

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-04>

УДК 550.385.37:550.388

**Л. Ф. ЧОРНОГОР**, д-р фіз.-мат. наук, професор  
e-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

**Ю. Б. МИЛОВАНОВ**, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

e-mail: [hobit1957@gmail.com](mailto:hobit1957@gmail.com)

**В. Л. ДОРОХОВ**, н.с.

e-mail: [leusstas53@gmail.com](mailto:leusstas53@gmail.com)

**В. А. ПОДНОС**, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

e-mail: [podnos@karazin.ua](mailto:podnos@karazin.ua)

**А. М. ЦИМБАЛ**, канд. фіз.-мат. наук, доцент

e-mail: [a.tsymbal@karazin.ua](mailto:a.tsymbal@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

**М. Б. ШЕВЕЛЕВ**, аспірант, м.н.с.

e-mail: [mykyta.b.shevelev@gmail.com](mailto:mykyta.b.shevelev@gmail.com)

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна, 61022, м. Харків, м-н Свободи, 4*

## ВАРІАЦІЇ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ В ЕКВАТОРІАЛЬНІЙ ІОНОСФЕРІ, ВИКЛИКАНІ СОНЯЧНИМ ЗАТЕМНЕННЯМ 21 ЧЕРВНЯ 2020 р.

**Актуальність.** Сонячне затемнення (СЗ) характеризується численними динамічними процесами у всіх оболонках Землі та геофізичних полях. Кожне СЗ є причиною регулярних і нерегулярних ефектів, які притаманні лише йому. На це впливає фаза СЗ, географічні координати, сонячна активність, пора року, час доби, атмосферно-космічна погода й інші фактори. Тому задача всебічного та поглибленого дослідження фізичних процесів у геооболонках для кожного нового СЗ є актуальною.

**Мета** цієї роботи – опис результатів аналізу часових варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) у вертикальному стовпі іоносфери, викликаних СЗ 21 червня 2020 р. у області поблизу екватору Землі. Затемнення було унікальне тим, що воно спостерігалось в екваторіальних і субтропічних широтах поблизу періоду літнього сонцестояння та мало кільцеподібний характер.

**Методи і методологія.** Для аналізу обрано індійські станції, які розташовані на південь від області максимальної фази. Сумарна похибка оцінки ПЕВ не перевищує 0.1 TECU.

**Результати.** Проаналізовано часові варіації ПЕВ для траєкторії супутників і розташування приймальних станцій, що знаходилися південніше області максимального затемнення. Для більшості часових залежностей ПЕВ  $N_V(t)$  величина дефіциту  $\Delta N_V$  зростала при збільшенні площі покриття диску Сонця. Відмінності в цій залежності може бути пояснено особливостями іоносфери в екваторіальному поясі Землі. Найбільше падіння ПЕВ могло становити 4 TECU за  $M_{\max} \approx 0.643$ . Відносні варіації концентрації електронів при цьому склали  $-19\%$ . В ранковий час зменшення ПЕВ не перевищувало 2 TECU за  $N_{V0} \approx 13.5-14.5$  TECU. При цьому відносне зменшення концентрації електронів  $\delta v = -11\%$ . Під час кільцеподібного затемнення зміни характеру хвильових форм у варіаціях концентрації електронів практично не виявлено.

**Висновки.** Установлено параметри часових варіацій ПЕВ у екваторіальній іоносфері під час кільцеподібного СЗ 21 червня 2020 р.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** екваторіальна іоносфера, сонячне затемнення, GPS-спостереження, повний електронний вміст, дефіцит повного електронного вмісту

**Як цитувати:** Черногор ЛФ, Милованов ЮБ, Дорохов ВЛ, Поднос ВА, Цимбал АМ, Шевелев МБ. Варіації повного електронного вмісту в екваторіальній іоносфері, викликані сонячним затемненням 21 червня 2020 р. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022;36:49-65. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-04>

**In cites:** Chernogor LF, Mylovanov YuB, Dorokhov VL, Podnos VA, Tsymbal AM, Shevelev MB. TEC variations in equatorial ionosphere during June 21, 2020 solar eclipse. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2022;36:49-65. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-04> (In Ukrainian).

### ВСТУП

Сонячне затемнення (СЗ) – унікальне явище природи – супроводжується низкою динамічних процесів у системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера (ЗАІМ) та геофізичних полях. Кожне СЗ

© Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Дорохов В. Л., Поднос В. А., Цимбал А. М., Шевелев М. Б., 2022

**Open access.** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

призводить до регулярних і нерегулярних, властивих тільки цьому затемненню, ефектів. Прояви ефектів залежать від фази СЗ, географічних координат, сонячної активності, пори року, часу доби, атмосферно-космічної погоди тощо (див., наприклад, [1–28]). Все це свідчить про актуальність дослідження фізичних процесів у системі ЗАІМ для кожного нового СЗ.

СЗ, що відбулося 21 червня 2020 р., присвячена низка робіт [29–42]. Установлено, що ефекти СЗ у низькоширотній (екваторіальній) іоносфері суттєво відрізнялись від ефектів у середньо- та високоширотній іоносфері. Це пов'язано з наявністю у іоносфері екваторіальної іонізаційної аномалії. Також виявлено ефекти СЗ в магнітоспряженій області [32] та ефект післядії, який продовжувався і за 7 год після закінчення затемнення [38]. Вплив СЗ на характеристики радіохвиль декаметрового діапазону описано нами у роботі [22].

Мета цієї роботи – викладення результатів аналізу часових варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ) у вертикальному стовпі іоносфери, викликаних СЗ 21 червня 2020 р. у екваторіальному регіоні. Особливістю цього затемнення було те, що воно було кільцеподібним, спостерігалось в низьких широтах поблизу періоду літнього сонцестояння. Для аналізу обрано станції, розташовані в Індії, тобто південніше області максимальної тіні.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СЗ

Протягом 137-го сароса відбулося кільцеподібне СЗ 21 червня 2020 р., яке почалось о 04:47:45 UT в Центральній Африці. На півночі Індії у штаті Уттаракханд було відмічено його максимальну фазу  $M_{\max} = 0.9940$ , яка тривала приблизно 0.63 хв. СЗ могли спостерігати жителі східної частини Африки, а також південної та східної Азії (Рис. 1). Ширина тіні становила 21.2 км. Максимальна фаза СЗ відмічалася о 06:39:59 UT поблизу кордону Індії та Китаю у точці з координатами  $30^{\circ}30' \text{ пн.ш.}$  і  $79^{\circ}42' \text{ сх.д.}$  Далі смуга тіні пройшла Китай і Тихий океан. Кільцеподібна фаза тривала до 08:32:17 UT, крайня точка спостереження мала координати  $19^{\circ} \text{ пн.ш.}$ ,  $149^{\circ} \text{ сх.д.}$

Часткове СЗ можна було бачити в 111 країнах, зокрема на всьому африканському континенті, південно-східній частині Європи, більшій частині Азії, крім півночі Російської Федерації, півночі Австралії, а також на водних просторах Індійського (північна частина) та Тихого (західна) океанів.

### СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Стан космічної погоди оцінювався за даними, наведеними на сайтах <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> і <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>. Аналізувалися часові варіації основних параметрів сонячного вітру, флуктуацій компонент міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітної активності. Концентрація протонів у сонячному вітрі з 16 по 22 червня 2020 р. варіювала в межах  $(1.5\text{--}18)\cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Швидкість, температура й тиск частинок змінювалися відповідно в межах 277–355 км/с,  $10^4\text{--}5.9\cdot 10^4 \text{ К}$  і 0.2–3.6 нПа, тобто параметри зростали на 30%, в 5.9 і 18 разів. Значення  $V_y$ - та  $V_z$ -компонент міжпланетного магнітного поля флуктували в межах  $-6.3\text{--}5.4 \text{ нТл}$ . Інжектвана в магнітосферу енергія за одиницю часу (функція Акасофу) не перевищувала 4.3 ГДж/с. Індеси  $K_p$  і  $D_{st}$  змінювалися відповідно в межах 0–2.3 і  $-10\text{--}19 \text{ нТл}$ .

З цього випливає, що стан космічної погоди цілком сприяв дослідженню ефектів СЗ.



траєкторіями супутників та положення цих станцій показано відповідно на Рис. 2 і 3. Важливо, що траєкторії та станції знаходилися південніше області максимального затемнення.

Головну систематичну похибку в оцінку ПЕВ двочастотним приймачем вносить зміщення часу між двома спостереженнями псевдодальностей GPS на різних частотах. Для компенсації цієї похибки використовують поправки DCB (Differential Code Biases). Сумарна похибка оцінки ПЕВ не перевищує 0.1 TECU [26, 28, 43].

### РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

*Станція HYDE. Супутник G02.* У контрольні дні 20 та 22 червня 2020 р. ПЕВ в інтервалі часу 04:00–06:00, флюктууючи, збільшувався від  $\sim 14$  до 20–21 TECU (Рис. 4). Під час затемнення ПЕВ поступово зменшувався. За  $M_{\max} = 0.542 N_V$  зменшилося від  $N_{V0} \approx 19.4$  до 18.2 TECU, при цьому  $\delta_V = (N_V - N_{V0})/N_{V0} \approx -6\%$ . Зменшення  $N_V$  відбувалося синхронно зі зміною фази СЗ.

У день затемнення з 05:00 до 08:00 спостерігалися квазіперіодичні збурення  $N_V$  з амплітудою  $\delta_{Va} \approx 0.10\text{--}0.15$  TECU та періодом  $T \approx 30$  хв.

Підкреслимо, що після 08:30 мало місце падіння ПЕВ від 20.5 до 17 TECU, а потім його поступове зростання (див. Рис. 4).

*Станція HYDE. Супутник G05.* 20 червня 2020 р. з 06:00 до 09:00 ПЕВ поступово збільшувався від 15.5 до 22 TECU, потім практично не змінювався до 10:00, далі спостерігалася поступове зменшення ПЕВ (Рис. 5).

В інтервалі часу 06:00–07:00 22 червня 2020 р. значення ПЕВ перевищували його значення 20 червня 2020 р. на 1.5–5 TECU.

У день СЗ від 06:00 до 08:00 ПЕВ збільшувався від 15.5 до 22.5 TECU, а потім поступово зменшувався до 16 TECU об 11:00. Якщо порівнювати значення ПЕВ 21 та 22 червня 2020 р., то зменшення  $N_V$  під час затемнення сягало 4 TECU або 18%.

*Станція HYDE. Супутник G06.* 20 та 22 червня 2020 р. з 03:00 до 08:30 ПЕВ, флюктууючи, поступово збільшувався від 12 до 22 TECU (Рис. 6).

21 червня 2020 р. під час СЗ спостерігалася зменшення ПЕВ, яке сягало 2.5 TECU за  $M_{\max} \approx 0.588$ . Варіації ПЕВ повністю відслідковували часові варіації фази затемнення.

*Станція HYDE. Супутник G17.* 20, 21 та 22 червня 2020 р. з 00:30 до 04:00 часові варіації ПЕВ були приблизно подібними (Рис. 7). З 04:30 до 05:40 20 та 21 червня 2020 р. спостерігалася невелике (до 2 TECU) зменшення ПЕВ. За  $M_{\max} \approx 0.611$  мало місце зменшення ПЕВ від  $\sim 24$  до 22 TECU або на  $\sim 8.3\%$ . Найбільше зменшення зареєстровано приблизно о 06:30, воно сягало 4 TECU (від 22 до 18 TECU).

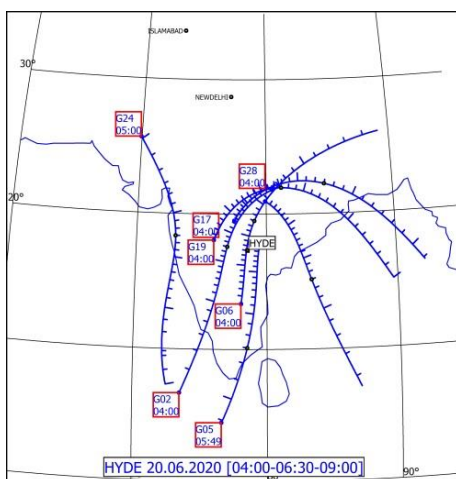
*Станція HYDE. Супутник G19.* З 02:00 до 04:00 в ці три дні мало місце зростання ПЕВ, яке з 04:00 до 05:30 сповільнилося, а потім продовжувало зростати до 08:00 (Рис. 8).

У день СЗ зменшення ПЕВ розпочалося до початку затемнення та сягнуло 1.5 TECU. Під час максимальної фази СЗ ПЕВ зменшився від  $\sim 21$  до 17 TECU, тобто на 19%.

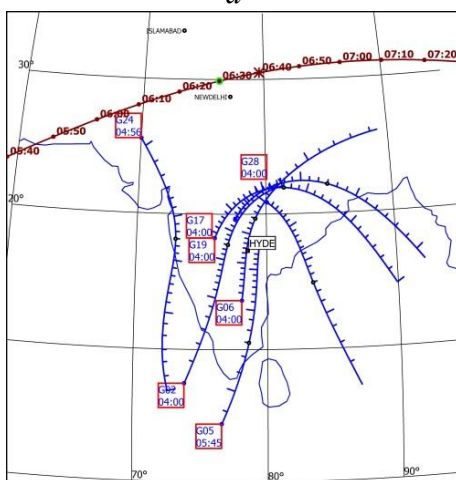
*Станція HYDE. Супутник G24.* У контрольні дні в інтервалі часу 05:00–07:30 спостерігалася поступове зростання ПЕВ від  $\sim 14$  до 20–21 TECU (Рис. 9). Після 07:20 20 червня 2020 р. мало місце зменшення ПЕВ.

У день СЗ мінімальне значення ПЕВ, що було близьким до 12.25 TECU, зареєстровано о 05:20, тобто на початку затемнення. При цьому  $\Delta N_V \approx 2$  TECU, або  $\delta_V \approx 14\%$ . За  $M_{\max} \approx 0.993$  маємо  $\Delta N_V \approx 2$  TECU, а  $N_{V0} \approx 18$  TECU,  $\delta_V \approx 11\%$ .

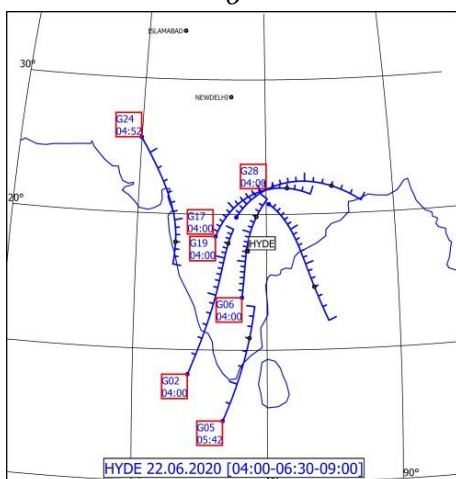
*Станція HYDE. Супутник G28.* 20, 21 та 22 червня 2020 р. з 02:00 до 04:20 мало місце майже монотонне зростання ПЕВ від 6–8 до 14–17 TECU (Рис. 10).



a



б



в

Рис. 2. Мапа прольотів супутників відносно станції HYDE для *a* – 20 червня, *б* – 21 червня, *в* – 22 червня 2020 р. в інтервалі часу 04:00 – 09:00 UT. Лінія з часовими позначками показує динаміку максимальної фази СЗ

Fig. 2. The flying map of satellites relative to the HYDE station for *a* – June 20, *б* – June 21, *в* – June 22, 2020 at time interval 04:00 – 09:00 UT. A line with time marks is shown a maximum magnitude SE dynamics

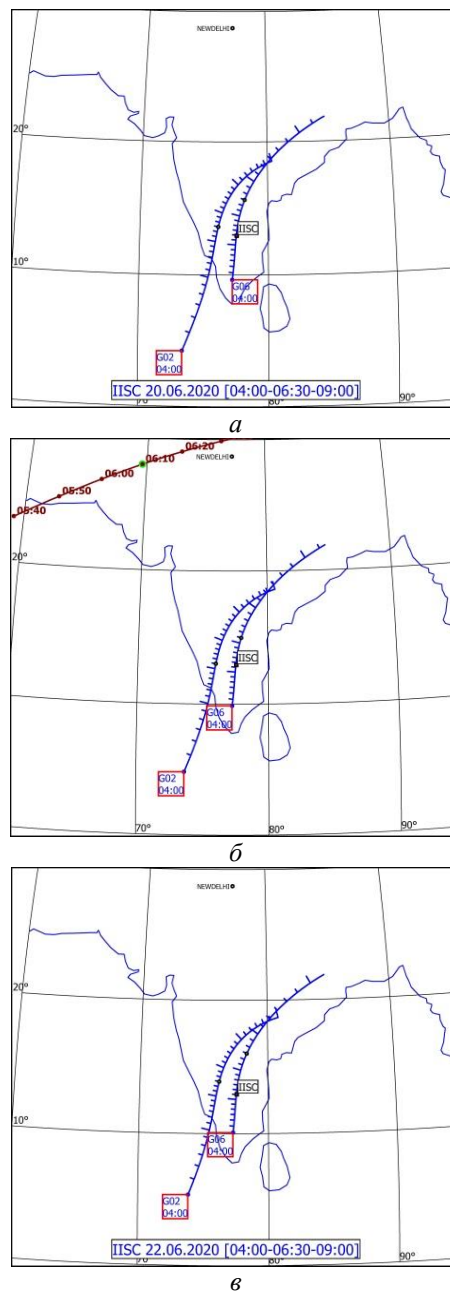


Рис. 3. Те ж саме, що й на Рис. 2, відносно станції IISC  
 Fig. 3. The same as in Fig. 2, for IISC station

У день СЗ від 04:20 до 05:00 спостерігалось деяке (до 1 TECU) зменшення ПЕВ, далі впродовж 20 хв він зростав, а потім з 05:40 убавав.

21 червня 2020 р. найбільше зменшення ПЕВ очікувалося о 05:45, тобто до моменту максимальної фази затемнення. При цьому  $\Delta N_V \approx 3.8$  TECU, а  $N_{V0} \approx 23$  TECU,  $\delta_V \approx 16.5\%$ . За  $M_{\max} \approx 0.389$  маємо  $\Delta N_V \approx 2$  TECU, а  $N_{V0} \approx 20$  TECU,  $\delta_V \approx 10\%$ .

*Станція IISC. Супутник G02.* У контрольні дні ПЕВ від 04:00 до 09:00, слабо флуктуюючи, збільшувався від 14 до 22–24 TECU (Рис. 11).

У день СЗ до 05:00 часові варіації були майже такі ж, як і у контрольні дні. Після початку затемнення зростання ПЕВ сповільнилося. За  $M_{\max} \approx 0.390$  ПЕВ зменшився від 19.4 до 17.5 TECU, тобто на 1.9 TECU або 10%.

*Станція IISC. Супутник G06.* 20 та 22 червня 2020 р. ПЕВ майже монотонно зростав від 10 до 22 TECU (Рис. 12).

Під час затемнення ПЕВ зменшувався до максимального значення 2 TECU за  $M_{\max} \approx 0.453$ . При цьому  $N_{V0} \approx 19$  TECU,  $\delta_V \approx 11\%$ .

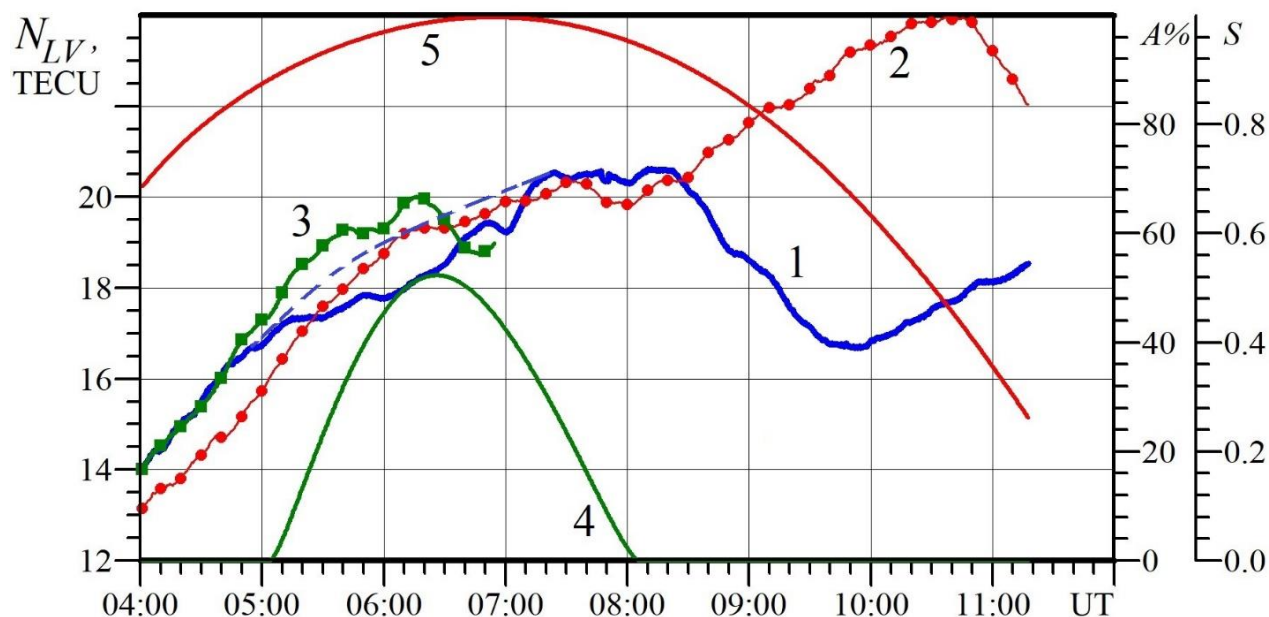


Рис. 4. Часова залежність ПЕВ вздовж прольоту супутника G02 відносно станції HYDE. Криві 1 – ПЕВ за 21 червня 2020 р., 2 – ПЕВ за 20 червня 2020 р., 3 – ПЕВ за 22 червня 2020 р., 4 – відносна площа покритої частини диску Сонця  $A$  (функція покриття), 5 – рівень інтенсивності  $S$  сонячного випромінювання. Пунктирна лінія показує очікувані варіації ПЕВ за відсутності СЗ

Fig. 4. Time dependence of the TEC along flying G02 relative HYDE station. Curves 1 – TEC for June 21, 2020, 2 – TEC for June 20, 2020, 3 – TEC for June 22, 2020, 4 – a relative square of covered part of a Sun's disk  $A$  (cover function), 5 – intensity level of the Sun's radiation  $S$ .

The dotted line shows an TEC expected variations in the case of absent of SE

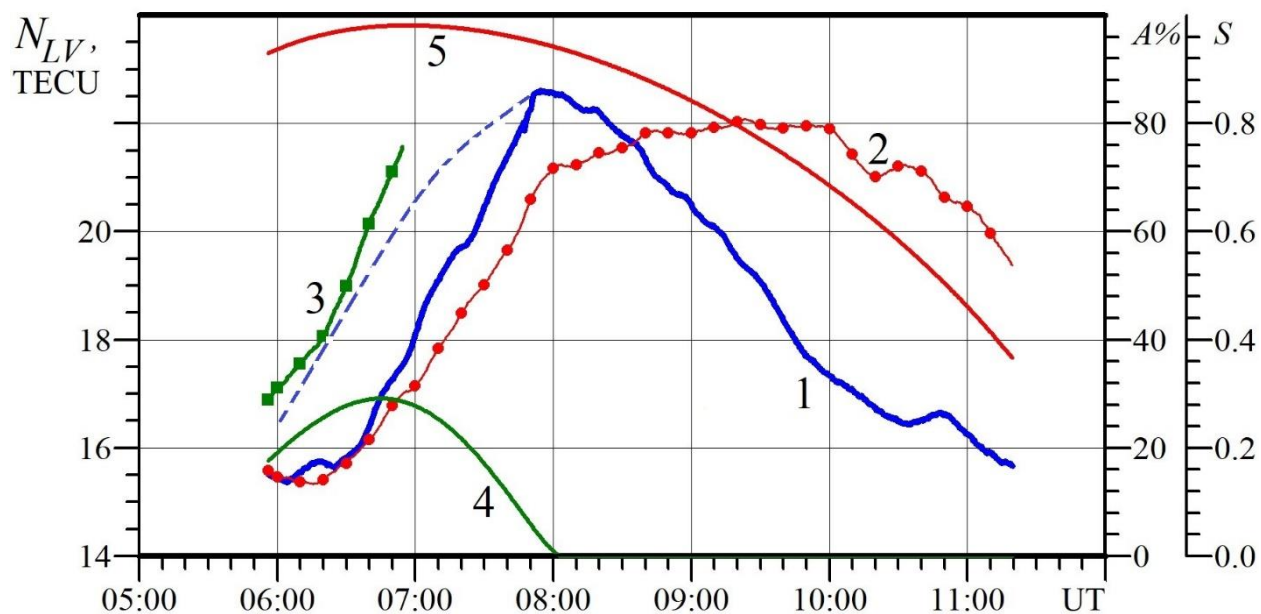


Рис. 5. Те ж, що й на Рис. 4, вздовж прольоту супутника G05  
Fig. 5. The same as in Fig. 4, along the flying of the G05 satellite

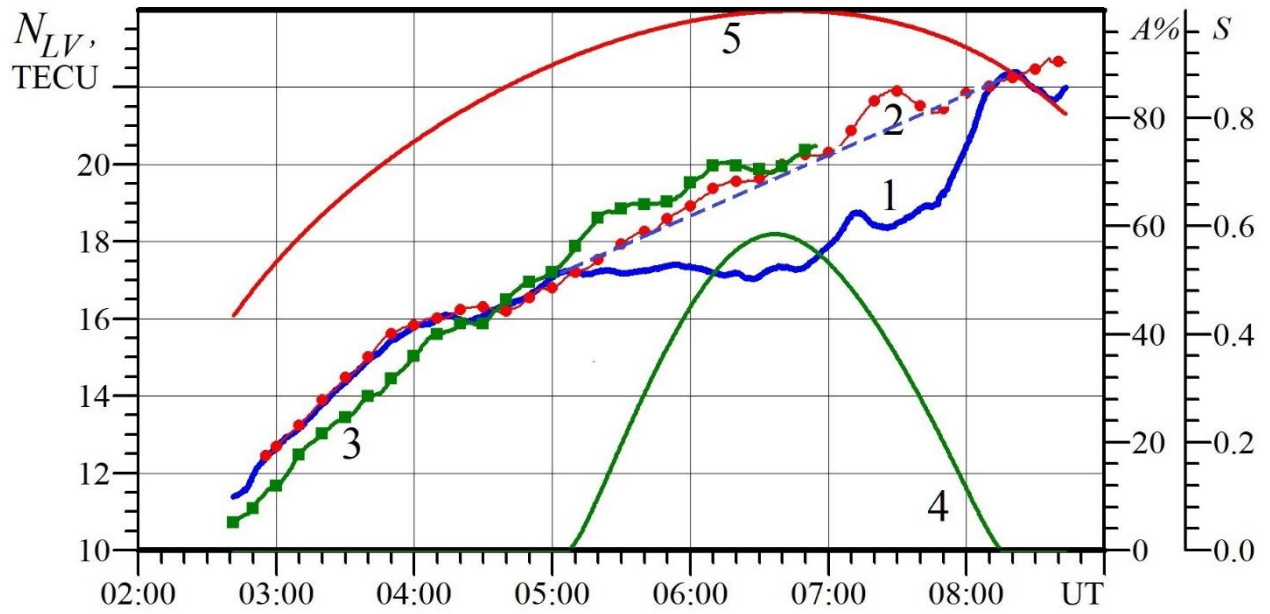


Рис. 6. Те ж, що й на Рис. 4, вздовж прольоту супутника G06  
 Fig. 6. The same as in Fig. 4, along the flying of the G06 satellite

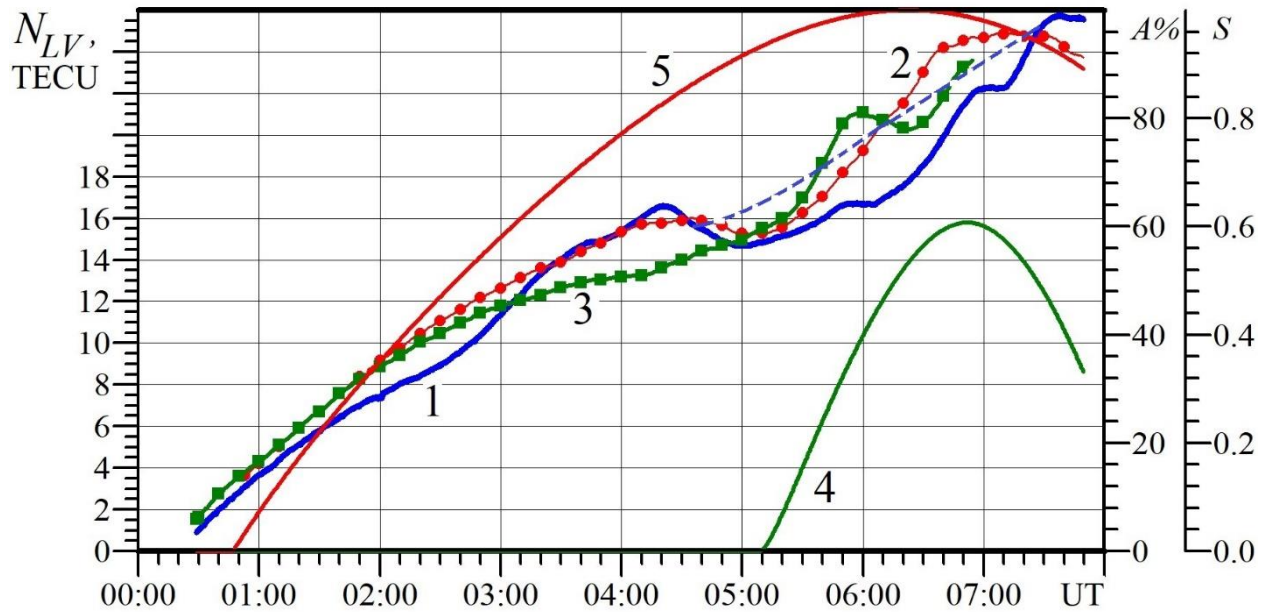


Рис. 7. Те ж, що й на Рис. 4, вздовж прольоту супутника G17  
 Fig. 7. The same as in Fig. 4, along the flying of the G17 satellite



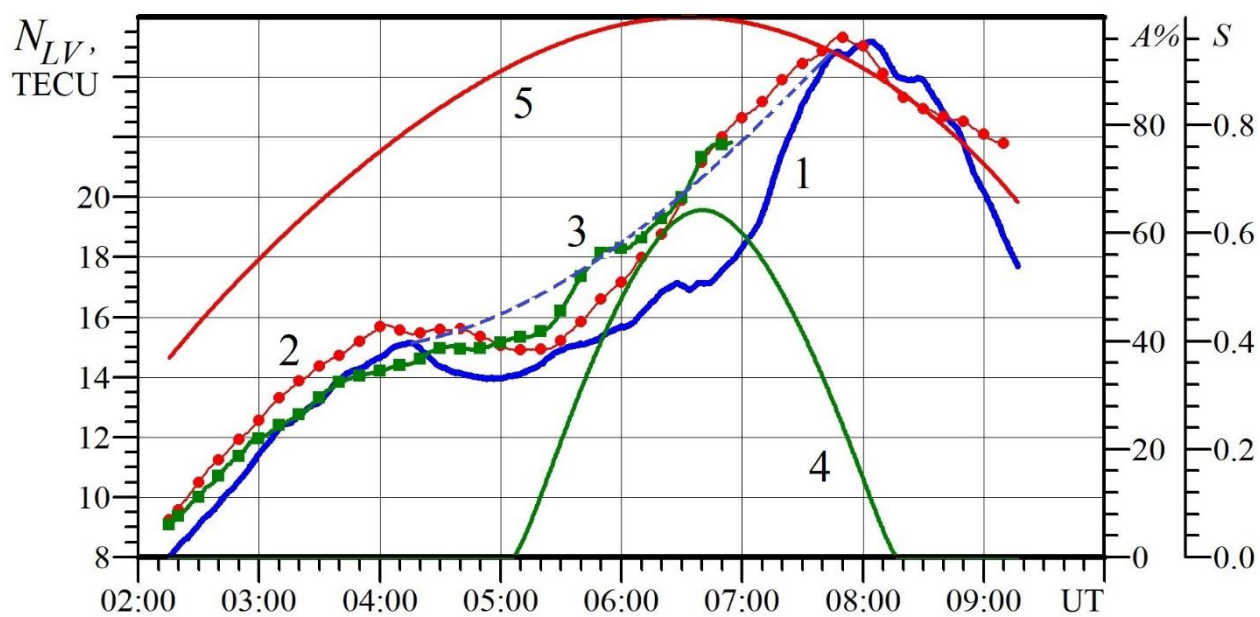


Рис. 8. Те ж, що й на Рис. 4, вздовж прольоту супутника G19  
 Fig. 8. The same as in Fig. 4, along the flying of the G19 satellite

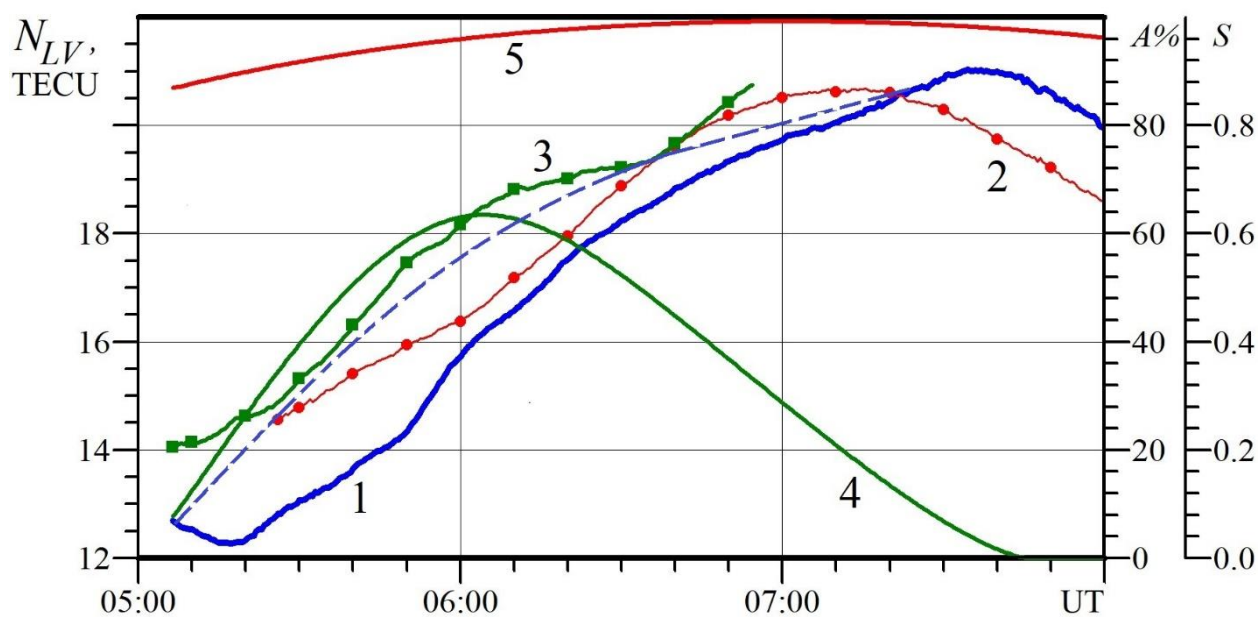


Рис. 9. Те ж, що й на Рис. 4, вздовж прольоту супутника G24  
 Fig. 9. The same as in Fig. 4, along the flying of the G24 satellite

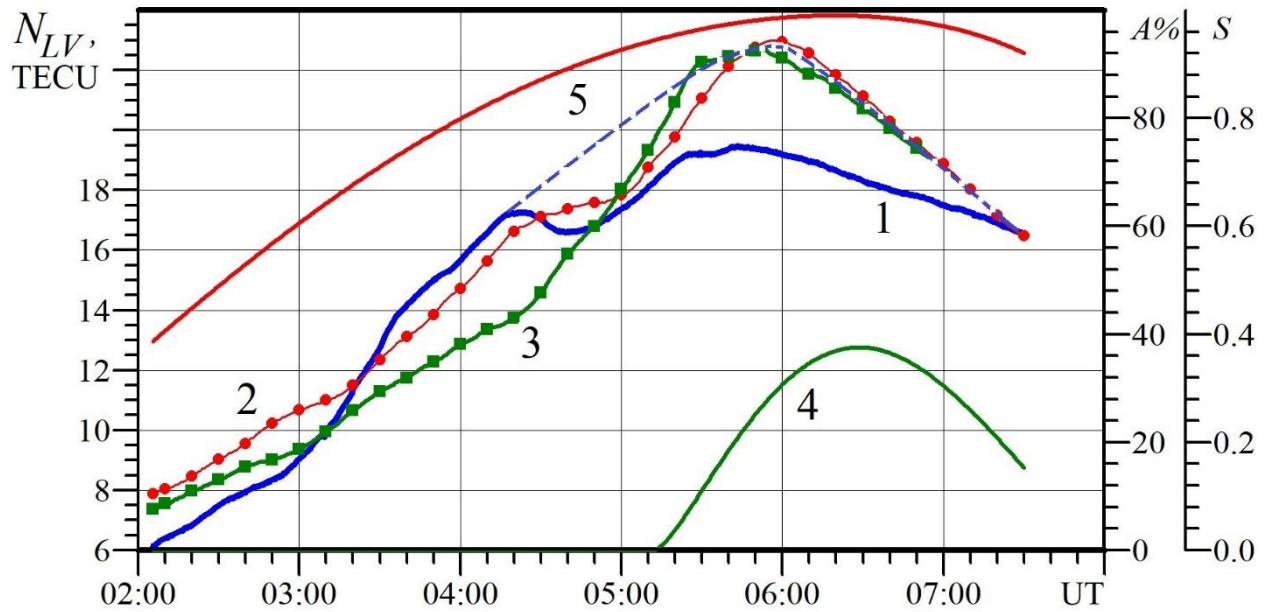


Рис. 10. Те ж, що й на Рис. 4, вздовж прольоту супутника G28  
 Fig. 10. The same as in Fig. 4, along the flying of the G28 satellite

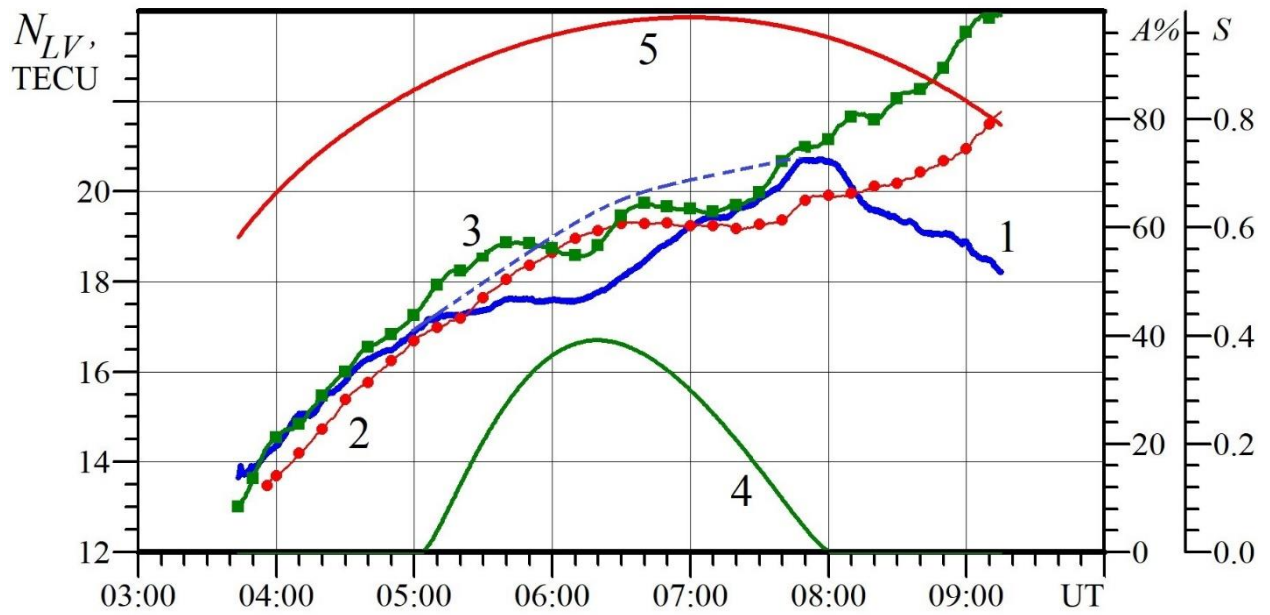


Рис. 11. Те ж, що й на Рис. 4, відносно станції IISC вздовж прольоту супутника G02  
 Fig. 11. The same as in Fig. 4, relative to the IISC station along the flying of the G02 satellite

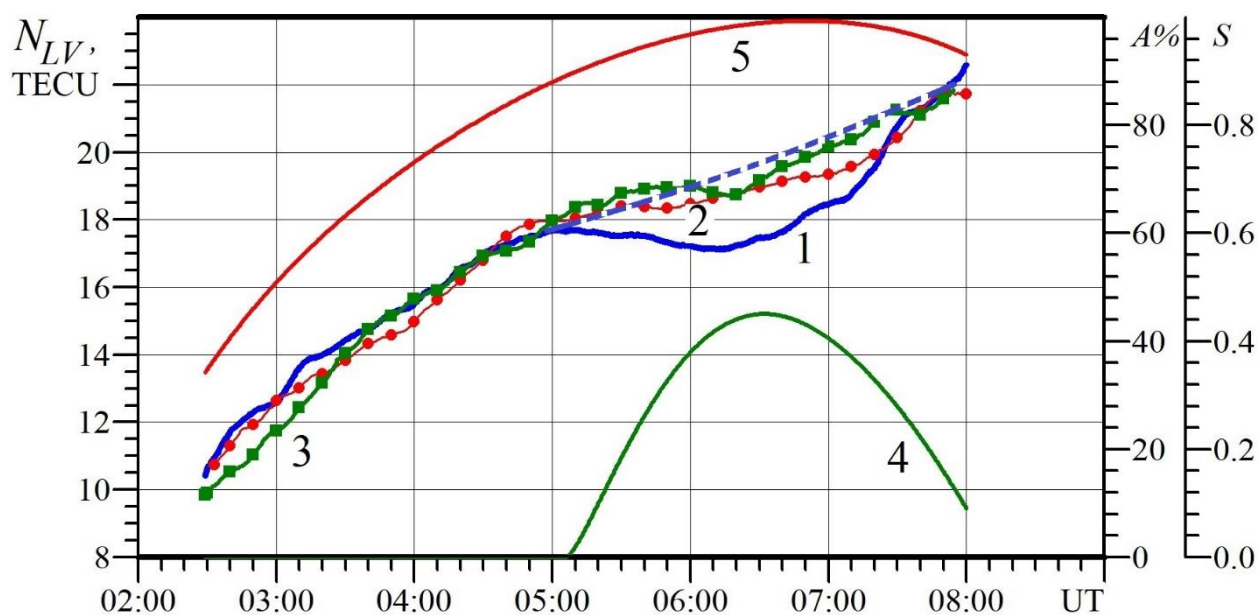


Рис. 12. Те ж, що й на Рис. 4, відносно станції IISC вздовж польоту супутника G06  
 Fig. 12. The same as in Fig. 4, relative to the IISC station along the flying of the G06 satellite

### ОБГОВОРЕННЯ

СЗ 21 червня 2020 р. мало декілька особливостей. По-перше, воно мало місце поблизу екватора, де чітко проявляється екваторіальна іоносферна аномалія та фонтан-ефект, тобто провал в значенні концентрації електронів поблизу магнітного екватору. По-друге, затемнення спостерігалось поблизу періоду літнього сонцестояння, коли Сонце на висотах більше  $\sim 250$  км не заходить. По-третє, СЗ розпочалося до світанку. По-четверте, затемнення було кільцеподібним.

Як відомо, СЗ супроводжується блокуванням сонячного випромінювання, що призводить до охолодження атмосфери та іоносферної плазми, зменшення концентрації електронів  $N$  у іоносфері, активізації ролі потоків плазми та фотоелектронів, процесів переносу з однієї півкулі в іншу, підсилення горизонтальних вітрів, спрямованих до охолодженої частини атмосфери, збурення електропровідності іоносфери, електричного поля та електричних струмів, порушення фонтан-ефекту. Все це призводить до нетривіальних варіацій  $N$  і ПЕВ.

Часові варіації ПЕВ у вертикальному стовпі  $N_V(t)$  дозволяють оцінити незбурене затемненням  $N_{V0}$  та його збурення  $\Delta N_V = N_V - N_{V0}$  та відносне збурення  $\delta_V = \Delta N_V / N_{V0}$ . Ці значення в залежності від максимального значення фази затемнення  $M_{\max}$  для різних супутників наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Залежність параметрів іоносфери від  $M_{\max}$

Table 2. Ionosphere parameters dependence on  $M_{\max}$

Супутник	G05	G28	G02	G06	G02	G06	G17	G19	G24
$M_{\max}$	0.313	0.389	0.390	0.453	0.542	0.588	0.611	0.643	0.993
$N_{V0}$	22	20	19	19	19.4	19.5	22	21	18
$\Delta N_V$	-4	-2	-1.7	-2	-1.2	-2.5	-4	-4	-2
$\delta_V, \%$	-18	-10	-9	-11	-6	-13	-18	-19	-11

Як видно із табл. 2, спостерігається тенденція до того, що більшому значенню  $M_{\max}$  відповідає більше значення  $|\delta_V|$ . Але є три винятки: за  $M_{\max}$ , що становили 0.313, 0.542 та 0.993. Значення  $\delta_V \approx -18\%$  за  $M_{\max} \approx 0.313$  може бути пов'язане з дещо суб'єктивною інтерполяцією залежності  $N_{V0}(t)$  та оцінкою  $\Delta N_V$ , а також з особливостями екваторіальної іоносферної аномалії. Значення  $\delta_V = -6\%$  також викликане цією особливістю. Аномально мале значення  $|\delta_V| \approx 11\%$  за  $M_{\max} = 0.993$  викликане тим, що супутник наближався до області максимального затемнення вранці, коли значення  $N_V$  були досить малі. До такого ж висновку дійшли і автори [41].

СЗ, як правило, супроводжуються активізацією хвильової активності (див., наприклад, [45–51]). Під час затемнення 21 червня 2020 р. хвильові збурення практично не спостерігались. Не вдалося з'ясувати, чим це було викликане.

### ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Проаналізовано часові варіації ПЕВ для траєкторії супутників і розташування приймальних станцій, що знаходилися південніше області максимального затемнення.
2. Для більшості залежностей  $N_V(t)$  величина дефіциту  $N_V$  збільшувалася при збільшенні фази СЗ. Відхилення від цієї тенденції могло бути пов'язане з особливостями екваторіальної іоносфери.
3. Найбільше зменшення ПЕВ сягало 4 TECU за  $M_{\max} \approx -0.643$ . Відносне зменшення при цьому складало  $-19\%$ .
4. В ранковий час зменшення ПЕВ не перевищувало 2 TECU за  $N_{V0} \approx 13.5-14.5$  TECU. При цьому  $\delta_V = -11\%$ .
5. Хвильові процеси, що супроводжували СЗ, практично не спостерігалися.

### ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проект 2020.02/0015 “Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля – атмосфера – іоносфера”. Роботу також частково підтримано в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0121U109882).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cheng K, Huang YN, Chen SW. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992;97(A1):103–112. <https://doi.org/10.1029/91JA02409>
2. Afraimovich EL, Palamartchouk KS, Perevalova NP, Chernukhov VV, Lukhnev AV, Zalutsky VT. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998;25(4):465–468. <https://doi.org/10.1029/98GL00186>
3. Tsai HF, Liu JY. Ionospheric total electron content response to solar eclipses. *J. Geophys. Res.* 1999;104(A6):12657–12668. <https://doi.org/10.1029/1999JA900001>
4. Choudhary RK, StMaurice JP, Ambili KM, Sunda S, Pathan BM. The impact of the January 15, 2010, annular solar eclipse on the equatorial and low latitude ionospheric densities. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2011;116(A9):A09309. <https://doi.org/10.1029/2011JA016504>
5. Черногор ЛФ. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
6. Coster AJ, Goncharenko L, Zhang SR, Erickson PJ, Rideout W, Vierinen J. GNSS Observations of Ionospheric Variations During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017;44(24):12041–12048. <https://doi.org/10.1002/2017GL075774>
7. Huba JD, 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(12):5928–5935. <https://doi.org/10.1002/2017GL073549>
8. Zhang SR, Erickson PJ, Goncharenko LP, Coster AJ, Rideout W, Vierinen J. Ionospheric Bow Waves and Perturbations Induced by the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. 44(24):12067–12073.
9. Cherniak I, Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content Response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(3):1199–1208. <https://doi.org/10.1002/2017GL075989>
10. 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(8):7040–7050. <https://doi.org/10.1029/2018JA025566>
11. Lei J, Dang T, Wang W, Burns A, Zhang B, Le H. Long-Lasting Response of the Global Thermosphere and Ionosphere to the 21 August 2017 Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018;123(5):4309–4316. <https://doi.org/10.1029/2018JA025460>
12. Nayak C, Yiğit E. GPS-TEC Observation of Gravity Waves Generated in the Ionosphere During 21 August 2017 Total Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018;123(1):725–738. <https://doi.org/10.1002/2017JA024845>
13. Reinisch BW, Dandenault PB, Galkin IA, Hamel R, Richards PG. Investigation of the Electron Density Variation During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(3):1253–1261.

- <https://doi.org/10.1002/2017GL076572>
14. Sun YY, Liu JY, Lin CCH, Lin CY, Shen MH, Chen CH, Chen CH, Chou MY. Ionospheric Bow Wave Induced by the Moon Shadow Ship Over the Continent of United States on 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(2):538–544. <https://doi.org/10.1002/2017GL075926>
  15. Wu C, Ridley AJ, Goncharenko L, Chen G. GITM-Data Comparisons of the Depletion and Enhancement During the 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(8):3319–3327. <https://doi.org/10.1002/2018GL077409>
  16. Chen CH, Lin CHC, Matsuo T. Ionospheric responses to the 21 August 2017 solar eclipse by using data assimilation approach. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2019;(6):13. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0263-4>
  17. Cnossen I, Ridley AJ, Goncharenko LP, Harding BJ. The Response of the Ionosphere-Thermosphere System to the 21 August 2017 Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019;124(8):7341–7355. <https://doi.org/10.1029/2018JA026402>
  18. Perry GW, Watson C, Howarth AD, Themens DR, Foss V, Langley RB, Yau AW. Topside Ionospheric Disturbances Detected Using Radio Occultation Measurements During the August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2019;46(13):7069–7078. <https://doi.org/10.1029/2019GL083195>
  19. Wang W, Dang T, Lei J, Zhang S, Zhang B, Burns A. Physical Processes Driving the Response of the F<sub>2</sub> Region Ionosphere to the 21 August 2017 Solar Eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019;124(4):2978–2991. <https://doi.org/10.1029/2018JA025479>
  20. Liu J-Y, Wu T-Y, Sun Y-Y, Pedatella NM, Lin C-Y, Chang LC, Chiu Y-C, Lin C-H, Chen C-H, Chang F-Y, Lee I-T, Chao C-K, Krankowski A. Lunar Tide Effects on Ionospheric Solar Eclipse Signatures: The August 21, 2017 Event as an Example. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(12):e28472. <https://doi.org/10.1029/2020JA028472>
  21. Zhang R, Le H, Li W, Ma H, Yang Y, Huang H, Li Q, Zhao X, Xie H, Sun W, Li G, Chen Y, Zhang H, Liu L. Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 June 2020 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(12):e2020JA028450. <https://doi.org/10.1029/2020JA028450>
  - <https://doi.org/10.1002/2017GL076054>
  22. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, 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>
  23. Aa E, Zhang SR, Erickson PJ, Goncharenko LP, Coster AJ, Jonah OF, Lei J, Huang F, Dang T, Liu L. Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019.; *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020;125(11):e2020JA028296. <https://doi.org/10.1029/2020JA028296>
  24. Zhang SR, Erickson PJ, Vierinen J, Aa E, Rideout W, Coster AJ, Goncharenko LP. Conjugate ionospheric perturbation during the 2017 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021;126(2):e2020JA028531. <https://doi.org/10.1029/2020JA028531>
  25. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Жданко ЄГ, Леус СГ, Luo Y. Особливості іоносферних ефектів часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2021;26(4):326–343. <https://doi.org/10.15407/rpra.26.04.326>
  26. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ, Luo Y. Ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в іоносфері високих широт: результати GPS-спостережень. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2022;27(1):15–31.
  27. Черногор ЛФ, Гармаш КП. Іоносферні процеси протягом часткового сонячного затемнення над Харковом 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл.* 2022;38(2):3–22.
  28. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ. Іоносферні ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в Заполяр'ї. *Кінематика і фізика небесних тіл.* 2022;38 [У друці].
  29. Dang T, Lei JH, Wang WB, Yan MD, Ren DX, Huang FQ. Prediction of the thermospheric and ionospheric responses to the 21 June 2020 annular solar eclipse. *Earth Planet. Phys.* 2020;4(3):231–237. <https://doi.org/10.26464/epp2020032>
  30. Huang F, Li Q, Shen X, Xiong C, Yan R, Zhang S-R, Wang W, Aa E, Zhong J, Dang T, Lei J. Ionospheric responses at low latitudes to the annular solar eclipse on 21 June 2020; *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(10):e2020JA028483. <https://doi.org/10.1029/2020JA028483>
  31. Le H, Liu L, Ren Z, Chen Y, Zhang H. Effects of the 21 June 2020 solar eclipse on conjugate hemispheres: A modeling study. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(11):e2020JA028344. <https://doi.org/10.1029/2020JA028344>
  32. Aa E, Zhang S-R, Shen H, Liu S, Li J. Local and conjugate ionospheric total electron content variation during the 21 June 2020 solar eclipse. *Adv. Space Res.* 2021;68(8):3435–3454. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.015>

33. Chen Y, Feng P, Liu C, Chen Y, Huang L, Duan J, Hua Y, Li X. Impact of the annular solar eclipse on June 21, 2020 on BPL time service performance. *AIP Advances*. 2021;11(11):115003. <https://doi.org/10.1063/5.0064445>
34. Huang L, Liu C, Chen Y, Wang X, Feng P, Li X. Observations and analysis of the impact of annular eclipse on 10 MHz short-wave signal in Sanya area on June 21, 2020. *AIP Advances*. 2021;11(11):115317. <https://doi.org/10.1063/5.0068778>
35. Patel K, Singh AK. Changes in atmospheric parameters due to annular solar eclipse of June 21, 2020, over India. *Indian J. Phys.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s12648-021-02112-2>
36. Şentürk E, Arqim Adil M, Saqib M. Ionospheric total electron content response to annular solar eclipse on June 21, 2020. *Adv. Space Res.* 2021;67(6):1937–1947. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.024>
37. Shagimuratov II, Zakharenkova IE, Tepenitsyna NY, Yakimova GA, Efishov II. Features of the Ionospheric Total Electronic Content Response to the Annular Solar Eclipse of June 21, 2020. *Geomagn. Aeron.* 2021;61:756–762. <https://doi.org/10.1134/S001679322105011X>
38. Sun YY, Chen CH, Qing H, Xu R, Su X, Jiang C, Yu T, Wang J, Xu H, Lin K. Nighttime ionosphere perturbed by the annular solar eclipse on June 21, 2020; *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021;126(9):e2021JA029419. <https://doi.org/10.1029/2021JA029419>
39. Wang X, Li B, Zhao F, Luo X, Huang L, Feng P, Li X. Variation of Low-Frequency Time-Code Signal Field Strength during the Annular Solar Eclipse on 21 June 2020: Observation and Analysis. *Sensors*. 2021;21(4):1216. <https://doi.org/10.3390/s21041216>
40. Wang J, Zuo X, Sun YY, Yu T, Wang Y, Qiu L, Mao T, Yan X, Yang N, Qi Y, Lei J, Sun L, Zhao B. Multilayered sporadic-E response to the annular solar eclipse on June 21, 2020; *Space Weather*. 2021;19(3):e2020SW002643. <https://doi.org/10.1029/2020SW002643>
41. Zhang R, Le H, Li W, Ma H, Yang Y, Huang H, Li Q, Zhao X, Xie H, Sun W, Li G, Chen Y, Zhang H, Liu L. Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 June 2020 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021;125(12):e2020JA028450. <https://doi.org/10.1029/2020JA028450>
42. Tripathi G, Singh SB, Kumar S, Ashutosh K Singh, Singh R, Singh AK. Effect of 21 June 2020 solar eclipse on the ionosphere using VLF and GPS observations and modeling. *Adv. Space Res.* 2022;6(1):254–265. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.007>
43. Черногор ЛФ, Милованов ЮБ. Ионосферні ефекти сонячного затемнення 11 серпня 2018 року над Китаєм. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2020;36(6):37–64. <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.06.037>
44. Universität Bern Astronomisches Institut. Satellite geodesy. CODE Products. URL: <ftp.aiub.unibe.ch/CODE/> (дата звернення: 15.09.2021).
45. Бурмака ВП, Таран ВИ, Черногор ЛФ. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2006;46(2):193–208.
46. Бурмака ВП, Таран ВИ, Черногор ЛФ. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2006;46(2):209–218.
47. Черногор ЛФ. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2010;50(3):361–376.
48. Черногор ЛФ. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 1. Экспериментальные данные. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2012;52(6):807–817.
49. Черногор ЛФ. Эффекты солнечных затмений в ионосфере: результаты доплеровского зондирования. 2. Спектральный анализ. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2012;52(6):818–831.
50. Бурмака ВП, Черногор ЛФ. Солнечное затмение 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты наблюдений волновых возмущений в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2013;53(4):509–521.
51. Panasenko SV, Otsuka Y, van de Kamp M, Chernogor LF, 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. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019;191:105051. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015>

#### REFERENCES

1. Cheng K, Huang YN, Chen SW. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992;97(A1):103–112. <https://doi.org/10.1029/91JA02409>
2. Afraimovich EL, Palamartchouk KS, Perevalova NP, Chernukhov VV, Lukhnev AV, Zalutsky VT. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998;25(4):465–468. <https://doi.org/10.1029/98GL00186>

3. Tsai HF, Liu JY. Ionospheric total electron content response to solar eclipses. *J. Geophys. Res.* 1999;104(A6):12657–12668. <https://doi.org/10.1029/1999JA900001>
4. Choudhary RK, StMaurice JP, Ambili KM, Sunda S, Pathan BM. The impact of the January 15, 2010, annular solar eclipse on the equatorial and low latitude ionospheric densities. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2011;116(A9):A09309. <https://doi.org/10.1029/2011JA016504>
5. Chernogor LF. Physical effects of solar eclipses in atmosphere and geospace. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2013. 480 p. [in Russian].
6. Coster AJ, Goncharenko L, Zhang SR, Erickson PJ, Rideout W, Vierinen J. GNSS Observations of Ionospheric Variations During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017;44(24):12041–12048. <https://doi.org/10.1002/2017GL075774>
7. Huba JD, 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(12):5928–5935. <https://doi.org/10.1002/2017GL073549>
8. Zhang SR, Erickson PJ, Goncharenko LP, Coster AJ, Rideout W, Vierinen J. Ionospheric Bow Waves and Perturbations Induced by the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2017. 44(24):12067–12073.
9. Cherniak I, Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content Response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(3):1199–1208. <https://doi.org/10.1002/2017GL075989>
10. 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(8):7040–7050. <https://doi.org/10.1029/2018JA025566>
11. Lei J, Dang T, Wang W, Burns A, Zhang B, Le H. Long-Lasting Response of the Global Thermosphere and Ionosphere to the 21 August 2017 Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018;123(5):4309–4316. <https://doi.org/10.1029/2018JA025460>
12. Nayak C, Yiğit E. GPS-TEC Observation of Gravity Waves Generated in the Ionosphere During 21 August 2017 Total Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018;123(1):725–738. <https://doi.org/10.1002/2017JA024845>
13. Reinisch BW, Dandenault PB, Galkin IA, Hamel R, Richards PG. Investigation of the Electron Density Variation During the 21 August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(3):1253–1261. <https://doi.org/10.1002/2017GL076572>
14. Sun YY, Liu JY, Lin CCH, Lin CY, Shen MH, Chen CH, Chen CH, Chou MY. Ionospheric Bow Wave Induced by the Moon Shadow Ship Over the Continent of United States on 21 August 2017. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(2):538–544. <https://doi.org/10.1002/2017GL075926>
15. Wu C, Ridley AJ, Goncharenko L, Chen G. GITM-Data Comparisons of the Depletion and Enhancement During the 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2018;45(8):3319–3327. <https://doi.org/10.1002/2018GL077409>
16. Chen CH, Lin CHC, Matsuo T. Ionospheric responses to the 21 August 2017 solar eclipse by using data assimilation approach. *Prog. Earth Planet. Sci.* 2019;(6):13. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0263-4>
17. Cnossen I, Ridley AJ, Goncharenko LP, Harding BJ. The Response of the Ionosphere-Thermosphere System to the 21 August 2017 Solar Eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019;124(8):7341–7355. <https://doi.org/10.1029/2018JA026402>
18. Perry GW, Watson C, Howarth AD, Themens DR, Foss V, Langley RB, Yau AW. Topside Ionospheric Disturbances Detected Using Radio Occultation Measurements During the August 2017 Solar Eclipse. *Geophys. Res. Lett.* 2019;46(13):7069–7078. <https://doi.org/10.1029/2019GL083195>
19. Wang W, Dang T, Lei J, Zhang S, Zhang B, Burns A. Physical Processes Driving the Response of the F<sub>2</sub> Region Ionosphere to the 21 August 2017 Solar Eclipse at Millstone Hill. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2019;124(4):2978–2991. <https://doi.org/10.1029/2018JA025479>
20. Liu J-Y, Wu T-Y, Sun Y-Y, Pedatella NM, Lin C-Y, Chang LC, Chiu Y-C, Lin C-H, Chen C-H, Chang F-Y, Lee I-T, Chao C-K, Krankowski A. Lunar Tide Effects on Ionospheric Solar Eclipse Signatures: The August 21, 2017 Event as an Example. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(12):e28472. <https://doi.org/10.1029/2020JA028472>
21. Zhang R, Le H, Li W, Ma H, Yang Y, Huang H, Li Q, Zhao X, Xie H, Sun W, Li G, Chen Y, Zhang H, Liu L. Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 June 2020 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(12):e2020JA028450. <https://doi.org/10.1029/2020JA028450>  
<https://doi.org/10.1002/2017GL076054>
22. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, 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>

23. Aa E, Zhang SR, Erickson PJ, Goncharenko LP, Coster AJ, Jonah OF, Lei J, Huang F, Dang T, Liu L. Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019.; *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020;125(11):e2020JA028296. <https://doi.org/10.1029/2020JA028296>
24. Zhang SR, Erickson PJ, Vierinen J, Aa E, Rideout W, Coster AJ, Goncharenko LP. Conjugate ionospheric perturbation during the 2017 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021;126(2):e2020JA028531. <https://doi.org/10.1029/2020JA028531>
25. Chernogor LF, Garmash KP, Zhdanko YH, Leus SG, Luo Y. Features of ionospheric effects from the partial solar eclipse over the city of Kharkiv on 10 June 2021. *Radio Phys. Radio Astron.* 2021;26(4):326–343. <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.326> [In Ukrainian].
26. Chernogor LF., Mylovanov YuB., Luo Y. Effects from the June 10, 2021 solar eclipse in the high-latitude ionosphere: results of GPS observations. *Radio Phys. Radio Astron.* 2022;27(1):15–31 [In Ukrainian].
27. Chernogor LF, Garmash KP. Ionospheric Processes during the Partial Solar Eclipse above Kharkiv on June 10, 2021. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2022;38(2):61–72. <https://doi.org/10.3103/S0884591322020039> [In Ukrainian]
28. Chernogor LF., Mylovanov YuB. Ionospheric Effects from the June 10, 2021 Solar Eclipse in the Polar Region. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2022;38 [In Press]. [In Ukrainian].
29. Dang T, Lei JH, Wang WB, Yan MD, Ren DX, Huang FQ. Prediction of the thermospheric and ionospheric responses to the 21 June 2020 annular solar eclipse. *Earth Planet. Phys.* 2020;4(3):231–237. <https://doi.org/10.26464/epp2020032>
30. Huang F, Li Q, Shen X, Xiong C, Yan R, Zhang S-R, Wang W, Aa E, Zhong J, Dang T, Lei J. Ionospheric responses at low latitudes to the annular solar eclipse on 21 June 2020; *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(10):e2020JA028483. <https://doi.org/10.1029/2020JA028483>
31. Le H, Liu L, Ren Z, Chen Y, Zhang H. Effects of the 21 June 2020 solar eclipse on conjugate hemispheres: A modeling study. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2020;125(11):e2020JA028344. <https://doi.org/10.1029/2020JA028344>
32. Aa E, Zhang S-R, Shen H, Liu S, Li J. Local and conjugate ionospheric total electron content variation during the 21 June 2020 solar eclipse. *Adv. Space Res.* 2021;68(8):3435–3454. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.015>
33. Chen Y, Feng P, Liu C, Chen Y, Huang L, Duan J, Hua Y, Li X. Impact of the annular solar eclipse on June 21, 2020 on BPL time service performance. *AIP Advances.* 2021;11(11):115003. <https://doi.org/10.1063/5.0064445>
34. Huang L, Liu C, Chen Y, Wang X, Feng P, Li X. Observations and analysis of the impact of annular eclipse on 10 MHz short-wave signal in Sanya area on June 21, 2020. *AIP Advances.* 2021;11(11):115317. <https://doi.org/10.1063/5.0068778>
35. Patel K, Singh AK. Changes in atmospheric parameters due to annular solar eclipse of June 21, 2020, over India. *Indian J. Phys.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s12648-021-02112-2>
36. Şentürk E, Arqim Adil M, Saqib M. Ionospheric total electron content response to annular solar eclipse on June 21, 2020. *Adv. Space Res.* 2021;67(6):1937–1947. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.024>
37. Shagimuratov II, Zakharenkova IE, Tepenitsyna NY, Yakimova GA, Efishov II. Features of the Ionospheric Total Electronic Content Response to the Annular Solar Eclipse of June 21, 2020. *Geomagn. Aeron.* 2021;61:756–762. <https://doi.org/10.1134/S001679322105011X>
38. Sun YY, Chen CH, Qing H, Xu R, Su X, Jiang C, Yu T, Wang J, Xu H, Lin K. Nighttime ionosphere perturbed by the annular solar eclipse on June 21, 2020; *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021;126(9):e2021JA029419. <https://doi.org/10.1029/2021JA029419>
39. Wang X, Li B, Zhao F, Luo X, Huang L, Feng P, Li X. Variation of Low-Frequency Time-Code Signal Field Strength during the Annular Solar Eclipse on 21 June 2020: Observation and Analysis. *Sensors.* 2021;21(4):1216. <https://doi.org/10.3390/s21041216>
40. Wang J, Zuo X, Sun YY, Yu T, Wang Y, Qiu L, Mao T, Yan X, Yang N, Qi Y, Lei J, Sun L, Zhao B. Multilayered sporadic-E response to the annular solar eclipse on June 21, 2020; *Space Weather.* 2021;19(3):e2020SW002643. <https://doi.org/10.1029/2020SW002643>
41. Zhang R, Le H, Li W, Ma H, Yang Y, Huang H, Li Q, Zhao X, Xie H, Sun W, Li G, Chen Y, Zhang H, Liu L. Multiple technique observations of the ionospheric responses to the 21 June 2020 solar eclipse. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021;125(12):e2020JA028450. <https://doi.org/10.1029/2020JA028450>
42. Tripathi G, Singh SB, Kumar S, Ashutosh K Singh, Singh R, Singh AK. Effect of 21 June 2020 solar eclipse on the ionosphere using VLF and GPS observations and modeling. *Adv. Space Res.* 2022;6(1):254–265. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.007>



43. Chernogor LF, Mylovanov, YuB. Ionospheric Effects of the August 11, 2018, Solar Eclipse over the People's Republic of China. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2020;36(6):274–290. <https://doi.org/10.3103/S0884591320060021>. [In Ukrainian].
44. Universität Bern Astronomisches Institut. Satellite geodesy. CODE Products. URL: ftp.aiub.unibe.ch/CODE/ (Last access: 15.09.2021).
45. Burmaka VP, Taran VI, Chernogor LF. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 1. Kharkov Incoherent Scatter Radar Observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006;46(2):183–198. <https://doi.org/10.1134/S0016793206020071>.
46. Burmaka VP, Taran VI, Chernogor LF. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 2. Analysis of Observations and Simulation. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006;46(2):199–208. <https://doi.org/10.1134/S0016793206020083>.
47. Chernogor LF. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010;50(3):346–361. <https://doi.org/10.1134/S0016793210030096>.
48. Chernogor LF. Effects of solar eclipses in the ionosphere: Results of Doppler sounding: 1. Experimental data. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012;52(6):768–778. <https://doi.org/10.1134/S0016793212050039>
49. Chernogor LF. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results: 2. Spectral Analysis. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012;52(6):779–792. <https://doi.org/10.1134/S0016793212050040>
50. Burmaka VP, Chernogor LF. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation Results of Wave Disturbances in the Ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013;53(4):479–491. <https://doi.org/10.1134/S001679321304004X>
51. Panasenko SV, Otsuka Y, van de Kamp M, Chernogor LF, 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. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2019;191:105051. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.015>

Стаття надійшла до редакції: 20 квітня 2022 р.

Рекомендовано до друку: 6 червня 2022 р.

#### TEC VARIATIONS IN EQUATORIAL IONOSPHERE DURING JUNE 21, 2020 SOLAR ECLIPSE

L. F. Chernogor, Yu. B. Mylovanov, V. L. Dorokhov, V. A. Podnos, A. M. Tsybal, M. B. Shevelev,

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

**Relevance.** Solar eclipse (SE) is characterized by numerous dynamic processes in all the Earth's shells and geophysical fields. Each SE is the cause of regular and irregular effects that are unique. This is influenced by the SE magnitude, geographical coordinates, solar activity, time of year, time of day, atmospheric and space weather and other factors. Therefore, the task of a comprehensive and in-depth study of physical processes in geoshells for each new SE is relevant.

**The aim of this paper** is describing of the results of the analysis of vertical TEC caused by the SE on June 21, 2020 in the area near the Earth's equator. The eclipse was unique in that it was observed in equatorial and subtropical latitudes near the summer solstice and was annular character.

**Methods and Methodology.** Indian stations located south of the SE magnitude region were selected for analysis. The total error of the TEC assessment does not exceed 0.1 TECU.

**Results.** Temporal variations of TEC for the trajectory of satellites and the location of receiving stations south of the region of maximum eclipse were analyzed. For most time dependences of the TEC  $N_V(t)$ , the magnitude of the  $\Delta N_V$  depression was increased with growth coverage of the Sun's disk. The differences in this dependence can be explained by the peculiarities of the ionosphere in the equatorial belt of the Earth. The largest depression in TEC could be 4 TECU at  $M_{\max} \approx -0.643$ . The relative variations in the electron concentration were  $-19\%$ . In the morning, the decrease in TEC did not exceed 2 TECU according to  $N_{V0} \approx 13.5\text{--}14.5$  TECU. The relative decrease in electron concentration  $\delta_V = -11\%$ . During the annular eclipse, changes in the waveform character in variations in the concentration of electrons were practically not detected.

**Conclusions.** The parameters of TEC temporal variations in the equatorial ionosphere during the annular SE on June 21, 2020 have been established.

**KEY WORDS:** *equatorial ionosphere, solar eclipse, GPS observations, total electron content, TEC depression*

The article was received by the editors: April 20, 2022.

The article is recommended for printing: June 6 2022