

ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093>
УДК 550.388

Л.Ф. Чорногор, Ю.Б. Милованов, Y. Luo

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
4, майдан Свободи, Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

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

Предмет і мета роботи. Сонячні затемнення — унікальні явища природи, що здатні активізувати взаємодію підсистем у системі Земля—атмосфера—іоносфера—магнітосфера. Унаслідок затемнення в усіх підсистемах та їхніх геофізичних полях виникають збурення. Важливо, що реакція підсистем залежить не лише від фази затемнення, але й від стану космічної погоди та місяця спостереження. Більшість сонячних затемнень спостерігаються в середніх і низьких широтах. Найбільша фаза кільцеподібного затемнення 10 червня 2021 р. спостерігалась у високих широтах, включно з Північним полюсом. Високоширотна іоносфера суттєво відрізняється від середньо- та низькоширотної іоносфери. Вона перебуває в метастабільному стані, отже будь-який вплив на неї призводить до активізації взаємодії підсистем. Актуальність цього дослідження є обумовленою саме особливостями проявів сонячного затемнення у високоширотній іоносфері. Мета роботи — виклад результатів спостережень за варіаціями повного електронного вмісту (ПЕВ) в іоносфері високих широт упродовж сонячного затемнення 10 червня 2021 р.

Методи та методологія. Для спостережень використовувалися станції приймання сигналів навігаційних супутників системи GPS (усього 11 станцій і 8 штучних супутників Землі).

Результати. Ефекти сонячного затемнення чітко спостерігались на всіх 11 станціях і для всіх використовуваних супутників системи GPS. Установлено, що в середньому, тобто без урахування випадкових флуктуацій, зменшення ПЕВ відстежувало зміну освітленості іоносфери. В усіх спостереженнях невдовзі після початку затемнення ПЕВ починав зменшуватися, через $60 \div 100$ хв досягав мінімуму і згодом повертався практично до початкового рівня. Максимальне зменшення ПЕВ дорівнювало $1.0 \div 5.1$ TECU (Total Electron Content Unit), а в середньому воно становило (2.7 ± 1.6) TECU, або (35 ± 18) %. Максимальне зменшення ПЕВ запізнювалось відносно максимального значення фази сонячного затемнення (найнижчої освітленості іоносфери) на $5 \div 30$ хв, у середньому — на (15.7 ± 6.8) хв. На низці часових залежностей ПЕВ, отриманих на різних станціях, спостерігались квазіперіодичні варіації з періодом від 5 до 19 хв. Відносна амплітуда коливань ПЕВ становила $1 \div 12$ %.

Висновки. Кільцеподібне сонячне затемнення 10 червня 2021 р. призвело до значного збурення високоширотної іоносфери. Під час затемнення мали місце аперіодичні та квазіперіодичні збурення повного електронного вмісту іоносфери.

Ключові слова: високоширотна іоносфера, сонячне затемнення, повний електронний вміст (ПЕВ), станції GPS, супутники GPS, зменшення повного електронного вмісту, квазіперіодичне збурення, час запізнювання збурення.

Ц и т у в а н н я: Чорногор Л.Ф., Милованов Ю.Б., Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 2. С. 93—109. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093>

C i t a t i o n: Chernogor, L.F., Mylovanov, Yu.B., and Luo, Y., 2022. Effects from the June 10, 2021 Solar Eclipse in the High-Latitude Ionosphere: Results of GPS Observations. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(2), pp. 93—109. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.093>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Іоносферні ефекти сонячних затемнень (СЗ) досліджуються понад 100 років, принаймні піонерською публікацією вважається робота [1]. Установлено, що СЗ супроводжуються як регулярними, тобто такими, що повторюються, ефектами, так і нерегулярними, властивими лише даному затемненню [2]. Показано, що СЗ викликає перебудову всіх підсистем у системі Земля—атмосфера—іоносфера—магнітосфера. Важливо, що реакція підсистем залежить не тільки від фази СЗ і площі покритої частини диска Сонця, але й від стану атмосферної та космічної погоди, часу і місця спостереження, пори року, та/або етапу розвитку циклу сонячної активності.

Найчастіше СЗ спостерігаються в середніх і низьких широтах, рідше — у високих [3–50]. Між тим, високоширотна іоносфера істотно відрізняється від середньо- та низькоширотної. Їй властива метастабільність, більша залежність від стану космічної погоди. Через це актуальною задачею є дослідження особливостей прояву у високоширотної іоносфері збурень, що викликані СЗ.

Мета цієї роботи — викладення результатів спостереження за допомогою радіосигналів системи GPS (Global Positioning System, США) за варіаціями повного електронного вмісту (ПЕВ) в іоносфері високих широт упродовж СЗ 10 червня 2021 р.

Незважаючи на унікальність затемнення 10 червня 2021 р., йому присвячено всього декілька робіт [45–50].

Таблиця 1. Перелік станцій спостереження за навігаційними супутниками системи GPS

Назва станції	Широта	Довгота	Приналежність
IQAL	63.60°	-68.51°	Канада
SRMP	72.91°	-54.39°	Гренландія
ASKY	75.72°	-58.25°	"
DKSG	76.35°	-61.67°	"
MARG	77.19°	-65.69°	"
GLS3	77.43°	-51.11°	"
KAGZ	79.13°	-65.85°	"
EUR2	79.92°	-85.94°	Канада
SCBY	80.26°	-59.59°	Гренландія
KMOR	81.25°	-63.53°	"
HRDG	81.87°	-44.52°	"

У статтях [45, 46] описано теплові ефекти та вплив на конвекцію в приземній атмосфері. У роботах [47, 48] викладаються результати спостережень за варіаціями геомагнітного поля упродовж СЗ у різних широтах. У роботах [49, 50] описано іоносферні ефекти СЗ над м. Харків, де фаза СЗ M становила близько 0.11. У даній роботі, на відміну від [49, 50], досліджуються іоносферні ефекти СЗ над високоширотними територіями, де фаза $M \approx 0.9$, тобто була максимальною.

1. Загальні відомості про сонячне затемнення 10 червня 2021 р.

Відомості стосовно затемнення 10 червня 2021 р. наведено на сайті <<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>>. Головна особливість цього СЗ полягала в тому, що воно було кільцеподібним. Максимальне значення фази затемнення $M \approx 0.94$.

Як відомо, СЗ розпочалося о 08:12:20 (тут і далі вказано всесвітній час UT), а закінчилося о 13:11:19. Місячна тінь рухалась від Канади через Атлантичний океан, Гренландію, Північний Льодовитий океан, Північний полюс, Росію. Часткове СЗ спостерігалось впритул до Апеннін, Балкан, Криму, Кавказу, Середньої Азії, Монголії та Китаю.

2. Стан космічної погоди

Ґрунтуючись на даних сайтів <<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>> та <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>>, у роботі [49] ми детальніше висвітлили стан космічної погоди.

Тут зазначимо лише наступне: 7, 10 і 12 червня 2021 р. спостерігались магнітні збурення. При цьому індекс K_p збільшувався до 3÷4, а D_{st} - індекс зменшувався до -10 нТл 7 червня 2021 р. і до -33 нТл 10 червня 2021 р. Саме цього дня виникла слабка (за класифікацією [51, 52]) магнітна буря, фаза відновлення якої тривала до 12 червня 2021 р.

Нижче наведено результати аналізу спостережень за варіаціями ПЕВ 9, 10 та 11 червня 2021 р. Через згадані магнітні збурення розглядати як контрольну дату доцільно 9 червня 2021 р.

3. Засоби та методи досліджень

Для виявлення реакції іоносфери на кільцеподібне СЗ 10 червня 2021 р. оброблялись реєстра-

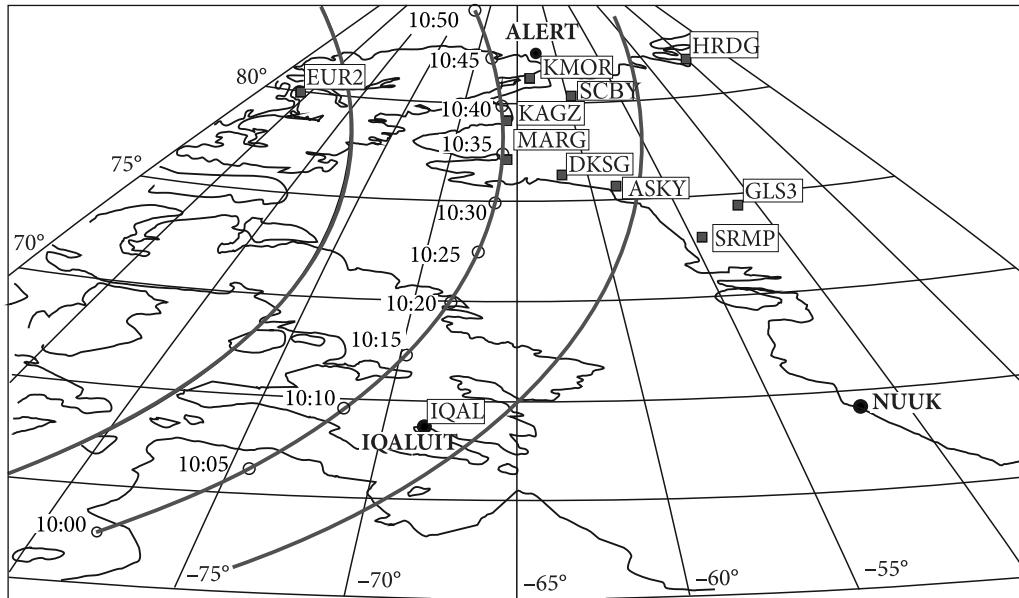


Рис. 1. Траекторія місячної тіні 10 червня 2021 р. о 10:00–10:50 та використовувані станції спостереження за навігаційними супутниками на карті півночі Канади та частини Гренландії

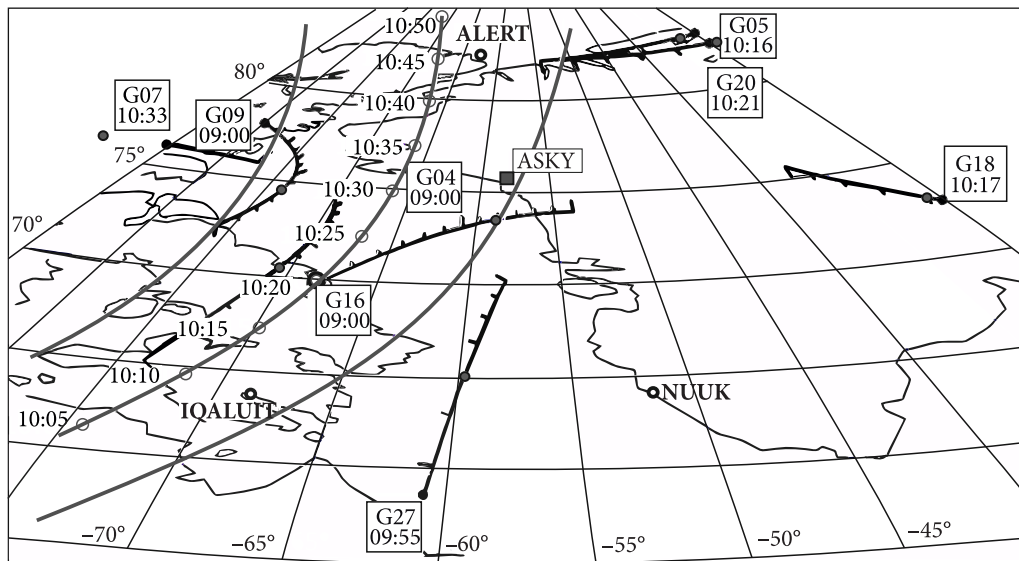


Рис. 2. Слід місячної тіні та прольоти супутників відносно станції ASKY 10 червня 2021 р. о 09:00–11:00 на карті півночі Канади та частини Гренландії

ції сигналів глобальної навігаційної супутникової системи GPS. У табл. 1 наведено перелік станцій спостереження, які знаходились поблизу траекторії руху місячної тіні земною поверхнею, із зазначенням географічних координат і країни приналежності. Як видно з табл. 1, усі станції знаходяться у високих широтах.

Лінії руху місячної тіні Землею та розташування станцій спостереження вказано на рис. 1. Рух

центра місячної тіні відмічався позначками часу з кроком 5 хв. Бічні лінії місячної тіні — це північний і південний краї центральної траекторії антумбральної тіні.

Приклад траекторії тіні Місяця поблизу станції ASKY наведено на рис. 2. У часовому інтервалі спостереження 09:00–11:00 оброблялися сигнали поточного групування супутників G04, G05, G07, G09, G16, G18, G20, G27.

Максимум концентрації електронів відносимо до F_2 -шару іоносфери на висоті 350 км. Радіопромінь від супутника перетинає шар F_2 іоносфери в точці, яка іменується іоносферною. Проекція іоносферної точки на поверхню Землі задає підіоносферну точку. Під прольотами супутника будемо мати на увазі траєкторії підіоносферних точок. Траєкторію тіні Місяця назвемо слідом місячної тіні.

У двочастотному приймачі за отриманими псевдодальностями оцінюється іоносферна затримка сигналу та розраховується вертикальний ПЕВ. Похибки оцінки ПЕВ походять з похибок розрахунку координат супутника та вимірювань псевдодальностей. Координати навігаційних супутників розраховуються з достатньо високою точністю. Вимірювані параметри псевдодальності за кодом і фазою містять іоносферну затримку, випадкові та систематичні похибки. Наведені нижче розрахунки показують, що для оцінки іоносферних збурень точність координат супутника та, відповідно, підіоносферних точок є достатньою у разі повідомлення навігаційних даних не рідше одного разу на добу. Вимірювання фази в системі GPS виконуються з достатньо високою точністю, та похибка у визначенні ПЕВ за 30-секундних інтервалів усереднення не перевищує 10^{14} м^{-2} , або 0.01 TECU (Total Electron Content Unit, $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ електронів/м}^2$) [53].

Головну систематичну похибку в оцінку ПЕВ двочастотним приймачем вносить зміщення часу між двома спостереженнями псевдодальностей GPS на різних частотах. Для компенсації цієї похибки використовують поправки DCB (Differential Code Biases).

Таблиця 2. Параметри максимального зближення місячної тіні та підіоносферної точки супутника для станції EUR2

Супутник	Час	Широта	Довгота	Відстань, км
G04	10:26	72°44'	-88°53'	719
G05	10:53	85°11'	-102°24'	222
G09	10:36	76°26'	-97°14'	779
G07	10:46	77°55'	-106°40'	862
G16	10:37	77°59'	-76°42'	247
G18	10:43	80°25'	-43°2'	440
G20	10:53	85°37'	-98°19'	160
G27	10:11	64°40'	-70°4'	71

Значення DCB^T і DCB^R для супутників (Transmitter) і деяких станцій (Receiver) наведено в інформаційних системах даних CDDIS і IGN [54]. Інститут геодезії та геофізики Китайської академії наук (IGG CAS) у м. Ухань та у Німецькому центрі аерокосмічних досліджень (DLR) у Кельні надають DCB^T і DCB^R із затримкою в 2–3 дні в щоденних файлах BSX [54]. Похибка визначення DCB^R зазвичай не перевищує 0.05 нс, що для частот GPS відповідає приблизно 0.14 TECU. Для супутників GPS носівні частоти є $f_1 = 1575.42 \text{ МГц}$ і $f_2 = 1227.60 \text{ МГц}$ [55].

Часові зміни значень DCB^R через цю систематичну похибку вказують на наявність випадкового шуму від зовнішніх джерел. Розрахунки показують, що джерела шуму повільно змінюються протягом кількох діб. У цьому випадку накопичення змін DCB^R за добу носить безперервний характер і протягом доби похибка DCB^R становить не більше 0.03 TECU за годину [43]. Якщо похибка DCB^R для конкретної станції відсутня, то користувач визначає поправку самостійно.

Для відображення місцезнаходження супутників і, відповідно, точок вимірювання ПЕВ у шарі F_2 іоносфери на географічній мапі будувались часові послідовності підіоносферних точок відносно станції (прольоти). Приклад такої мапи зі слідом місячної тіні та прольотами супутників відносно станції ASKY 10 червня 2021 р. наведено на рис. 2.

Для аналізу обирався інтервал часу 09:00–11:00. На рисунку кожний проліт супроводжується назвою супутника, часом початку радіобачення або розрахункового періоду. На кривій прольоту нанесено шкалу часу з кроком 10 хв (короткі риси) та 1 год (довгі риси) і відміткою поточної точки вимірювання на момент часу 10:20 у вигляді кола. Відображено лише ті супутники поточного групування, підіоносферні точки яких знаходяться поблизу траєкторії місячної тіні. Початок прольоту позначено невеликим колом, і в рамці вказано номер супутника та час початку радіобачення або періоду вимірювань.

Максимальний ефект від місячної тіні очікувався під час зближення підіоносферної точки супутника та центра місячної тіні. Приклад параметрів максимального зближення для станції EUR2 та супутників поточного групування наведено в табл. 2. Момент максимального зближен-

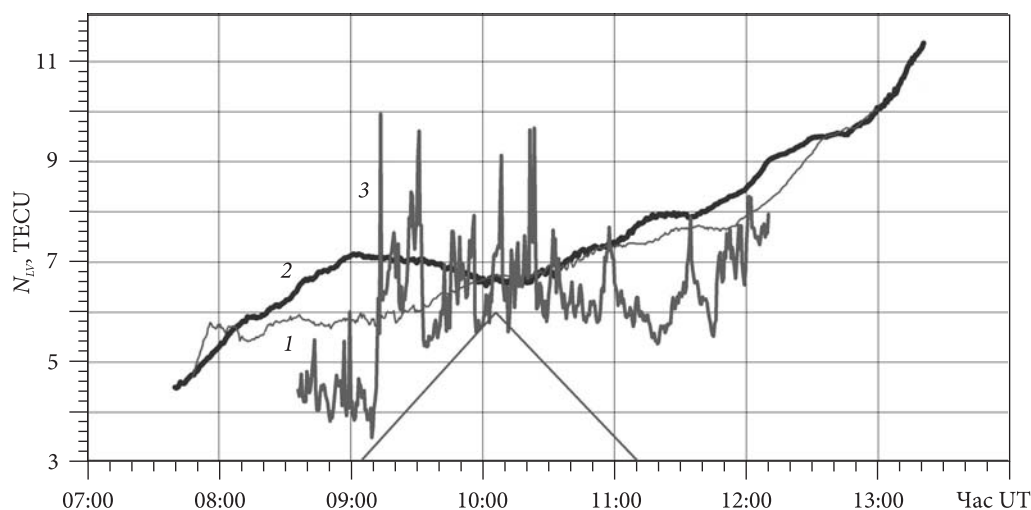


Рис. 3. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції IQAL (супутник G16) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3). Трикутниками тут і далі позначено інтервал часу спостереження СЗ

ня центра місячної тіні та підіоносферної точки використовувався для пошуку ефекту від СЗ.

Для оцінки іоносферної затримки ПЕВ оброблялись часові послідовності вимірюваних псевдодальностей C1C, L1C, C2W і L2W [55]. Часові затримки проходження сигналів у двох радіоканалах обумовлюють систематичні та випадкові похибки у вимірюваних псевдодальностях. Для врахування систематичної похибки використовувались поправки DCB. Ці поправки регулярно розраховуються для пар кодових псевдодальностей за даними кожного супутника та кожного приймача [54, 56]. Для розрахунку ПЕВ використовувалась методика, що описана в [43, 57].

Для супутників GPS відповідні значення DCB^T знаходяться у ресурсі <cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/bias>. Поправки DCB^R для станцій у Гренландії відсутні. Для оцінки поправок DCB^R обрано день 9 червня 2021 р. Використовувались дані супутникових вимірювань і карта глобального розподілу ПЕВ [58, 59]. Уздовж лінії іоносферних точок на висоті F_2 -шару іоносфери порівнювались дві часові послідовності: ПЕВ із глобальної карти та розрахункової для обраних супутників із невідомим параметром DCB^R . За допомогою метода найменших квадратів оцінювались DCB^R для кожного прольоту. Часові поправки середнього значення DCB^R і середньоквадратичні відхилення σ подано в табл. 3.

4. Результати спостережень

Надамо приклади результатів аналізу даних спостережень, отриманих на 11 радіоприймальних станціях системи GPS із використанням сигналів 8 супутників (G04, G05, G07, G09, G16, G18, G20 та G27).

4.1. Станція IQAL. Супутник G16

У контрольний день 9 червня 2021 р. ПЕВ поступово збільшувався від 5.8 до 7.4 TECU в інтервалі часу 09:00–11:10 (рис. 3). 11 червня 2021 р. — в день магнітної бурі — в цьому ж інтервалі часу ПЕВ змінювався в широких межах: від 3.5 до 10.0 TECU. У день затемнення, 10 червня 2021 р., ПЕВ безпосередньо після початку СЗ зменшувався від 7.2 до 6.6 TECU. Близько 11:15 відзначе-

Таблиця 3. Поправки DCB^R

Станція	DCB^R , нс	σ , нс
ASKY	4.36	1.35
DKSG	3.68	1.28
GLS3	-17.97	0.66
HRDG	-0.95	0.35
KAGZ	4.68	1.68
KMOR	0.47	1.84
MARG	5.43	1.14
SCBY	10.86	0.89
SRMP	4.10	1.02

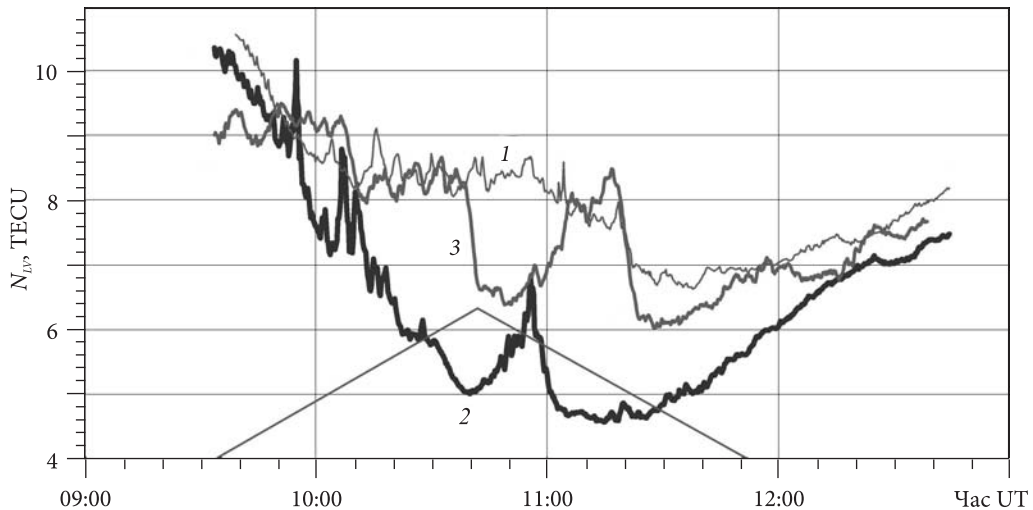


Рис. 4. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції SRMP (супутник G20) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

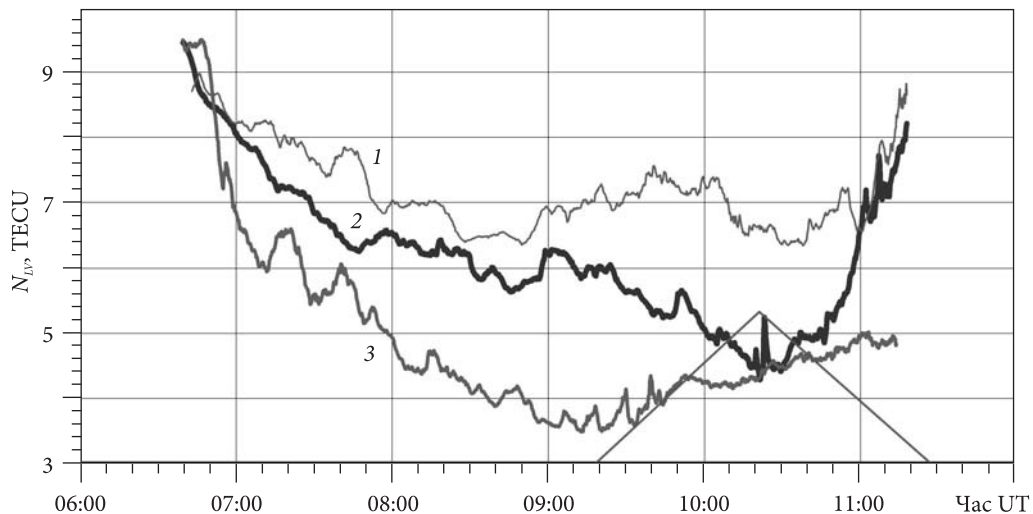


Рис. 5. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції ASKY (супутник G04) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

но мінімальне значення ПЕВ, яке запізнявалось відносно моменту максимальної фази СЗ (далі «час запізнювання τ ») на $\tau \approx 12$ хв. Після цього ПЕВ поступово збільшувався від 6.6 до 7.5 TECU.

4.2. Станція SRMP. Супутник G20

Часові варіації ПЕВ наведено на рис. 4. Можна бачити, що 9 червня 2021 р. з 09:40 до 11:50 ПЕВ зменшувався від 10.6 до 7.0 TECU, помітно флюктууючи. У тому ж інтервалі часу 11 червня 2021 р. реєструвались сильні флюктуації ПЕВ: від 6.0 до 10.1 TECU. 10 червня 2021 р. упродовж СЗ ПЕВ спочатку зменшився від 10.3 до 4.9 TECU, а потім немонотонно збільшувався до 5.6 TECU. В

інтервалі часу 10:40–11:05 на більш-менш монотонні зміни ПЕВ накладалося сильне збурення з амплітудою близько 1.7 TECU. Через це збурення не вдалося визначити час запізнення τ , а також точніше оцінити мінімальне значення ПЕВ.

4.3. Станція ASKY. Супутник G04

Розглянемо варіації ПЕВ в інтервалі часу 09:20–11:20 (рис. 5). Можна бачити, що 9 червня 2021 р. ПЕВ змінювався від 8.5 до 6.4 TECU, демонструючи помітні флюктуації. Далі, 11 червня 2021 р., ПЕВ немонотонно збільшувався від 3.6 до 5.0 TECU. У день СЗ ПЕВ, флюктууючи, спочатку зменшувався від 6.0 до 4.5 TECU, а потім посту-

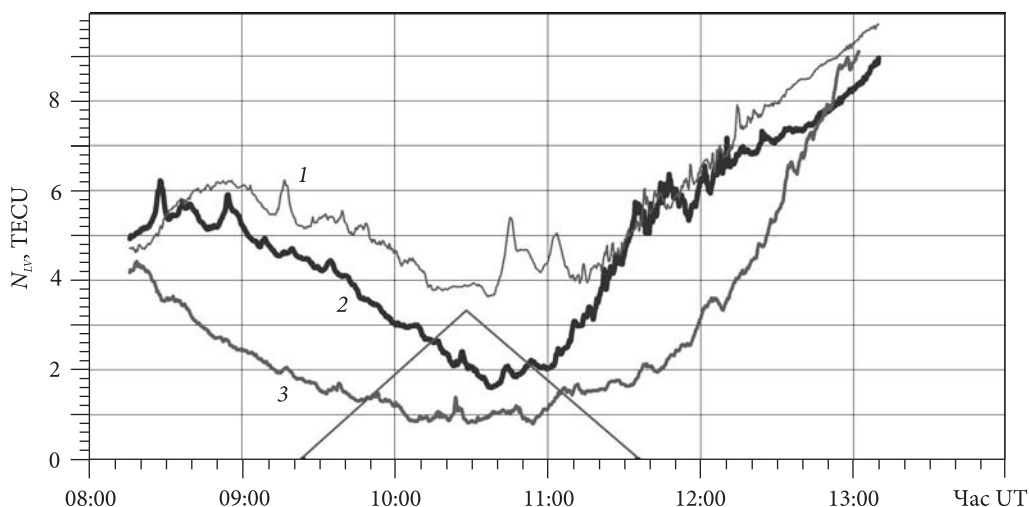


Рис. 6. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції DKSG (супутник G16) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

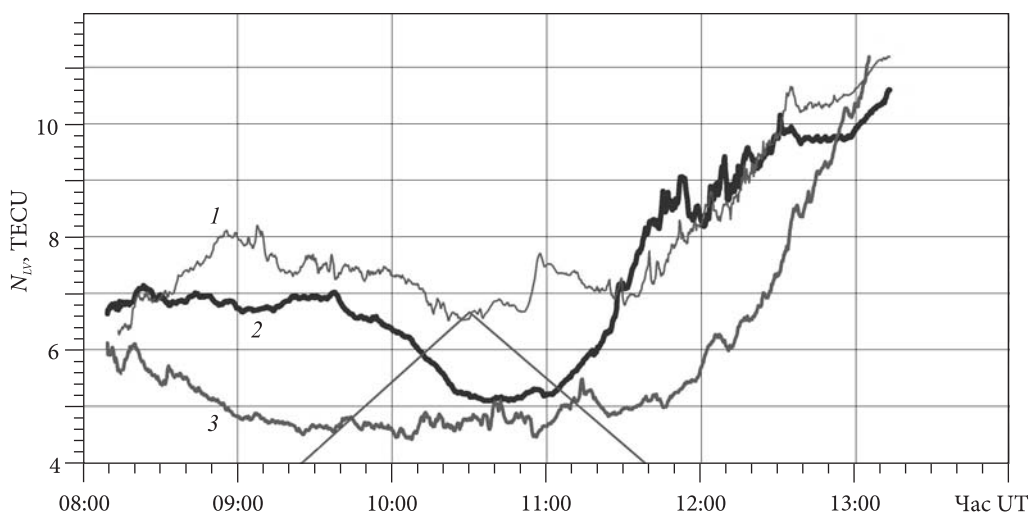


Рис. 7. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції MARG (супутник G16) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

пово збільшувався до 8.0 TECU. Час запізнення $\tau \approx 10$ хв. У цей день до початку СЗ і під час СЗ, приблизно до 10:00, мали місце квазіперіодичні варіації ПЕВ із періодом $T \approx 15 \div 18$ хв і амплітудою $\Delta N_{LVa} \approx 0.2 \div 0.3$ TECU при середньому значенні ПЕВ $\overline{N_{LV}} \approx 5.5 \div 6.0$ TECU. Відносна амплітуда $\delta_{NLa} = \Delta N_{LV} / \overline{N_{LV}} \approx 3.3 \div 5.5$ %.

4.4. Станція DKSG. Супутник G16

У контрольний день 9 червня 2021 р. в інтервалі часу 09:25–11:35 ПЕВ спочатку зменшувався від 5.4 до 3.8 TECU, а потім збільшувався до 5.0 TECU (рис. 6). Від 10:40 до 11:10 на достатньо повільні варіації ПЕВ накладалися збурен-

ня з амплітудами 1.5 і 1.0 TECU. У день 11 червня 2021 р. у тому ж інтервалі часу ПЕВ спочатку зменшився від 1.6 до 0.8 TECU, а потім збільшився до 1.6 TECU. У день затемнення ПЕВ спочатку зменшувався від 4.5 до 1.7 TECU, а потім збільшувався від 1.7 до 4.5 TECU. Час запізнення τ становив близько 17 хв. Спостерігались варіації з квазіперіодом $T \approx 9 \div 10$ хв і амплітудою близько $0.20 \div 0.25$ TECU при $\overline{N_{LV}} \approx 2.0$ TECU. Тоді $\delta_{NLa} \approx 10.0 \div 12.5$ %.

4.5. Станція MARG. Супутник G16

Часові варіації ПЕВ показано на рис. 7. Можна бачити, що в інтервалі часу 09:25–11:37 9 червня

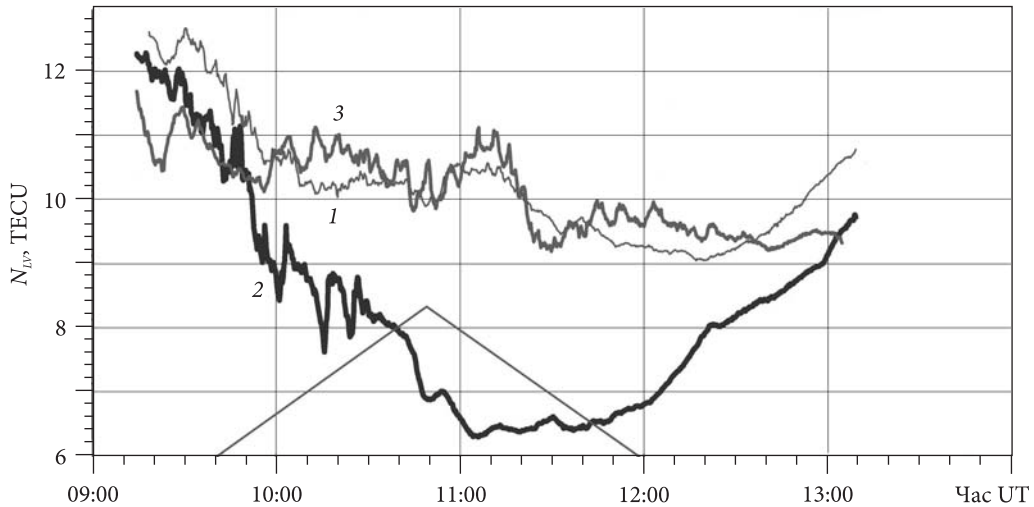


Рис. 8. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції GLS3 (супутник G05) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

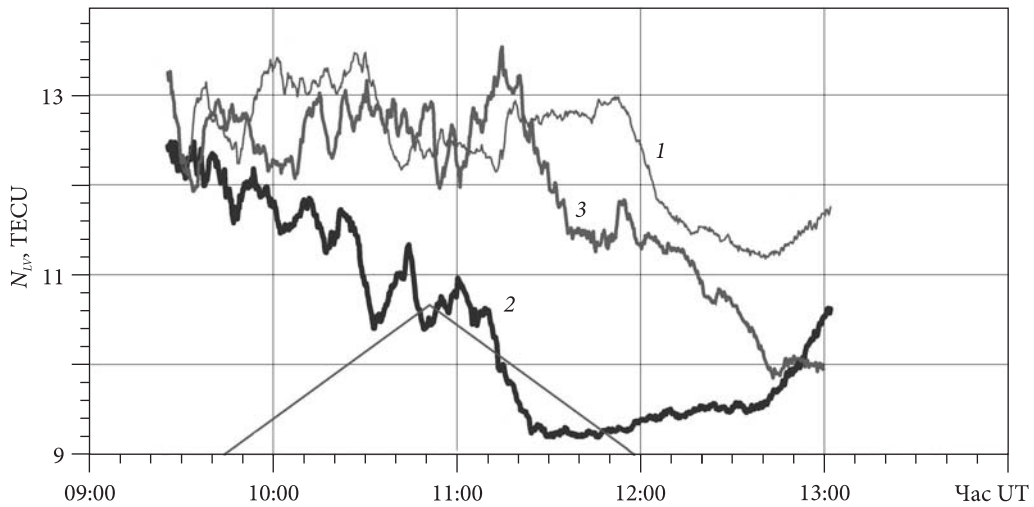


Рис. 9. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції KAGZ (супутник G05) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

2021 р. ПЕВ немонотонно зменшувався від 7.5 до 6.6 TECU, а потім збільшувався до 7.0 TECU. Від 10:50 до 11:20 на повільні зміни ПЕВ накладалися збурення з амплітудою близько 1.0 TECU. 11 червня 2021 р. ПЕВ змінювався від 4.5 до 5.4 TECU, демонструючи флуктуації. Власне в день СЗ, приблизно за 10 хв після його початку, ПЕВ зменшувався від 7.0 до 5.2 TECU, а потім збільшувався до 7.3 TECU. Час запізнювання $\tau \approx 15$ хв.

4.6. Станція GLS3. Супутник G05

Розглянемо варіації ПЕВ в інтервалі часу 09:40–12:00 (рис. 8). 9 червня 2021 р. ПЕВ, істотно флуктуюючи, зменшувався від 11.5 до 9.4 TECU.

Приблизно такими ж були часові варіації ПЕВ і 11 червня 2021 р. У день СЗ спочатку спостерігалось швидке зменшення ПЕВ від 11.2 до 6.4 TECU. На більш-менш повільні варіації ПЕВ накладалися квазіперіодичні збурення з $T \approx 8$ хв і амплітудою близько 1.0 TECU. При $\overline{N_{LV}} \approx 8.4 \div 9.0$ TECU маємо $\delta_{NL\alpha} \approx 11 \div 12$ %. Після 10:50 період збільшувався до 19 хв, $\Delta N_{LV\alpha} \approx 0.1$ TECU. При $\overline{N_{LV}} \approx 6.4$ TECU відносна амплітуда дорівнювала $\delta_{NL\alpha} \approx 1.6$ %. Час запізнювання τ становив близько 15 хв.

4.7. Станція KAGZ. Супутник G05

У контрольний день 9 червня 2021 р. в інтервалі часу 09:45–12:00 ПЕВ сильно флуктував у

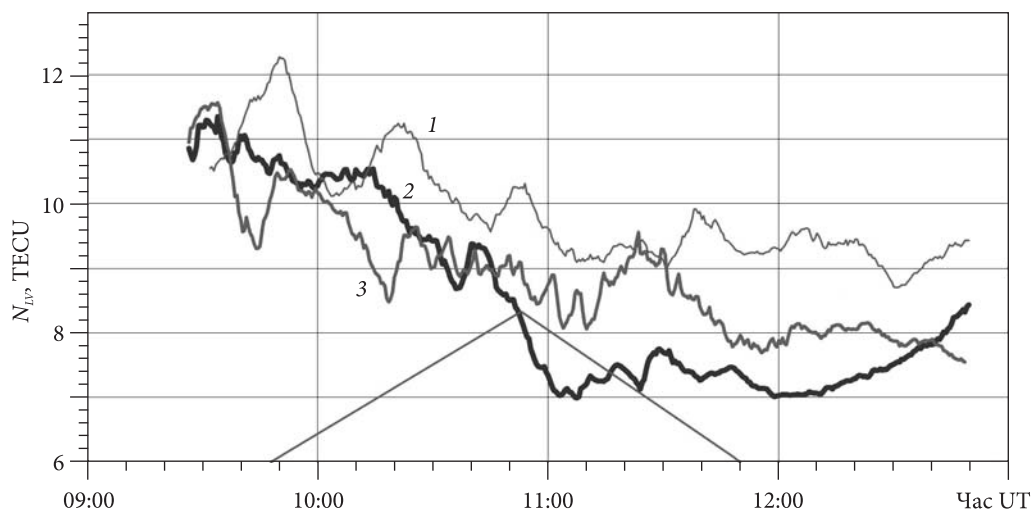


Рис. 10. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції EUR2 (супутник G20) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

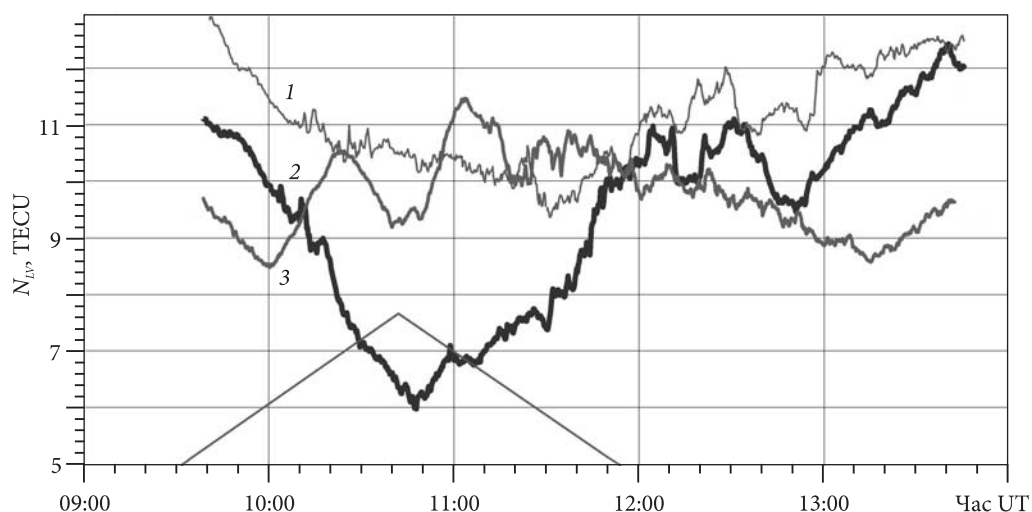


Рис. 11. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції SCBY (супутник G18) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

межах $12.2 \div 13.4$ TECU (рис. 9). 11 червня 2021 р. варіації ПЕВ були ще більшими: від 11.4 до 13.4 TECU. У день СЗ ПЕВ у середньому зменшувався від 12.0 до 9.2 TECU, а потім повільно збільшувався від 9.2 до 9.3 TECU. На повільні варіації ПЕВ накладались квазіперіодичні збурення з періодом $15 \div 16$ хв і амплітудою, яка поступово збільшувалася від 0.25 до 0.45 TECU. При $\overline{N_{LV}} \approx 12.6 \div 10.7$ TECU маємо відповідно $\delta_{NL\alpha} \approx 2 \div 4$ %. Час запізнювання $\tau \approx 35$ хв.

4.8. Станція EUR2. Супутник G20

Часові варіації ПЕВ 9–11 червня 2021 р. наведено на рис. 10. Можна бачити, що 9 червня 2021 р.

в інтервалі часу 09:50–11:50 ПЕВ у середньому спадав від 11.5 до 9.5 TECU. На повільні варіації накладались квазіперіодичні зі змінним періодом $18 \div 32$ хв і амплітудою від 0.2 до 1.0 TECU. 11 червня 2021 р. також спостерігались сильні флуктуації ПЕВ. Мали місце квазіперіодичні варіації з періодом $5 \div 11$ хв і амплітудою $0.3 \div 0.4$ TECU.

10 червня 2021 р. упродовж СЗ спостерігалось зменшення ПЕВ від 10.6 до 7 TECU, а потім його повільне збільшення до $7.3 \div 7.5$ TECU. Квазіперіодичні коливання з періодом, який поступово змінювався від 5 до 18 хв, і амплітудою, що збільшувалася від 0.1 до 0.3 TECU, спостерігались від 11:03 до 11:50. При $\overline{N_{LV}} \approx 7.1 \div 7.5$ TECU віднос-

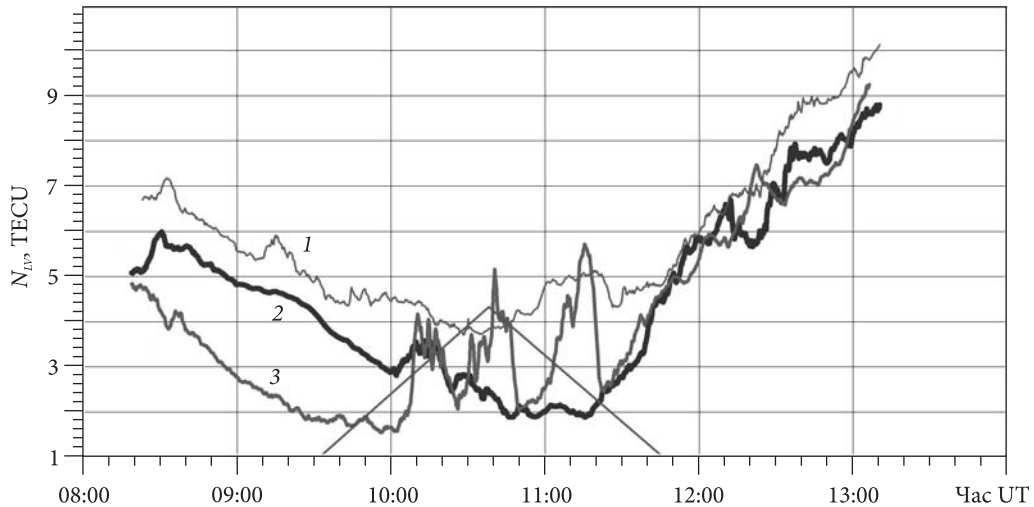


Рис. 12. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції KMOR (супутник G16) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

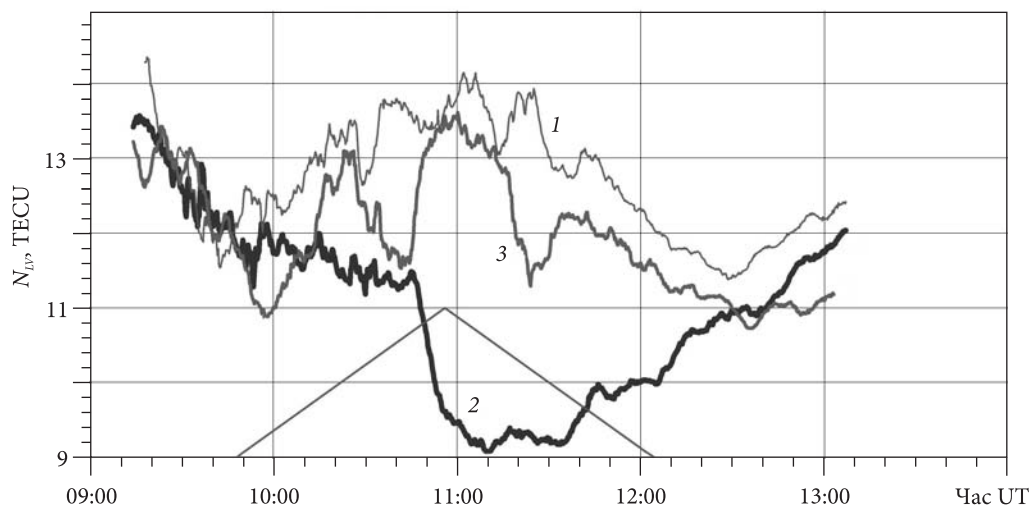


Рис. 13. Часові варіації ПЕВ, зареєстровані на станції HRDG (супутник G05) 9 червня 2021 р. (крива 1), 10 червня 2021 р. (крива 2), 11 червня 2021 р. (крива 3)

на амплітуда $\delta_{NL\alpha} \approx 1.4 \div 4.0 \%$. Час запізнювання τ становив близько 15 хв.

4.9. Станція SCBY. Супутник G18

Опишемо варіації ПЕВ в інтервалі часу 09:30–12:00 (рис. 11). 9 червня 2021 р. спостерігалось переважно зменшення ПЕВ від 13.0 до 10.0 TECU. Від 11:25 до 13:15 флуктуації ПЕВ посилювались. Квазіперіод становив $15 \div 25$ хв. 11 червня 2021 р. ПЕВ збільшувався від 9.5 до 10.5 TECU, а потім спадав до 10 TECU. 10 червня 2021 р. після початку затемнення ПЕВ стрімко зменшувався від

11.0 до 6.0 TECU приблизно від 09:35 до 10:48, а потім збільшувався до 9.0 TECU. Значення $\tau \approx 15$ хв.

4.10. Станція KMOR. Супутник G16

У контрольний день 9 червня 2021 р. в інтервалі часу 09:30–11:45 ПЕВ спадав від 5.0 до 3.7 TECU, а після 10:35, сильно флуктуючи, збільшувався до $4.3 \div 5.1$ TECU (рис. 12). 11 червня 2021 р. до 09:30 спостерігалось швидке зменшення ПЕВ від 5.0 до 1.7 TECU. В інтервалі часу 10:08–11:22 відмічались значні сплески ПЕВ на $2.3 \div 3.5$ TECU. У день затемнення після його початку ПЕВ змен-

Таблиця 4. Відомості про йоносферні ефекти СЗ 10 червня 2021 р.

Станція, супутник	Максимальне збурення, ΔN_{LV} , TECU	Середнє значення, \overline{N}_{LV} , TECU	Максимальне відносне збурення, $\Delta N_{LV} / \overline{N}_{LV}$, %	Час запізнювання, хв
IQAL, G16	-1.0	7.5	-13	12
SRMP, G20	-3.3	8.3	-40	-
ASKY, G04	-1.5	6.0	-25	10
DKSG, G16	-1.8	4.0	-45	17
MARG, G16	-5.1	7.0	-73	15
GLS3, G05	-3.0	9.4	-32	15
KAGZ, G05	-2.0	12.6	-16	35
EUR2, G20	-2.5	9.5	-26	15
SCBY, G18	-5.0	11.0	-45	5
KMOR, G16	-2.0	4.0	-50	23
HRDG, G05	-2.0	11.0	-18	15

шувався від 4.0 до 2.0 TECU, а потім зростав до 4.0 TECU. На повільні варіації ПЕВ накладались флуктуації з амплітудою від 0.2 до 0.5 TECU. Час запізнювання $\tau \approx 23$ хв.

4.11. Станція HRDG. Супутник G05

Розглянемо варіації ПЕВ в інтервалі часу 09:50—12:00 (рис. 13). 9 червня 2021 р. тренд ПЕВ спочатку збільшувався від 12.0 до 13.6 TECU, а після 11:00 спадав до 12.2 TECU. На повільні варіації ПЕВ накладались коливання з квазіперіодом $\sim 20 \div 25$ хв і амплітудою ~ 0.5 TECU. 11 червня 2021 р. ПЕВ спочатку зростав від 11.5 до 12.5 TECU, а потім зменшувався до 11.5 TECU. Спостерігалися потужні квазіперіодичні коливання зі змінним періодом $38 \div 45$ хв і амплітудою $0.5 \div 1.0$ TECU ($4 \div 8$ %).

Упродовж затемнення перші 60 хв тренд ПЕВ зменшувався незначно, а саме від 11.8 до 11.4 TECU. Приблизно о 10:45 він різко зменшився до 9.2 TECU. Протягом наступних 30 хв ПЕВ слабо змінювався, а після 11:35 та до 12:00 він збільшувався від 9.3 до 10.0 TECU. Час $\tau \approx 15$ хв.

5. Обговорення

Аналіз даних 11 станцій і 8 супутників показав, що невдовзі після початку затемнення значення ПЕВ в усіх спостереженнях зменшувались на $1.0 \div 5.1$ TECU, а в середньому на (2.7 ± 1.6) TECU (табл. 4). Приблизно через $60 \div 100$ хв ПЕВ почало зростати до початкового рівня або близько-

го до нього. Часто після закінчення затемнення ПЕВ продовжував збільшуватись. Максимальне відносне зменшення ПЕВ змінювалось у межах від -13 до -73 %, а в середньому на (35 ± 18) %. Такий значний розкид пов'язаний з мінливістю високоширотної іоносфери, а також із незначною різницею значень фази СЗ у місцях розташування станцій і вздовж траєкторій підіоносферних точок. Час запізнювання моменту спостереження мінімального значення ПЕВ відносно максимальної фази СЗ варіював від 5 до 35 хв, а в середньому становив (15.7 ± 6.8) хв. Приблизно такий же час запізнювання спостерігався за допомогою мережі йонозондів під час інших СЗ [2]. Значення τ визначається лінійним законом рекомбінації іонів у F-області іоносфери, а точніше — коефіцієнтом лінійної рекомбінації β , $\tau \approx \beta^{-1}$. Поблизу максимуму йонізації $\beta \approx 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ [60, 61], а значення $\tau \approx 16.7$ хв є дуже близьким до оцінки, що отримана в цій роботі, (15.7 ± 6.8) хв.

Окрім ефекту аперіодичного зменшення ПЕВ, упродовж затемнення на низці станцій спостерігались квазіперіодичні варіації ПЕВ зі змінним періодом, який варіював у широких межах: від 5 до 19 хв. Істотно варіювала й відносна амплітуда коливань: від одиниць до $10 \div 12$ %.

6. Головні результати

1. Ефекти СЗ чітко спостерігались на всіх 11 станціях і для всіх використовуваних супутників систе-

ми GPS. Установлено, що в середньому зменшення ПЕВ відстежувало зміну освітленості іоносфери. Протягом приблизно $60 \div 100$ хв ПЕВ зменшувався, досягаючи мінімуму, а потім повертався майже до вихідного значення. Максимальне зменшення ПЕВ складало $\sim 1.0 \div 5.1$ ТЕСУ, а в середньому становило (2.7 ± 1.6) ТЕСУ, або (35 ± 18) %.

2. Максимальне зменшення ПЕВ запізнювалось відносно максимального значення фази СЗ (освітленості іоносфери) на $5 \div 35$ хв, у середньому — на (15.7 ± 6.8) хв.

3. На низці реєстрацій часових залежностей ПЕВ спостерігались квазіперіодичні варіації з

періодом від 5 до 19 хв. Відносна амплітуда коливань ПЕВ становила $1 \div 12$ %.

Дослідження Л.Ф. Черногора та У. Лио було виконане в рамках проєкту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля—атмосфера—іоносфера»).

Роботу Л.Ф. Черногора та Ю.Б. Милованова було підтримано в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Eccles W.H. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. 1912. Vol. 69. P. 109—117.
2. Черногор Л.Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе*. Монография. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2013. 480 с.
3. Гоков А.М., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2000. Т. 5, № 4. С. 348—360.
4. Костров Л.С., Черногор Л.Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2000. Т. 5, № 4. С. 361—370.
5. Черногор Л.Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2000. Т. 5, № 4. С. 371—375.
6. Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2002. № 2. С. 25—63.
7. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Пуляев В.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года. *Космічна наука і технологія*. 2004. Т. 10, № 1. С. 12—25. DOI: 10.15407/knit2004.01.012.
8. Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния. *Геомagnetизм и аэрономія*. 2006. Т. 46, № 2. С. 193—208.
9. Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование. *Геомagnetизм и аэрономія*. 2006. Т. 46, № 2. С. 209—218.
10. Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2007. № 3. С. 38—53.
11. Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2007. Т. 13, № 6. С. 74—86. DOI: 10.15407/knit2007.06.074.
12. Акимов А.Л., Акимов Л.А., Черногор Л.Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 2. С. 117—134.
13. Григоренко Е.И., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. *Геомagnetизм и аэрономія*. 2008. Т. 48, № 3. С. 350—364.
14. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов. *Космічна наука і технологія*. 2008. Т. 14, № 1. С. 57—64. DOI: 10.15407/knit2008.01.057.
15. Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в приземной атмосфере. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44, № 4. С. 467—482.
16. Дзюбанов Д.А., Емельянов Л.Я., Черногор Л.Ф. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 3. С. 62—69. DOI: 10.15407/knit2009.03.062.
17. Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 3. С. 70—81. DOI: 10.15407/knit2009.03.070.

18. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты расчетов и обсуждение. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 4. С. 3—11. DOI: 10.15407/knit2009.04.003.
19. Емельянов Л.Я., Склярів І.Б., Черногор Л.Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 4. С. 12—21. DOI: 10.15407/knit2009.04.012.
20. Бурмака В.П., Черногор Л.Ф. Радиофизические наблюдения волновых возмущений в ионосфере в период частного солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2009. Т. 14, № 4. С. 390—402.
21. Черногор Л.Ф. Динамические процессы в приземной атмосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 1. С. 84—95.
22. Черногор Л.Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2010. Т. 50, № 3. С. 361—376.
23. Акимов А.Л., Черногор Л.Ф. Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008 г. в приземной атмосфере. *Кинематика и физика небесных тел*. 2010. Т. 26, № 3. С. 58—74.
24. Гармаш К.П., Леус С.Г., Черногор Л.Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2011. Т. 16, № 2. С. 164—176.
25. Chernogor L.F. The Earth—atmosphere—geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.* 2011. Vol. 32, Iss. 11. P. 3199—3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510.
26. Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 4. С. 41—52. DOI: 10.15407/knit2011.04.041.
27. Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., and Lyashenko M.V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *Int. J. Remote Sens.* 2011. Vol. 32, Iss. 11. P. 3219—3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509.
28. Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Черногор Л.Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2012. Т. 17, № 2. С. 132—145.
29. Бурмака В.П., Домнин И.Ф., Черногор Л.Ф. Радиофизические наблюдения акустико-гравитационных волн в ионосфере во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2012. Т. 17, № 4. С. 344—352.
30. Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012. Т. 52, № 6. С. 807—817.
31. Черногор Л.Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный анализ. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012. Т. 52, № 6. С. 818—831.
32. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 3. Результаты расчетов и обсуждение. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53, № 3. С. 384—393.
33. Бурмака В.П., Черногор Л.Ф. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты наблюдений волновых возмущений в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53, № 4. С. 509—521.
34. Черногор Л.Ф. Физические процессы в средней ионосфере, сопровождавшие солнечное затмение в Харькове 4 января 2011 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53, № 1. С. 22—34.
35. Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Котов Д.В., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений методом некогерентного рассеяния. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53, № 1. С. 119—129.
36. Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Частное затмение Солнца 4 января 2011 г. над Харьковом: Результаты наблюдений и моделирования. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54, № 5. С. 627—637.
37. Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2015. Т. 20, № 4. С. 311—331. DOI: 10.15407/rpra20.04.311.
38. Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферный отклик на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. Т. 56, № 5. С. 627—638.
39. Черногор Л.Ф., Гармаш К.П. Магнито-ионосферные эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017. Т. 57, № 1. С. 79—90.
40. Coster A.J., Goncharenko L., Zhang S.-R., Erickson P.J., Rideout W., and Vierinen J. GNSS Observations of Ionospheric Variations During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, Iss. 24. P. 12041—12048. DOI: 10.1002/2017GL075774.
41. Chernogor L.F., Domnin I.F., Emelyanov L.Ya., and Lyashenko M.V. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. Vol. 182. P. 1—9. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.016.
42. Panasenko S.V., Otsuka Y., van de Kamp M., Chernogor L.F., Shinbori A., Tsugawa T., and Nishioka M. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. Vol. 191. id. 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015.
43. Черногор Л.Ф., Милованов Ю.Б. Ионосферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2020. Т. 36, № 6. С. 37—64. DOI: 10.15407/kfnt2020.06.037.
44. Guo Q., Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T. and Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 2020. Vol. 55, Iss. 2. id. e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866.
45. Черногор Л.Ф. Тепловий ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в приземній атмосфері. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. Т. 37, № 6. С. 34—48. DOI: 10.15407/kfnt2021.06.003.

46. Черногор Л.Ф. Эффект конвекции в приземной атмосфере протягом сонячних затемнень 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. Т. 37, № 6. С. 19–33. DOI: 10.15407/kfnt2021.06.003.
47. Черногор Л.Ф. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022. Т. 38, № 1. С. 16–34. DOI: 10.15407/kfnt2022.01.016.
48. Черногор Л.Ф., Голуб М.Ю., Луо У., Цимбал А.М., Шевелев М.Б. Варіації геомагнітного поля, що супроводжували сонячне затемнення 10 червня 2021 р. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка*. 2021. Т. 34. С. 55–69.
49. Черногор Л.Ф., Гармаш К.П. Іоносферні процеси протягом часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2022 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. Т. 38, № 2. С. 3–22. DOI: 10.15407/kfnt2022.02.003.
50. Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Жданко Є.Г., Леус С.Г., Луо У. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 4. С. 326–343. DOI: 10.15407/rpa26.04.326.
51. Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. *Фізика геокоосмічних бурь*. Монографія. Харьков: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2014. 408 с.
52. Черногор Л.Ф. Фізика геокоосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2021. Т. 27, № 1. С. 3–77. DOI: 10.15407/knit2021.01.003.
53. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НЦ ПВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
54. NASA. *GNSS Differential Code Bias Product*. URL: <ftp://cdis.nasa.gov/gnss/products/bias/> (дата звернення: 15.09.2021).
55. International GNSS Service. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.02*. URL: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf> (дата звернення: 15.09.2021).
56. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., and Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *J. Geod.* 2016. Vol. 90, Iss. 3. P. 209–228. DOI: 10.1007/s00190-015-0867-4.
57. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice*. Wien, New York: Springer-Verlag, 1994. 356 p.
58. Universität Bern Astronomisches Institut. *Satellite geodesy. CODE Products*. URL: <ftp.aiub.unibe.ch/CODE/> (дата звернення: 15.09.2021).
59. Espenak F. *Annular Solar Eclipse of 2021 Jun 10*. URL: <http://www.eclipsewise.com/solar/SEprime/2001-2100/SE2021Jun10Aprime.html> (дата звернення: 15.09.2021).
60. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Фізика іоносфери*. Москва: Наука, 1987. 5278 с.
61. Schunk R.W. and Nagy A.F. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 554 p.

Стаття надійшла 29.09.2021

REFERENCES

1. Eccles, W.H., 1912. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*, **69**, pp. 109–117.
2. Chernogor, L.F., 2013. *Physical effects of solar eclipses in the atmosphere and geospace*. Kharkiv, Ukraine: V.N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
3. Gokov, A.M. and Chernogor, L.F., 2000. Processes in the Lower Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.*, **5**(4), pp. 348–360 (in Russian).
4. Kostrov, L.S. and Chernogor, L.F., 2000. Processes in the Bottomside Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.*, **5**(4), pp. 361–370 (in Russian).
5. Chernogor, L.F., 2000. Magnetosphere Electron Precipitation Induced by a Solar Eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.*, **5**(4), pp. 371–375 (in Russian).
6. Akimov, L.A., Grigorenko, E.I., Taran, V.I., Tyrnov, O.F. and Chernogor, L.F., 2002. Integrated radio physical and optical studies of dynamic processes in the atmosphere and geospace caused by the solar eclipse of August 11, 1999. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, **2**, pp. 25–63 (in Russian).
7. Grigorenko, Ye.I., Pazura, S.A., Puliaiev, V.A., Taran, V.I. and Chernogor, L.F., 2004. Dynamic processes in the ionosphere during the geospace storm on 30 May and Solar eclipse on 31 May 2003. *Space Sci. Technol.*, **10**(1), pp. 12–25 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2004.01.012.
8. Burmaka, V.P., Taran, V.I. and Chernogor, L.F., 2006. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations. *Geomagn. Aeron.*, **46**(2), pp. 183–198. DOI: 10.1134/S0016793206020071.
9. Burmaka, V.P., Taran, V.I. and Chernogor, L.F., 2006. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation. *Geomagn. Aeron.*, **46**(2), pp. 199–208. DOI: 10.1134/S0016793206020083.
10. Burmaka, V.P., Grigorenko, Ye.I., Emel'yanov, L.Ya., Lysenko, V.N., Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2007. Radar observations of effects in geospace caused by a partial solar eclipse on 29 March 2006. *Uspekhi Sovremennoi Radioelektroniki*, **3**, pp. 38–53 (in Russian).
11. Burmaka, V.P., Lysenko, V.N., Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2007. Tropospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 1. Observations. *Space Sci. Technol.*, **13**(6), pp. 74–86 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2007.06.074.

12. Akimov, A.L., Akimov, L.A. and Chernogor, L.F., 2007. Turbulence Parameters in the Atmosphere Associated with Solar Eclipses. *Radio Phys. Radio Astron.*, **12**(2), pp. 117–134 (in Russian).
13. Grigorenko, E.I., Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2008. Effects of the solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagn. Aeron.*, **48**(3), pp. 337–351. DOI: 10.1134/S0016793208030092.
14. Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2008. Atmospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 2. Modeling and discussion. *Space Sci. Technol.*, **14**(1), pp. 57–64 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2008.01.057.
15. Chernogor, L.F., 2008. Effects of solar eclipses in the surface atmosphere. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **44**(4), pp. 432–447. DOI: 10.1134/S000143380804004X.
16. Dzyubyanov, D.A., Emelyanov, L.Ya. and Chernogor, L.F., 2009. Plasma dynamics of the ionosphere above Kharkiv during the solar eclipse of 1 August 2008. *Space Sci. Technol.*, **15**(3), pp. 62–69 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2009.03.062.
17. Emelyanov, L.Ya., Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2009. Some effects in the geospace plasma during partial Solar eclipse of 1 August 2008 above Kharkiv. 1. The observation results. *Space Sci. Technol.*, **15**(3), pp. 70–81 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2009.03.070.
18. Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2009. Some effects in the geospace plasma during the partial Solar eclipse of 1 August 2008 above Kharkov. 2. Calculation results and discussion. *Space Sci. Technol.*, **15**(4), pp. 3–11 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2009.04.003
19. Emelyanov, L.Ya., Sklyarov, I.B. and Chernogor, L.F., 2009. Ionosphere response to the solar eclipse on 1 August 2008: Some results of vertical sounding. *Space Sci. Technol.*, **15**(4), pp. 12–21 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2009.04.012.
20. Burmaka, V.P. and Chernogor, L.F., 2009. Wave Disturbance Radio Observations in the Ionosphere Associated with the August 1, 2008 Partial Eclipse. *Radio Phys. Radio Astron.*, **14**(4), pp. 390–402 (in Russian).
21. Chernogor, L.F., 2011. Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **47**(1), pp. 77–86. DOI: 10.1134/S000143381101004X.
22. Chernogor, L.F., 2010. Wave response of the ionosphere to the partial solar eclipse of August 1, 2008. *Geomagn. Aeron.*, **50**(3), pp. 346–361. DOI: 10.1134/S0016793210030096.
23. Akimov, A.L. and Chernogor, L.F., 2010. Effects of the solar eclipse of August 1, 2008, on the Earth's lower atmosphere. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, **26**(3), pp. 135–145. DOI: 10.3103/S0884591310030050.
24. Garmash, K.P., Leus, S.G., and Chernogor, L.F., 2011. January 4, 2011 Solar Eclipse Effects over Radio Circuits at Oblique Incidence. *Radio Phys. Radio Astron.*, **16**(2), pp. 164–176 (in Russian).
25. Chernogor, L.F., 2011. The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote. Sens.*, **32**(11), pp. 3199–3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
26. Chernogor, L.F. and Barabash, V.V., 2011. The response of the middle ionosphere to the solar eclipse of 4 January 2011 in Kharkiv: some results of vertical sounding. *Space Sci. Tech.*, **17**(4), pp. 41–52 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2011.04.041.
27. Chernogor, L.F., Grigorenko, Ye.I. and Lyashenko, M.V., 2011. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *Int. J. Remote. Sens.*, **32**(11), pp. 3219–3229. DOI: 10.1080/01431161.2010.541509.
28. Domnin, I.F., Emelyanov, L.Ya. and Chernogor, L.F., 2012. The Dynamics of Ionosphere Plasma over Kharkiv during the Solar Eclipse of January 4, 2011. *Radio Phys. Radio Astron.*, **17**(2), pp. 132–145 (in Russian).
29. Burmaka, V.P., Domnin, I.F. and Chernogor, L.F., 2012. Radiophysical Observations of Acoustic-Gravity Waves in the Ionosphere during Solar Eclipse of January 4, 2011. *Radio Phys. Radio Astron.*, **17**(4), pp. 344–352 (in Russian).
30. Chernogor, L.F., 2012. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagn. Aeron.*, **52**(6), pp. 768–778. DOI: 10.1134/S0016793212050039.
31. Chernogor, L.F., 2012. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomagn. Aeron.*, **52**(6), pp. 779–792. DOI: 10.1134/S0016793212050040.
32. Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagn. Aeron.*, **53**(3), pp. 367–376. DOI: 10.1134/S0016793213020096.
33. Burmaka, V.P. and Chernogor, L.F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagn. Aeron.*, **53**(4), pp. 479–491. DOI: 10.1134/S001679321304004X.
34. Chernogor, L.F., 2013. Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagn. Aeron.*, **53**(1), pp. 19–31. DOI: 10.1134/S0016793213010052.
35. Domnin, I.F., Yemel'yanov, L.Ya., Kotov, D.V., Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2013. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagn. Aeron.*, **53**(1), pp. 113–123. DOI: 10.1134/S0016793213010076.
36. Domnin, I.F., Yemel'yanov, L.Ya., Lyashenko, M.V. and Chernogor, L.F., 2014. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. *Geomagn. Aeron.*, **54**(5), pp. 583–592. DOI: 10.1134/S0016793214040112.
37. Chernogor, L.F. and Barabash, V.V., 2015. The Effects of Solar Eclipse of March 20, 2015 over Ionosphere of Europe: Ionosonde Observations. *Radio Phys. Radio Astron.*, **20**(4), pp. 311–331 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra20.04.311.
38. Chernogor, L.F., 2016. Atmosphere–ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomagn. Aeron.*, **56**(5), pp. 592–603. DOI: 10.1134/S0016793216050030.
39. Chernogor, L.F. and Garmash, K.P., 2017. Magneto-ionospheric effects of the solar eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomagn. Aeron.*, **57**(1), pp. 72–83. DOI: 10.1134/S0016793216060062.
40. Coster, A.J., Goncharenko, L., Zhang, S.-R., Erickson, P.J., Rideout, W. and Vierinen, J., 2017. GNSS Observations of Ionospheric Variations During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.*, **44**(24), pp. 12041–12048. DOI: 10.1002/2017GL075774.

41. Chernogor, L.F., Domnin, I.F., Emelyanov L.Ya. and Lyashenko, M.V., 2019. Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6° N, 36.3° E). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **182**, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.016.
42. Panasenko, S.V., Otsuka, Y., van de Kamp, M., Chernogor, L.F., Shinbori, A., Tsugawa, T. and Nishioka, M., 2019. Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **191**, id. 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015.
43. Chernogor, L.F. and Mylovanov, Yu.B., 2020. Ionospheric Effects of the August 11, 2018, Solar Eclipse over the People's Republic of China. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, **36**(6), pp. 274–290. DOI: 10.3103/S0884591320060021.
44. Guo, Q., Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Rozumenko, V.T. and Zheng, Y., 2020. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.*, **55**(2), id. e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866.
45. Chernogor, L.F., 2021. Thermal Effect in Surface Atmosphere of the Solar Eclipse on June, 10, 2021. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, **37**(6), pp. 293–299. DOI: 10.3103/S0884591321060040.
46. Chernogor, L.F., 2021. Convection Effect in the Surface Atmosphere of Solar Eclipses of March 20, 2015, and June 10, 2021. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, **37**(6), pp. 284–292. DOI: 10.3103/S0884591321060039.
47. Chernogor, L.F., 2022. Geomagnetic effect of the solar eclipse on June 10, 2022. *Kinematika i fizika nebesnykh tel*, **38**(1), pp. 16–34 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/kfnt2022.01.016.
48. Chernogor, L.F., Holub, M. Yu., Luo, Y., Tsymbal, A.M. and Shevelev, M.B., 2021. Variations in the Geomagnetic Field That Accompanied the 10 June 2021 Solar Eclipse. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. "Radio Physics and Electronics"*, **34**, pp. 55–69 (in Ukrainian).
49. Chernogor, L.F. and Garmash, K.P., 2022. Ionospheric Processes During the 10 June 2021 Partial Solar Eclipse at Kharkiv. *Kinematika i fizika nebesnykh tel*, **38**(2), pp. 3–22 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/kfnt2022.02.003.
50. Chernogor, L.F., Garmash, K.P., Zhdanko, Y.H., Leus, S.G. and Luo, Y., 2021. Features of Ionospheric Effects from the Partial Solar Eclipse over the City of Kharkiv on 10 June 2021. *Radio Phys. Radio Astron.*, **26**(4), pp. 326–343 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.04.326.
51. Chernogor, L.F. and Domnin, I.F., 2014. *Physics of Geospace Storms*. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv V.N. Karazin National University Publ. (in Russian).
52. Chernogor, L.F., 2021. Physics of geospace storms. *Space Sci. Technol.*, **27**(1), pp. 3–77 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/knit2021.01.003
53. Afraimovich, E.L. and Perevalova, N.P., 2006. *GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere*. Irkutsk: SI SC RRS ESSC SD RAMS Publ. (in Russian).
54. NASA., 2021. *GNSS Differential Code Bias Product* [online]. [viewed 15 Sept. 2021]. Available at: <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/bias/>.
55. International GNSS service, 2013. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.02* [online]. [viewed 15 Sept. 2021]. Available from: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf>.
56. Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., Montenbruck, O. and Tan, B., 2016. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *J. Geod.*, **90**(3), pp. 209–228. DOI 10.1007/s00190-015-0867-4.
57. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 1994. *Global Positioning System. Theory and Practice*. Wien, New York: Springer-Verlag.
58. Universität Bern Astronomical Institute, 2021. *Satellite geodesy. CODE Products* [online]. [viewed 15 Sept. 2021]. Available at: <ftp.aiub.unibe.ch/CODE>.
59. Espenak, F., 2021. *Annular Solar Eclipse of 2021 Jun 10* [online]. [viewed 15 Sept. 2021]. Available at: <http://www.eclipsewise.com/solar/SEprime/2001-2100/SE2021Jun10Aprime.html>.
60. Bryunelli, B.E. and Namgaladze, A.A., 1988. *Physics of the ionosphere*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
61. Schunk, R.W. and Nagy, A.F., 2000. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.

Received 29.09.2021

L.F. Chernogor, Yu.B. Mylovanov, and Y. Luo

V.N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

EFFECTS FROM THE JUNE 10, 2021 SOLAR
ECLIPSE IN THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE:
RESULTS OF GPS OBSERVATIONS

Subject and Purpose. The unique natural phenomena which solar eclipses are can activate coupling between the subsystems of the Earth—atmosphere—ionosphere—magnetosphere system. Following an eclipse, disturbances may get induced in all the subsystems and their associated geophysical fields. It is important that a subsystem's response does not depend on the phase of the eclipse alone, but also on the state of space weather and the observation site coordinates. The majority of solar eclipses occur at middle and low latitudes. The maximum phase of the June 10, 2021 annular eclipse was observed at high latitudes, including the North Pole. The high-latitude ionosphere is fundamentally different from the mid- and low-latitude ionosphere as it stays in a metastable state, such that any impact may be capable of activating subsystem coupling. The relevance of this study is conditioned by the diversity of the solar eclipse effects in the high-latitude ionosphere. The purpose of this work is to present observational results concerning variations in the total electron content (TEC) in the high-latitude ionosphere in the course of the June 10, 2021 solar eclipse.

Methods and Methodology. An array of eleven terrestrial GPS receive stations and eight GPS satellites were used for the observations.

Results. The effects from the solar eclipse were distinctly observable at all eleven reception sites and from all the eight satellites. On the average, i.e. with random fluctuations neglected, changes in illumination at ionospheric heights were followed by decreases in the TEC. All of the observation records demonstrated a decrease in the TEC at the early stage of the eclipse. Some 60 to 100 min later the TEC attained a minimum and then returned to virtually the initial value. The lowest observed magnitude of the TEC was 1.0–5.1 TEC units, while, on the average, it was found to be 2.7 ± 1.6 TEC units, or $35 \pm 18\%$. The greatest decrease in the TEC lagged behind the maximum phase of the solar eclipse (lowest illumination at the heights of the ionosphere) by 5–30 min, or 15.7 ± 6.8 min on the average. A few TEC records obtained at different stations showed quasi-periodic variations with the periods ranging from 5 to 19 min and amplitudes of 1 to 12%.

Conclusions. The annular eclipse of June 10, 2021 acted to significantly disturb the high-latitude ionosphere where aperiodic and quasi-periodic disturbances of the TEC took place.

Keywords: high-latitude ionosphere, solar eclipse, total electron content, GPS receiver, GPS satellite, TEC reduction, quasi-periodic disturbance, disturbance time lag.