 21 до 8 TECU.

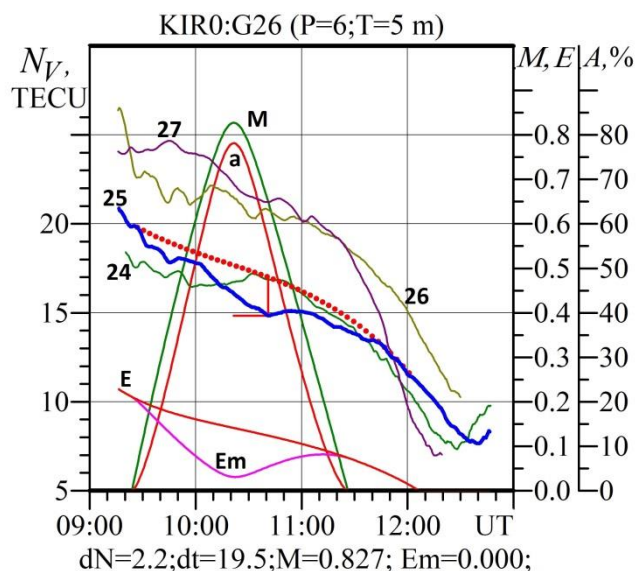


Рис. 14. Часові залежності ПЕВ для супутника G26 відносно станції KIRO

Так як рух точки зміни параметрів ПЕВ о 09:30 UT рухався на північ та приблизившись до траєкторії руху місячної тіні (10:30 UT), то показники ПЕВ підверглися різкому зменшенню. На графіку фази затемнення можна побачити, що $A_{\max} \approx 79\%$. СЗ у зоні дослідження супутника тривало приблизно 115 хв. Час затримки відклику іоносфери, час виникнення максимального дефіциту ПЕВ, відносно максимуму фази затемнення $M \approx 0.83$, $t = 19.5$ хв. $N_V \approx 15$ TECU та очікуване значення ПЕВ $N_{V0} \approx 17$ TECU. Дефіцит ПЕВ, відповідно, $\Delta N_V = -2$ TECU. По даним графікам час релаксації почався о 12:30 UT та становив, приблизно, 10 хв.

3.3. Обговорення отриманих результатів

У цьому дослідженні дані станцій GPS і супутників використовувалися для аналізу часових змін ПЕВ в іоносфері в період 24 – 27 жовтня 2022 року. Космічна погода цього дня була сприятливою для проведення дослідження. Дані аналізували з різних супутників на станціях POLV і KIR0. Дослідження показали, що рух місячної тіні на схід ускладнює процес затемнення і що повне затемнення відбувається тільки за межами Землі.

Часові залежності ПЕВ у контрольні дні дозволяють побудувати очікувану поведінку ПЕВ у припущенні відсутності затемнення та розрахувати дефіцит ПЕВ.

По результатам дослідження можна зробити ряд висновків:

- Дефіцит ПЕВ був менший з даних супутників, що рухалися ближче до руху місячної тіні (станція KIR0)
- Максимальний дефіцит ПЕВ спостерігався під час активної фази сонячного затемнення, з поступовим відновленням після нього.
- Час затримки іоносферного відгуку варіювався в межах 5.5–25 хв, що залежить від супутника та станції.
- Час релаксації іоносфери після активної фази затемнення тривав від 10 до 60 хв, залежно від географічного положення та параметрів F_2 шару.

3.4. Висновки до розділу 3

25 жовтня 2022 року відбулося часткове сонячне затемнення, яке спостерігали в умовах сприятливої космічної погоди. Для моніторингу та аналізу цього явища були задіяні численні наземні станції, зокрема, POLV та KIR0 . Крім того, збір даних підтримувався за допомогою різних супутників, що дозволило отримати детальні й різносторонні результати. Дані, отримані з кожної станції, були оброблені та представлені в таблицях, які містять відповідні вимірювання та висновки щодо умов спостереження й характеристик затемнення.

Отримали часові залежності ПЕВ, що були побудовані уздовж траєкторії іоносферних точок для супутників поточного угруповання щодо станції POLV та KIRO.

Завдяки супутникам станцій, з яких були отримані параметри відклику іоносфери, можна зробити висновок, що максимальний дефіцит ПЕВ перевищував очікувані значення та максимальний дефіцит ПЕВ був у діапазоні 1.7 – 5.5 TECU.

Висновки

Аналіз даних про часткове сонячне затемнення 25 жовтня 2022 року дозволив дослідити складні фізико-хімічні процеси, які затемнення запускає в іоносфері. Зокрема, встановлено, що затемнення спричиняє охолодження іоносфери, зменшення концентрації N-електронів та блокування сонячної радіації, що значно впливає на *F*-шар. Максимальні зміни повного електронного вмісту (ПЕВ) зафіксовані через 18 – 33 хвилини після початку затемнення, із загальним часом впливу на іоносферу, що перевищував саму тривалість затемнення, і становив близько 145 хвилин.

Дослідження, проведене за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), таких як GPS, підтвердило надійність вимірювань ПЕВ, що досягалася завдяки точному коригуванню даних та зменшенню похибок, зокрема завдяки використанню формату RINEX. Під час затемнення було зафіксовано значне падіння ПЕВ, що показало високу кореляцію з параметрами космічної погоди.

Отримані результати дозволили зробити висновок, що часткове сонячне затемнення 25 жовтня 2022 року справило помітний вплив на іоносферу, зокрема на ПЕВ у високих широтах. Спостереження з використанням станцій, таких як POLV та KIRO, продемонстрували дефіцит ПЕВ у діапазоні 1.7 – 5.5 TECU, що

перевищувало очікувані значення. Ці результати підтверджують, що сонячні затемнення можуть викликати значні зміни в іоносфері, впливаючи на електричні поля, струми, потоки плазми і провідність, що має важливе значення для подальших досліджень у сфері космічної погоди та навігаційних технологій.

Список використаної літератури

1. L. F. Chernogor, * and Yu. B. Mylovanov ISSN 0884-5913, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2023, Vol. 39, No. 4, pp. 181–203. © Allerton Press, Inc., 2023. Global Variations of the Total Electron Content in the Equatorial Ionosphere during the Annular Solar Eclipse of June 21, 2020
2. L. F. Chernogor, and Yu. B. Mylovanov ISSN 0884-5913, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2023, Vol. 39, No. 4, pp. 181–203. © Allerton Press, Inc., 2023. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм.
3. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., Edemskiy I. K., Gavrilyuk N. S., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. J. Space Weather Space Clim. 2013;3(A27):1–19. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
4. ЧОРНОГОР Л. Ф. Фізичні ефекти сонячних затемнень у атмосфері та геокосмосі: Монографія. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. – 386 с.123
5. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Луо У. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. 27, № 2. С. 93—109.123
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. Черногор 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
8. Черногор Л. Ф., Милованова Л. І., Милованов Ю. Б., Цимбал А. М., Луо У. 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.
9. https://cdsis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS
10. Cheng W., Xu W., Gu X., Wang S., Wang Q., Ni B., Lu Z., Xiao B., Meng X. A Comparative Study of VLF Transmitter Signal Measurements and Simulations during Two Solar Eclipse Events. Remote Sens. 2023;15 (3025):1–14. <https://doi.org/10.3390/rs15123025>
11. Chauvenet W. Manual of Spherical and Practical Astronomy, 5-th ed. Vol.1. Philadelphia: J. B. Lippincott Co.; 1891. Reprinted 1960, New York: Dover Publications. 704 p.
12. <https://www.eclipsewise.com/solar/SEprime/20012100/SE2022Oct25Pprime.htm>
1
13. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., Chernukhov V. V., Lukhnev A. V., Zalutsky V. T. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. Geophys. Res. Lett. 1998;25(4):465–468. <https://doi.org/10.1029/98GL00186>
14. Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов Космічна фізика, Кінематика і фізика небесних тіл том39 №4 2023 Глобальні варіації повного електронного вмісту в екваторіальній іоносфері протягом кільцеподібного сонячного затемнення 21 червня 2020 р.