

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.04.029>

УДК 550.388.2

**Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4, м. Харків, Україна  
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

### **Іоносферні ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. у Заполяр'ї**

*Сонячні затемнення (СЗ) викликають цілий комплекс процесів у всіх геосферах. У іоносфері має місце зменшення концентрації електронів, температури електронів, іонів і нейтралів; істотно змінюється динаміка іоносферної плазми, генеруються хвильові збурення, активується взаємодія підсистем у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Доведено, що ефекти СЗ залежать від фази сонячного затемнення, географічних координат, часу доби, пори року, стану атмосферної та космічної погоди, положення в циклі сонячної активності та інших факторів. Окрім повторюваних чи регулярних ефектів, виникають ефекти, властиві саме цьому СЗ. З цієї причини вивчення фізичних процесів у всіх геооболонках, викликаних СЗ, є актуальною міждисциплінарною задачею. Метою даної роботи є виклад результатів спостереження й аналізу часових збурень вертикального повного електронного вмісту (ПЕВ) у Заполяр'ї. Дані, використані в цьому дослідженні, включають параметри сигналів, що приймаються мережею станцій від навігаційних супутників, які проходять над областю тіні Місяця, де фаза СЗ становила приблизно  $0.9$  у діапазоні широт  $70...80^\circ$  пн. ш. Кільцеподібне сонячне затемнення 10 червня 2021 р. розпочалось о 08:12:20 UT та закінчилось о 13:11:19 UT. Спочатку тінь від СЗ з'явилась над Канадою, далі вона рухалась через Гренландію, Північний Льодовитий океан, Північний полюс і острів Нова Сибір. Тінь від СЗ покривала північну частину Російської Федерації. Часткове СЗ відмічалось у північній і середній частинах Європи, більшій частині Російської Федерації, в Монголії та Китаї. З використанням 11 наземних станцій, які приймали сигнали GPS восьми ШСЗ, вивчено просторово-часові варіації ПЕВ при максимальному покритті диска Сонця, яке спостерігалось у Запо-*

ляр'ї, та встановлено таке. Зменшення електронної концентрації для кожної станції та для кожного супутника відмічалось практично відразу ж після початку СЗ і тривало близько 60...100 хв. Далі реєструвалося мінімальне значення ПЕВ, після чого наступало його збільшення до початкового або більшого значення. Середнє значення ПЕВ дорівнювало 5.2...10.4 TECU. У середньому зменшення ПЕВ становило 2.3–0.6 TECU від рівня 8.4–1.6 TECU. У відносних одиницях зменшення варіювало у межах –16.5...–46 % (середнє значення 30–9.7 %. Визначено час запізнення моменту настання мінімального значення ПЕВ відносно моменту максимальної фази СЗ. Він змінювався у межах 5–30 хв (середнє значення 18.3–8.5 хв). У низці випадків протягом СЗ спостерігались квазіперіодичні варіації ПЕВ із періодом 9–15 хв і відносною амплітудою 3–5 %.

**Ключові слова:** іоносфера, сонячне затемнення, повний електронний вміст, аперіодичне збурення, квазіперіодичне збурення, параметри збурення.

## ВСТУП

Ефекти сонячних затемнень (СЗ) вивчаються понад століття [41]. Встановлено, що сонячні затемнення супроводжуються цілим комплексом фізичних процесів у всіх геосферах. У іоносфері має місце зменшення концентрації електронів, температури електронів, іонів і нейтралів, істотно змінюється динаміка іоносферної плазми, генеруються хвильові збурення, активується взаємодія підсистем у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера [10]. Доведено, що ефекти СЗ залежать від фази затемнення, географічних координат, часу доби, пори року, стану атмосферної та космічної погоди, положення в циклі сонячної активності та інших факторів. Окрім повторюваних або регулярних ефектів виникають ефекти, властиві саме цьому СЗ. З цієї причини вивчення фізичних процесів у всіх геоболонках, викликаних СЗ, є актуальною міждисциплінарною задачею. Для досліджень іоносферних ефектів застосовується весь арсенал методів [1, 3, 4, 7, 9—35, 37—40, 44, 45, 47—52, 54, 55, 57, 58, 61—64, 66].

Затемненню 10 червня 2021 р. присвячено лише окремі роботи [9—12, 14, 15]. У роботі [11] описано тепловий ефект затемнення в приземній атмосфері над м. Харків. Показано, що через незначну фазу ( $M = 0.11$ ) зменшення температури приземного шару атмосфери становило близько 1 °С. У роботі [10] проведено порівняння ефектів конвекції та турбулентності у приземній атмосфері для двох затемнень. У роботах [9, 15] вивчено супутні затемненню варіації головного магнітного поля в інтервалі географічних широт 48–77 пн. ш., для яких фаза СЗ змінювалась у межах 0.1–0.94. Як і слід було очікувати, найбільший ефект спостерігався в Заполяр'ї, де мала місце найбільша

фаза затемнення. У роботах [12, 14] описано іоносферні ефекти СЗ 10 червня 2021 р., зареєстровані поблизу м. Харків.

Метою даної роботи є виклад результатів спостереження й аналіз часових збурень вертикального повного електронного вмісту (ПЕВ) в Заполяр'ї. Для цього використовувались результати вимірювань на низці радіоприймальних пунктів параметрів сигналів навігаційних супутників, які пролітали над областю тіні з  $M = 0.9$  на високих широтах (70...80 пн. ш.).

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ

Сонячне затемнення 10 червня 2021 р. — кільцеподібне [42]. Воно розпочалось 10 червня 2021 р. о 08:12:20 UT (тут і далі час всесвітній), а закінчилось о 13:11:19 UT. Спочатку тінь від СЗ з'явилась над Канадою, далі вона рухалась через Гренландію, Північний Льодовитий океан, Північний полюс Землі, острів Нова Сибір. Тінь від СЗ покривала північну частину Російської Федерації. Часткове СЗ відмічались у північній і середній частинах Європи, більшій частині Російської Федерації, в Монголії та Китаї.

### СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Для виявлення ефектів СЗ в іоносфері принциповим є знання стану іоносфери, яке визначається космічною погодою. Стан космічної погоди встановлено за даними сайту [65].

7 червня 2021 р. у 5...6 разів збільшилась концентрація частинок у сонячному вітрі. Швидкість протонів сонячного походження збільшилась приблизно в 1.5 раза наприкінці доби 7 червня та на початку доби 8 червня 2021 р.; 9...11 червня 2021 р. вона, як і концентрація частинок, практично повернулася до незбуреного стану. У кінці доби 7 червня 2021 р. спостерігалось різке (до 20...22 разів) збільшення температури протонів у сонячному вітрі.

7 червня 2021 р. спостерігались значні (до 5 нТл) варіації  $B_y$ - і  $B_z$ -складових міжпланетного магнітного поля. Потужність енергії сонячного вітру, яка потрапляла до магнітосфери Землі, при цьому збільшилась на порядок. У кінці доби 7 червня 2021 р.  $K_p$ -індекс збільшився до 3...4, що характеризувало слабку магнітну бурю. Буря розпочалась 9 червня 2021 р., її головна фаза відзначалась вночі 10 червня 2021 р, а її релаксація тривала 10 і 11 червня 2021 р. Значення  $D_{st}$ -індексу зменшувалось до мінімального рівня -33 нТл.

Слабка магнітна буря супроводжувалась незначним збуренням іоносфери. Це дозволило надійно виділити ефекти СЗ. Додамо, що за контрольні вибрано сусідні дні 9 і 11 червня 2021 р.

## ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для розв'язання задачі виявлення відгуку іоносфери на кільцеподібне сонячне затемнення 10 червня 2021 р. оброблялись реєстрації сигналів глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС). Перелік станцій спостереження, які перебували поблизу траєкторії руху місячної тіні земною поверхнею, наведено у табл. 1. Як видно, практично всі станції (окрім однієї) розміщені в Заполярній області.

Лінію руху місячної тіні Землею та розташування станцій спостереження показано на рис. 1. Рух центра місячної тіні відмічався позначками часу з кроком 5 хв. Бічні лінії місячної тіні є північним і південним краями центральної траєкторії тіньової або антумбральної тіні. У інтервалі часу спостереження затемнення 09:00—11:00 UT оброблялись сигнали від ГНСС поточного групування супутників G04, G05, G07, G09, G16, G18, G20, G27.

Таблиця 1. Перелік використовуваних станцій

№	Станція			Країна
1	IQAL	63.60	-68.51	Канада
2	SRMP	72.91	-54.39	Гренландія
3	ASKY	75.72	-58.25	Гренландія
4	DKSG	76.35	-61.67	Гренландія
5	MARG	77.19	-65.69	Гренландія
6	GLS3	77.43	-51.11	Гренландія
7	KAGZ	79.13	-65.85	Гренландія
8	EUR2	79.92	-85.94	Канада
9	SCBY	80.26	-59.59	Гренландія
10	KMOR	81.25	-63.53	Гренландія
11	HRDG	81.87	-44.52	Гренландія

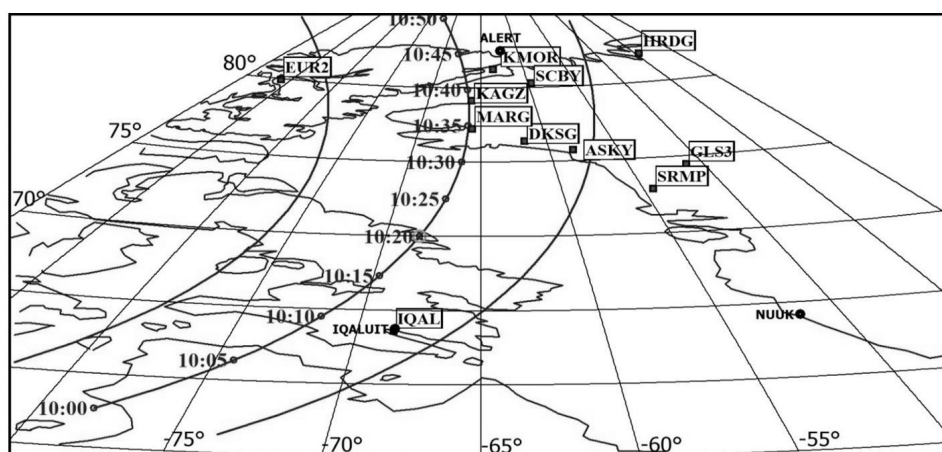


Рис. 1. Карта півночі Канади та частини Гренландії з місячним слідом і використовуваними станціями приймання сигналів ГНСС. Час 10 червня 2021 р. 10:00...10:50 UT

Максимум концентрації електронів відносимо до  $F_2$ -шару іоносфери на висоті 350 км. Радіопромінь із супутника перетинає  $F_2$ -шар іоносфери в точці, яка іменується іоносферною. Проекція іоносферної точки на поверхню Землі задає підіоносферну точку. Траєкторії підіоносферних точок назвемо прольотами, а траєкторію тіні Місяця — місячним слідом.

У двочастотному приймачі за отриманими псевдодальностями оцінюється іоносферна затримка сигналу та розраховується значення вертикального ПЕВ. Значення ПЕВ вимірюється в одиницях TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ) [1].

Похибки оцінки ПЕВ зумовлені похибками розрахунку координат супутника, похибками вимірювань псевдодальностей із урахуванням двочастотного прийому. Координати навігаційних супутників розраховуються з достатньо високою точністю. Псевдодальності за кодом і фазою містять іоносферну затримку, випадкові та систематичні похибки.

Розрахунки [16] показують, що для оцінки іоносферних збурень точність координат супутника та відповідно підіоносферних точок є достатньою при опублікуванні навігаційних даних не рідше, ніж один раз на добу. Вимірювання фази в системі GPS виконуються з достатньо високою точністю та похибка в визначенні ПЕВ при 30-секундних інтервалах усереднення не перевищує  $10^{14} \text{ м}^{-2}$  (0.01 TECU) [1].

Головну систематичну похибку в оцінці ПЕВ двочастотним приймачем вносить зміщення часу між двома спостереженнями коду ГНСС на різних частотах. Для компенсації даної похибки використовують поправки DCB (Differential Code Biases).

Значення  $\text{DCB}^T$  для супутників і  $\text{DCB}^R$  деяких станцій представлено в базах CDDIS і IGN [36]. Інститут геодезії та геофізики (IGG) Китайської академії наук (CAS) у м. Ухань і Deutsche Forschungsanstalt für Luftung Raumfahrt (DLR) в Німеччині, надають значення  $\text{DCB}^T$  і  $\text{DCB}^R$  із затримкою у 2...3 дні в щоденних файлах BSX [36]. Похибка визначення  $\text{DCB}^R$  зазвичай не перевищує 0.05 нс, що для частот GPS відповідає приблизно 0.14 TECU. Для супутників GPS (Global Positioning System, США) несучі частоти дорівнюють  $f_1 = 1575.42 \text{ МГц}$  і  $f_2 = 1227.60 \text{ МГц}$  [59].

Часові зміни значень  $\text{DCB}^R$  за рахунок даної систематичної похибки припускають наявність випадкового шуму, який, вочевидь, має зовнішні джерела. Розрахунки показують, що зовнішні джерела шуму повільно змінюються протягом декількох днів. У цьому випадку накопичення змін  $\text{DCB}^R$  за добу носить безперервний характер, і середня добова похибка  $\text{DCB}^R$  становить не більше, ніж 0.03 TECU за годину [16]. Якщо похибка  $\text{DCB}^R$  для конкретної станції відсутня, то користувач визначає поправку самостійно.

Для відображення місцезрештування супутників і відповідно точок вимірювання ПЕВ у  $F_2$ -шарі іоносфери на географічній карті будувались часові послідовності підіоносферних точок відносно станції

**Таблиця 2.** Географічні координати підіоносферної точки супутника в момент максимального зближення центра місячної тіні (станція EUR2)

№	Супутник	Час	Широта	Довгота	Відстань, км
1	G04	10:26	72 44	-88 53	719
2	G05	10:53	85 11	-102 24	222
3	G09	10:36	76 26	-97 14	779
4	G07	10:46	77 55	-106 40	862
5	G16	10:37	77 59	-76 42	247
6	G18	10:43	80 25	-43 2	440
7	G20	10:53	85 37	-98 19	160
8	G27	10:11	64 40	-70 4	71

(прольоти). Приклади таких карт із прольотами супутників відносно максимально рознесених станцій EUR2, HRDG, IQAL і SRMP для 10 червня 2021 р. наведено на рис. 2.

Для порівняльного аналізу обирався розрахунковий інтервал часу 09:00...11:00 UT. На рисунках кожний проліт супроводжується назвою супутника, часом початку радіобачення або розрахункового періоду. На лінії прольоту нанесено шкалу часу з кроком 10 хв (короткі риси) та 1 год (довгі риси) та відміткою контрольного положення супутника на момент часу 10:20 UT у вигляді кола. Відображено лише ті супутники поточного групування, підіоносферні точки яких лежать поблизу траєкторії місячної тіні. Початок прольоту відмічено невеликим колом, і в рамці вказано номер супутника та час початку радіобачення або розрахункового періоду.

Максимальний ефект від місячної тіні очікувався при зближенні підіоносферної точки супутника та центра місячної тіні. Як приклад для станції EUR2 та супутників поточного групування параметри максимального зближення наведено в табл. 2. Момент часу максимального зближення центра місячної тіні та підіоносферної точки використовується для вказання області пошуку ефекту від СЗ.

Для оцінки іоносферної затримки та ПЕВ оброблялись часові послідовності C1C, L1C, C2W і L2W [59]. Часові затримки проходження сигналів у двох радіоканалах зумовлюють систематичні та випадкові похибки у вимірюваних псевдодальностях. Для отримання й аналізу ПЕВ та компенсації систематичної похибки використовувались поправки DCB. Ці поправки регулярно розраховуються для пар кодових псевдодальностей за кожним супутником і кожним приймачем [64]. Для розрахунку ПЕВ використовувалась методика, описана в роботах [12, 46]. Для супутників GPS відповідні значення DCB<sup>T</sup> можна знайти у базах [36]. Поправки DCB<sup>R</sup> для станцій, розташованих у Гренландії, відсутні. Для оцінки поправок DCB<sup>R</sup> цих станцій обрано день 9 червня 2021 р. Використовувались дані супутникових вимірювань і карта глобального розподілу ПЕВ [60]. Порівнювались дві часові послідовності ПЕВ: із глобальної карти та розрахункової для обраних супутників із

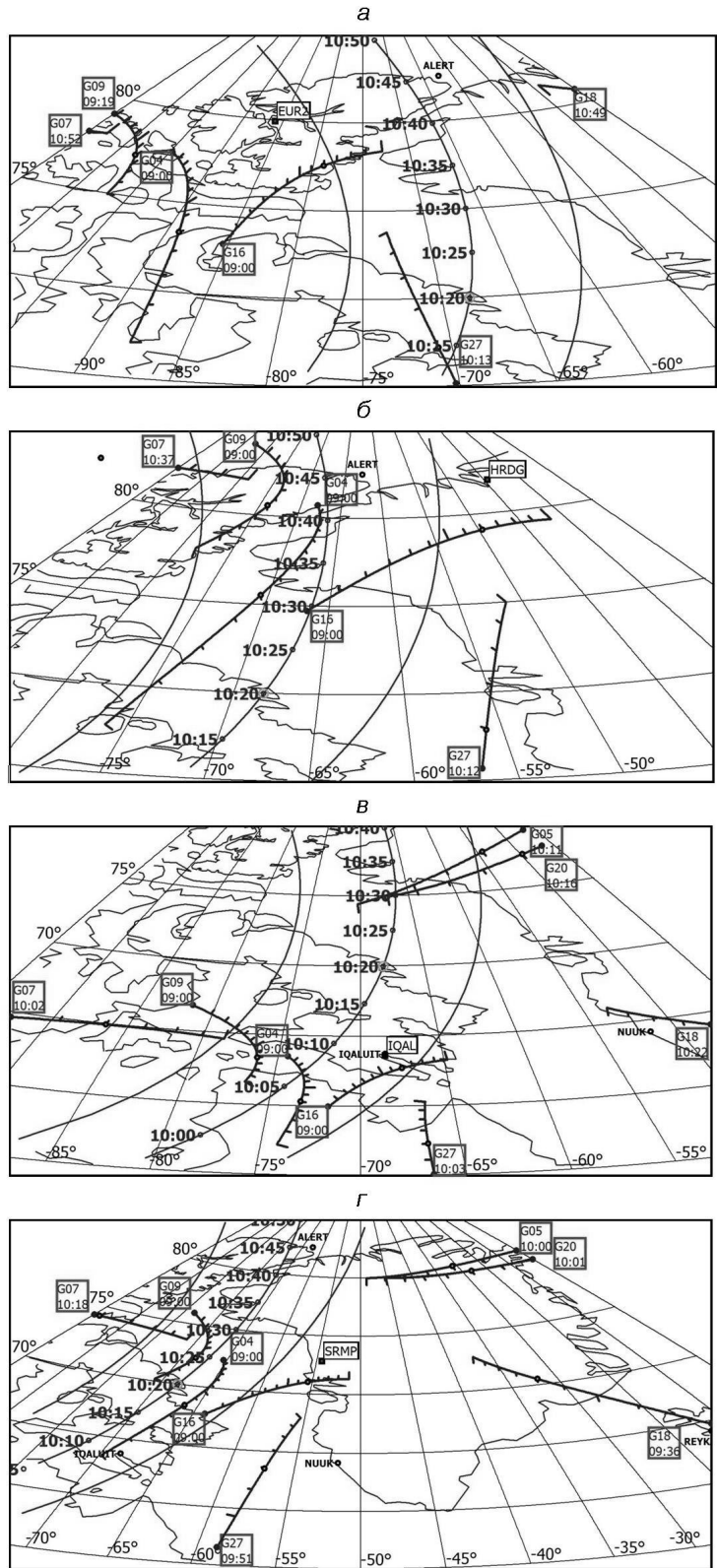


Рис. 2. Карта місячного сліду з прольотами супутників: а — станція EUR2, б — станція HRDG, в — станція IQAL, г — станція SRMP

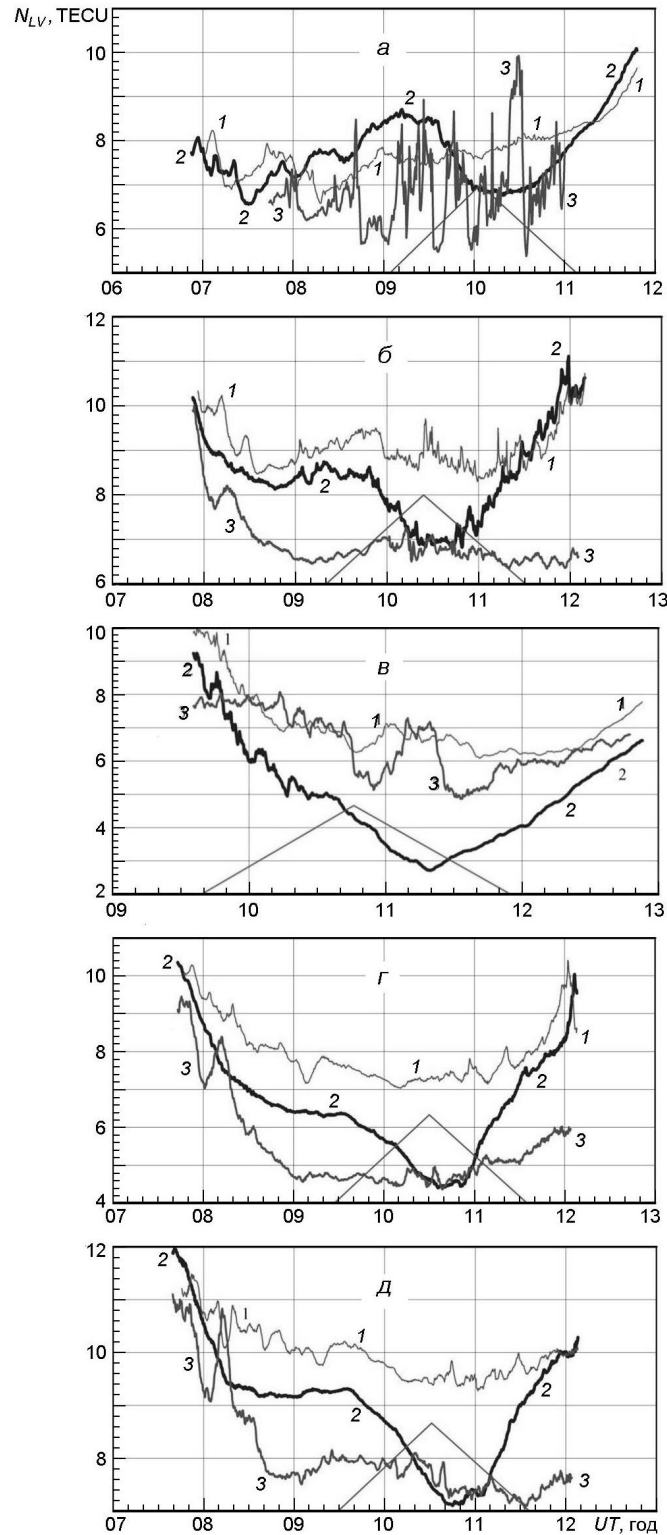


Рис. 3. Часові залежності ПЕВ для 9, 10 і 11 червня 2021 р. (криві 1, 2 і 3 відповідно): а — станція IQAL, супутник G04; б — станція SRMP, супутник G09; в — станція ASKY, супутник G20; г — станція DKSG, супутник G09; д — станція MARG, супутник G09. Трикутником тут і далі відмічено максимальну фазу C3



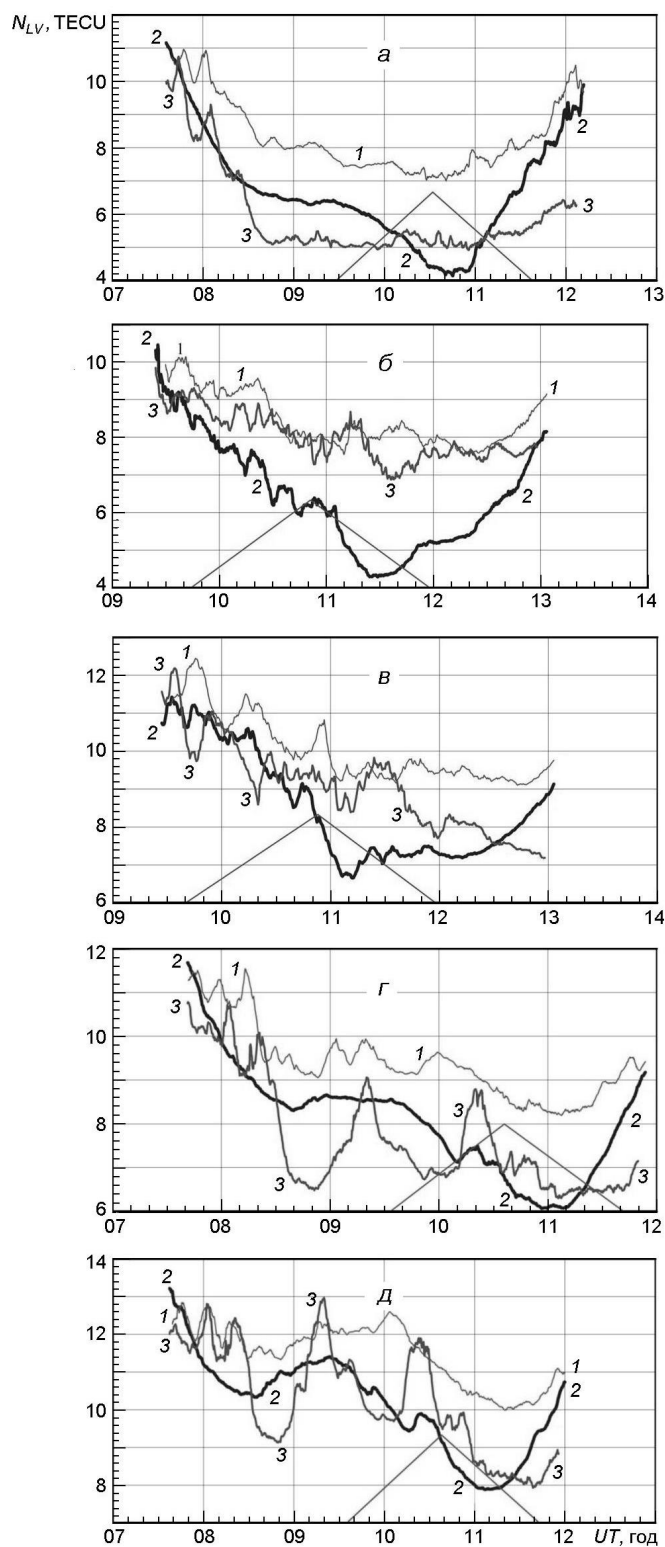


Рис. 4. Часові залежності ПЕВ для 9, 10 і 11 червня 2021 р. (криві 1, 2 і 3 відповідно): а — станція GLS3, супутник G09; б — станція KAGZ, супутник G20; в — станція EUR2, супутник G05; г — станція SCBY, супутник G09; д — станція KMOR, супутник G09

невідомим параметром  $DCB^R$ . За допомогою методу найменших квадратів оцінювали  $DCB^R$  для кожного прольоту. Оцінки ПЕВ отримано для 11 станцій і 8 супутників.

## РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Розглянемо спочатку часові варіації ПЕВ. Часові зміни цього параметра іоносфери для різних станцій і супутників наведено на рис. 3, 4. Для порівняння наряду з даними для дня з СЗ наведено дані для контрольних днів (9 і 11 червня 2021 р.). Слід відзначити, що день 11 червня 2021 р. був збуреним. Тому для контрольного дня більше підходить 9 червня 2021 р.

### *Станція IQAL. Супутник G04*

На рис. 3а видно, що 9 червня 2021 р. від 09:00 до 11:00 ПЕВ змінювався, слабо флюктуючи біля значення  $N_{LV} = 7.8$  TECU. У цей же час 11 червня флюктуації ПЕВ були дуже значними (від 5.5 до 9...10 TECU). У день затемнення практично після його початку ПЕВ почав зменшуватися від 8.5...8.6 до 6.8 TECU, а потім збільшуватися від 6.8 до 8 TECU та більше. Час запізнення мінімального значення ПЕВ відносно максимального значення фази затемнення становив близько 15 хв.

### *Станція SRMP. Супутник G09*

Як видно з рис. 3б, 9 червня 2021 р. в інтервалі часу 09:10...11:15 флюктуації ПЕВ біля значення 8.8 TECU не перевищували 0.6...0.7 TECU. 11 червня 2021 р. значення ПЕВ флюктували біля 7.8 TECU. У день СЗ після його початку ПЕВ спочатку зменшився від 8.3 до 6.9 TECU, а потім збільшився від 6.9 до 9 TECU та більше. На повільні варіації ПЕВ накладалися квазіперіодичні зміни з періодом 9 хв, амплітудою  $N_{LV} = 0.3...0.4$  TECU та відносною амплітудою  $N_{LV} = 4...5$  %. Час запізнення = 5 хв.

### *Станція ASKY. Супутник G20*

З рис. 3в можна бачити, що від 10:00 до 12:00 9 червня 2021 р. ПЕВ, флюктуючи, зменшувався від 8 до 6.2 TECU. У тому ж інтервалі часу 11 червня 2021 р., сильно флюктуючи, ПЕВ варіював від 8 до 5 TECU. У день СЗ відразу після початку затемнення ПЕВ зменшився від 8 до 2.8 TECU, а потім він збільшився у кінці затемнення до 4 TECU. Після 12:00 ПЕВ продовжив збільшуватися від 4 до 6.6 TECU. Значення = 30 хв.

### *Станція DKSG. Супутник G09*

З рис. 3г видно, що від 09:30 до 11:30 9 червня 2021 р. ПЕВ варіював у межах 7...7.5 TECU. 11 червня 2021 р. в тому ж інтервалі часу ПЕВ становив 4.6...5.1 TECU. У день затемнення, практично після його початку, значення ПЕВ поступово зменшувалось від 6.4 до 4.4 TECU, а потім збільшувалось від 4.4 до 7.4 TECU і більше. Час запізнення = 15 хв.

*Станція MARG. Супутник G09*

Із рис. 3д можна бачити, що від 09:30 до 11:30 9 червня 2021 р. ПЕВ флукутував біля значення 9.6 TECU. Величина флукутацій не перевищувала 0.6 TECU. 11 червня 2021 р. приблизно після 10:10 спостерігались варіації ПЕВ, які досягали 0.7 TECU. У день СЗ приблизно через 5 хв після початку події ПЕВ поступово зменшувався від 9.3 до 7.15 TECU. Після 10:50 він поступово збільшувався від 7.15 до 9.2 TECU і більше. Час запізнення був близьким до 15 хв. Спостерігались незначні квазіперіодичні варіації ПЕВ.

*Станція GLS3. Супутник G09*

Як видно з рис. 4а, в інтервалі часу 09:30...11:40 9 червня 2021 р. значення ПЕВ зменшились від 7.5 до 7.0...7.2 TECU, а потім, флукуючи, збільшились від 7.0...7.2 TECU до 8.0...8.3 TECU та більше. У тому ж інтервалі часу 11 червня 2021 р. значення ПЕВ неістотно флукутували біля 5.2 TECU. У день затемнення відразу ж після його початку ПЕВ поступово зменшувалося від 6.4 до 4.2...4.3 TECU. Далі воно збільшувалося від 4.2...4.3 TECU до 7.6 TECU і більше. Час запізнення 15 хв.

*Станція KAGZ. Супутник G20*

На рис. 4б видно, що з 10:00 до 12:00 9 червня 2021 р. ПЕВ, істотно флукуючи, змінювався у межах 9.2...7.8 TECU. Наступного після СЗ дня в тому ж інтервалі часу ПЕВ, сильно флукуючи, варіював від 8.8 до 6.8 TECU. Амплітуда квазіперіодичних коливань досягала 0.4 TECU ( 6 %), а їхній період становив 9...11 хв. У день затемнення ПЕВ, флукуючи, змінювалось в тому ж інтервалі часу від 7.6 до 4.3 TECU, а потім збільшувалося від 4.3 до 5.2 TECU і більше. Час запізнення 30 хв. Амплітуда квазіперіодичних збурень дорівнювала 0.3 TECU (4...5 %), а їхній період становив 14 хв.

*Станція EUR2. Супутник G05*

З рис. 4в можна бачити, що в інтервалі часу 09:40...11:00 за день до СЗ мали місце сильні (до 1-2 TECU) варіації ПЕВ. Середнє значення ПЕВ зменшувалося від 11.5 до 9.5 TECU. На наступний після затемнення день ПЕВ, сильно флукуючи, зменшувався від 12.2 до 8.6 TECU. 10 червня 2021 р. ПЕВ також, помітно флукуючи, спочатку зменшився від 11 до 6.7 TECU, а далі збільшився від 6.7 до 7.3 TECU та більше. Параметр 15 хв. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ПЕВ становила 0.2-0.3 TECU (3...3.5 %), а  $T$  12-15 хв.

*Станція SCBY. Супутник G09*

Як видно з рис. 4г, за день до затемнення в інтервалі 09:30...11:40 ПЕВ варіював у межах 9.6-8.2 TECU. 11 червня 2021 р. відзначались сильні флукутації ПЕВ: від 6.4 до 8.8 TECU. У день СЗ ПЕВ після початку події зменшився, флукуючи, від 8.6 до 6.0 TECU. Після 11:30 він збільшувався від 6.0 до 8 TECU та більше. Час запізнення 21 хв.

*Станція KMOR. Супутник G20*

З рис. 4д можна бачити, що за день до СЗ в інтервалі часу 09:30...11:40 значення ПЕВ флукутували у межах 12.6...10 TECU. 11 червня

**Таблиця 3. Основні відомості про іоносферний ефект СЗ**

Станція, супутник	Максимальне збурення $N_{LV}$ , TECU	Середнє значення $\bar{N}_{LV}$ , TECU	Максимальне відносне збурення $N_{LV} / \bar{N}_{LV}$ , %	Час запізнення, хв
IQAL, G04	-1.7	8.5	-20	15
SRMP, G09	-1.4	8.5	-16.5	5
ASKY, G20	-2.4	5.2	-46	30
DKSG, G09	-2.0	6.4	-31	15
MARG, G09	-2.2	7.3	-30	15
GLS3, G09	-2.2	6.4	-34	15
KAGZ, G20	-3.6	7.8	-45.5	30
EUR2, G05	-2.3	9.0	-25.5	15
SCBY, G09	-1.6	8.6	-18.6	21
KMOR, G09	-2.5	10.4	-24	25
HRDG, G20	-3.5	7	-50	10

2021 р. флуктуації ПЕВ у тому ж інтервалі часу були значними. Відзначались квазіперіодичні варіації ПЕВ з амплітудою близько 1 TECU (6 %) та періодом близько 25 хв. У день СЗ, 10 червня 2021 р., ПЕВ майже монотонно зменшувався в інтервалі часу 09:50...11:00 від 10.5 до 7.9 TECU, а потім збільшувався від 7.9 до 9.5 TECU та більше. Мінімальне значення ПЕВ спостерігалось при 25 хв і тривало близько 20 хв.

Узагальнення параметрів основних іоносферних ефектів наведено в табл. 3.

## ОБГОВОРЕННЯ

Часові залежності ПЕВ для всіх станцій і супутників якісно подібні. Практично відразу ж після початку СЗ мало місце стійке зменшення ПЕВ, яке тривало від 60 до 180 хв. Мінімальне значення ПЕВ запізнялося по відношенню до максимальної фази затемнення на час від 5 до 30 хв (у середньому 18.3 ± 8.5 хв). Максимальне зменшення ПЕВ при цьому становило 1.4...3.6 TECU при середньому значенні  $\bar{N}_{LV} = 5.2...10.4$  TECU (табл. 3).

У середньому  $N_{LV} = 2.3 \pm 0.6$  TECU, а  $\langle \bar{N}_{LV} \rangle = 8.4 \pm 1.6$  TECU. При цьому значення  $N_{LV} / \bar{N}_{LV}$  змінювалось від -16.5 до -46 %, а середнє значення становило -30 ± 9.7 %.

Зіставимо отримане зі спостережень значення  $N_{LV} = -30 \pm 9.7$  % з його теоретичною оцінкою. Для цього врахуємо, що

$$N_{LV} = \int_{z_0}^z N dz - \bar{N} z, \quad (1)$$

$$N_{LV0} = \int_{z_0}^{\infty} N_0 dz \quad (2)$$

де  $\overline{N}$  — середнє по висоті збурення концентрації електронів за рахунок СЗ,  $N_0$  — середнє по висоті значення за відсутності затемнення,  $z$  і  $z_0$  — товщина шару іоносфери, який дає основний внесок у  $N_{LV}$  і  $N_{LV0}$ . З (1) і (2) маємо

$$\frac{N_{LV}}{N_{LV0}} = \frac{\overline{N}}{N_0} \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

Значення  $\overline{N} / N_0$  можна оцінити із рівняння балансу  $N$  з умови нехтування процесами переносу. У роботах [7, 12, 14] для  $N/N_0$  в  $F$ -області іоносфери наведено вираз

$$\frac{N}{N_0} = \frac{B}{1 + B}$$

де  $B$  — відносна незатінена частина диску Сонця,  $\frac{B}{1+B}$  — відносний внесок в іонізацію іоносфери сонячної корони. Тоді

$$N = \frac{N_0}{1 + B} = \frac{1}{1 + B} N_0 \quad (4)$$

Значення  $\frac{B}{1+B}$  апіорі невідоме. Скоріше за все, воно змінюється з часом і залежить від процесів на Сонці. За даними роботи [7] прийемо  $B = 1.15 \dots 1.25$ . Тоді з (4) при  $B = 0.1$  отримаємо  $N = 72 \dots 78 \%$ . Зі співвідношення (3) при  $z = 160$  км,  $z_0 = 400$  км впливає, що  $N_{LV} = 29 \dots 31 \%$ . Це значення дуже близьке до значення, отриманого зі спостережень ( $-30 \dots -9.7 \%$ ).

Після досягнення мінімального значення ПЕВ спостерігалось його збільшення до вихідного або більшого значення.

У низці випадків спостерігались квазіперіодичні збурення ПЕВ з періодом 9...15 хв та відносною амплітудою 3...5 %. З даних про  $N_{La} = 3 \dots 5 \%$  оцінимо середнє за висотою  $N_a$ . Врахуємо, що

$$N_{La} = \int_{z_a}^{\infty} N_a dz \quad (5)$$

де  $z_a$  — товщина іоносферного шару з хвильовими збуреннями (зазвичай вони займають діапазон висот 150...250 км). При цьому  $z_a = 100$  км,  $N_a = 12 \dots 20 \%$ .

Просторовий розподіл ПЕВ у напрямку, поперечному по відношенню до тіні, відбиває зменшення фази затемнення. В області максимальної фази зменшення ПЕВ максимальне, а по обидва боки від тіні воно поступово зменшується.

Час запізнення реакції іоносфери на СЗ 18.3 8.5 хв зумовлений інерційністю хімічних процесів у  $F$ -області іоносфери. Цей час

визначається коефіцієнтом лінійної рекомбінації іонів  $O^+$  і концентрацією молекул  $N_2$  і  $O_2$  [2, 56]. Зазвичай  $10^{-3} \text{ c}^{-1}$  [2, 56], а  $^{-1}$  17 хв, що дуже близько до отриманого зі спостережень середнього значення

18 хв. Додамо, що час запізнення максимального зменшення концентрації електронів у  $F$ -області іоносфери по відношенню до максимального значення фази протягом низки сонячних затемнень у 1999–2021 рр., яке ми спостерігали на мережі іонозондів, становив 15...20 хв [7].

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

За допомогою 11 станцій наземних вимірювань системи GPS для восьми ШСЗ вивчено просторово-часові варіації ПЕВ при максимальному покритті диску Сонця, яке спостерігалось у Заполяр'ї (широти 73...72 пн. ш.) й установлено наступне.

1. На кожній станції для кожного супутника зменшення концентрації електронів наступало практично відразу ж після початку СЗ. Це зменшення тривало близько 60...100 хв. Після цього відзначалося мінімальне значення ПЕВ, а далі — його збільшення до вихідного або більшого значення.

2. Максимальне зменшення ПЕВ складало  $-1.4$ – $-3.6$  TECU при середньому значенні ПЕВ 5.2–10.4 TECU. У середньому зменшення ПЕВ дорівнювало  $2.3$ – $0.6$  TECU, а рівень, від якого мало місце це зменшення, дорівнював 8.4–1.6 TECU. Відносне зменшення змінювалось від  $-16.5$  до  $-46$  %. У середньому воно становило  $-30$ – $9.7$  %.

3. Визначено час запізнення моменту настання мінімального значення ПЕВ по відношенню до максимальної фази СЗ. Він змінювався у межах 5–30 хв, середнє значення цього часу складало 18.3–8.5 хв.

4. У низці випадків протягом СЗ спостерігались квазіперіодичні варіації ПЕВ з періодом 9–15 хв і відносною амплітудою 3–5 %.

Дослідження Л. Ф. Чорногора проведено в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»). Робота Л. Ф. Чорногора та Ю. Б. Милованова підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 і 0122U001476).

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. *GPS мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск. 2006. 479 с.*
2. Брунелли Б. Е., Намгаладзе А. В. *Физика ионосферы*. Москва: Наука. 1988. 528 с.
3. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Черногор Л. Ф. Радиопизические наблюдения акустико-гравитационных волн в ионосфере во время солнечного затмения 4

- января 2011 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. 17, № 4. С. 344—352.
4. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011. 16, № 2. С. 164—176.
  5. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2009. 386 с.
  6. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
  7. Черногор Л. Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2013. 480 с.
  8. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика. 2013. С. 160—182.
  9. Черногор Л. Ф. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022. 38, № 1. С. 16—34.
  10. Черногор Л. Ф. Эффект конвекції в приземній атмосфері протягом сонячних затемнень 20 березня 2015 р. і 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. 37, № 6. С. 19—33. DOI: 10.15407/kfnt2021.06.003
  11. Черногор Л. Ф. Тепловий ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в приземній атмосфері. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. 37, № 6. С. 34—48. DOI: 10.15407/kfnt2021.06.003
  12. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Іоносферні процеси протягом часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022. 38, № 2. С. 3—22.
  13. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Жданко Є. Г., Леус С. Г., Поднос В. А. Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2020. 30. С. 42—59. DOI: 10.26565/2311-0872-2020-33-04
  14. 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.
  15. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю., Luo Y., Цимбал А. М., Шевелєв М. Б. Варіації геомагнітного поля, що супроводжували сонячне затемнення 10 червня 2021 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2021. 34.
  16. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2020. 36, № 6. С. 37—64.
  17. Adekoya B. J., Chukwuma V. U. Ionospheric F2 layer responses to total solar eclipses at low and mid-latitude. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2016. 138—139, P. 136—160. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.01.006
  18. Beynon W. J. G., Brown G. M. *Solar eclipses and the ionosphere*. London: Elsevier, 1956. ISBN: 978-0080090467.
  19. Burmaka V. P., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagnetism and*

- Aeronomy*. 2013. 53, Is. 4. P. 479—491. DOI: 10.1134/S001679321304004X
20. Chapman S. The influence of a solar eclipse upon the upper atmospheric ionization. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1932. 92. P. 413—420.
  21. Chen G., Wu C., Huang X., Zhao Z., Zhong D., Qi H., Huang L., Qiao L., Wang J. Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. 120. P. 3009—3020. DOI: 10.1002/2014JA020849
  22. Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., Li N. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 2011. 116, id. A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
  23. Cherniak I., Zakharenkova I. Ionospheric total electron content response to the great American solar eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018. 45. P. 1199—1208. DOI: 10.1002/2017GL075989
  24. Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse. *Geomag. Aeron.* 2010. 50, Is. 1. P. 96—106. DOI: 10.1134/S0016793210010111
  25. Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomag. Aeron.* 2010. 50, Is. 3. P. 346—361. DOI: 10.1134/S0016793210030096
  26. Chernogor L. F. The Earth—atmosphere—geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* 2011. 32, Is. 11. P. 3199—3218. DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
  27. Chernogor L. F. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomag. Aeron.* 2012. Vol. 52, Is. 6. P. 768—778. DOI: 10.1134/S0016793212050039
  28. Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results: 2. Spectral Analysis. *Geomag. Aeron.* 2012. 52, Is. 6. P. 779—792. DOI: 10.1134/S0016793212050040
  29. Chernogor L. F. Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomag. Aeron.* 2013. 53, Is. 1. P. 19—31. DOI: 10.1134/S0016793213010052
  30. Chernogor L. F. Wave Processes in the Ionosphere over Europe that Accompanied the Solar Eclipse of March 20, 2015. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2016. 32, Is. 4. P. 196—206. DOI: 10.3103/S0884591316040024
  31. Chernogor L. F. Atmosphere-Ionosphere response to Solar Eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomag. Aeron.* 2016. 56, Is. 5. P. 592—603. DOI: 10.1134/S0016793216050030
  32. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — atmosphere — geospace as an open non-linear dynamical system. *Radio Phys. Radio Astron.* 2008. 13, Is. 2. P. 120—137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563>
  33. Chernogor L. F., Garmash K. P. Magneto-ionospheric effects of the solar eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomag. Aeron.* 2017. 57, Is. 1. P. 72—83. DOI: 10.1134/S0016793216060062
  34. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., 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. Solar-Terr. Phys.* 2019. 182. P. 1—9. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.016
  35. Coster A. J., Goncharenko L., Zhang S. R., Erickson P. J., Rideout W., Vierinen J.



- GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. 44, Is. 24. P. 12041—12048.  
DOI: 10.1002/2017GL075774
36. Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS DAAC). 2014. International GNSS Service, Daily 30-second observation data.  
<ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/bias/>, [webigs.ign.fr/gdc/en/data/search](http://webigs.ign.fr/gdc/en/data/search)
37. Dang T., Lei J., Wang W., Burns A., Zhang B., Zhang S.-R. Suppression of the polar tongue of ionization during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2018. 45, Is. 7. P. 2918—2925. DOI: 10.1002/2018GL077328
38. Dang T., Lei J., Wang W., Zhang B., Burns A., Le H., Wu Q., Ruan H., Dou X., Wan W. Global responses of the coupled thermosphere and ionosphere system to the August 2017 Great American Solar Eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. 123. P. 7040—7050. DOI: 10.1029/2018JA025566
39. Ding F., Wan W., Ning B., Liu L., Le H., Xu G., Wang M., Li G., Chen Y., Ren Z., Xiong B., Hu L., Yue X., Zhao B., Li F. and Yang M. GPS TEC response to the 22 July 2009 total solar eclipse in East Asia. *J. Geophys. Res.* 2010. 115, id. A07308. DOI: 10.1029/2009JA015113
40. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Y., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. 53, Is. 1. P. 113—123.  
DOI: 10.1134/S0016793213010076
41. Eccles W. H. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician.* 1912. 69. P. 109—117.
42. Espenak F. Annular Solar Eclipse of 2021 Jun 10.  
<http://www.eclipsewise.com/solar/SEprime/2001-2100/SE2021Jun10Aprime.html>
43. Gossard E. E., Hooke W. H. *Waves in the Atmosphere.* New York: Elsevier, 1975. 456 p.
44. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 2020. 55, Is. 2. DOI: 10.1029/2019RS006866
45. Higgs A. J. Ionospheric measurements made during the total Solar eclipse of 1940, October 1-st, South Africa. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1942. 102, Is. 1. P. 24—34. DOI: 10.1093/mnras/102.1.24
46. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice.* Springer-Verlag Wien New York, 2001. XXIV, 382 p.
47. Huba J. D., Drob D. SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system. *Geophys. Res. Lett.* 2017. 44. P. 5928—5935. DOI: 10.1002/2017GL073549
48. Le H., Liu L., Ding F., Ren Z., Chen Y., Wan W., Ning B., Xu G., Wang M., Li G., Xiong B. and Hu L. Observations and modeling of the ionospheric behaviors over the east Asia zone during the 22 July 2009 solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 2010. 115, id. A10313. DOI: 10.1029/2010JA015609
49. Ledig P. G., Jones M. W., Giesecke A. A., Chernosky E. J. Effects on the ionosphere at Huancayo, Peru, of the solar eclipse, January 25, 1944. *J. Geophys. Res.* 1946. 51, Is. 3. P. 411—418. DOI: 10.1029/TE051i003p00411
50. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. 53, Is. 3. P. 367—376. DOI: 10.1134/S0016793213020096
51. Madhav Haridas M. K., Manju G. On the response of the ionospheric F region over In-

- dian low-latitude station Gadanki to the annular solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 2012. 117, is. A1. id. A01302. DOI: 10.1029/2011JA016695
52. Marlton G. J., Williams P. D., Nicoll K. A. On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2016. 374, Is. 2077. DOI: 10.1098/rsta.2015.0222.
53. Marple Jr., S. L. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1987. 492 p.
54. Panasenko S. V., Otsuka Y., van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., 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. Solar-Terr. Phys.* 2019. 191. id. 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015
55. Pitout F., Bletty P.-L., Alcayde D. High-latitude ionospheric response to the solar eclipse of 1 August 2008: EISCAT observations and TRANSCAR simulation. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2013. 105. P. 336—349. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.02.004
56. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge: Cambridge atmospheric and space science series, 2000. 555 p.
57. Sharma S., Dashora N., Galav P., Pandey R. Total solar eclipse of July 22, 2009: Its impact on the total electron content and ionospheric electron density in the Indian zone. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2010. 72, Is. 18. P. 1387—1392. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.10.006
58. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsée D., Bruyninx C., Chevalier J. M., Clette F., de Backer H., de Keyser J., D’huys E., Dominique M., Lemaire J. F., Magdalenic J., Marqué C., Pereira N., Pierrard V., Sapundjiev D., Seaton D. B., Stegen K., Linden R. V., Verhulst T. G. W., West M. J. 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, id. A19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2017017>
59. *The Receiver Independent Exchange Format*. Version 3.02. International GNSS Service (IGS).
60. *Universität Bern, Astronomisches Institut*. <ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>, [www.aiub.unibe.ch/download/CODE/](http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/)
61. Uryadov V. P., Kolchev A. A., Vybornov F. I., Shumaev V. V., Egoshin A. I., Chernov A. G. Ionospheric effects of a solar eclipse of March 20, 2015 on oblique sounding paths in the Eurasian longitudinal sector. *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. 59, Is. 6. P. 431—441. DOI: 10.1007/s11141-016-9711-9
62. Verhulst T. G. W., Sapundjiev D., Stankov S. M. High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Adv. Space Res.* 2016. 57, Is. 11. P. 2407—2419. DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.009
63. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *J. Geodesy.* 2016. 90, No. 3. P. 209—228. DOI: 10.1007/s00190-015-0867-4
64. Wang W., Dang T., Lei J., Zhang S., Zhang B., Burns A. Physical processes driving the response of the F2 region ionosphere to the 21 August 2017 solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. 124. P. 2978—2991. DOI: 10.1029/2018JA025479
65. *World Data Center for Geomagnetism*, Kyoto: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

66. Zhang S.-R., Erickson P. J., Goncharenko L. P., Coster A. J., Rideout W., Vierinen J. Ionospheric bow waves and perturbations induced by the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. 44. P. 12,067—12,073.  
DOI: 10.1002/2017GL076054

## REFERENCES

1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. (2006). *GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere*. Irkutsk: SC RRS SB RAMS [In Russian].
2. Brunelli B. E., Namgaladze A. V. (1988). *Physics of the ionosphere*. (Moscow: Nauka).
3. Burmaka V. P., Domnin I. F., 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), 344—352. [In Russian].
4. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F. (2011). January 4, 2011 Solar Eclipse Effects over Radio Circuits at Oblique Incidence. *Radio Phys. Radio Astron.* 16(2), 164—176. [In Russian]. DOI: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/442>
5. Chernogor L. F. (2009). *Radio Physical and Geomagnetic Effects of Rocket Launches*. (Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.) [In Russian].
6. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [In Russian].
7. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [In Russian].
8. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Tyrnov O. F. (2013). The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio physical Observatory — the tool for ionosphere monitoring in space experiments. *Space Project "Ionosat-Micro"*. Kyiv: Academperiodika, 160—182. [In Russian].
9. Chernogor L. F. (2021). Geomagnetic effect of the solar eclipse on June 10, 2021. *Kinemat. fiz. nebesnyh tel.* 2022. 38(1). 16—34. [In Ukrainian].
10. Chernogor L. F. (2021). Convection Effect in the Atmospheric Surface Layer in the Course of Solar Eclipses of 20 March 2015 and 10 June 2021. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 37(6), 19—33. [In Ukrainian]. DOI: 10.15407/kfnt2021.06.003
11. Chernogor L. F. (2021). Thermal effect of the 10 June 2021 Annular Solar Eclipse in the Atmospheric Surface Layer. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 37(6), 34—48. [In Ukrainian]. DOI: 10.15407/kfnt2021.06.003
12. Chernogor L. F. Garmash K. P. (2021). Ionospheric Processes During the 10 June 2021 Partial Solar Eclipse at Kharkiv. *Kinemat. fiz. nebesnyh tel.* 2022. 38(2). 3—22. [In Ukrainian].
13. Chernogor L. F., Garmash K. P., Zhdanko Y. H., Leus S. G., Podnos V. A. (2020). Software and hardware system of multi-frequency oblique sounding the ionosphere. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Radio Physics and Electronics"*. 30, 42—59. DOI: 10.26565/2311-0872-2020-33-04 [in Ukrainian].
14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Zhdanko Y. H., Leus S. G., 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). 326—343. [in Ukrainian].
15. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Luo Y., Tsymbal A. M., 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, series "Radio Physics and*

- Electronics*". 34. [In Ukrainian].
16. Chornogor L. F., Mylovanov Yu. B. (2020). Ionospheric effects of the solar eclipse on August 11, 2018 over China. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 36(6), 37—64.
  17. Adekoya B. J., Chukwuma V. U. (2016). Ionospheric F2 layer responses to total solar eclipses at low and mid-latitude. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 138—139, 136—160. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.01.006
  18. Beynon W. J. G., Brown G. M. (1956). Solar eclipses and the ionosphere. London: Elsevier. ISBN: 978-0080090467.
  19. Burmaka V. P., Chernogor L. F. (2013). Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 53(4), 479—491.  
DOI: 10.1134/S001679321304004X
  20. Chapman S. (1932). The influence of a solar eclipse upon the upper atmospheric ionization. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 92, 413—420.
  21. Chen G., Wu C., Huang X., Zhao Z., Zhong D., Qi H., Huang L., Qiao L., Wang J. (2015). Plasma flux and gravity waves in the midlatitude ionosphere during the solar eclipse of 20 May 2012. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 120, 3009—3020.  
DOI: 10.1002/2014JA020849
  22. Chen G., Zhao Z., Ning B., Deng Z., Yang G., Zhou C., Yao M., Li S., Li N. (2011). Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 116, A06301. DOI: 10.1029/2010JA016305
  23. Cherniak I., Zakharenkova I. (2018). Ionospheric total electron content response to the great American solar eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 45, 1199—1208. DOI: 10.1002/2017GL075989
  24. Chernogor L. F. (2010). Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse. *Geomag. Aeron.* 50(1), 96—106. DOI: 10.1134/S0016793210010111
  25. Chernogor L. F. (2010). Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomag. Aeron.* 50(3), 346—361.  
DOI: 10.1134/S0016793210030096
  26. Chernogor L. F. (2011). The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* 32(11), 3199—3218.  
DOI: 10.1080/01431161.2010.541510
  27. Chernogor L. F. (2012). Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomag. Aeron.* 52(6), 768—778.  
DOI: 10.1134/S0016793212050039
  28. Chernogor L. F. (2012). Effects of solar eclipses in the ionosphere: Doppler sounding results: 2. Spectral analysis. *Geomag. Aeron.* 52(6), 779—792.  
DOI: 10.1134/S0016793212050040
  29. Chernogor L. F. (2013). Physical processes in the middle ionosphere accompanying the solar eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomag. Aeron.* 53(1), 19—31.  
DOI: 10.1134/S0016793213010052
  30. Chernogor L. F. (2016). Wave processes in the ionosphere over Europe that accompanied the solar eclipse of March 20, 2015. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 32(4), 196—206. DOI: 10.3103/S0884591316040024
  31. Chernogor L. F. (2016). Atmosphere-ionosphere response to solar eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomag. Aeron.* 56(5), 592—603.  
DOI: 10.1134/S0016793216050030

32. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). Earth — atmosphere — geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Phys. Radio Astron.* 13(2), 120—137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563>
33. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2017). Magneto-ionospheric effects of the solar eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomag. Aeron.* 57(1), 72—83. DOI: 10.1134/S0016793216060062
34. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., 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. Solar-Terr. Phys.* 182, 1—9. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.016
35. Coster A. J., Goncharenko L., Zhang S. R., Erickson P. J., Rideout W., Vierinen J. (2017). GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 44(24), 12041—12048. DOI: 10.1002/2017GL075774
36. Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS DAAC). (2014). International GNSS Service, Daily 30-second observation data. <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/bias/>, [webigs.ign.fr/gdc/en/data/search](http://webigs.ign.fr/gdc/en/data/search)
37. Dang T., Lei J., Wang W., Burns A., Zhang B. and Zhang S.-R. (2018). Suppression of the polar tongue of ionization during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 45(7), 2918—2925. DOI: 10.1002/2018GL077328
38. Dang T., Lei J., Wang W., Zhang B., Burns A., Le H., Wu Q., Ruan H., Dou X., Wan W. (2018). Global responses of the coupled thermosphere and ionosphere system to the August 2017 Great American Solar Eclipse. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 123, 7040—7050. DOI: 10.1029/2018JA025566
39. Ding F., Wan W., Ning B., Liu L., Le H., Xu G., Wang M., Li G., Chen Y., Ren Z., Xiong B., Hu L., Yue X., Zhao B., Li F., Yang M. (2010). GPS TEC response to the 22 July 2009 total solar eclipse in East Asia. *J. Geophys. Res.* 115, A07308. DOI: 10.1029/2009JA015113
40. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Y., 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. *Geomagnetism and Aeronomy.* 53(1), 113—123. DOI: 10.1134/S0016793213010076
41. Eccles W. H. (1912). Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician.* 69, 109—117.
42. Espenak F. (2021). Annular Solar Eclipse of 2021 Jun 10. <http://www.eclipsewise.com/solar/SEprime/2001-2100/SE2021Jun10Aprime.html>
43. Gossard E. E., Hooke W. H. (1975). *Waves in the Atmosphere*. New York: Elsevier.
44. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., 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). DOI: 10.1029/2019RS006866
45. Higgs A. J. (1942). Ionospheric measurements made during the total Solar eclipse of 1940, October 1-st, South Africa. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 102(1), 24—34. DOI: 10.1093/mnras/102.1.24
46. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001). *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer-Verlag Wien New York. XXIV, 382 p.
47. Huba J. D., Drob D. (2017). SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system. *Geophys. Res. Lett.* 44, 5928—5935. DOI: 10.1002/2017GL073549

48. Le H., Liu L., Ding F., Ren Z., Chen Y., Wan W., Ning B., Xu G., Wang M., Li G., Xiong B., Hu L. (2010). Observations and modeling of the ionospheric behaviors over the east Asia zone during the 22 July 2009 solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 115(A10313). DOI: 10.1029/2010JA015609
49. Ledig P. G., Jones M. W., Giesecke A. A., Chernosky E. J. (1946). Effects on the ionosphere at Huancayo, Peru, of the solar eclipse, January 25, 1944. *J. Geophys. Res.* 51(3), 411—418. DOI: 10.1029/TE051i003p00411
50. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2013). Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy.* 53(3), 367—376. DOI: 10.1134/S0016793213020096
51. Madhav Haridas M. K., Manju G. (2012). On the response of the ionospheric F region over Indian low-latitude station Gadanki to the annular solar eclipse of 15 January 2010. *J. Geophys. Res.* 117(A1), A01302. DOI: 10.1029/2011JA016695
52. Marlton G. J., Williams P. D., Nicoll K. A. (2016). On the detection and attribution of gravity waves generated by the 20 March 2015 solar eclipse. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 374(2077). DOI: 10.1098/rsta.2015.0222.
53. Marple Jr. S. L. (1987). *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
54. 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. Solar-Terr. Phys.* 191, 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015
55. Pitout F., Blelly P.-L., Alcayde D. (2013). High-latitude ionospheric response to the solar eclipse of 1 August 2008: EISCAT observations and TRANSCAR simulation. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 105, 336—349. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.02.004
56. Schunk R. W., Nagy A. F. (2000). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge: Cambridge Atmospheric and Space Science Series.
57. Sharma S., Dashora N., Galav P., Pandey R. (2010). Total solar eclipse of July 22, 2009: Its impact on the total electron content and ionospheric electron density in the Indian zone. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 72(18), 1387—1392. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.10.006
58. Stankov S. M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsée D., Bruyninx C., Chevalier J. M., Clette F., de Backer H., de Keyser J., D’huys E., Dominique M., Lemaire J. F., Magdalenic J., Marqué C., Pereira N., Pierrard V., Sapundjiev D., Seaton D. B., Stegen K., Linden R. V., Verhulst T. G. W., West M. J. (2017). 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.* 7, A19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2017017>
59. *The Receiver Independent Exchange Format*. Version 3.02. International GNSS Service (IGS).
60. Universität Bern, Astronomisches Institut, <ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>  
[www.aiub.unibe.ch/download/CODE/](http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/)
61. Uryadov V. P., Kolchev A. A., Vybornov F. I., Shumaev V. V., Egoshin A. I., Chernov A. G. (2016). Ionospheric effects of a solar eclipse of March 20, 2015 on oblique sounding paths in the Eurasian longitudinal sector. *Radiophys. Quantum Electron.* 59(6), 431—441. DOI: 10.1007/s11141-016-9711-9
62. Verhulst T. G. W., Sapundjiev D., Stankov S. M. (2016). High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015

- including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Adv. Space Res.* 57(11), 2407—2419. DOI: 10.1016/j.asr.2016.03.009
63. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. (2016). Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *J. Geodesy.* 90(3), 209—228. DOI: 10.1007/s00190-015-0867-4
64. Wang W., Dang T., Lei J., Zhang S., Zhang B., Burns A. (2019). Physical processes driving the response of the F2 region ionosphere to the 21 August 2017 solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 124, 2978—2991. DOI: 10.1029/2018JA025479
65. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>
66. Zhang S.-R., Erickson P. J., Goncharenko L. P., Coster A. J., Rideout W., Vierinen J. (2017). Ionospheric bow waves and perturbations induced by the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 44, 12,067—12,073. DOI: 10.1002/2017GL076054

*L. F. Chernogor, Yu. B. Mylovanov*

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

#### IONOSPHERIC EFFECTS FROM THE JUNE 10, 2021 SOLAR ECLIPSE IN THE POLAR REGION

*Solar eclipses (SEs) are determined to reveal a broad array of processes acting in all geospheres. In the ionosphere, a decrease in the electron density, electron, ion, and neutral temperatures take place; the dynamics of the ionospheric plasma significantly changes, wave disturbances are generated, and coupling expands across the entire Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. The effects from SEs have been proved to depend on the magnitude of the solar eclipse, geographic coordinates, season, atmospheric and space weather state, solar cycle magnitude, and other factors. In addition to the recurring or regular effects, effects pertaining to a given SE arise. Therefore, the study of physical processes arising in all geospheres under the action of a SE is an urgent interdisciplinary task. The purpose of this paper is to present observations and analysis of temporal disturbances in total electron content (TEC) in the vertical column over the polar region. The data used in this study include the parameters of signals, received at a network of stations, from navigation satellites passing over the moon's shadow where  $M = 0.9$  in the latitude range  $70...80^\circ$  N. The annular June 10, 2021 solar eclipse began at 08:12:20 UT and ended at 13:11:19 UT. The moon's shadow appeared over Canada, then it moved across Greenland, Arctic Ocean, the North Pole, and New Siberian Islands. The moon's shadow covered the northern part of the Russian Federation. Partial SEs were noted in northern and middle parts of Europe, most of the Russian Federation, Mongolia, and China. Using 11 ground-based stations receiving GPS signals and 8 stations receiving signals from navigation satellites, spatial and temporal variations in TEC have been studied during the maximum magnitude of the eclipse in the polar region ( $73...72^\circ$  N latitude), and it has been determined the following. A decrease in the electron density at each station and for every satellite began virtually at once after the SE onset and persisted for about 60 to 100 min. Subsequently, a minimum value of TEC was noted, and further TEC showed an increase to the initial or to the greater value. The TEC average value was observed to be  $5.2...10.4$  TECU. On average, a decrease in TEC was estimated to be  $2.3 \pm 0.6$  TECU relative to the  $8.4 \pm 1.6$  TECU level. On a relative scale, the decrease varied in the  $-16.5$  to  $-46\%$  range over an average value of  $-(30 \pm 9.7)\%$ . The TEC values increased with lateral distance from the region of maximum shade, i.e., with decreasing of the magnitude of the SE, and their disturbances decreased. The time delay between the TEC minima and the SE*

*maximum magnitude has been determined to vary in the 5...30-min range with the mean observed to be 18.3 8.5 min. In the course of the SE, in some cases, TEC exhibited quasi-periodic variations within the period range of 9...15 min and amplitude of 3...5%.*

**Keywords:** *ionosphere, solar eclipse, total electron content, aperiodic disturbance, quasi-periodic disturbance parameter*

Стаття надійшла до редакції 06.01.2022

Після доопрацювання 06.01.2022

Прийнята до друку 22.04.2022