

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.06.037>

УДК 550.388, 520.86, 550.385.37

Л. Ф. Чорногор, Ю. Б. Милованов

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

Іоносферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм

Метою роботи є опис іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення 11 серпня 2018 р. над Китаєм, вивчених за допомогою GPS-технологій. Сонячні затемнення — рідкісні явища природи. Протягом 2—3 годин затемнення відбувається певна перебудова процесів на поверхні Землі, в атмосфері, геокосмосі, тобто в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ). Реакція цієї системи залежить від положення в циклі сонячної активності, сезону, часу доби та стану атмосферної та космічної погоди. Тому вивчення реакції системи ЗАІМ на сонячні затемнення залишається актуальною задачею. Реакція супроводжується контрольованими динамічними процесами, вивчення яких дозволяє краще зрозуміти будову навколоземного середовища. У цьому полягає загальнонаукова значущість досліджень реакції системи ЗАІМ на сонячні затемнення. З практичної точки зору сонячні затемнення викликають значні збурення параметрів середовища у системі ЗАІМ, які суттєво впливають на поширення радіохвиль практично всіх діапазонів, функціонування засобів радіонавігації, радіолокації, телекомунікації, радіоастрономії та дистанційного зондування середовищ. На сьогоднішній день досить добре досліджено регулярні ефекти в іоносфері: зменшення протягом затемнень концентрації електронів, температур електронів та іонів, варіації іонного складу, вертикальні рухи плазми. Істотно менше вивчені нерегулярні ефекти, які можуть відрізнятися при різних затемненнях. Затемнення над Китаєм відбувалося у передзахідний період. Початок затемнення в різних частинах Китаю припадав на інтервали 09:54—10:05 UT, а кінець затемнення — на інтервали 10:07—11:10 UT; його тривалість становила від декількох хвилин до 67 хв. Максимальна спостережувана фаза затемнення змінювалася від 0.07 до 0.52; площа затемнення становила 0.02...0.42. Незначна

тривалість затемнення і рух вечірнього термінатора вплинули на іоносферні ефекти затемнення. Стан космічної погоди був цілком сприятливим для спостереження ефектів затемнення в іоносфері. Для виявлення відгуку іоносфери оброблялися реєстрації сигналів глобальної навігаційної супутникової системи. За допомогою вимірювань псевдодальностей у двочастотному приймачі розраховано іоносферні затримки сигналу і, відповідно, вертикальний повний електронний вміст (ПЕВ). Незважаючи на вплив сонячного термінатора, вдалося впевнено виділити іоносферні ефекти сонячного затемнення. Його ефекти виявилися досить малими через малі значення фази затемнення. Над Китаєм спостерігалося вирвopodobне зменшення ПЕВ, яке мало розмір 1300 км по широті і 2000 км по довготі. Відносне зменшення ПЕВ становило близько 7 %. Затемнення супроводжувалося генерацією аперіодичних збурень ПЕВ зі швидкістю 0.4...0.8 TECU/год і тривалістю близько 105 хв. Хвильові збурення впевнено не спостерігалися, що пов'язано з малою фазою затемнення та незначним збуренням концентрації електронів.

Ключові слова: сонячне затемнення, іоносфера, GPS-технологія, повний електронний вміст, аперіодичне збурення.

ВСТУП

Сонячні затемнення (СЗ) є рідкісним явищем природи. Протягом 2—3 годин відбувається перебудова процесів на поверхні Землі, в атмосфері, геокосмосі, тобто в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) [2]. Реакція цієї системи залежить від положення в циклі сонячної активності, сезону, часу доби та стану атмосферної та космічної погоди. Тому вивчення реакції системи ЗАІМ на СЗ залишається актуальною задачею. Реакція супроводжується контрольованими динамічними процесами, вивчення яких дозволяє краще зрозуміти будову навколоземного середовища. У цьому полягає загальнонаукова значущість досліджень реакції системи ЗАІМ на СЗ. Практична значущість полягає в наступному. Сонячні затемнення викликають значні збурення параметрів середовища в системі ЗАІМ, які суттєво впливають на поширення радіохвиль практично всіх діапазонів, а отже, і на функціонування засобів радіонавігації, радіолокації, телекомунікації, радіоастрономії та дистанційного зондування середовищ.

Ефекти СЗ в іоносфері вивчаються протягом приблизно 100 років [6, 48, 59]. Для цього спочатку використовувалися дослідження спотворень характеристик радіохвиль, потім — метод вертикального зондування, ще пізніше — супутникові, ракетні методи та метод некогерентного розсіяння. На сьогоднішній день досить добре досліджено регулярні ефекти: зменшення протягом затемнень концентрації електронів, температур електронів та іонів, варіації іонного складу, вертикальні рухи плазми [1—44, 46, 49, 55—57, 60—62, 65, 67, 70—76]. Істотно менше вивчено нерегулярні ефекти, які можуть бути різними

для різних затемнень [14—19, 39, 43, 46, 47, 51, 58, 73]. До таких ефектів належить і генерація хвильових збурень (ХЗ) в іоносфері, передбачена у роботі [53]. Детальний огляд робіт, присвячених дослідженням зазначених ефектів, зроблено у монографії [43].

У сучасних роботах [45, 47, 51, 52, 63, 64, 68, 77, 81, 82] описано іоносферні ефекти СЗ, які мали місце 20 березня 2015 р. над Європою. У роботі [54] аналізуються ефекти СЗ 21 серпня 2017 р. У роботі [58] обговорюються іоносферні ефекти часткового СЗ 11 серпня 2018 р. над Китаєм. Для спостережень використовувався когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, дислокований на території Харбінського інженерного університету (КНР). Виявлено аперіодичні та квазіперіодичні збурення в іоносфері. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів N з періодом $T \approx 10$ хв становила 1...10 %. Найбільше зменшення N в Е-області іоносфери (до 26 %) відповідало теоретичним оцінкам (24 %).

Крім методу багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери, що дозволяє охоплювати значні регіони, ефективним методом є метод, заснований на GPS-технологіях [8, 54, 55, 60, 66, 67, 79, 83].

Метою цієї роботи є опис іоносферних ефектів СЗ 11 серпня 2018 року над Китаєм, вивчених за допомогою GPS-технологій.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СОНЯЧНЕ ЗАТЕМНЕННЯ 11 СЕРПНЯ 2018 р. ТА СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Сонячне затемнення 11 серпня 2018 р. над Китаєм було частковим. Максимальна фаза $M = 0.7368$ відзначалася в районі Східно-Сибірського моря (географічні координати: 70.4 пн. ш., 174.5 сх. д.). Затемнення спостерігалось на півночі Північної Америки, в Гренландії, Північній Європі й Азії.

Особливістю СЗ над Китаєм було те, що воно спостерігалось у передзахідний період (за місцевим часом). Тому максимальна спостережувана фаза затемнення для території Китаю змінювалася у межах від 0.07 до 0.52. Площа затемнення при цьому становила $A \approx 0.02...0.42$. Початок затемнення в різних частинах Китаю спостерігався в інтервалі часу з 09:54 до 10:05 UT, а кінець — з 10:07 до 11:10 UT. Тривалість СЗ становила від 4 хв до 67 хв. Незначна тривалість затемнення і рух вечірнього термінатора вплинули на іоносферні ефекти СЗ.

Стан космічної погоди. Для коректного виділення іоносферних ефектів сонячного затемнення необхідний ретельний аналіз стану космічної погоди.

Концентрація заряджених частинок в сонячному вітрі 8—11 серпня 2018 р. змінювалася в межах $(3...15) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, їхня швидкість була близькою до 400 км/с, температура — до 10^5 К [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/

pub/lists/ace2/, 58]. Динамічний тиск в сонячному вітрі був близьким до 1...3 нПа. Складова B_z міжпланетного магнітного поля у першій половині доби 11 серпня 2018 р. змінювалася від 3 до 10 нТл, а потім різко зменшувалася від 10 до -7 нТл. При цьому функція Акасофу збільшилася від 1 до 15 ГДж/с. Авроральний індекс AE у другій половині доби 11 серпня 2018 р. збільшився від 100...200 до 1500 нТл. При цьому індекс Kp зріс до 2.7...3, а індекс D_{st} зменшився від 10 до -30 нТл.

Таким чином, стан космічної погоди у першій половині доби (за всесвітнім часом) 11 серпня 2018 р., тобто у період затемнення був цілком сприятливим для спостереження ефектів СЗ в іоносфері.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вихідні дані. Для розв'язання задачі виявлення відгуку іоносфери на часткове сонячне затемнення 11 серпня 2018 р. оброблялися реєстра-

Таблиця 1. Станції та супутники, які використовувались у дослідженні

Станція			Супутники	Країна
CHAN	43.60	125.44°	G13	КНР
DAEJ	36.22°	127.37°	G21	Республіка Корея
GAMG	35.41°	127.92°	G21	Республіка Корея
MHGR	53.30°	122.34°	C04, C13, G05, G13, G15	КНР
OSN3	36.90°	127.03°	G21	Республіка Корея
OSN4	36.90°	127.03°	G21	Республіка Корея
P101	43.02°	140.86°	G21	Японія
P102	41.89°	139.49°	G29	Японія
P105	38.38°	139.55°	G21,G29	Японія

ції сигналів глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС). Інформацію про залучені станції та супутники наведено в табл. 1.

За допомогою вимірних псевдодальностей у двохчастотному приймачі розраховані іоносферні затримки сигналу i , відповідно, вертикальний повний електронний вміст (ПЕВ, TEC , N_{LV}). Значення ПЕВ подаються в одиницях TECU (Total Electron Content Unit, 1 TECU = 10^{16} м^{-2}). Максимум електронної концентрації відносимо до F2-шару іоносфери з розрахунковою середньою висотою 350 км. Перетин лінії супутник — станція з F2-шаром називають іоносферною точкою; всі подальші розрахунки будемо відносити до цього шару та цієї точки. Центральна проєкція іоносферної точки на поверхню Землі визначає підіоносферну точку. Траєкторії іоносферних або підіоносферних точок супутників назвемо для стислості прольотами, а траєкторію тіні Місяця в F2-шарі — слідом місячної тіні.

Оцінка похибок. Можливі джерела похибок розрахованих значень ПЕВ такі.

1. Похибки розрахунку координат супутника у рамках моделі руху.
2. Похибки вимірювання псевдодальностей за кодом і фазою.
3. Похибки різниці псевдодальностей для різних несучих частот, систематична та випадкова похибки.

Далі розглянемо ці похибки детальніше.

Координати розташування супутника визначаються за індивідуальними навігаційними даними, які публікуються не рідше, ніж раз на добу. Навігаційні дані є параметрами орбіти за моделлю Кеплера з поправками. Початковий час (епоха) задає справжнє положення супутника, яке встановлюється наземними станціями стеження. Між даними, які публікуються, положення супутника розраховується за моделлю, та з часом виникає розбіжність розрахованого положення супутника з реальним. Це пов'язано з тим, що Земля є геоїдом з нерівномірним розподілом мас, а не однорідною кулею. Гравітаційні збурення в орбіту штучного супутника також вносять інші космічні тіла. Для забезпечення необхідної точності навігації в ГНСС спеціальні наземні станції спостереження вимірюють істинні положення супутників і кожні дві години передають уточнені параметри орбіти на супутники з подальшою передачею на приймачі. За дві години навігаційний супутник подолає приблизно 23000 км. За цей час утворюється розбіжність між розрахунковим і дійсним положенням супутника.

Оцінімо величину відхилення за добу кеплерівської орбіти від справжнього положення. Істинне положення вважаємо відомим у момент «оновлення» двогодинних координат. Розрахунки координат іоносферних точок показують, що відхилення дійсного положення від розрахункового через 2 год не перевищують 50 м, а через 18 год — не перевищують 250 м. Географічні координати підіоносферної точки за 10 год відхиляються від справжнього положення не більше ніж на 0.002 для широти та не більш, ніж на 0.007° для довготи.

Положення супутника також впливає на величину кута між нормаллю до іоносферного F2-шару та напрямком супутник — станція. Відносна похибка вертикального ПЕВ за 10 год становить не більше 0.001 %.

Наведені розрахунки показують, що для розв'язання задач виявлення та ідентифікації збурень точність координат іоносферних точок є достатньою для орбітальних даних, які публікуються не рідше, ніж раз на добу.

Величина ПЕВ залежить від точності визначення псевдодальностей, моделі показника заломлення в іоносфері та апаратної похибки. Вимірювання фази в системі GPS виконуються з високою точністю. Помилка у визначенні ПЕВ по 30-с інтервалах усереднення не перевищує 10^{14} м^{-2} (або 0.01 TECU) [8].

Основну систематичну похибку визначення ПЕВ двочастотним приймачем вносить поправка DCB (Differential Code Biases). Дана похибка утворюється за рахунок зміщення часу між двома спостере-

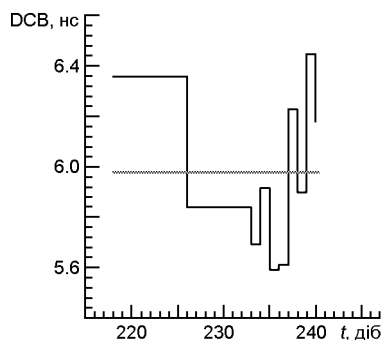


Рис. 1. Часова залежність DSB (параметри C1C, C2WyGPS) станції AGGO за період 215...240 діб від початку 2018 р. Горизонтальна лінія — середнє значення DSB

женнями коду сигналу ГНСС на різних частотах. Поправку DSB для приймача, як правило, розраховують на кожен день. Похибка визначення DSB зазвичай не перевищує 0.05 нс, що для частот GPS відповідає 0.14 TECU. Приклад добової залежності DSB наведено на рис. 1. Видно, що варіації DSB від доби до доби досягають 0.4 нс, а середнє квадратичне відхилення значень DSB становлять 0.3 нс, що дає похибку визначення ПЕВ близько 0.8 TECU. Різниця значень DSB для суміжних днів передбачає наявність випадкового шуму, який необхідно враховувати у методиках виявлення збурень ПЕВ. Добові зміни DSB, мабуть, мають зовнішнє джерело. Припустимо, що накопичення змін DSB за добу носять неперервний характер. Тоді ці випадкові похибки можна віднести до періоду досліджуваних збурень. Зокрема, середня добова похибка станції AGGO за 25 діб дорівнює 0.8 TECU за добу або 0.03 TECU/год.

Ця похибка, прихована невизначеність розрахунку ПЕВ, задає верхню оцінку точності варіації ПЕВ. Оскільки розрахункова максимальна амплітуда часових варіацій ПЕВ досягала 0.7 TECU/год, то похибка розрахунків варіацій ПЕВ дорівнює 4 %.

Час і місце розташування точок вимірювання, прольоти. Для оцінювання ПЕВ використовувалися часові послідовності псевдодальностей як за кодом, так і за фазою на двох основних радіоканалах з різними несучими частотами f_1 та f_2 . Для супутників GPS (Global Positioning System, США) ці частоти дорівнюють $f_1 = 1575.42$ МГц і $f_2 = 1227.60$ МГц [78]. Для супутників BDS (Bei Dou System, КНР) $f_1 = 1561.098$ МГц та $f_2 = 1207.14$ МГц [78].

Розрахунок розташування супутників у період вимірювань під час сонячного затемнення 11 серпня 2018 р. порівнюємо з аналогічними положеннями за попередній день. Щоб відобразити розташування супутників, побудуємо на географічній прямокутній контурній карті прольоти використовуваних у роботі ШСЗ (рис. 2—4). Для порівняльного аналізу оберемо інтервал часу 08:00—12:00 UT, який включає в себе час спостереження сонячного затемнення в районі північного Китаю 11 серпня 2018 р. На рисунках приведено назви супутників, шкали часу з кроком 10 хв (короткі штрихи) і відмітки контрольного положення супутника на момент часу 10:40 UT (кружки). Контрольний час відповідає максимальній фазі сонячного затемнення в околиці м. Хар-

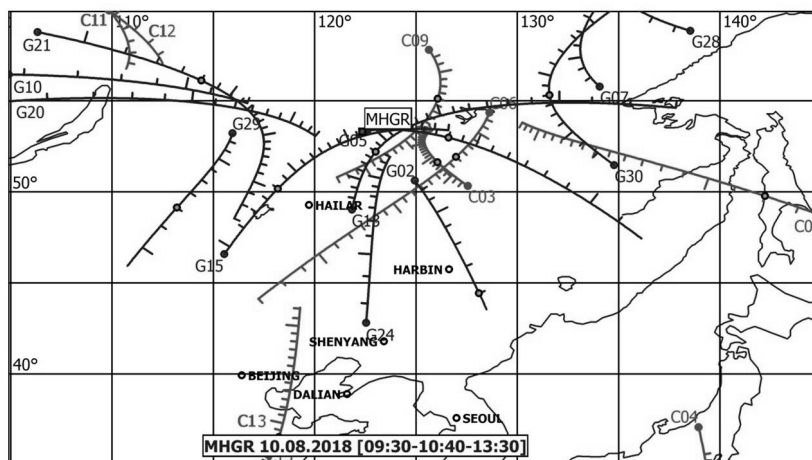


Рис. 2. Карта прольотів супутників. Станція MHGR. 10 серпня 2018 р., 09:30—13:30 UT

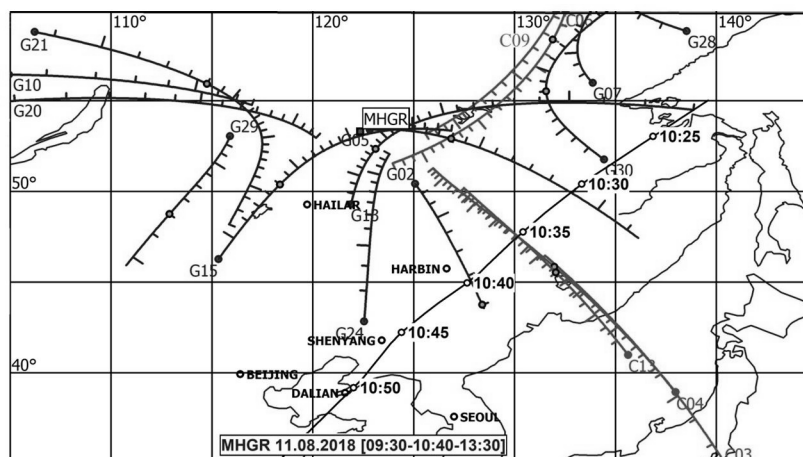


Рис. 3. Карта сліду місячної тіні з прольотами супутників. Станція MHGR. 11 серпня 2018 р., 09:30—13:30 UT

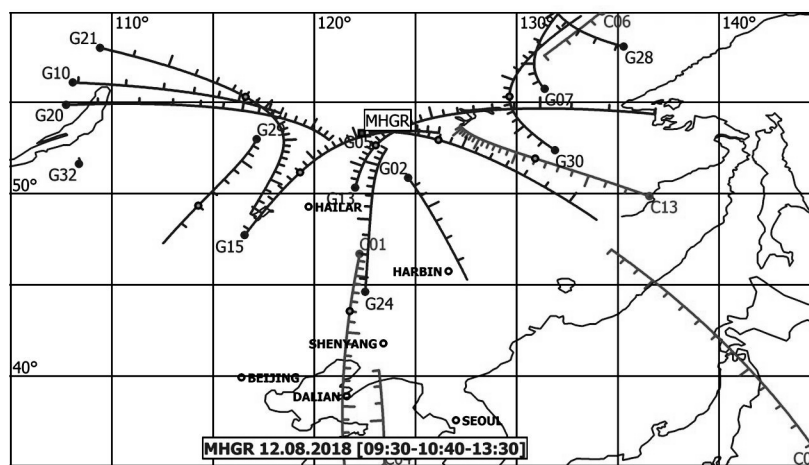


Рис. 4. Карта прольотів супутників. Станція MHGR. 12 серпня 2018 р., 09:30—13:30 UT

бін. На слід місячної тіні (рис. 3) нанесено шкалу часу з п'ятихвилинним інтервалом. Відображено ті супутники поточного угруповання, іоносферні точки яких лежать поблизу траєкторії місячної тіні. Початок прольоту відзначено невеликим кружком, який вказує на початок радіобачення або початок розрахункового часового інтервалу.

Методика розрахунку ПЕВ. Поправка DCB. Методи вимірювання псевдодальностей у приймачах змінюються слідом за змінами в технологіях. На поточний момент псевдодальності представлено у вигляді часових послідовностей C1C, L1C, C2W, L2W для супутників GPS та C1I, L1I, C7I, L7I для супутників BDS [78]. Різниця несучих частот в радіоканалах привносить систематичні та випадкові похибки у різницю псевдодальностей. Для компенсації систематичної похибки використовують попередньо розраховані поправки DCB. Ці поправки щодня визначаються для всіх пар кодових псевдодальностей за кожним супутником і кожним приймачем [80, 83].

Нагадаємо визначення DCB для супутника та приймача. Нехай P_1 та P_2 — виміряні псевдодальності за кодом для частот f_1 та f_2 відповідно. Популярну двочастотну модель для псевдодальностей, згідно із [80], запишемо у вигляді

$$P_{1,2} = p + c(t^R - t^T) + d^{TROP} + d_{1,2}^{ION} + c\left(\frac{T}{1,2} - \frac{R}{1,2}\right), \quad (1)$$

де p — справжня поточна дальність від супутника до приймача, c — швидкість світла, t^R — похибка годинника приймача, t^T — похибка годинника передавача, d^{TROP} — затримка сигналу в тропосфері, $d_{1,2}^{ION}$ — затримка сигналу в іоносфері, $\frac{T}{1,2}$ — поправка до вимірювання затримки часу в передавачі, $\frac{R}{1,2}$ — поправка до вимірювання затримки часу в приймачі.

Тропосферна затримка d^{TROP} , як і коефіцієнт заломлення тропосфери, не залежить від частоти. Тоді, згідно з виразом (1), різниця псевдодальностей $P_2 - P_1$ містить частотно-залежні затримки в іоносфері, передавачі та у приймачі:

$$P_2 - P_1 = d_2^{ION} - d_1^{ION} + c\left(\frac{T}{2} - \frac{T}{1}\right) + c\left(\frac{R}{2} - \frac{R}{1}\right). \quad (2)$$

Введемо позначення

$$DCB^T = \frac{T}{1} - \frac{T}{2}, \quad (3)$$

$$DCB^R = \frac{R}{1} - \frac{R}{2}. \quad (4)$$

Тоді вираз (2) набуде вигляду

$$P_2 - P_1 = d_2^{ION} - d_1^{ION} + c(DCB^T - DCB^R),$$

звідки різниця іоносферних затримок для різних частот дорівнюватиме

$$d_2^{ION} - d_1^{ION} = P_2 - P_1 - c(DCB^T - DCB^R). \quad (5)$$

Тут DCB^T та DCB^R визначають часові затримки у передавачі та приймачі, пов'язані з відмінністю частот.

З іншого боку, величини $d_{1,2}^{ION}$ відповідають груповій затримці сигналу I_g , її значення пов'язані з інтегральною електронною концентрацією N_L в іоносфері вздовж шляху поширення сигналу [80]

$$d_{1,2}^{ION} = I_g(f_{1,2}) = \frac{40.35}{f_{1,2}^2} N_L. \quad (6)$$

Формула (5) з урахуванням (6) набуде вигляду

$$40.35 N_L (f_2^2 - f_1^2) = P_2 - P_1 - \alpha(DCB^T - DCB^R),$$

або

$$N_L = \frac{P_2 - P_1 - \alpha(DCB^T - DCB^R)}{40.35(f_2^2 - f_1^2)}. \quad (7)$$

Для підвищення точності N_L замість різниці псевдодальностей за кодом $P_2 - P_1$ використовують різницю псевдодальностей за фазою $L_{1,1} - L_{2,2} + \dots$. Тут \dots — фазова невизначеність, яка знімається статистичними методами. Кінцева формула для визначення вертикального ПЕВ має вигляд

$$N_{LV} = \frac{L_{1,1} - L_{2,2} - \alpha(DCB^T - DCB^R)}{40.35(f_2^2 - f_1^2)} \cos \theta. \quad (8)$$

Тут θ — кут між напрямом супутник — приймач та нормаллю до F2-шару іоносфери.

Точність визначення ПЕВ залежить від похибок DCB^R та кута входження радіопромменя у F2-шар іоносфери, тобто від взаємного положення супутника та приймача. Значення DCB^R розраховують кожного дня та пов'язують в основному з технічним станом приймача. Добова ж мінливість DCB^R , ймовірно, контролюється зовнішніми причинами. Тому розрахункова похибка DCB^R складається з двох частин — системної та випадкової похибок.

Для GPS на поточний момент використовується пара псевдодальностей за кодом C1C та C2W. Поправку DCB^T для супутників визначає власник супутникової системи, а поправку DCB^R для станції користувач встановлює самостійно.

Знання поправок DCB^T та DCB^R необхідне для розрахунку ПЕВ і відповідно для досліджень стану іоносфери. В рамках експерименту IGS Multi-GNSS (MGEX) різні значення DCB для супутників і станцій в даний час представлено в репозитаріях CDDIS та IGN [78]. Інститут геодезії та геофізики Китайської академії наук (IGG CAS) у м. Ухань і Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt (DLR) в Німеччині надають DCB^T і DCB^R із затримкою 2-3 дні у щоденних файлах BSX [83].

Для супутників GPS і BDS відповідні значення DCB^T перебувають в зазначених базах. А поправки DCB^R для станції MHGR в даний час немає, і пряме вимірювання ПЕВ неможливе, як і коректне порівняння варіацій ПЕВ для цієї станції, отриманих від різних супутників.

Для оцінки значення DCB^R станції MHGR скористаємося картами глобального розподілу ПЕВ, опублікованими в роботі [80]. Значення ПЕВ наводяться з кроком 2.5 по широті та 5 по довготі. Оберемо два дні для розрахунку DCB^R станції MHGR — 9 та 10 серпня 2018 р. Скористаємося даними супутникових вимірювань і картами глобального розподілу ПЕВ [81]. Уздовж ліній прольоту на висоті F2-шару іоносфери порівнюємо дві розрахункові часові послідовності ПЕВ $Map(t)$ з глобальної карти і $Satellite(DCB^R, t)$, для обраних супутників з невідомими параметром DCB^R :

$$Map(t) \quad Satellite(DCB^R, t).$$

За допомогою методу найменших квадратів оцінюємо DCB^R для кожного прольоту. Середнє значення DCB^R дорівнює 11.37 нс з середнім квадратичним відхиленням 0.87 нс. Далі в розрахунках ПЕВ по даних станції MHGR будемо використовувати дану оцінку. При цьому допускається похибка визначення N_{LV} , що дорівнює 0.14 TECU.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Вертикальний повний електронний вміст. Для розрахунку DCB^R у методиці отримання ПЕВ побудуємо лінії рівного значення з карт глобального розподілу ПЕВ на глобусі. Максимальне значення ПЕВ на глобальній карті 11 серпня 2018 р. о 10:00 UT становить 27.6 TECU. При рівномірному розбитті на 50 рівнів різниця значень ПЕВ між сусідніми рівнями дорівнює 0.55 TECU. Вивчення карт глобального погодинного розподілу ПЕВ у розрахунковому періоді часу призвело до виявлення ефекту сонячного затемнення (рис. 5).

На рис. 6 наведено перерізи глобальної карти по довготі і широті у точці мінімального значення ПЕВ. Зменшення ПЕВ спостерігаються в інтервалі 115...145 сх. д. (рис. 6а) і в інтервалі 42...52 пн. ш. (рис. 6б). Максимальні зміни ПЕВ на глобальній карті у межах 42.5...60 сх. ш. та 115...145 сх. д. для 10:00 UT та 11:00 UT становили 1.2 TECU/год по часу, 0.33 TECU на 100 км по широті та 0.14 TECU на 100 км по

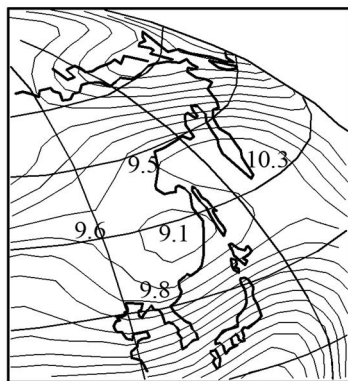


Рис. 5. Карта глобального розподілу ПЕВ в районі північного Китаю з лініями рівного значення ПЕВ та областю знижених до 9.1 TECU ПЕВ (11 серпня 2018 р., 10:00 UT)

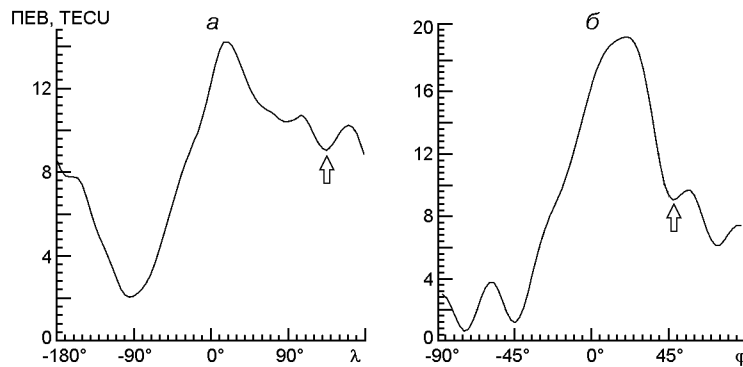


Рис. 6. Переріз ПЕВ: *a* — по широті $\lambda = 48.8$ пн. ш., *б* — по довготі $\phi = 132.9$ сх. д. Стрілками відмічено області знижених значень ПЕВ. 11 серпня 2018 р., 10:00 — 11:00 UT

довготі. Слід зауважити, що деякий вплив на величину ПЕВ надає близькість вечірнього термінатора. Проміжок часу в одну годину та розмір 100 км були обрані відповідно до розмірів області прольотів. При проведенні реальних вимірювань ПЕВ складно розділити просторові зміни від часових. У нашому випадку рух швидшої тіні дозволяє знехтувати просторовими змінами, тому далі будемо оцінювати величину збурення з часової залежності ПЕВ.

Як відомо, півтінь часткового сонячного затемнення в кілька разів більша за розмір тіні від повного затемнення та досягає кількох тисяч кілометрів. Тому відгук іоносфери від півтіні повинен відбиватись і на прольотах, віддалених від траєкторії руху центру місячної тіні на значній відстані. Пошук подібних збурень ПЕВ розумно розпочинати поблизу області максимального зближення іоносферних точок прольоту та центра місячної тіні (табл. 2). У табл. 2 наведено значення мінімальної відстані d між іоносферними точками прольоту на висоті

Таблиця 2. Місце та час області пошуку збурень

Станція	Супутник	Час			d , км	T_0	T_k	T_s
MHGR	C04	10:36	47.0	130.7°	134	09:52	10:32s*	12:05
	C13	10:36	46.8	130.7°	141	09:53	10:31s	12:04
	G05	10:31	53.1	125.5°	666	09:42	11:10s	12:50
	G13	10:33	52.4	122.8°	781	09:44	11:18s	12:57
	G15	10:36	50.8	119.0°	947	09:48	11:22	13:06
CHAN	G13	10:42	43.56	125.9°	111	10:01	10:43s	12:13
DAEJ	G21	10:48	41.6	120.0°	311	10:07	11:03s	12:32
GAMG	G21	10:49	41.0°	120.4°	243	10:08	11:00s	12:28
OSN3	G21	10:48	41.2°	121.2°	216	10:07	10:57s	12:26
OSN4	G21	10:48	42.2°	119.7°	363	10:06	11:05s	12:31
P101	G21	10:32	49.4°	131.8°	113	09:48	10:34s	12:09
P102	G29	10:49	38.4°	126.8°	367	10:11	10:32s	11:56
P105	G21	10:37	46.5°	128.7°	34	09:54	10:39s	12:11
	G29	10:51	35.2°	126.8°	648	10:17	10:24s	11:53

* Літерою «s» відмічено час заходу Сонця на висоті $z = 0$

F2-шару іоносфери та центра місячної тіні, а також момент часу досягнення цієї події та географічні координати підіоносферної точки. Отримані координати досягнення мінімальної відстані використовуються як розрахункові координати часу початку та закінчення затемнення: T_0 и T_k , часу заходу Сонця на висоті $z = 0$ км і висоті F2-шару іоносфери: T_s і T'_s . Замість часу закінчення затемнення може приводитися час заходу Сонця на нульовій висоті, якщо затемнення відбувається пізніше від заходу Сонця (відмічено літерою «s»).

Пошук збурень ПЕВ для наведених супутників провадився в інтервалі від початку сонячного затемнення до заходу Сонця на висоті $z = 0$ км. Моменти часу затемнення та заходу Сонця розраховуються з високою точністю. Час і положення точок вимірювання та значення іоносферної затримки відповідають високим вимогам глобальної навігаційної супутникової системи. Разом вони є досить точним вимірювальним інструментом для успішної локалізації та ідентифікації збурень ПЕВ.

Для розрахунків значень і варіацій ПЕВ були обрані супутники C04, C13 (BDS), прольоти яких безпосередньо перетинають слід місячної тіні. Також використовувалися супутники G02, G05, G13, G15, G30 (GPS) з прольотами поблизу сліду місячної тіні. Для розрахунку варіацій використовувалась апроксимація поліномом часової залежності ПЕВ на довільному інтервалі часу. Інтервал апроксимації, як правило, включав в себе досліджуване збурення та був досить великим, щоб поліном відбивав природні, без збурень, зміни ПЕВ. Різниця між часовою залежністю ПЕВ та функцією апроксимації є варіацією ПЕВ.

Зміни з часом вертикального ПЕВ для супутників C04, C13 і G05 для 11 серпня 2018 р. відносно станції MHGR приведено на рис. 7. Час прольоту обмежувався періодом радіобачення та завадами. Вертикальна лінія вказує на моменти часу: суцільна — початок і закінчення сонячного затемнення, штрихові — захід Сонця на нульовій висоті та висоті F2-шару іоносфери. Трикутник на осі часу додатково вказує на

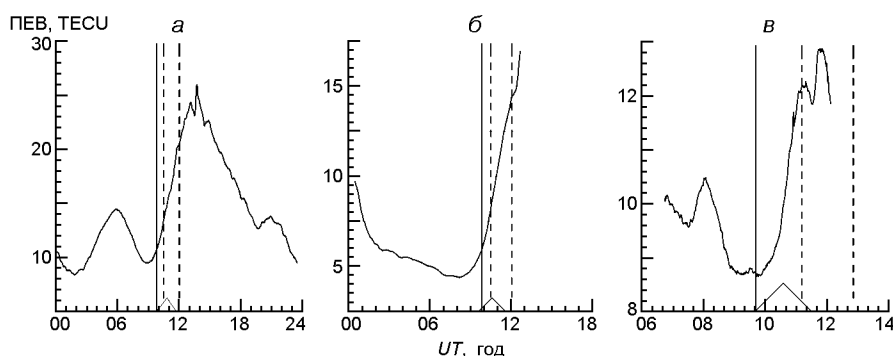


Рис. 7. Часові залежності ПЕВ, 11 серпня 2018 р., станція MHGR: а, б, в — супутники C04, C13, G05 відповідно. Тут і далі вертикальна суцільна лінія — час початку затемнення, пунктирні лінії — час заходу Сонця на висотах $z = 0$ та $z = 350$ км. Трикутник відображає фази затемнення: початкову, максимального покриття та закінчення

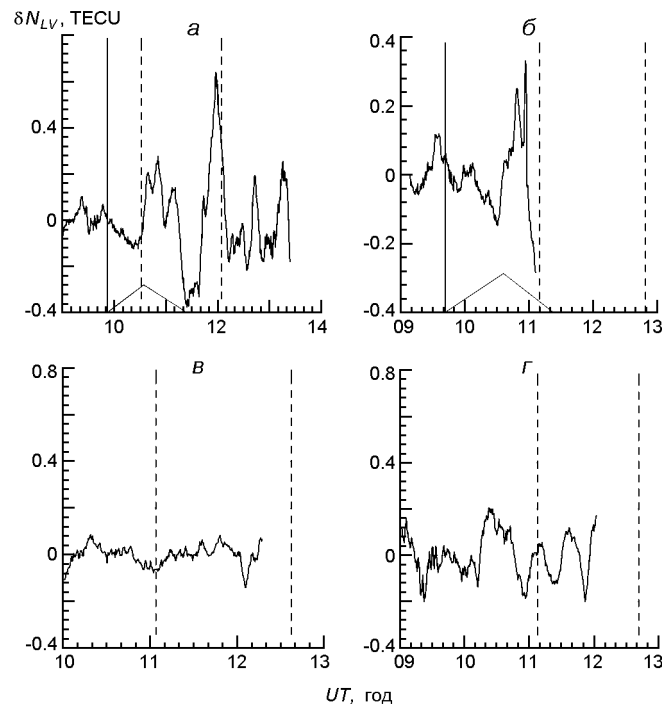


Рис. 8. Часові залежності варіацій ПЕВ 11 серпня 2018 р. Станція MHGR: *a* — супутник C04, *б* — G05, *в* — G05 (10 серпня 2018 р.), *г* — G05 (12 серпня 2018 р.)

фази затемнення, зокрема й на фазу максимального покриття диску Сонця Місяцем.

Швидкість центра місячної тіні набагато перевищує швидкість іоносферних точок супутників. У період збурення прольоти супутників C04 і C13 лежали поблизу лінії місячної тіні, і збурення ПЕВ для них можна розглядати як локальні коливання іоносферної плазми.

Хвильові збурення. Не всі використані станції надають поправку DCB. Тому для аналізу збурень ПЕВ скористаємося її варіаціями

N_{NL} , отриманими за допомогою поліноміальної апроксимації. Приклади розрахунків варіацій ПЕВ наведено на рис. 8.

Сонячне затемнення в районі північного Китаю розпочиналося перед заходом Сонця. Відгук іоносфери на проходження вечірнього термінатора позначається у виникненні квазіперіодичних варіацій ПЕВ. Сонячне затемнення викликає подібну реакцію, але меншу величину ефекту. Розглянемо часові варіації ПЕВ 11 серпня 2018 р. На рис. 8*a* (супутник C04) спостерігається регулярне зниження ПЕВ відносно нульового рівня від початку затемнення до його фази максимального покриття, яке тривало близько 0.5 год: значення варіації досягало $0.12 \text{ TECU}/0.5 \text{ год} = 0.24 \text{ TECU}/\text{год}$. Пізніше, після початку заходу Сонця на висоті $z = 0 \text{ км}$, спостерігаються очікувані квазіперіодичні варіації ПЕВ від дії вечірнього термінатора.

На рис. 8*б* (супутник G05) початок заходу Сонця на висоті $z = 0 \text{ км}$ відбувається пізніше фази максимального покриття диска Сонця Мі-

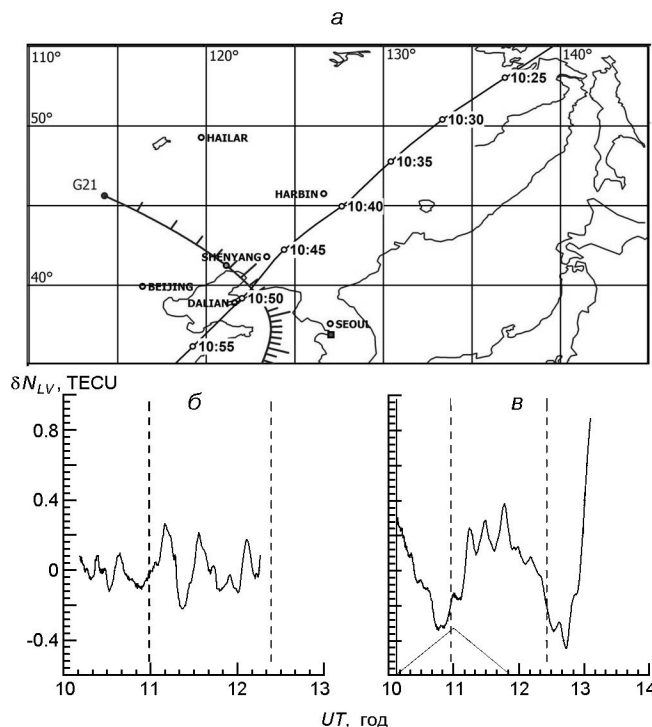


Рис. 9. Станція OSN3, супутник G21: а — карта, 11 серпня 2018 р. 10:00—14:00 UT; б, в — часові залежності варіацій ПЕВ за 10 та 11 серпня 2018 р. відповідно

сяцем. З моменту часу 10:30 UT спостерігається зростання ПЕВ відносно нульового рівня ($0.15 \text{ TECU}/0.5 \text{ год} = 0.3 \text{ TECU}/\text{год}$), що відповідає поступовому зменшенню покриття.

Рис. 8в та 8г ілюструють рівень флуктуацій ПЕВ для супутника G05 для контрольних діб 10 та 12 серпня 2018 р. У цьому випадку розрахунок часу заходу Сонця прив'язується до середньої точки прольоту. Як видно, часова залежність варіації ПЕВ не містить фрагментів регулярного зниження та підвищення значень ПЕВ, подібних варіаціям у день СЗ.

Розраховані варіації ПЕВ для станції OSN3 (супутник G21) наведено на рис. 9. Кружечком на траєкторії прольоту (рис. 9а) відзначено момент максимального зближення іоносферних точок і центра місячної тіні о 10:48 UT. Квадратиком відзначено положення станції, на південь від м. Сеул. У контрольний день (рис. 9б) часова залежність варіації ПЕВ не містила фрагментів регулярного зменшення чи збільшення значень ПЕВ, властивих СЗ (рис. 9в). У контрольний день зменшення ПЕВ перед моментом часу 11:00 досягало 0.1 TECU та не виходило за межі похибки методу.

На рис. 10 приведено результати спостереження для станції CHAN у період сонячного затемнення. На рис. 10а наведено карту за 11 серпня 2018 р. з прольотом обраного супутника G13. Кружечком відзначено час максимального зближення з центром місячної тіні, яке мало

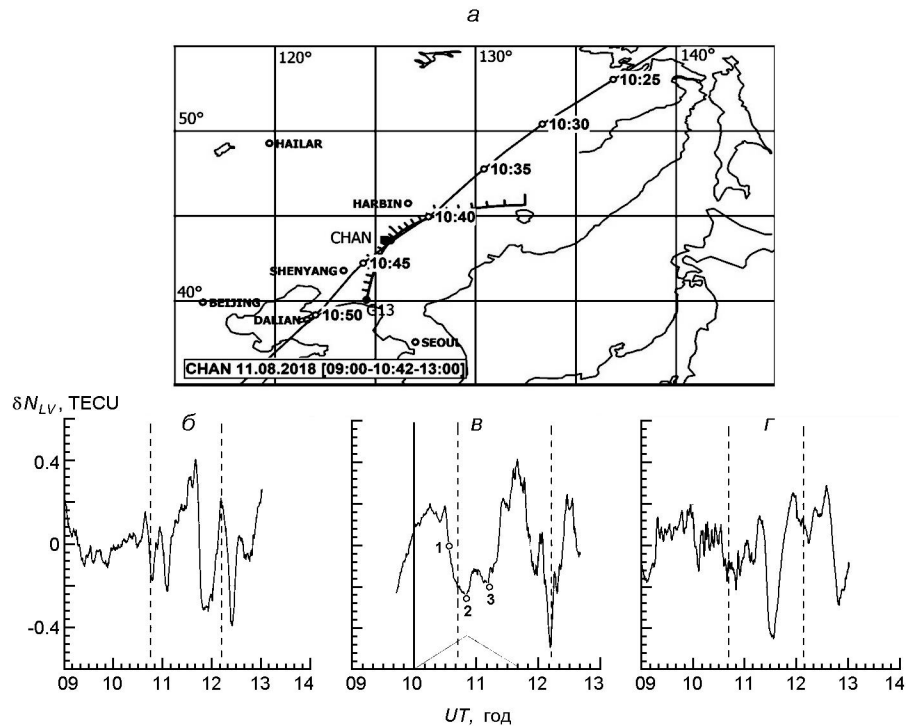


Рис. 10. Станція CHAN, супутник G13: а — карта від 11 серпня 2018 р. 10:00—13:00 UT; б, в, г — часові залежності варіацій ПЕВ від 10, 11, 12 серпня 2018 р. відповідно

місце о 10:42:30 UT. Квадратиком відмічено положення станції між містами Шеньян і Харбін. Варіації ПЕВ на 10, 11 та 12 серпня 2018 р. наведено на рис. 10б, в, г відповідно. Під час затемнення спостерігалось зниження варіації ПЕВ між відмітками 1 та 2, відносно нульового рівня до -0.23 TECU за 20 хв, або 0.7 TECU/год. Подальшому зменшенню ПЕВ перешкоджає вплив вечірнього термінатора та виникнення супутніх квазіперіодичних варіацій.

У контрольну добу 10 серпня 2018 р. (рис. 10б) варіації ПЕВ носили випадковий характер. Не спостерігається регулярного зниження та підвищення ПЕВ, подібного реакції іоносфери у періоди затемнення поза інтервалом дії вечірнього термінатора.

ОБГОВОРЕННЯ

Просторовий розподіл збурень ПЕВ. Особливістю даного часткового СЗ було те, що воно мало місце у передзахідний час доби. Тому ефекти вечірнього термінатора могли накладатися на ефекти СЗ.

Розглянемо спочатку вертикальний ПЕВ у районі Північного Китаю. З рис. 5 видно, що в цьому районі просторовий градієнт знизив ПЕВ приблизно на 0.7 TECU. Про це ж свідчать широтна та довготна залежності (див. рис. 6). При $\bar{N}_{LV} = 10$ TECU маємо, що значення ПЕВ

зменшилися в середньому на $\Delta N_{NL} / \bar{N}_{NL} \approx 7\%$. Важливо, що форма ліній постійних значень ПЕВ має вирвopodobний вигляд. Це однозначно свідчить про те, що зменшення ПЕВ пов'язане зі СЗ, а не з проходженням сонячного термінатора. Ефективний розмір вирви за широтою становить 1300 км, за довготою — близько 2000 км.

Вивчення глобальних карт у період затемнення показало, що у формуванні варіацій ПЕВ часова залежність є визначальною.

Аперіодичні збурення повного електронного вмісту. Про появу аперіодичних збурень ПЕВ свідчать часові залежності $N_{LV}(t)$, отримані за допомогою супутників C04 (рис. 8а), G21, G05 (рис. 8б, 9в) та G13 (рис. 10в).

Часові залежності $N_{LV}(t)$ для низки супутників і станцій наведено на рис. 8а та 8б. Тривалість аперіодичного коливання відповідала тривалості СЗ у точці спостереження та не перевищувала 105 хв.

Доказом того, що аперіодичні збурення були викликані СЗ, а не вечірнім термінатором, є те, що вони спостерігались до моменту заходу Сонця. Момент заходу Сонця прив'язувався до точки вимірювання та її максимального зближення до центру місячної тіні. Для навігаційних супутникових систем і астрономічних розрахунків ці моменти часу визначалися з достатньою точністю.

Періодичні збурення повного електронного вмісту. Квазіперіодичні варіації ПЕВ чітко реєструвалися поблизу моментів проходження сонячного термінатора. Їхня амплітуда становила 0.2...0.4 TECU, а період — 15...20 хв. Хвильових збурень, викликаних СЗ, не зареєстровано. Це пов'язано з малою величиною фази СЗ та незначним збуренням концентрації електронів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

За допомогою супутників глобальної навігаційної системи досліджено реакцію ПЕВ у іоносфері на часткове СЗ 11 серпня 2018 р. над Китаєм і встановлено наступне.

1. Вдалося впевнено виділити іоносферні ефекти СЗ, незважаючи на вплив сонячного термінатора.
2. Ефекти СЗ виявилися досить малими через низькі значення фази СЗ.
3. Над Китаєм спостерігалось вирвopodobне зменшення ПЕВ, яке має розмір 1300 км за широтою і 2000 км за довготою. Відносне зменшення ПЕВ становило близько 7%.
4. Затемнення супроводжувалося генерацією аперіодичних збурень ПЕВ зі швидкістю близько 0.4...0.8 TECU/год і тривалістю близько 105 хв.
5. Хвильові збурення, викликані СЗ, впевнено не спостерігались. Це пов'язано з малою величиною фази СЗ та незначним збуренням концентрації електронів.

1. Акимов А. Л., Акимов Л. А., Черногор Л. Ф. Параметры турбулентных процессов в атмосфере, сопровождавших затмения Солнца. *Радиофиз. и радиоастрон.* 2007. 12. № 2. С. 117—134.
2. Акимов А. Л., Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008 г. в приземной атмосфере. *Кинематика и физика небес. тел.* 2010. 26. № 3. С. 58—74.
3. Акимов А. Л., Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове. *Геомагнетизм и аэрон.* 2005. 45. № 4. С. 526—551.
4. 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. *Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники.* 2002. № 2. С. 25—63.
5. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове. *Успехи соврем. радиоэлектроники.* 2005. № 3. С. 55—70.
6. Альперт Я. Л., Горожанкин Б. Н. Солнечные затмения и радио-исследования ионосферы. *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1944. 8. 85 с.
7. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Перевалова Н. П., Водяников В. В., Гордиенко Г. И., Литвинов Ю. Г., Яковец А. Ф. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном. *Геомагнетизм и аэрон.* 2007. 47. № 4. С. 491—500.
8. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли.* Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН; ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 479 с.
9. Безродный В. Г., Блиох П. В., Шубова Р. С., Ямпольский Ю. М. *Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля — ионосфера.* М.: Наука, 1984. 146 с.
10. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 1. Моделирование эффектов затмения. *Геомагнетизм и аэрон.* 1999. 39. № 6. С. 45—51.
11. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Тащилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 2. Данные наблюдений и сравнения с результатами моделирования. *Геомагнетизм и аэрон.* 1999. 39. № 6. С. 52—60.
12. Большакова О. В., Курашкова Н. А., Троицкая В. А. Эффект солнечного затмения в геомагнитных пульсациях Рс 3. *Геомагнетизм и аэрон.* 1987. 27. № 1. С. 122—125.
13. Борисов Б. Б., Егоров Д. А., Егоров Н. Е., Колесник А. Г., Колесник С. А., Мельчинов В. П., Нагорский П. М., Парфенов С. С., Решетников Д. Д., Смирнов В. Ф., Степанов А. Е., Тарашук Ю. Е., Тельпуховский Е. Д., Цыбиков Б. Б., Шинкевич Б. М. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. *Геомагнетизм и аэрон.* 2000. 40. № 3. С. 94—103.
14. 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 соврем. радиоэлектроники.* 2007. № 3. С. 38—53.
15. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Черногор Л. Ф. Радиофизические наблюдения акустико-гравитационных волн в ионосфере во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радиофиз. и радиоастрон.* 2012. 17. № 4. С. 344—352.
16. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ио-

- носферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2007. 13. № 6. С. 74—86.
17. 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. *Геомагнетизм и аэрон*. 2006. 46. № 2. С. 193—208.
18. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование. *Геомагнетизм и аэрон*. 2006. 46. № 2. С. 209—218.
19. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты наблюдений волновых возмущений в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрон*. 2013. 53. № 4. С. 509 — 521.
20. Гармаш К. П., Леус С. Г., Черногор Л. Ф. Радиофизические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. на наклонных радиотрассах. *Радиофиз. и радиоастрон*. 2011. 16. № 2. С. 164—176.
21. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофиз. и радиоастрон*. 2000. 5. № 4. С. 348—360.
22. Григоренко Е. И., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Эффекты в ионосфере и атмосфере, вызванные солнечным затмением 29 марта 2006 г. *Геомагнетизм и аэрон*. 2008. 48. № 3. С. 350—364.
23. 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. 10. №1. С. 12—25.
24. 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. 15. № 3. С. 62—69.
25. 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 аэрон*. 2013. 53. № 1. С. 119—129.
26. 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 аэрон*. 2014. 54. №5. С. 627—637.
27. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г. *Радиофиз. и радиоастрон*. 2012. 17. № 2. С. 132—146.
28. 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. 15. № 3. С. 70—81.
29. Емельянов Л. Я., Складов И. Б., Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2009. 15. № 4. С. 12—21.
30. Колоколов Л. Е., Легенька А. Д., Пулинец С. А. Ионосферные эффекты, связанные с солнечным затмением 18 марта 1988 г. *Геомагнетизм и аэрон*. 1993. 33. № 1. С. 49—57.
31. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в средней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофиз. и радиоастрон*. 2000. 5. № 4. С. 361—370.
32. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсужде-

- ние результатов. *Космічна наука і технологія*. 2008. 14. № 1. С. 57—64.
33. 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. 15. № 4. С. 3—11.
34. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 3. Результаты расчетов и обсуждение. *Геомагнетизм и аэрон.* 2013. 53. № 3. С. 384—393.
35. Соколов В. Д., Безродных И. П., Кузьмин В. А., Скрыбин Н. Г. Эффект солнечного затмения в риометрических данных в Якутске 9 марта 1997 года. *Геомагнетизм и аэрон.* 1999. 39. № 2. С. 139—140.
36. Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А., Бойко Г. Н., Терентьев С. П. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. *Изв. вузов. Радиофиз.* 2000. 43. № 8. С. 682—686.
37. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца. *Радиофиз. и радиоастрон.* 2000. 5. № 4. С. 371—375.
38. Черногор Л. Ф. Вариации амплитуды и фазы ОНЧ радиоволн в ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрон.* 2010. 50. № 1. С. 96—106.
39. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрон.* 2010. 50. № 3. С. 361—376.
40. Черногор Л. Ф. Динамические процессы в приземной атмосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. *Изв. Академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2011. 47. № 1. С. 84—95.
41. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные. *Геомагнетизм и аэрон.* 2012. 52. № 6. С. 807—817.
42. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный анализ. *Геомагнетизм и аэрон.* 2012. 52. № 6. С. 818—831.
43. Черногор Л. Ф. *Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе*: Монография. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
44. Черногор Л. Ф. Физические процессы в средней ионосфере, сопровождавшие солнечное затмение в Харькове 4 января 2011 г. *Геомагнетизм и аэрон.* 2013. 53. № 1. С. 22—34.
45. Черногор Л. Ф. Атмосферно-ионосферный отклик на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом. *Геомагнетизм и аэрон.* 2016. 56. № 5. С. 627—638.
46. 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. 17. № 4. С. 41—52.
47. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. *Радиофиз. и радиоастрон.* 2015. 20. № 4. С. 311—331.
48. Beynon W. J. G., Brown G. M. *Solar eclipses and the ionosphere*. London: Elsevier, 1956. 330 p.
49. Chandra H., Sethia G., Vyas G. D., Deshpande M. R., Vats H. O. Ionospheric effects of the total solar eclipse of 16 Feb. 1980. *Proc. Indian Nat. Acad. Sci.* 1980. A47. № 1. P. 57—60.
50. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing*. 2011. 32. № 11. P. 3199—3218.
51. Chernogor L. F. Wave processes in the ionosphere over Europe that accompanied the solar eclipse of March 20, 2015. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2016. 32.

- № 4. P. 196—206.
52. Chernogor L. F., Garmash K. P. Magneto-ionospheric effects of the solar eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomagn. Aeron.* 2017. 57. № 1. P. 72—83.
 53. Chimonas G., Hines C. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1970. 75. № 4. P. 875.
 54. 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. 2017. *Geophys. Res. Lett.* 44. № 24. P. 12041—12048.
 55. Deshpande M. R., Chandra H., Sethia G., Vats Hari Om, Vyas G. D., Iyer K. N., Janve A. V. Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes. *Proc. Indian. Nat. Acad. Sci.* 1982. A48. № 3. P. 427—433.
 56. Eclipse supplement. *Nature*. 1970. 226. P. 1097—1155.
 57. Founda D., Melas D., Lykoudis S., Lisaridis I., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Petrakis M., Zerefos C. The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece. *Atmos. Chem. Phys.* 2007. 7. P. 5543—5553.
 58. 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. № 2. e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
 59. 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. P. 24—34.
 60. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice*. New York: Springer-Verlag Wien, 1994. 382 p.
 61. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., Cander Lj. R. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2008. 70. № 6. P. 836—853.
 62. Liu J. Y., Hsiao C. C., Tsai L. C., Liu C. H., Kuo F. S., Lue H. Y., Huang C. M. Vertical phase and group velocities of internal gravity waves derived from ionograms during the solar eclipse of 24 October 1995. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1998. 60. № 17. P. 1679—1686.
 63. 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. Roy. Soc. A.* 2016. 374. № 2077. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0222>.
 64. Mošna Z., Boška J., Knížová P. K., Šindelářová T., Kouba D., Chum J., Rejček L., Potužníková K., Arikan F., Toker C. Observation of the solar eclipse of 20 March 2015 at the Pruhonice station. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2018. 171. 277—284.
 65. Müller-Wodarg I. C. F., Aylward A. D., Lockwood M. Effects of a mid-latitude solar eclipse on the thermosphere and ionosphere — a modeling study. *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25. № 20. P. 3787—3790.
 66. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Y. M., Figurski M. Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors*. 2017. 17. № 10. P. 2298.
 67. Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Ann. Geophys.* 2013. 31. № 2. P. 163—172.
 68. 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. and Solar-Terr. Phys.* 2019. 191. № 105051.
 69. *Partial Solar Eclipse of 2018 Aug 11*. URL: <http://www.eclipsewise.com/solar/SEgmap/2001-2100/SE2018Aug11Pgmap.html>

70. Rama Rao P. V. S., Rao B. V. P. S., Nru D., Niranjana K. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980. *Proc. Indian Nat. Acad. Sci.* 1982. 48. № 3. P. 434—438.
71. Roble R. G., Emery B. A., Ridley E. C. Ionospheric and thermospheric response over Millstone Hill to the May 30, 1984, annual solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1986. 91. № A2. P. 1661—1670.
72. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M., Emery B. A., Roble R. G. Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 1986. 91. № A2. P. 1651—1660.
73. Šauli P., Roux S. G., Abry P., Boška J. Acoustic-gravity waves during solar eclipses: Detection and characterization using wavelet transforms. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2007. 69. № 17-18. P. 2465—2484.
74. SenGurta A., Goel G. K., Mathur B. S. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1980. 42. № 11/12. P. 907—909.
75. Special Eclipse Issue (The eclipse of 7 March 1970). *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1972. 34. P. 559—739.
76. Special Issue of *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. 7.
77. 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., Magdalenić 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. № A19. <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2017017>.
78. *The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy*. URL: <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/bias/>, <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcb>
79. Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., Hozumi K., Saito S., Shinbori A., Otsuka Y., Saito A., Buhari S. M., Abdullah M., Supnithi P. Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS. *J. Disaster Res.* 2018. 13. № P. 535—545.
80. *Universität Bern Astronomisches Institut*. URL: <ftp.aiub.unibe.ch/CODE/> www.aiub.unibe.ch/download/CODE/
81. 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. № P. 431—441.
82. 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. № 11. P. 2407—2419.
83. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *J. Geodesy*. 2016. 90. № 3. P. 209—228.

REFERENCES

1. Akimov A. L., Akimov L. A., Chernogor L. F. (2007). Turbulence Parameters in the Atmosphere Associated with Solar Eclipses. *Radio Phys. and Radio Astron.* 12(2). 117—134 (In Russian).
2. Akimov A. L., Chernogor L. F. (2010). Effects of the Solar Eclipse of August 1, 2008 on the Earth’s Lower Atmosphere. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 26(3). 135—145. <https://doi.org/10.3103/S0884591310030050>

3. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). Atmospheric-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of May 31, 2003, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 45(4). 494—518.
4. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Tyrnov O. F., Chernogor L. F. (2002). Complex Radar and Optical Studies of Dynamic Processes in the Atmosphere and Geospace, Related to the Solar Eclipse of August 11, 1999. *Usp. Sovrem. Radioelektron*. 2. 25—63 (In Russian).
5. Akimov L. A., Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F. (2005). The features fatmosphere and ionosphere effects of May 31, 2003 solar eclipse: optical and radiophysical observations results in Kharkiv. *The Modern Radio Electronics Successes*. 3. 55—70 (In Russian).
6. Al'pert Ya. L., Gorojankin B. N. (1944). Solar eclipses and ionosphere radio investigations. *Izv. AN USSR. Geophysica Series*. 8. 85 p. (In Russian).
7. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P., Vodyannikov V. V., Gordienko G. I., Litvinov Yu. G., Yakovets A. F. (2007). Ionospheric effects of the March 29, 2006, solar eclipse over Kazakhstan. *Geomagnetism and Aeronomy*. 47(4). 461—469. <https://doi.org/10.1134/S0016793207040068>
8. Afraimovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere*. Irkutsk: Solar-Terrestrial Physics Institute SD RAS: SI SC RRS ESSC SD RAMS, 479 p.(In Russian).
9. Bezrodny V. G., Bliokh P. B., Shubova R. S., Yampolskiy Yu. M. (1984). *Fluctuations of superlong radio waves in the Earth-Ionosphere waveguide*. Moscow: Nauka, 144. (in Russian).
10. Boitman O. N., Kalihman A. D., Tashilin A. V. (1999). Mid-latitude ionosphere during 09 March, 1997 solar eclipse. 1. Modeling effects of eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. 39(6). 45—51 (In Russian).
11. Boitman O. N., Kalikhman A. D., Tashchilin A. V. (1999). The midlatitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997. *Geomagnetism and Aeronomy*. 39(6). 52—60 (In Russian).
12. Bolshakova O. V., Kurashkovskaya N. A., Troickaya V. A. (1987). Solar eclipse effect in Pc 3 geomagnetic pulses. *Geomagnetism and Aeronomy*. 27(1). 122—125 (In Russian).
13. Borisov B. B., Egorov D. A., Egorov N. E., Kolesnik A. G., Kolesnik S. A., Melchinov V. P., Nagorskiy P. M., Parfenov S. S., Reshetnikov D. D., Smirnov V. F., Stepanov A. E., Tarashuk Yu. E., Telpuhovskij E. D., Cybikov B. B., Shinkevich B. M. (2000). The complex experimental investigation of ionosphere effect on March 09, 1997 solar eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. 40(3). 94—103 (In Russian).
14. Burmaka V. P., Grigorenko E. I., Emel'yanov L. Ya., Lysenko V. N., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2007). Radar observations of effects in the geospace, caused by the partial solar eclipse of March 29, 2006. *Usp. Sovrem. Radioelektron*. 3. 38—53 (In Russian).
15. 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. and Radio Astron*. 17(4). 344—352. (In Russian).
16. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2007). Tropospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 1. Observations. *Kosm. nauka tehnol*. 13(6). 74—86 (In Russian). <http://dx.doi.org/10.15407/knit2007.06.074>
17. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2006). Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations. *Geomagnetism and Aeronomy*. 46(2). 183—198. <https://doi.org/10.1134/S0016793206020071>
18. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2006). Wave-like processes in the iono-

- sphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation. *Geomagnetism and Aeronomy*. 46(2). 199—208.
<https://doi.org/10.1134/S0016793206020083>
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.
<https://doi.org/10.1134/S001679321304004X>
20. Garmash K. P., Leus S. G., Chernogor L. F. (2011). January 4, 2011 Solar eclipse effects over radio circuits at oblique incidence. *Radio Phys. and Radio Astron.* 16(2). 164—176 (In Russian).
21. Gokov A. M., Chernogor L. F. (2000). Processes in lower ionosphere during August 11, 1999 solar eclipse. *Radio Phys. and Radio Astron.* 5(4). 348—360 (In Russian).
22. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Effects of Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 48(3). 337—351. <https://doi.org/10.1134/S0016793208030092>
23. Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Puliaiev V. A., Taran V. I., Chernogor L. F. (2004). Dynamic processes in the ionosphere during the geospace storm on 30 May and Solar eclipse on 31 May 2003. *Kosm. nauka tehnol.* 10(1). 12—25. <https://doi.org/10.15407/knit2004.01.012>. (In Russian).
24. Dzyubanov D. A., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2009). Plasma dynamics of the ionosphere above Kharkiv during the solar eclipse of 1 August 2008. *Kosm. nauka tehnol.* 15(3). 62—69. <https://doi.org/10.15407/knit2009.03.062> (In Russian).
25. Domnin I. F., Yemel'yanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., 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. <https://doi.org/10.1134/S0016793213010076>
26. Domnin I. F., Emelyanov L. Y., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2014). Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulations results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54(5). 583—592. <https://doi.org/10.1134/S0016793214040112>
27. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2012). The dynamics of ionosphere plasma over Kharkiv during the solar eclipse of January 4, 2011. *Radio Phys. and Radio Astron.* 17(2). 132—146 (In Russian).
28. Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2009). Some effects in the geospace plasma during partial Solar eclipse of 1 august 2008 above Kharkiv. 1. The observation results. *Kosm. nauka tehnol.* 15(3). 70—81 (In Russian). <https://doi.org/10.15407/knit2009.03.070>
29. Emelyanov L. Ya., Sklyarov I. B., Chernogor L. F. (2009). Ionosphere response to the solar eclipse on 1 august 2008: Some results of vertical sounding. *Kosm. nauka tehnol.* 15(4). 12—21 (In Russian). <http://dx.doi.org/10.15407/knit2009.04.012>
30. Kolokolov L. E., Legenka A. D., Pulinets S. A. (1993). Ionospheric effects accompanied March 18, 1988 solar eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. 33(1). 49—57 (In Russian).
31. Kostrov L. S., Chernogor L. F. (2000). Processes in Bottomside Ionosphere during August 11, 1999 Solar Eclipse. *Radio Phys. and Radio Astron.* 5(4). 361—370 (In Russian).
32. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Tropospheric-ionospheric effects of the 3 October 2005 partial solar eclipse in Kharkiv. 2. Modeling and discussion. *Kosm. nauka tehnol.* 14(1). 57—64 (In Russian). <https://doi.org/10.15407/knit2008.01.057>
33. Lyashenko M. V., 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. *Kosm. nauka tehnol.* 15(4). 3—11 (In Russian). <http://dx.doi.org/10.15407/knit2009.04.003>

34. 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. <https://doi.org/10.1134/S0016793213020096>
35. Sokolov V. D., Bezrodnyh I. P., Kuzmin V. A., Skryabin N. G. (1999). Solar eclipse effect in riometric data in Yakutsk on March 09, 1997. *Geomagnetism and Aeronomy*. 39(2). 139—140 (In Russian).
36. Uryadov V. P., Leonov A. M., Ponyatov A. A., Boiko G. N., Terent'ev S. P. (2000). Variations in the Characteristics of a HF Signal over an Oblique Sounding Path during the Solar Eclipse on August 11, 1999. *Radiophys. and Quantum Electronics*. 43. 614—618. <https://doi.org/10.1023/A:1004801201847>
37. Chernogor L. F. (2000). Magnetosphere electron precipitation induced by a solar eclipse. *Radio Phys. and Radio Astron.* 5(4). 371—375 (In Russian).
38. Chernogor L. F. (2010). Variations in the amplitude and phase of VLF radiowaves in the ionosphere during the August 1, 2008, solar eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy*. 50(1). 96—106. <https://doi.org/10.1134/S0016793210010111>
39. Chernogor L. F. (2010). Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy*. 50(3). 346—361. <https://doi.org/10.1134/S0016793210030096>
40. Chernogor L. F. (2011). Dynamic processes in the near-ground atmosphere during the solar eclipse of August 1, 2008. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Phys.* 47(1). 77—86. <https://doi.org/10.1134/S000143381101004X>
41. Chernogor L. F. (2012). Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 52(6). 768—778. <https://doi.org/10.1134/S0016793212050039>
42. Chernogor L. F. (2012). Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results: 2. Spectral Analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 52(6). 779—792. <https://doi.org/10.1134/S0016793212050040>
43. Chernogor L. F. (2013). *Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace: monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 480. (in Russian).
44. Chernogor L. F. (2013). Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy*. 53(1). 19—31. <https://doi.org/10.1134/S0016793213010052>
45. Chernogor L. F. (2016). Atmosphere—Ionosphere response to Solar Eclipse over Kharkiv on March 20, 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*. 56(5). 592—603. <https://doi.org/10.1134/S0016793216050030>
46. Chernogor L. F., 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. *Kosm. nauka tehnol.* 17(4). 41—52 (In Russian). <http://dx.doi.org/10.15407/knit2011.04.041>
47. Chernogor L. F., Barabash V. V. The effects of solar eclipse of March 20, 2015 over ionosphere of Europe: Ionosonde observations. *Radio Phys. and Radio Astron.* 20(4). 311—331 (In Russian). <https://doi.org/10.15407/rpra20.04.311>
48. Beynon W. J. G., Brown G. M. (1956). *Solar eclipses and the ionosphere*. London: Elsevier. 330.
49. Chandra H., Sethia G., Vyas G. D., Deshpande M. R., Vats H. O. (1980). Ionospheric effects of the total solar eclipse of 16 Feb. 1980. *Proc. Indian Nat. Acad. Sci.* A47(1). 57—60.
50. Chernogor L. F. (2011). The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing*. 32(11). 3199—3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
51. Chernogor L. F. (2016) Wave processes in the ionosphere over Europe that accompanied the solar eclipse of March 20, 2015. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 32(4).

- 196—206. <https://doi.org/10.3103/S0884591316040024>
52. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2017). Magneto-ionospheric effects of the solar eclipse of March 20, 2015, over Kharkov. *Geomagn. Aeron.* 57(1). 72—83. <https://doi.org/10.1134/S0016793216060062>
53. Chimonas G., Hines C. (1970). Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 75(4). 875. <https://doi.org/10.1029/JA075i004p00875>
54. 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). 12,041—12,048. <https://doi.org/10.1002/2017GL075774>
55. Deshpande M. R., Chandra H., Sethia G., Vats Hari Om, Vyas G. D., Iyer K. N., Janve A. V. (1982) Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes. *Proc. Indian. Nat. Acad. Sci.* A48(3). 427—433.
56. Eclipse supplement. *Nature.* 1970. 226, 1097—1155.
57. Founda D., Melas D., Lykoudis S., Lissaridis I., Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Petrakis M., Zerefos C. (2007). The effect of the total solar eclipse of 29 March 2006 on meteorological variables in Greece. *Atmos. Chem. Phys.* 7. 5543—5553. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5543-2007>
58. 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). e2019RS006866. <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
59. 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. 24—34.
60. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (1994). *Global Positioning System. Theory and Practice.* New York: Springer-Verlag Wien. 382.
61. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., Cander Lj. R. (2008). Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 70 (6). 836—853. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.02.016>
62. Liu J. Y., Hsiao C. C., Tsai L. C., Liu C. H., Kuo F. S., Lue H. Y., Huang C. M. (1998). Vertical phase and group velocities of internal gravity waves derived from ionograms during the solar eclipse of 24 October 1995. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 60(17). 1679—1686.
63. 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. Roy. Soc. A.* 374(2077). <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0222>
64. Mošna Z., Boška J., Knížová P. K., Šindelářová T., Kouba D., Chum J., Rejček L., Potužníková K., Arian F., Toker C. (2018). Observation of the solar eclipse of 20 March 2015 at the Pruhonice station. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 171, 277—284. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.011>
65. Müller-Wodarg I. C. F., Aylward A. D., Lockwood M. (1998). Effects of a mid-latitude solar eclipse on the thermosphere and ionosphere — a modeling study. *Geophys. Res. Lett.* 25(20). 3787—3790. <https://doi.org/10.1029/1998GL900045>
66. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Y. M., Figurski M. (2017). Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors.* 17(10). 2298. <https://doi.org/10.3390/s17102298>
67. Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T. (2013). GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Ann. Geophys.* 31(2). 163—172. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013>
68. Panasenko S. V., Otsuka Y., van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015>
69. *Partial Solar Eclipse of 2018 Aug 11*: URL: <http://www.eclipsewise.com/solar/SEgmap/2001-2100/SE2018Aug11Pgmap.html>
 70. Rama Rao P. V. S., Rao B. V. P. S., Nru D., Niranjana K. (1982). TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980. *Proc. Indian Nat. Acad. Sci.* 48(3). 434—438.
 71. Roble R. G., Emery B. A., Ridley E. C. (1986). Ionospheric and thermospheric response over Millstone Hill to the May 30, 1984, annual solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 91(A2). 1661—1670. <https://doi.org/10.1029/JA091iA02p01661>
 72. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., Holt J. M., Emery B. A., Roble R. G. (1986). Observations of the May 30, 1984, annual solar eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res.* 91(A2). 1651—1660. <https://doi.org/10.1029/JA091iA02p01651>
 73. Šauli P., Roux S. G., Abry P., Boška J. (2007). Acoustic-gravity waves during solar eclipses: Detection and characterization using wavelet transforms. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 69(17-18). 2465—2484. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.06.012>
 74. SenGurta A., Goel G. K., Mathur B. S. (1980). Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 42(11/12). 907—909. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90107-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90107-5)
 75. Special Eclipse Issue (The eclipse of 7 March 1970). *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 1972. 34. 559—739.
 76. Special Issue of *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. 7.
 77. 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). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2017017>.
 78. *The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy*. URL: <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/bias/>, <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcb>
 79. Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., Hozumi K., Saito S., Shinbori A., Otsuka Y., Saito A., Buhari S. M., Abdullah M., Supnithi P. (2018). Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS. *J. Disaster Res.* 13(3). 535—545. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0535>
 80. *Universität Bern Astronomisches Institut*. URL: <ftp.aiub.unibe.ch/CODE/> and www.aiub.unibe.ch/download/CODE/
 81. 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. and Quantum Electronics*. 59(6). 431—441. <https://doi.org/10.1007/s11141-016-9711-9>
 82. 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. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.009>
 83. 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. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0867-4>

Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНОГО ЗАТМНЕННЯ

11 АВГУСТА 2018 ГОДА НАД КИТАЕМ

Целью работы является описание ионосферных эффектов частного солнечного затмения 11 августа 2018 года над Китаем, изученных с помощью GPS-технологий. СЗ представляют собой редкие явления природы. В течение 2-3 часов происходит перестройка процессов на поверхности Земли, в атмосфере, геокосмосе, то есть в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ). Реакция этой системы зависит от положения в цикле солнечной активности, сезона, времени суток и состояния атмосферной и космической погоды. Поэтому изучение реакции системы ЗАИМ на СЗ остается актуальной задачей. Реакция сопровождается контролируемые динамическими процессами, изучение которых позволяет лучше понять строение околоземной среды. В этом заключается общенаучная значимость исследований реакции системы ЗАИМ на СЗ. Практическая значимость заключается в следующем. СЗ вызывают значительные возмущения параметров среды в системе ЗАИМ, которые существенно влияют на распространение радиоволн практически всех диапазонов, а следовательно, и на функционирование средств радионавигации, радиолокации, телекоммуникации, радиоастрономии и дистанционного зондирования сред. Эффекты СЗ в ионосфере изучаются в течение примерно 100 лет. На сегодняшний день достаточно хорошо исследованы регулярные эффекты: уменьшение в течение затмений концентрации электронов, температур электронов и ионов, вариации ионного состава, вертикальные движения плазмы. Существенно меньше изучены нерегулярные эффекты, которые могут отличаться при различных затмениях. Особенностью СЗ над Китаем было то, что оно наблюдалось в предзаходный период (по местному времени). Максимальная наблюдаемая фаза затмения для территории Китая изменялась в пределах от 0.07 до 0.52. Площадь затмения при этом составляла 0.02...0.42. Начало затмения в разных частях Китая наблюдалось в интервале времени 09:54—10:05 UT, а конец — с 10:07 UT до 11:10 UT. Продолжительность СЗ менялась от нескольких минут примерно до 67 минут. Незначительная продолжительность затмения и движение вечернего терминатора повлияли на ионосферные эффекты СЗ. Состояние космической погоды в период затмения было вполне благоприятным для наблюдения эффектов СЗ в ионосфере. Для выявления отклика ионосферы на СЗ 11 августа 2018 обрабатывались регистрации сигналов глобальной навигационной спутниковой системы. С помощью измеренных псевдодалностей в двухчастотном приемнике рассчитаны ионосферные задержки сигнала и, соответственно, вертикальное полное электронное содержание (ПЭС). Несмотря на влияние солнечного терминатора, удалось уверенно выделить ионосферные эффекты СЗ. Эффекты СЗ оказались достаточно малыми через низкие значения фазы СЗ. Над Китаем наблюдалось воронкоподобное уменьшение ПЭС, которое имело протяженность по широте около 1300 км и по долготе около 2000 км. Относительное уменьшение ПЭС составило около 7 %. Затмение сопровождалось генерацией апериодических возмущений ПЭС со скоростью около 0.4—0.8 TECU/ч и продолжительностью около 105 минут. Волновые возмущения, вызванные СЗ, уверенно не наблюдались. Это связано с малой величиной фазы СЗ и незначительным возмущением концентрации электронов.

Ключевые слова: солнечное затмение, ионосфера, GPS-технология, полное электронное содержание, апериодические возмущения.

L. F. Chernogor, Yu. B. Milovanov

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

IONOSPHERIC EFFECTS OF THE AUGUST 11, 2018, SOLAR ECLIPSE OVER THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

The purpose of the work is to describe the ionospheric effects of the August 11, 2018 partial solar eclipse (SE) that occurred over the People's Republic of China, as observed via GPS technology. SEs present rare phenomena of nature. In the course of 2 to 3 hours, the rearrangement of processes acting at the Earth's surface, in the atmosphere, geospace, i.e., in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system (EAIMS), occurs. The response of this system depends on the solar activity, season, time of day, and on the state of atmospheric and space weather. Therefore, the study of the EAIMS response to SEs remains an urgent need. The response is accompanied by controllable dynamic processes, the study of which improves our understanding of the near-Earth environment. The study of the EAIMS response to SEs is of fundamental importance to science. Its practical applications include the following. The SE give rise to significant perturbations in the EAIMS, which affect the propagation of radio waves virtually in all frequency bands, and consequently deteriorate the operation of radar, radio astronomy, and radio navigation systems, as well as the instruments for remotely sensing the medium. The SE effects have been studied for over more than about 100 years. Thus far, the following regular effects have been quite well studied: decreases in the electron density, electron and ion temperatures, variations in ion composition, and plasma vertical movements. The irregular effects have been studied to a significantly smaller degree, and they can vary from one solar eclipse to another. The main feature of the SE over the PRC was the fact that it was observed during before local time sunset period. The maximum phase of the eclipse within the PRC area varied from 0.07 to 0.52, while the Sun's surface area occulted by the moon was observed to be 0.02—0.42. The beginning of the eclipse over the PRC was observed to occur in the 09:54—10:05 UT period, and the end varied from 10:07 UT to 11:10 UT. The SE duration varied from a few minutes to approximately 67 min. The insignificant duration of the eclipse and the dusk terminator affected the SE effects. The state of space weather during the solar eclipse was conducive to observing the SE effects occurring in the ionosphere. To reveal the ionospheric response to the August 11, 2018, SE, the global navigation satellite system data were processed. The ionospheric time delay and, respectively, the vertical total electron content (TEC), were calculated combining the pseudo range and integrated phase data at two frequencies. Regardless of the dusk terminator influence, we have managed to confidently detect the ionospheric SE effects, which proved to be sufficiently small because of small values of the SE phase. Over the People's Republic of China area, a funnel-shaped decrease in TEC was observed to occur approximately 1,300 km in latitude and 2,000 km in longitude. The TEC decrease was observed to be 7 %. The solar eclipse was accompanied by the generation of aperiodic TEC disturbances at a rate of 0.4—0.8 TEC unit/h and 105-min in duration. Wave disturbances caused by the SE were not observed confidently, which is due to the small value of the SE phase and insignificant disturbances in the electron density.

Keywords: solar eclipse, ionosphere, GPS-technology, total electron content, aperiodic disturbances.

Стаття надійшла до редакції 06.07.2020

Після доопрацювання 06.07.2020

Прийнята до друку 14.08.2020