

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет

імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної

електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра космічної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Леонід Чорногор
Завідувач кафедри
підпис
ініціали прізвище
«14» 12 2023 року

Кваліфікаційна робота

магістра

на тему:

**«Іоносферні ефекти сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. над
Харковом»**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66

Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,

Освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»

Василенко Олександр Анатолійович

Керівник: завідувач кафедри космічної радіофізики, доктор фіз.-мат. наук,
професор Чорногор Леонід Феоктистович

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

Харків 2023

Реферат

В даній роботі було розглянуто вплив сонячного затемнення (СЗ) 25 жовтня 2022 року на іоносферу Землі. Для цього було розглянуто основні характеристики сонячного затемнення, використанні сигнали навігаційних супутників які отримані на станціях розміщених у Європі. Коротко нагадаємо основні відомості про іоносферу, та сонячне затемнення.

Скористаємося методиками вимірювань радіосигналів та методиками дослідження іоносфери за допомогою Глобальної навігаційної супутникової системи.

Abstract

In this work, the influence of the solar eclipse (SE) on October 25, 2022 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. Let's briefly recall the basic information about the ionosphere and solar eclipse.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	
1.1. Загальні відомості про сонячні затемнення.....	6
1.2. Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень.....	11
1.3. Результати досліджень іноземних фахівців.....	12
1.4. Результати досліджень українських фахівців.....	12
1.5. Висновки до розділу 1.....	14
2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ	
2.1. Глобальна система навігаційних супутників.....	15
2.2. Методи аналізу даних вимірювань.....	18
2.3. Стан космічної погоди.....	20
2.4. Висновки до розділу 2.....	24
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	
3.1. Загальна характеристика даних.....	24
3.2. Результати аналізу часових варіацій.....	25
3.3. Обговорення отриманих результатів.....	34
3.4. Висновки до розділу 3.....	34
ВИСНОВКИ	
Список використаної літератури.....	36

ВСТУП

Дослідження іоносферних ефектів сонячного затемнення залишається актуальним завданням для науковців на сьогоднішні дні. Не дивлячись на те, що історія досліджень іоносферних ефектів під впливом Сонячних затемнень (СЗ) нараховує вже більше століття [2], кожне затемнення є унікальним явищем, яке дозволяє виділити як загальні закономірності явищ іоносфери, так і їх цікаві особливості. Унікальність кожного СЗ можна одразу обґрунтувати його залежністю від сонячної активності, стану космічної погоди, сезонності, часового поясу, координат, типу затемнення, його фази тощо [1].

Сонячне затемнення - глобальний збуджуючий фактор, який змінює характеристики іоносфери. При затемненні, в іоносфері відбувається ряд цікавих явищ: зменшується концентрація електронів, температури електронів, іонів та нейтралів, суттєво змінюється динаміка іоносферної плазми [3]. Такі явища здатні порушити роботу радіосигналів і навігаційних систем.

В даній роботі проводиться аналіз часових збуджень повного електронного складу (ПЕВ) над Харковом. Для цього використовувались результати вимірів на певних радіоприймальних пунктах параметрів сигналів навігаційних супутників в області місячної тіні на різних широтах. Мета даної роботи - опрацювання результатів спостереження за часовими залежностями повного електронного вмісту (ПЕВ) в іоносфері упродовж СЗ 25 жовтня 2022 року. Виміри ПЕВ проводяться за допомогою метода аналізу сигналу навігаційних супутників, а саме метод подвійних частот GPS (Dual Frequency GPS), що використовує сигнали з двох частот GPS (L1, L2) для вимірювання затримки сигналу від іоносфери. Цей метод не єдиний, але наразі найчастіше використовується у сучасних навігаційних системах і для даного випадку є доцільним.

Дослідження впливу СЗ на іоносферу є важливою та актуальною задачею для науковців через ряд причин: по-перше, дозволяє краще зрозуміти природу атмосфери та її явищ, а також дослідити вплив сонячної активності на навколоземне середовище. По-друге, зміни у іоносфері спричиняють нестабільності при передачі радіохвиль та сигналів в системах навігації. Розуміння причин таких змін лежить саме у дослідженні впливів СЗ на навколоземне середовище. Дослідження таких змін у майбутньому може привести до вдосконалення технічного обладнання, прогнозування космічної погоди та багатьох інших досягнень науки і техніки, розширення пізнання про природу космосу та взаємодію між сонячною активністю та Землею тощо.

Дослідження стану іоносфери є складнішою задачею, на відміну від досліджень у низьких шарах атмосфери, де переважає рівноважний стан середовища, та менший вплив на нього космічної погоди. Якщо брати до уваги вже існуючі статті та дослідження по СЗ 25 жовтня 2022р., то ця робота не єдина. Вагоме дослідження даного СЗ було проведено у роботі [21], що значною мірою стало одним з основних джерел для даної роботи, але на відміну від [21], дане дослідження буде відрізнятися тим, що спостережувані дані були взяті і опрацьовані переважно з українських станцій. Це призводить до висновків щодо актуальності теми магістерської дипломної роботи «Іоносферні ефекти сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. над Харковом».

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальні відомості про сонячні затемнення

Численні спостереження СЗ, як вже згадувалося, мають певні закономірності і особливості, які вдалося встановити вченим за роки спостережень.

Так, за ступенем покриття Місяцем, СЗ можна поділити на повні, часткові та кільцеподібні. У першому випадку, на Землі існує точка, де Сонце буде повністю перекриватися, у другому випадку – такої точки не існує. При кільцеподібному СЗ, через менший відносний діаметр (кутовий розмір, що варіюється), місячний диск не може повністю екранувати сонячний диск. Такі затемнення відбуваються від 2 до 5 разів на рік.

Фаза затемнення (M , magnitude) – величина, що виражає покриту частину діаметра Сонця, і визначається відношенням їхніх діаметрів. Тривалість СЗ пов'язана із швидкістю та розміром полоси тіні. Враховуючи швидкості Місяця, обертання Землі, виду затемнення, розраховується час терміну дії цієї події. Для позначення циклічності затемнень, використовується сарос – період, тривалістю приблизно 18 календарних років, тобто затемнення мають спільні характеристики і їх легше прорахувати. Звичайно, точний час СЗ рахується більш точними методами. Додатково можна зазначити, що під час явища затемнення, температура на земній поверхні в області тіні незначно зменшується.

Відносна освітленість (E), дозволяє оцінити зміни світлового потоку, що потрапляє на земну поверхню під час затемнення. Для дослідження параметрів СЗ, також актуальна відносна освітленість (E_m) під час затемнення. В момент, коли Місяць проходить найближче до центру Землі, можна визначити мінімальну відстань осі місячної тіні від центру Землі така величина називається гамма (γ). Вона дозволяє визначити тип затемнення.

Всі отримані дані грають основну роль у розв'язанні задач із дослідження іоносфери. Розробка моделі з використанням всіх вище перелічених величин, розрахунку ПЕВ та інших характеристик іоносфери присвячено другий розділ даної роботи, що описує методи визначення параметрів плазми.

Нинішні науково-технічні досягнення дозволяють давати точні характеристики і оцінки багатьом параметрам СЗ, будувати точні теоретичні та чисельні моделі тощо. Але раніше, вчені також могли передбачати такі події. У 1824 році, німецький (пруський) вчений (математик і астроном) Фрідріх Бессель розрахував і спрогнозував метод спостереження СЗ на фундаментальній площині, що поєднує систему Земля-Місяць у єдиній системі відліку і дозволяє спроектувати слід тіні на земній поверхні без значних спотворень. В задачі оцінювання ПЕВ, він допомагає сформулювати модель затемнення, описати та виразити з геометричних та тригонометричних міркувань деякі величини (радіуси, координати та кути тіні, півтіні тощо). Метод і елементи Бесселя (L_1 , L_2) використовуються і донині, і є фундаментом для сучасної науки[14].

Маючи коротке описання основних оптичних характеристик СЗ, можна вже давати початкову характеристику затемнення, яке відбулося 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 (рис. 1)[15].

Послідовність точок на поверхні Землі, де проходить максимальна фаза затемнення M , назвемо слідом місячної тіні. Швидкість тіні Місяця становила близько 1 км/с діаметр тіні близько 100 - 150 км. Швидкість обертання Землі як відомо, варіюється від екватора до полюса.

Більшість часткових затемнень мають не дуже великі фази. Території, з яких їх видно, також, в цілому, відносно невеликі і «тяжіють» до північного

або південного полярного кола. Ще однією відмінністю затемнення 25 жовтня є те, що його зона видимості простягалася майже до екватора, що відбувається рідше. Максимальне значення фази складало $M_{\max} = 0,861$. Його спостерігали на заході сонця в точці з координатами $61,6^\circ$ північної широти і $77,4^\circ$ східної довготи[17].

Країн, де було видно затемнення, дуже багато, починаючи від Афганістану, де старт часткового затемнення був у 14:55, а кінець в 17:24, закінчуючи Аландськими островами, де початок був в 12:09, а кінець в 14:26. У тій чи іншій фазі затемнення було видно майже в усій Європі (включаючи Великобританію, Ірландію та Ісландію, але без Португалії та південного заходу Іспанії), у північно-східній Африці та Західній Азії, включаючи Індію, Непал і Шрі-Ланку.

Partial Solar Eclipse of 2022 Oct 25

Geocentric Conjunction = 10:03:36.7 UT J.D. = 2459877.919175
 Greatest Eclipse = 11:00:00.4 UT J.D. = 2459877.958338

Eclipse Magnitude = 0.8611 Gamma = 1.0700

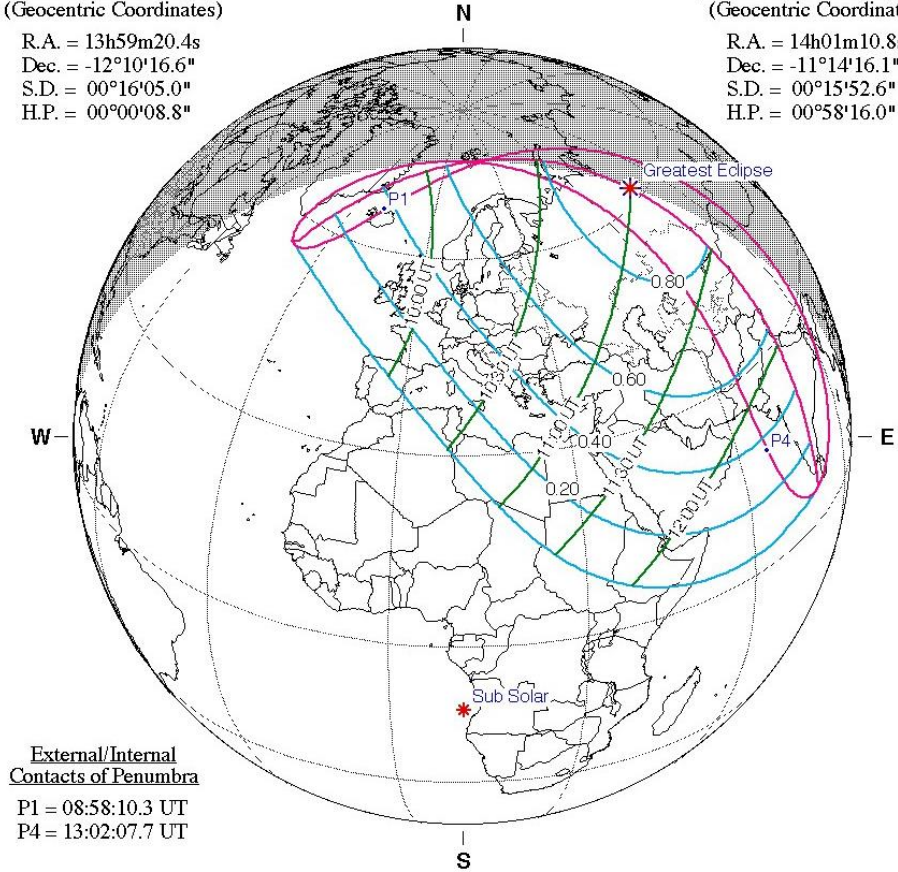
Saros Series = 124 Member = 55 of 73

Sun at Greatest Eclipse
(Geocentric Coordinates)

R.A. = 13h59m20.4s
 Dec. = -12°10'16.6"
 S.D. = 00°16'05.0"
 H.P. = 00°00'08.8"

Moon at Greatest Eclipse
(Geocentric Coordinates)

R.A. = 14h01m10.8s
 Dec. = -11°14'16.1"
 S.D. = 00°15'52.6"
 H.P. = 00°58'16.0"



External/Internal
Contacts of Penumbra

P1 = 08:58:10.3 UT
 P4 = 13:02:07.7 UT

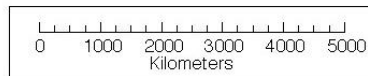
Ephemeris & Constants

Eph. = Newcomb/ILE
 $\Delta T = 79.7 \text{ s}$
 $k1 = 0.2724880$
 $k2 = 0.2722810$
 $\Delta b = 0.0'' \quad \Delta l = 0.0''$

Geocentric Libration
(Optical + Physical)

$l = -4.55^\circ$
 $b = -1.38^\circ$
 $c = 18.60^\circ$

Brown Lun. No. = 1235



F. Espenak, NASA's GSFC - Fri, Jul 2,
sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html

Рис.1. Схема руху часткового СЗ 25 жовтня 2022 р. 124 саросу. Зірочка – точка максимальної фази. Хрестик – підсонячна точка (точка зеніту на земній поверхні). Дугові лінії вказують на області, охоплені частковим затемненням.

Джерело:

NASA

(<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEplot/SEplot2001/SE2022Oct25P.GIF>)

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). Також наведено обставини затемнення 25 жовтня 2022 року для найбільших міст України (рис.2): моменти початку входження Місяця в сонячний диск (1-й контакт), максимальну фазу та кінець затемнення (4-й контакт). Київський літній час[20].

У Києві 1-й контакт був у 12:22:44, максимальна фаза в 13:36:45, максимальна фаза значення була 0,58, а 4-й контакт відбувся у 14:48:23. У Києві спостереження за затемненнями організовувалися на базі Головної астрономічної обсерваторії (ГУРТ) [16]. У Харкові 1-й контакт відбувся у 12:28:46, максимальна фаза була у 13:44:40, максимальна фаза значення 0,66, а 4-й контакт у 14:58:32.

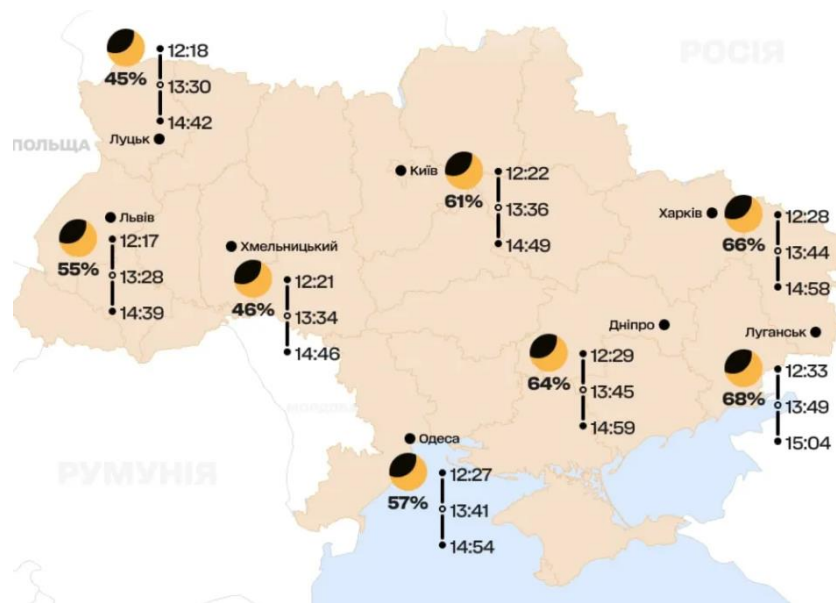


Рис. 2. Карта СЗ 25 жовтня 2022 року в Україні з фазою затемнення (%). У найбільших містах позначені моменти початку затемнення (верхні значення часу), максимальної фази (центральні позначення) і кінця (нижні значення). Джерело: meteorprog.ua

1.2. Основні іоносферні ефекти сонячних затемнень

Як вже з'ясувалося, при СЗ, змін та збурень, в цілому, зазнає вся система Земля-атмосфера-іоносфера-магнітосфера. [21] Хоча й цікаво дослідити всі можливі ефекти, процеси та явища у всій системі та їх взаємозв'язок, у даній роботі будуть розглядатися лише іоносферні ефекти, важливість дослідження яких вже була встановлена.

Іоносферний шар, що починається на висоті приблизно 60 км від земної поверхні, складає верхню частину атмосфери, що охоплює мезосферу, мезопаузу та термосферу. Із назви можна зробити часткові висновки про склад даного прошарку: він складається із суміші молекул нейтрального газу (в основному кисню і азоту) та газу у іонізованому стані, тобто квазінейтральної плазми. Іонізація відбувається за рахунок потоку сонячного випромінення.

Щільність середовища можна описати величиною концентрації заряджених частинок, або повного електронного вмісту (ПЕВ) (англ. TEC - Total Electron Content). ПЕВ вимірюється у TECU (Total Electron Content Unit). $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ ел/м}^2$. [/] Значення ПЕВ, звичайно, залежить від часу доби, сезону, сонячної активності та багатьох інших факторів. Існує численна модель international reference ionosphere (IRI), виконана за допомогою комп'ютерного моделювання, яка враховує багато параметрів та статистичне усереднення всіх процесів, що відбуваються в іоносфері.

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 $N_{max} \sim 10^2\text{—}10^3 \text{ см}^{-3}$. Область E (до 120 км) характеризується щільністю плазми $N_{max} \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$, а у F ділянці $N \sim 10^5\text{—}10^6 \text{ см}^{-3}$. Область F є найцікавішою в контексті розподілу щільності плазми (якщо подивитися на іонограму) і поділяється на 2 межі - F1(до 200 км), F2 (до 400). За відкриття шару F англійському фізику Едварду Віктору Еплтону у 1947 році було присуджено Нобелівську премію з фізики.

Під час затемнень в іоносфері відбувається реіонізація - частина іонів повертає електрони, які були втрачені під дією сонячного випромінювання, а також, через зміни у температурі середовища, може варіюватися концентрація ПЕВ іоносферного середовища. Як вже було зазначено, внаслідок таких змін, погіршуються умови розповсюдження радіохвиль, особливо у високочастотному діапазоні.

1.3. Результати досліджень іноземних фахівців

Так як дослідження впливу СЗ на іоносферні процеси відбувається вже багато років, за цей час вдалося провести достатньо велику кількість спостережень, вивести певні закономірності та визначити відмінності кожного СЗ. Не дивлячись на те, що при пошуку СЗ 25 жовтня 2022 року, досліджень у світових масштабах не було знайдено, саме даному СЗ було приділено увагу з боку українських дослідників, про що буде детально описано у наступному пункті.

Дослідження, проведені під час СЗ, продовжують надавати нові відомості і поглиблювати наше розуміння багатьох процесів у іоносфері та у Сонячній системі загалом. Саме тому, вчені всього світу детально досліджують кожне СЗ.

1.4. Результати досліджень українських фахівців

Дослідженням сонячного затемнення 25 жовтня 2022 року займалося чимало українських вчених і науковців, але один із найважливіших внесків, на мою думку, зробили співробітники кафедри космічної радіофізики з Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Наприклад, в роботі [21] були приведені загальні відомості про сонячні затемнення, що вони з себе уявляють, на що впливають, структури, різновиди тощо. Так само було

згадано про стан космічної погоди і її сприятливість для спостереження ефектів затемнення. Не менш важливим внеском було приведення засобів та методів спостереження та вивчення впливу сонячного затемнення на іоносферу, в яких було використано дані вимірювань сигналів навігаційних супутників. Не можна не згадати головні результати і висновки статті, в яких сказано наступне:

- максимальне зменшення ПЕВ складало 1.6...4.1 TECU, а його відносне зменшення становило – (0.12...0.23)

- максимальне зниження ПЕВ у високих широтах становило 18...33 хв і затримувалося в середньому на 23 ± 6.6 хв. Це значення становить $(0.51...0.93) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, що відповідає лінійному коефіцієнту рекомбінації $(0.93) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. У середньо широтній іоносфері цей коефіцієнт становив $1.85 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

- ефекти ранкового іоносферного сонячного затемнення у високих широтах достовірно спостерігалися на всіх станціях і на всіх супутниках. У середньому зменшення ПЕВ слідувало за зміною іоносферної освітленості: між 60 і 90 хвилинами ПЕВ зменшувалося, досягало мінімуму, а потім зростало, поступово наближаючись до незбурених значень.

- тривалість реакції сонячного затемнення змінювалася у межах 120...180 хв. В середньому ця тривалість становила 145 ± 11 хвилин, що перевищувало тривалість сонячного затемнення.

1.5. Висновки до розділу 1

Кожне СЗ призводить до цілої низки фізико-хімічних процесів у іоносфері. Особливо важливо дослідити вплив на F-шар іоносфери. Можна зробити висновок, що:

- 1) СЗ супроводжується блокуванням сонячного випромінювання;
- 2) це призводить до охолодження атмосфери та іоносфери, зменшення концентрації електронів N у іоносфері;
- 3) активізації ролі потоків плазми та фотоелектронів, процесів переносу з однієї півкулі в іншу, підсилення горизонтальних вітрів, спрямованих до охолодженої частини атмосфери, збурення електропровідності іоносфери, електричного поля та електричних струмів, порушення фонтан-ефекту

Все це призводить до нестабільності ПЕВ у іоносферній плазмі. Всі ці загальні висновки можна віднести і до часткового СЗ, що відбувалося 25 жовтня 2022 року. Дослідження українських вчених дослідили варіації ПЕВ у ранкові години за даними європейських дослідних станцій, а дана робота присвячена обробці даних з українських станцій.

2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

2.1. Глобальна система навігаційних супутників

По мірі розвитку технологій, використовувалися різні методи дослідження іоносфери: томографічний, фотографічний, радіозондування тощо. Кожен з цих методів є корисним для різних цілей, проте наразі для визначення ПЕВ найзручнішим є метод вимірювань глобальними навігаційними системами.

Глобальні навігаційні системи – GPS, ГЛОНАСС, Galileo тощо, є багатофункціональними, багатоцільовими, але всі вони використовують супутникові системи, які складаються з мережі супутників, наземних станцій та приймачів. Зміни в іоносфері можуть призводити до збільшення варіацій сигналів, що впливає на точність цих систем.[7]

Для даної роботи використовувалися дані з GPS - система глобального позиціонування, що надає інформацію про точне місцезнаходження, швидкість і час в будь-якому місці на Землі чи навколо неї. Вона використовує мережу зазвичай 32 супутників, які синхронізовано обертаються на високих орбітах. Кожен супутник передає сигнали, які отримуються приймачем. Зазвичай, параметри сигналу дають приймачам інформацію про їх знаходження, а контрольні пункти – наземні станції, в свою чергу відстежують роботу супутників і коригують їхнє положення та час. Це основна мета роботи GPS. Але мета геодезистів, радіофізиків і фізиків – використати ці системи з найбільшою користю для якомога більшого поля досліджень, що зараз використовується їх і для досліджень іоносфери.[26]

З середини 2000-х років розпочато активне використання сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) GPS та ГЛОНАСС для визначення ПЕМ в іоносфері Землі. Дані для обробки є файлами у форматі RINEX. Формат оптимізовано для мінімізації обсягу збереженої інформації, незалежно від кількості різних типів спостережень, що проводяться певним

приймачем, шляхом вказівки заголовку типів збережених даних спостережень. В операційних системах, що дозволяють зберігати записи змінної довжини, запису даних спостережень можуть бути скорочені наскільки це можливо. Кожен тип файлу складається з секції заголовка та секції даних. Заголовок файлу містить глобальну інформацію для всього файлу та розміщується на початку файлу. Заголовок містить текст міток заголовка в стовпці 61-80 для кожного рядка заголовка. Ці мітки обов'язкові та повинні розташовуватися точно в тій послідовності, як зазначено в опис та приклади.[5]

Для виявлення реакції іоносфери вимірюється нахилений ПЕВ вздовж променя супутник-приймач. Реєстрація сигналів від супутників здійснюється двочастотними приймачами. Несучі частоти радіоканалів становлять $f_1 = 1.57542$ ГГц и $f_2 = 1.22760$ ГГц. При обробці сигналів фіксується час поширення сигналу від супутника до приймача. Час, за який сигнал проходить відстань між супутником і приймачем. Цю відстань називають псевдодальністю.[9]

Вимірювання координат пункту прийому радіосигналів GPS супутників виходить із співвідношення:

$$D' = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} + c\tau_R + \sigma_D$$

де D' – псевдодальність між приймачем та супутником;

x_s, y_s, z_s – координати супутника;

x, y, z – координати приймача ;

c – швидкість світла;

τ_R – відхилення годинника приймача від системного часу;

σ_D – похибка вимірів.

Для визначення псевдодальності вимірюють час поширення кодованого сигналу, або набіг фази несучої радіохвилі на трасі GPS супутник - приймач. Внаслідок цього розрізняють кодові та фазові вимірювання псевдодальності:

$$Df' = \lambda \Delta\varphi + \lambda N$$

де $\lambda = c/f$ – довжина радіохвилі;

$\Delta\varphi$ - вимірювана приймачем різницю фаз між несучою радіохвилею, прийнятою від супутника і сигналом тієї ж частоти, що згенерований в самому приймачі. [18]

Повне число циклів фази у момент включення приймача (N) невідомо. Це так звана фазова неоднозначність вимірів.

$$D_{P/C}' = c\tau$$

де τ - час затримки між моментом випромінювання та моментом реєстрації кодованого радіосигналу.

Головну систематичну похибку в оцінку ПЕВ приймачем вносить зміщення часу між двома спостереженнями псевдодальностей GPS на різних частотах. Для компенсації цієї похибки, - для псевдодальностей по коду, використовують поправки DCB (Differential Code Biases). За допомогою псевдодальностей по коду рахується фазова поправка для псевдодальностей по фазі. Результативне значення ПЕС не перевищує значення 0,14 TECU. [22]

При обробці сигналів, для визначення реакції іоносфери на СЗ вимірюється похилий ПЕВ. У рамках спрощеної моделі вся іоносфера розглядалася як сферичний шар нульової товщини, розташований на фіксованій висоті від 350 км до 450 км, і вважалось, що ПЕВ, виміряне вздовж променя, формується в одній точці, точці перетину цим променем сферичного шару. Ця точка має назву точка виміру або іоносферна точка (Ionosphere Pierce Point, IPP).

Проекція іоносферної точки на поверхню Землі визначає підіоносферну точку. Географічні координати іоносферної та підіоносферної точок збігаються. По мірі руху супутників, при вимірі іоносферної точки створюються траєкторії, назвемо їх прольоти. [25]

Для виявлення реакції іоносфери на часткове СЗ 25 жовтня 2022 року в Україні (в основному), використовувалися такі станції: (табл.1)

№	Станція	Широта	Довгота	Місцезнаходження	Відстань до Харкова
1	MIKL	46°78' пн. ш.	31°07' сх. д.	Миколаїв	458,48 км
2	ZECK	43°79' пн. ш.	41°57' сх. д.	Карачаєво-Черкесія	801,58 км
3	POLV	49°603' пн. ш.	34°543' сх. д.	Полтава	113,8 км
4	BFN1	50°00' пн. ш.	36°10' сх. д.	Харків	0 км
5	BMHR	49°69' пн. ш.	36°33' сх. д.	Харків	50 км

Табл. 1. Список використаних станцій спостереження за навігаційними супутниками переважно на території України

2.2. Методи аналізу даних вимірювань

Для отримання даних про вплив сонячного затемнення було використано дані вимірювань сигналів навігаційних супутників, які були отримані на близьких до сонячної тіні станціях. Слід місячної тіні, що накривав земну поверхню можна оцінити за допомогою рисунку (рис. 3).

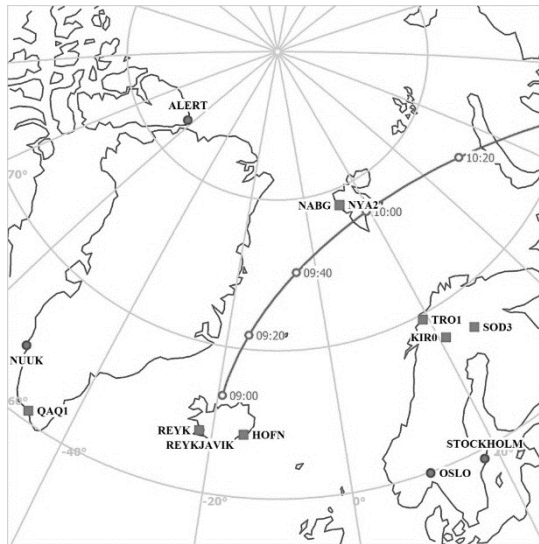


Рис. 3. Контурна карта області північної Європи. Суцільна лінія – слід місячної тіні на з часовими мітками через кожні 20 хвилин в інтервалі 04:00 – 09:00 UT. Квадрати позначають станції спостереження.

Слід місячної тіні, фаза затемнення M , частка площі A диску Сонця, покритої диском Місяця, відносна освітленість E та відносна освітленість з урахуванням сонячного затемнення описується як

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

отримане за допомогою методу Ф. Бесселя. При цьому

$$E = \cos \chi,$$

де χ – зенітний кут падіння сонячного випромінювання. Відносна ж освітленість нормувалася на освітленість у підсонячній точці, яка знаходилася найближче від Сонця.

Величина ПЕВ залежить від отримуваної сонячної енергії та відносної площі покриття диска Сонця Місяцем при затемненні A (magnitude obscuration) % . ПЕВ електронів уздовж фазового променя визначається як:

$$I_s = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}_{1,2} + \sigma L]$$

де L_1, L_2 – псевдодальності, виміряні фазовим методом,

$\text{const}_{1,2}$ – неоднозначність фазових вимірів,

σL – помилка вимірів фази.

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma_P],$$

де σ_P – помилка виміру дальності за Р-кодом.

Помилки цього методу істотно вище, ніж у фазових вимірах. Також, ПЕВ може бути визначене через різницю псевдодальностей на частотах f_1 і f_2 .

Аналізу підлягають ПЕВ N_V , очікуване значення ПЕВ N_{V0} , яке було б за відсутності сонячного затемнення, дефіцит ПЕВ $\Delta N_V = N_V - N_{V0}$, відносне значення дефіциту ПЕВ $\delta_V = \Delta N_V / N_{V0}$, Час запізнювання Δt реакції ПЕВ по відношенню до фази сонячного затемнення з M_{max} , тривалість реакції ΔT .

Параметри M, A та E обчислювалися для кожної точки вимірювань вздовж траєкторії польоту супутника, а тому вони залежали від координат. що обертання Землі навколо своєї осі суттєво впливало на часові залежності параметрів M, A та E . [6]

2.3. Стан космічної погоди

Для побудови рис.1 та аналізу стану космічної погоди було використано дані сайту [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Число Вольфа змінювалося в межах 53...85. [21]

21 та 22 жовтня 2022 р. концентрація частинок n_{sw} сонячного вітру, флуктуюючи, збільшувалася від $5 \cdot 10^6$ до $22.4 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (див. рис. 1). Після 17:00

УТ (тут і надалі всесвітній час) 22 жовтня 2022 р. n_{sw} різко зменшувалась. Деяке (до $7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$) зростання n_{sw} спостерігалось у другій половині доби 23 жовтня 2022 р. 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 $n_{sw} \approx (4 \dots 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. [21]

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. 25 жовтня 2022 р. $V_{sw} \approx 350 \dots 450 \text{ км/с}$.

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

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 $p_{sw} \approx 1 \text{ нПа}$. Компонент B_y міжпланетного магнітного поля зростав до 5...10 нТл 22 та 23 жовтня 2022 р. У другій половині доби 23 жовтня 2022 р. та епізодично 24 жовтня 2022 р. його рівень спадав до -9.9 нТл .

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

Сплески функції Акасофу ϵ_A сягали 16 та 25 ГДж/с 23 та 24 жовтня 2022 р. У день СЗ $\epsilon_A \approx 1 \dots 2 \text{ ГДж/с}$.

Від'ємні значення B_z -компоненту та сплески ϵ_A 23 та 24 жовтня 2022 р. свідчили про настання магнітної бурі. Максимальні значення Кр-індексу мали місце 23 жовтня 2022 р. ($Kp_{max} \approx 5.3$) та 24 жовтня 2022 р. ($Kp_{max} \approx 4.3$) (див. рис. 1). Спостерігалось дві бурі, перша з них – помірною, а друга – слабкою. У день СЗ значення індексу Кр не перевищували 2.

Падіння Dst-індексу від 10 до -76 нТл також свідчило про настання магнітної бурі. Її головна фаза продовжувалася з 06:00 до 18:30 22 жовтня 2022 р. Фаза відновлення тривала до кінця доби 24 жовтня 2022 р. 25 жовтня 2022 р. значення Dst-індекса флюктуювали у межах ± 5 нТл.

Таким чином, у день сонячного затемнення стан космічної погоди був сприятливим для спостереження ефектів затемнення. У якості контрольних днів було обрано 24, 26 та 27 жовтня 2022 р. [14]

Параметри космічної погоди:

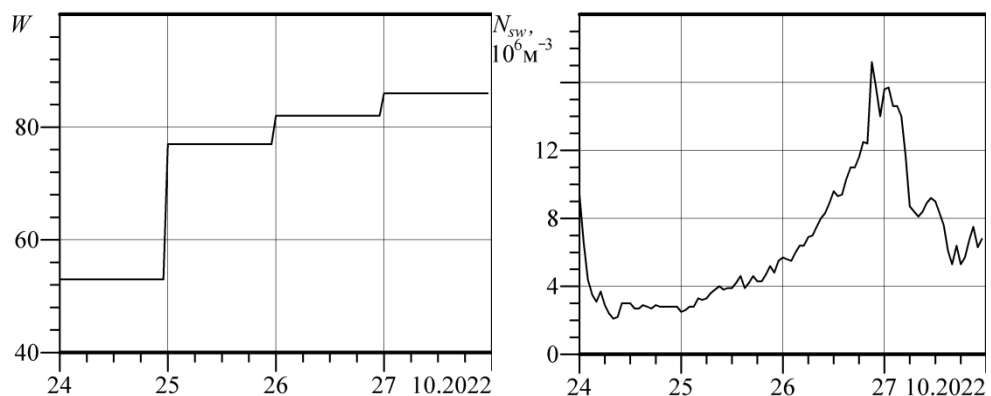


Рис. 4. Значення числа Вольфа (W) (зліва), та концентрація частинок (n_{sw}) (справа) сонячного вітру з 24 по 27 жовтня 2022 року

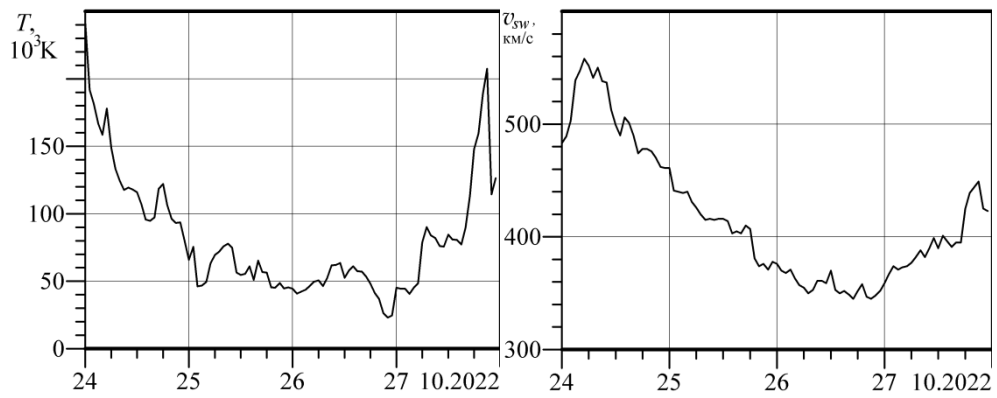


Рис. 5. Залежність параметрів космічної погоди: температури (T_{sw}) (зліва), та швидкості (V_{sw}) (справа) частинок сонячного вітру у період з 24 по 27 жовтня 2022 року

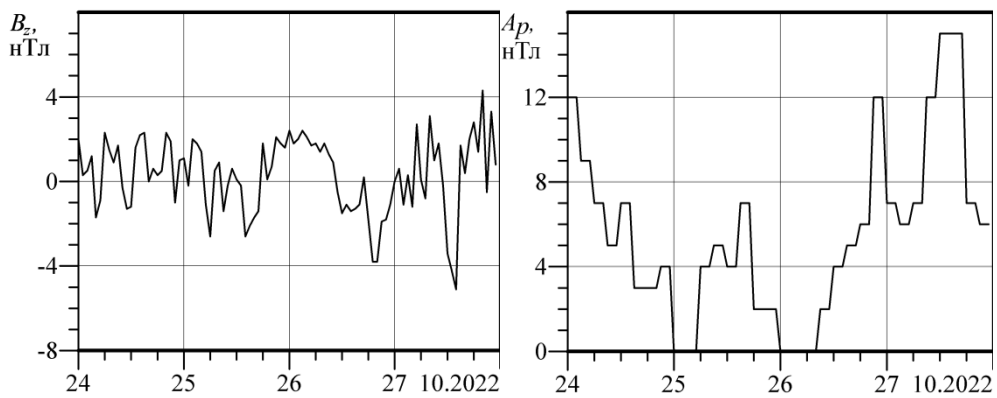


Рис. 6. Значення рівня B_z -компоненти (зліва) та B_y компоненти (справа) міжпланетного магнітного поля з 24 по 27 жовтня 2022 року

дефіциту, TECU Δt – затримка часу між максимальною фазою затемнення та максимального досягнутого дефіциту ПЕМ, хв. Максимальний дефіцит ПЕС:

$$\Delta N = N_a - N$$

Для кожної станції далі отримані часові залежності ПЕВ.

Станція	Супутник	N	N_a	ΔN
MIKL	G03	19.8	15.6	4.2
ZECK	G03	18.3	16.1	2.2
POLV	G04	22.5	16.5	4
BFN1	G03	22.4	19	3.4
BMHR	G03	22	18.5	1.5

Табл. 2. Параметри відклику іоносфери на СЗ 25 жовтня 2022 г.

3.2. Результати аналізу часових варіацій

Проліт для кожного супутника на графіках у даній роботі починається з назви супутника і часу початку радіовидимості або часу розрахункового періоду. Уздовж траєкторії прольоту супутника на графіках нанесені часові криві шкали з кроком 10 хвилин і 1 година. Точки розташовані близько до сліду тіні Місяця і показані лише супутники, відібрані для розрахунків. Також показано фрагменти місячної тіні у вигляді ліній з позначкою часу. Літерами "E_m" і "S" відзначені тимчасові залежності фази затемнення та рівень освітленості в точці вимірювання ПЕВ, на висоті F₂-шару іоносфери. Вертикальні лінії відзначають час сходу Сонця на поверхні Землі.

Всесвітній час (UT1) – шкала часу, заснована на обертанні Землі відносно віддалених небесних об'єктів (зірок і квазарів); UT1 є нерівномірною шкалою часу, оскільки період обертання Землі повільно збільшується через приливну взаємодію з Місяцем. Права вертикальна шкала призначена для значень фази затемнення з міткою M та відносних освітленостей як з

урахуванням затемнення E_m так і без урахування затемнення E . Пунктирна лінія представляє очікуване значення ПЕВ у припущенні відсутності затемнення. Прямі відрізки вказують місце вимірювання дефіциту ПЕВ і тимчасової затримки відгуку щодо максимуму фази.

Станція VFN1 (м. Харків)

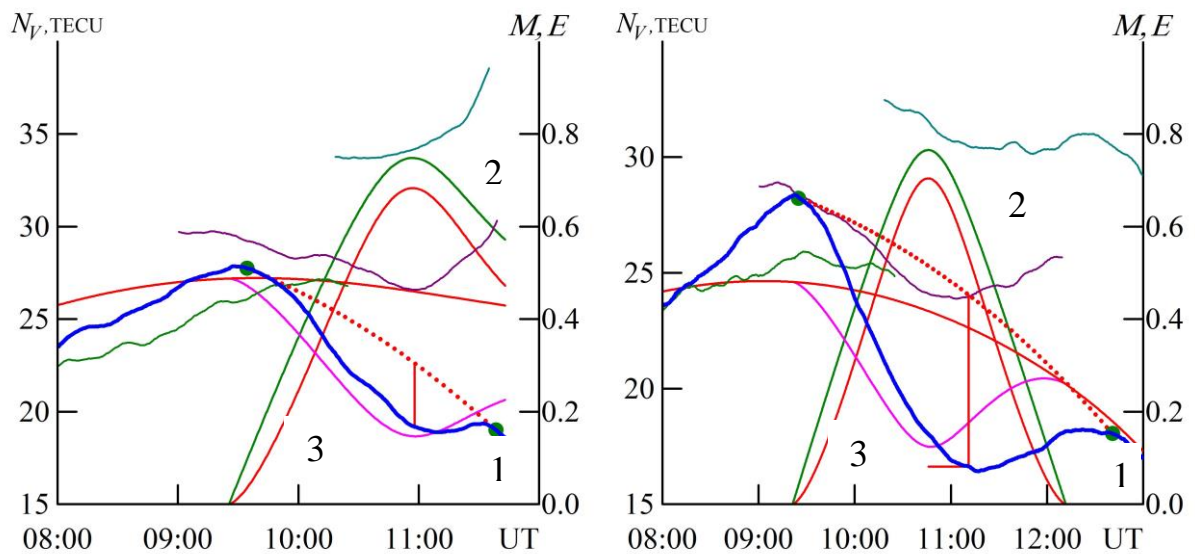


Рис. 8. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G03 (ліворуч) та G04 (праворуч) відносно станції VFN1. Криві: 1 – ПЕВ за 25 жовтня 2022 року, 2 - відносна площа покритої частини диску Сонця A (функція покриття), 3 – рівень інтенсивності S сонячного випромінювання. Пунктирна лінія показує очікувані варіації ПЕВ за відсутності $S3$

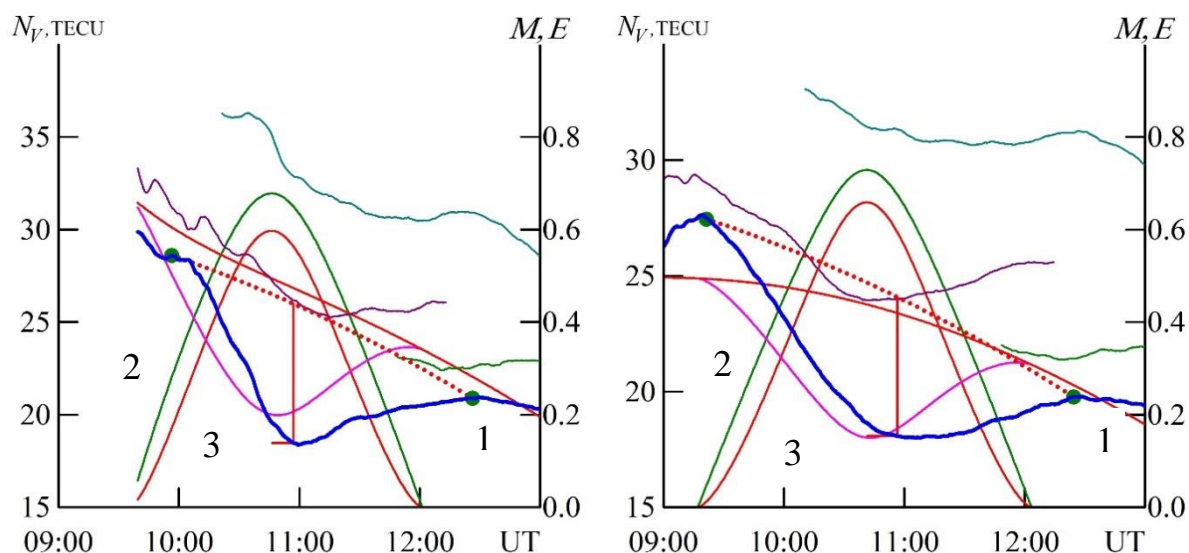


Рис. 9. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G07 (ліворуч) та G09 (праворуч) відносно станції BFNI.

Станція VMHR (с. Гайдари, Харківська обл)

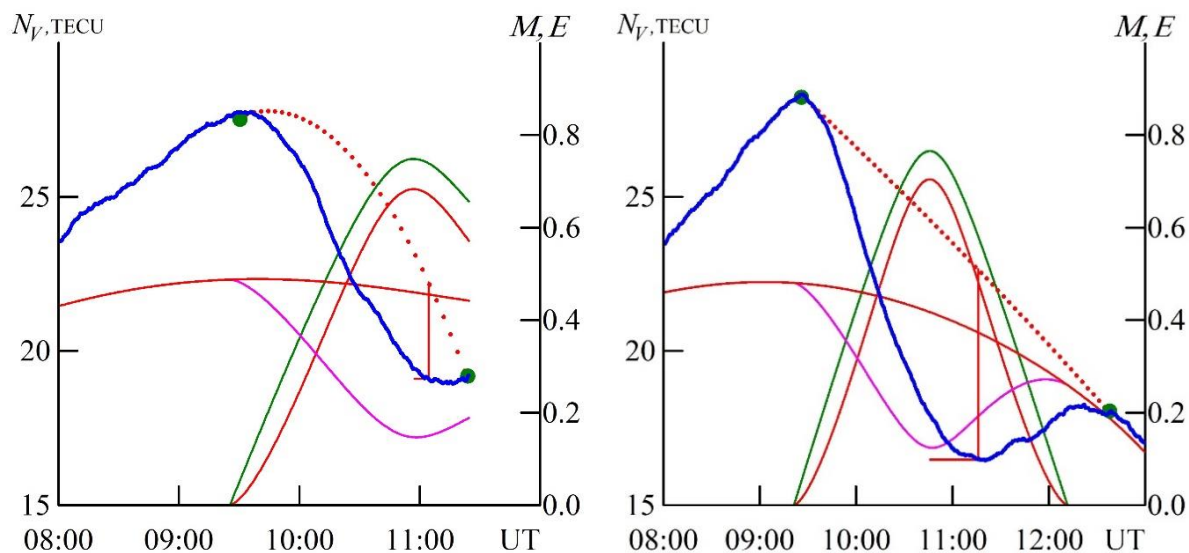


Рис. 10. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G03 (ліворуч) та G04 (праворуч) відносно станції VMHR.

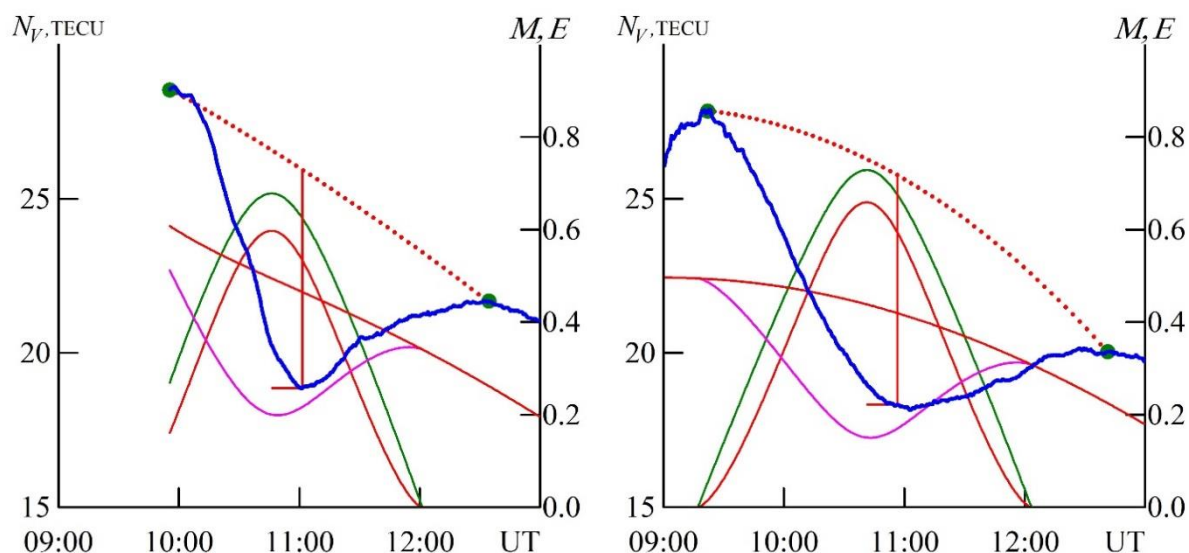


Рис. 11. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G07 (ліворуч) та G09 (праворуч) відносно станції

Станція POLV

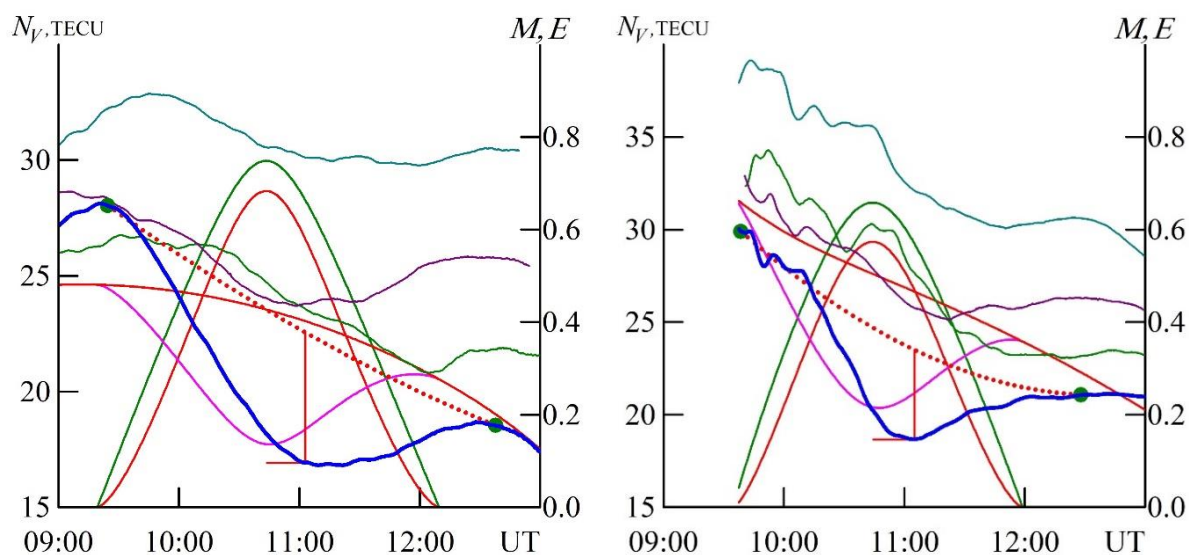


Рис. 12. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G04 (ліворуч) та G07 (праворуч) відносно станції POLV

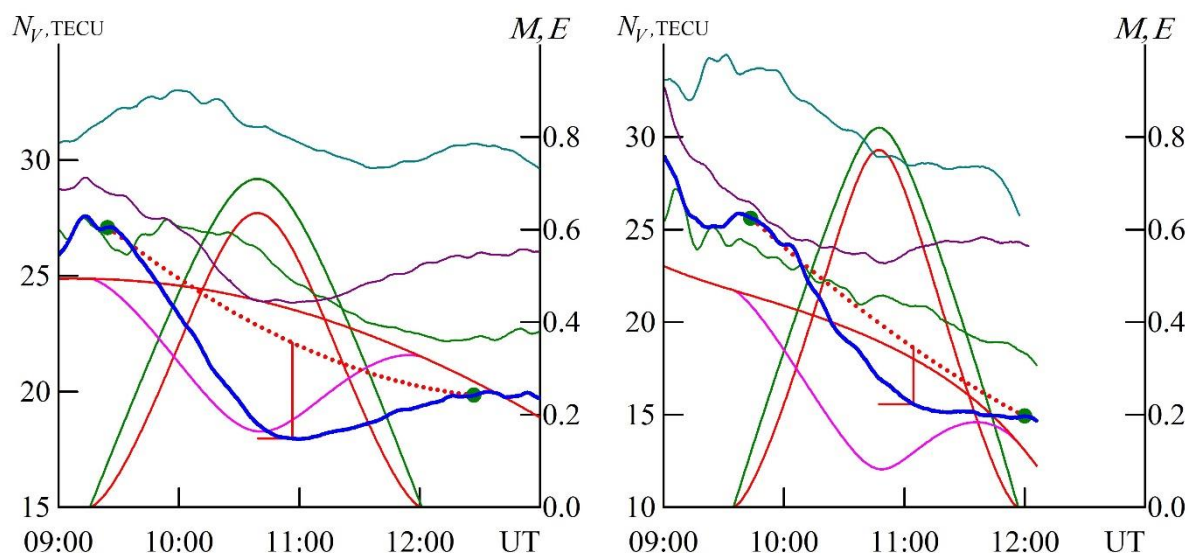


Рис. 13. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G04 (ліворуч) та G07 (праворуч) відносно станції POLV

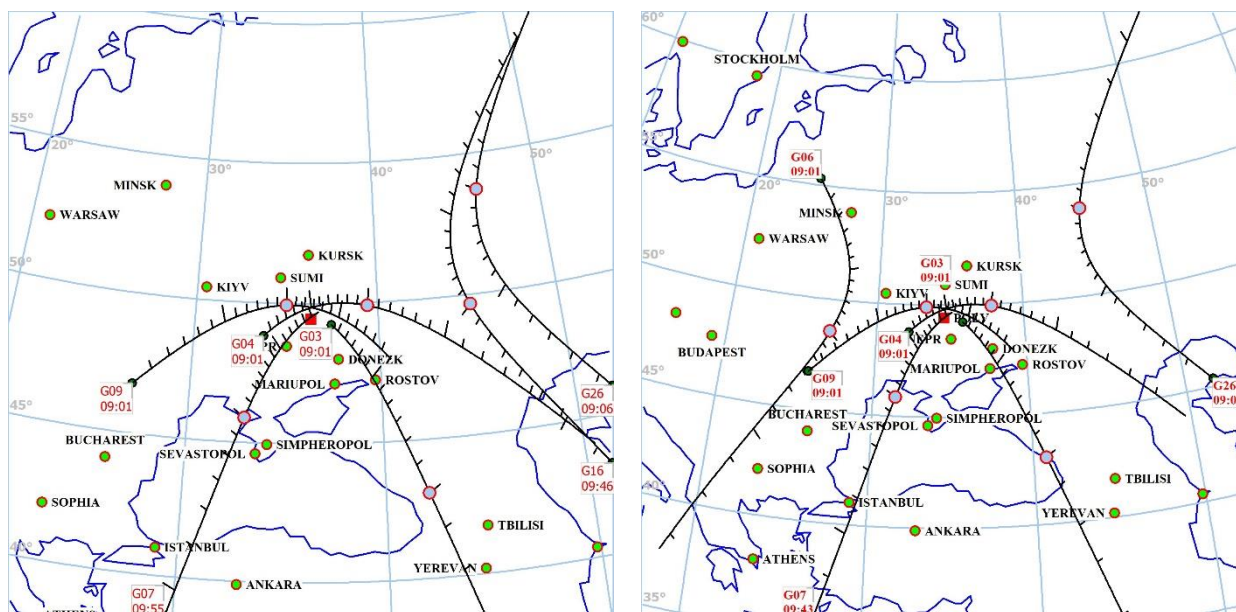


Рис. 14. Мапа прольотів супутників відносно станцій TRO-1 (зліва) і POLV (справа) 22.10.2022 р.

Станція МІКЛ (м. Миколаїв)

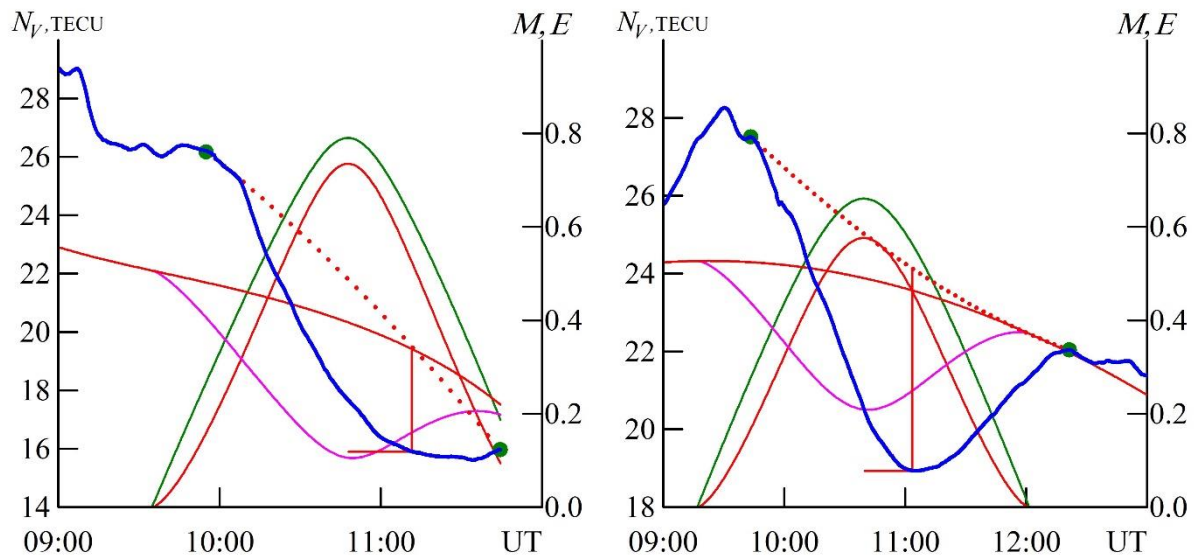


Рис. 15. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G03 (ліворуч) та G04 (праворуч) відносно станції МІКЛ

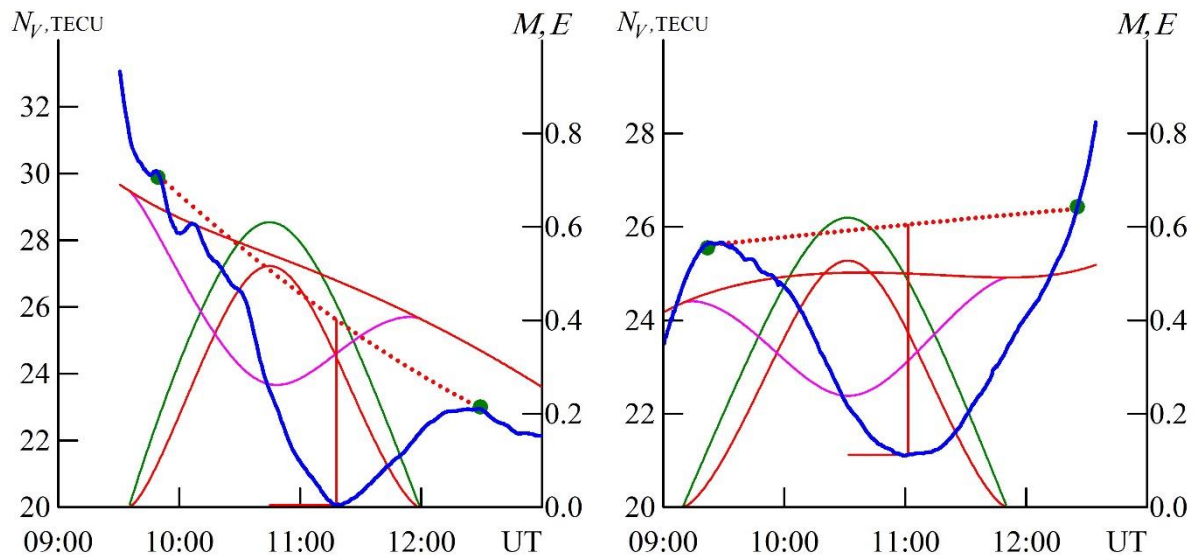


Рис. 16. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G06 (ліворуч) та G07 (праворуч) відносно станції МІКЛ

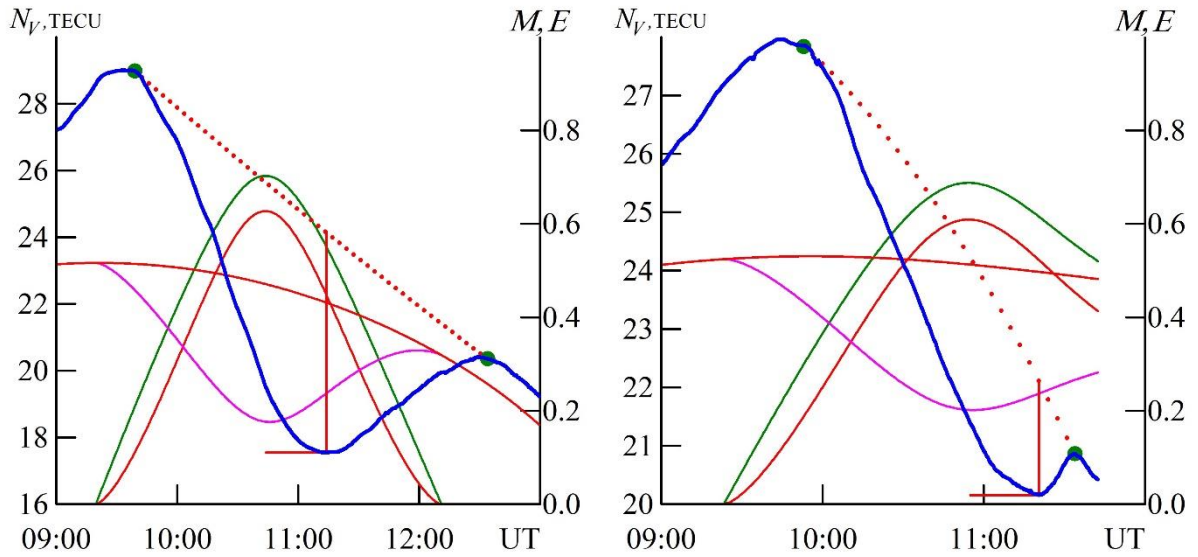


Рис. 17. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G09 (ліворуч) та G26 (праворуч) відносно станції MIKL

Станція ZECK (м. Черкесія)

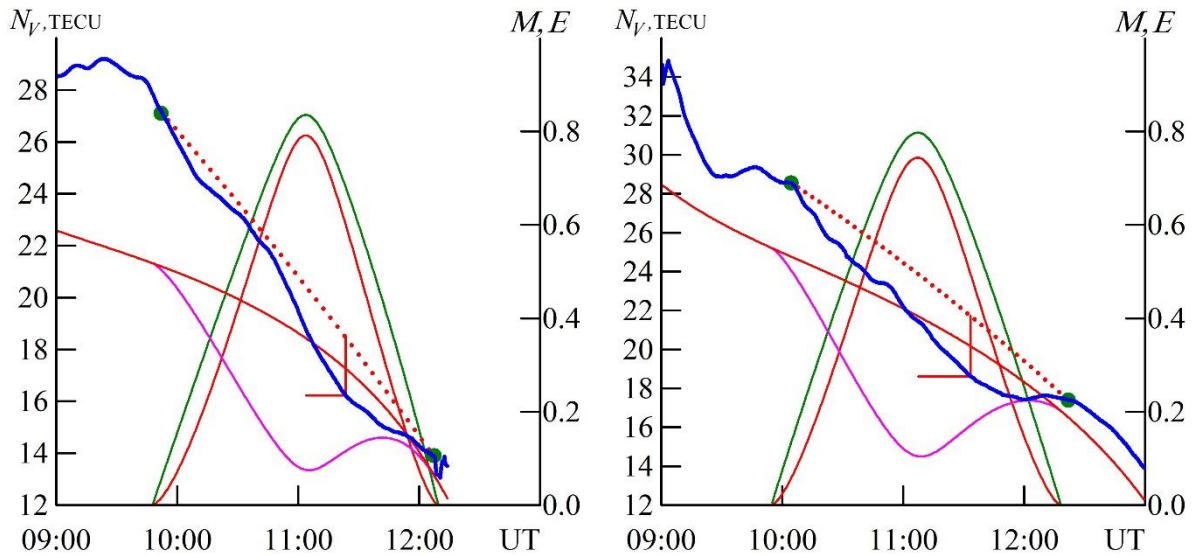


Рис. 18. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G03 (ліворуч) та G04 (праворуч) відносно станції ZECK.

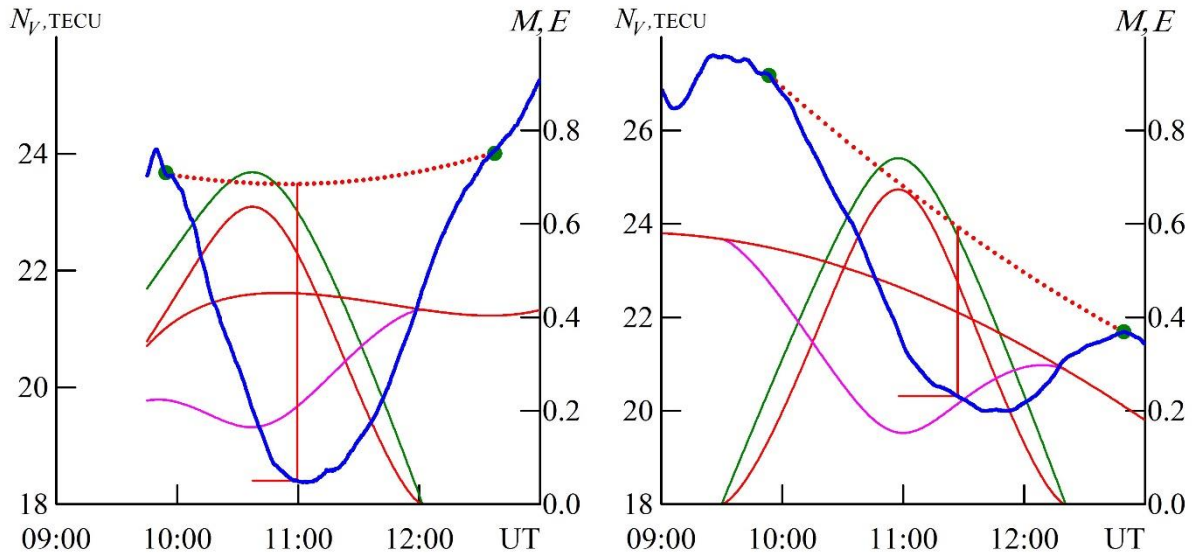


Рис. 19. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G06 (ліворуч) та G07 (праворуч) відносно станції ZECK (м. Черкесія).

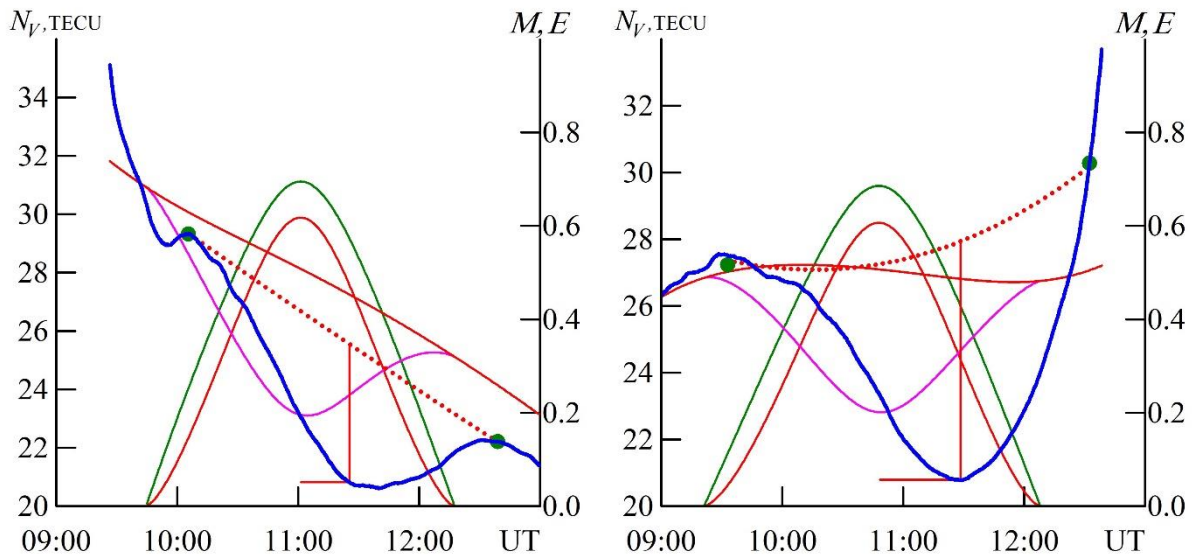


Рис. 20. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G09 (ліворуч) та G11 (праворуч) відносно станції ZECK.

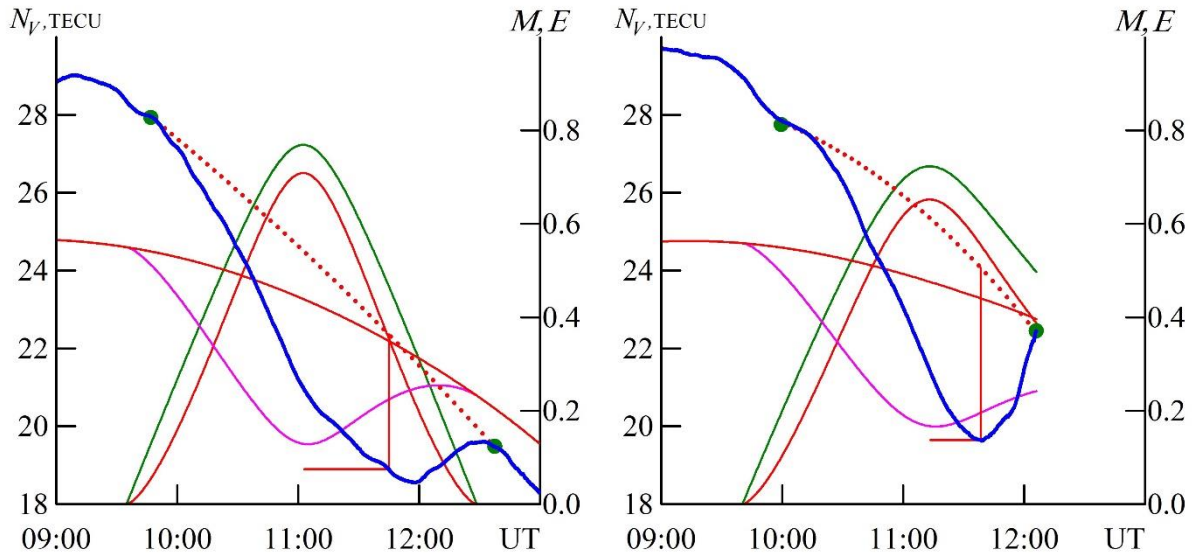


Рис. 21. Часові залежності ПЕК (ПЕВ) для прольоту супутників G16 (ліворуч) та G26 (праворуч) відносно станції ZECK.

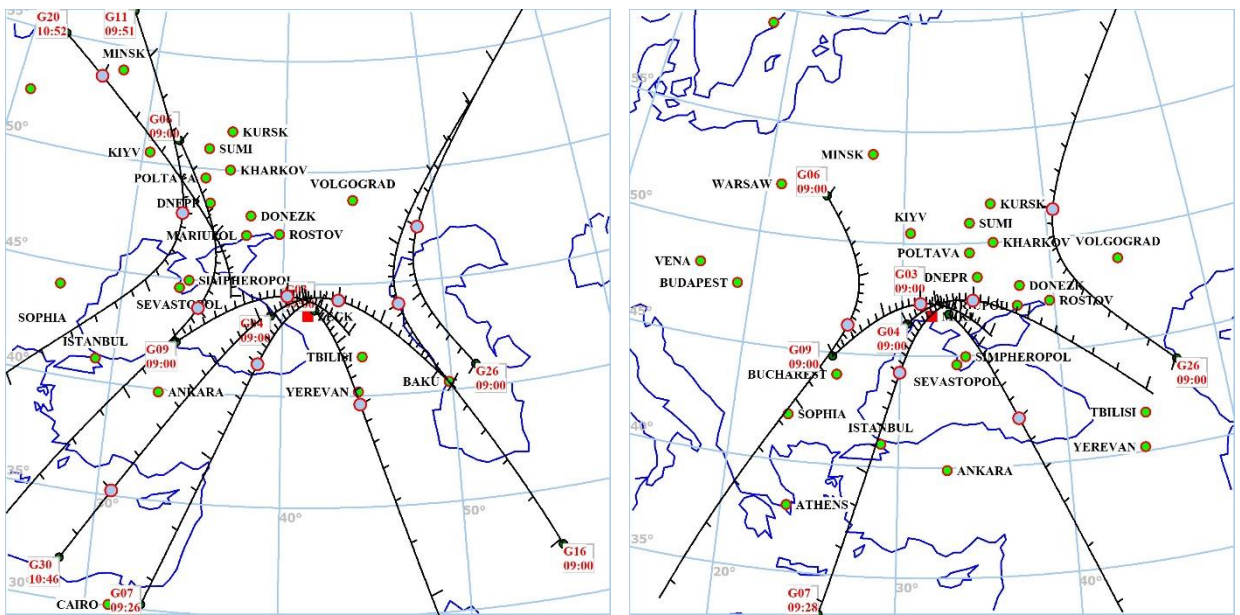


Рис. 22. Мапа прольотів супутників відносно станцій TRO-1 MIKL (зліва) і ZECK (справа) 22.10.2022 р.

3.3. Обговорення отриманих результатів

В цій роботі було проведено аналіз часових варіацій ПЕВ в іоносфері, використані дані з допомогою станцій та супутників GPS, у контрольні дні та в день СЗ 25 жовтня 2022 року. Космічна погода в цей день сприяла дослідженню ПЕВ. Аналіз даних проводився на станціях MIKL, ZECK, POLV, BFN1, VMHR різними супутниками.

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

Дослідження показали, що рух місячної тіні на схід ускладнив процес затемнення, і повне затемнення відбулося лише за межами Землі. Місячна тінь проходила поряд із північним полярним кругом, і СЗ почалося з Північної частини Ісландії. Таким чином, дані з супутників та станції TRO1 були ближчі до події, ніж дані зі станції HOFN.

3.4. Висновки до розділу 3

СЗ 25 жовтня 2022 року було частковим. Космічна погода в цей день була сприятлива. Аналіз даних проводився на станціях MIKL, ZECK, POLV, BFN1, VMHR різними супутниками. Результати наведені у відповідних таблицях.

ВИСНОВКИ

Дослідження результатів розрахунку ПЕВ для СЗ за 25 жовтня 2022р над станціями встановило, що

- 1) Часові залежності ПЕВ з супутників 7 – 13 TECU, тим часом супутники демонстрували результати часової залежності ПЕВ 17 – 25 TECU, що значно плутає при дослідженні даного СЗ.
- 2) Місячна тінь рухалася на схід, проходила поряд із північним полярним колом. СЗ почалося з Північної частини Ісландії, тому можна вважати, що дані з супутників та станції TRO1 були ближчі, ніж зі станції ZECK
- 3) Середній дефіцит ПЕВ склав майже 1.7 TECU, а середня затримка дорівнює 18 хв.
- 4) При подальшому русі місячної тіні на схід, вечірній термінатор ускладнив картину затемнення. Повне затемнення відбулося тільки за межами Землі, через що не було значних змін зі зв'язком та з різними комунікаціями.

Список використаної літератури

1. Aa E., Zhang S-R., Erickson P. J., Goncharenko L. P., Coster A. J., Jonah O. F., Lei J., Huang F., Dang T., Liu L. Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020;125(11):1–17, e2020JA028296. <https://doi.org/10.1029/2020JA028296>
2. 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>
3. 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>
4. Chapman S. The influence of a solar eclipse upon the upper atmospheric ionization. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 1932;92:413–420. <https://doi.org/10.1093/mnras/92.5.413>
5. 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.
6. 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.
7. 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>

8. Harjosuwito J., Husin A., Dear V., Muhamad J., Faturahman A., Bahar A., Erlansyah, Syetiawan A., Pradipta R. Ionosonde and GPS total electron content observations during the 26 December 2019 annular solar eclipse over Indonesia. *Ann. Geophys.* 2023;41:147–172. <https://doi.org/10.5194/angeo-41-147-2023>

9. https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS

10. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

11.

<https://www.eclipsewise.com/solar/SEprime/20012100/SE2022Oct25Pprime.html>

12. 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

13. 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.

14. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsée D., Bruyninx C., et al. Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. *J. Space Weather Space Clim.* 2017; 7(A19):1–23. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017017>

15. Sun Y.-Y., Chen C.-H., Su X., Wang J., Yu T., Xu H.-R., Liu, J.-Y. Occurrence of nighttime irregularities and their scale evolution in the ionosphere due to the solar eclipse over East Asia on 21 June 2020. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2023;128:1–9. e2022JA030936. <https://doi.org/10.1029/2022JA030936>

16. Tsai H. F., Liu J. Y. Ionospheric total electron content response to solar eclipses. *J. Geophys. Res.* 1999;104(A6):12657–12668. <https://doi.org/10.1029/1999JA900001>

17. Verhulst T. G. W., Stankov S. M. Height dependency of solar eclipse effects: The ionospheric perspective. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2020;125:1–20, e2020JA028088. <https://doi.org/10.1029/2020JA028088>

18. 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.

19. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск. 2006; 480 с.

20. 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.

21. Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов Особливості високоширотних іоносферних ефектів сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. у ранковий час

22. Л. Ф. ЧОРНОГОР, Ю. Б. МИЛОВАНОВ, В. Л. ДОРОХОВ, В. А. ПОДНОС, А. М. ЦИМБАЛ, М. Б. ШЕВЕЛЕВ ISSN 2311-0872 Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна 49 Серія «Радіофізика та електроніка», випуск 36, 2022. С. 49–65. ВАРІАЦІЇ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ В ЕКВАТОРІАЛЬНІЙ ІОНОСФЕРІ, ВИКЛИКАНІ СОНЯЧНИМ ЗАТЕМНЕННЯМ 21 ЧЕРВНЯ 2020 р.

23. Л. Ф. Черногор, Ю.Б. Милованов, Y. Luo ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ISSN 1027-9636. Радіофізика і радіоастрономія. Т. 27, № 2,

2022 ЕФЕКТИ СОНЯЧНОГО ЗАТЕМНЕННЯ 10 ЧЕРВНЯ 2021 р. В
ІОНОСФЕРІ ВИСОКИХ ШИРОТ: РЕЗУЛЬТАТИ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

24. Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.123

25. ЧОРНОГОР Л. Ф. Фізичні ефекти сонячних затемнень у атмосфері та геокосмосі: Монографія. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. – 386 с.123

26. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Жданко Є. Г., Леус С. Г., Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. Радіофізика і радіоастрономія. 2021. 26, № 4. С. 326—343.

27. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Luo Y. Эффекты солнечного затемнения 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. Радіофізика і радіоастрономія. 2022. 27, № 2. С. 93—109.123

28. 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

29. Черногор Л. Ф., Милованова Л. І., Милованов Ю. Б., Цимбал А. М., Luo Y. Эффекты солнечного затемнения 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.