

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-01>

УДК 550.388

Л. Ф. ЧОРНОГОР, д. ф.-м. наук, проф., член-кор. НАН України
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

М. Ю. ТКАЧЕНКО, аспірант, м. н. с.

e-mail: tkachenko.postgrad@gmail.com

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

РЕГІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗБУРЕНЬ В ІОНОСФЕРІ ПІД ЧАС ПОТУЖНОЇ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 4-5 ЛИСТОПАДА 2023 РОКУ

Актуальність. Іоносфера є основним каналом, що забезпечує функціонування систем радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії. Параметри цього каналу суттєво впливають на якість та можливість функціонування як наземних, так і космічних технологічних систем. Параметри каналу формуються під дією різноманітних чинників, що мають місце в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ). Найвпливовіший чинник – сонячні бурі, що супроводжуються сонячними спалахами, сонячним космічним випромінюванням та корональними викидами маси. При цьому значно збурюються атмосферно-іоносферно-магнітосферні радіоканали, що призводить до порушення функціонування радіосистем різного призначення. Тому всебічне дослідження збурень радіоканалу є актуальною задачею.

Метою цієї роботи є опис результатів дослідження регіональних особливостей збурень в іоносфері шляхом аналізу похідних від глобальних іоносферних мап, а саме мап відсоткових приростів значень повного електронного вмісту (ПЕВ).

Методи і методологія. У якості первинних даних використано укладені Center for Orbit Determination in Europe глобальні іоносферні мапи, розміщені в вільному доступі на сайті The Crustal Dynamic Data Information System.

Результати. Вперше за допомогою ГНСС-технологій побудовано та досліджено мапи відсоткових приростів значень ПЕВ в іоносфері, які можна трактувати як індекс збуреності іоносфери. Досліджено реакцію ПЕВ на потужну геокозмичну бурю 4-5 листопада 2023 року. Встановлено, що більшу частину часу протягом головної фази магнітної бурі найбільші іоносферні збурення спостерігалися на широтах значно нижчих, ніж лінія північного та південного полярного кола, що свідчить про перебудову іоносферно-магнітосферної струмової системи, виникнення в ній струмів значної величини та зміну стану іоносферної погоди.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: іоносфера, магнітна буря, повний електронний вміст, іоносферні збурення, особливості реакції іоносфери

Як цитувати: Чорногор ЛФ, Ткаченко МЮ. Регіональні особливості збурень в іоносфері під час потужної геокозмичної бурі 4-5 листопада 2023 року. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024;4:7-13.

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-01>

In cites: Chornogor LF., Tkachenko MYu. Regional features of ionospheric disturbances during the intense geospace storm on November 4-5, 2023. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". (In Ukrainian).2024;41:7-13.

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-01>

ВСТУП

Іоносфера є основним каналом, що забезпечує функціонування систем радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії [1, 2]. Параметри цього каналу суттєво впливають на якість та можливість функціонування як наземних, так і космічних технологічних систем. Параметри формуються під дією різноманітних чинників, що мають місце в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) [3]. Визначальним чинником можна назвати сонячну активність: постійні потоки сонячного вітру, сонячні спалахи та корональні викиди маси значною мірою визначають стан підсистем системи ЗАІМ. Вивчення регіональних особливостей збурень в іоносфері є важливим не лише з теоретичної точки зору, але й з прикладної, адже, як було сказано вище, стан іоносфери значно впливає на функціонування наземних та космічних технологічних систем та апаратів. Знання про

© Чорногор Л.Ф., Ткаченко М.Ю., 2024

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

регіональні особливості збурень в іоносфері дозволяють будувати адекватні регіональні моделі іоносфери та впроваджувати відповідні поправки в роботу систем, якість та можливість функціонування яких суттєво залежить від стану іоносфери.

Для вивчення іоносферних ефектів під час магнітних бурь застосовується цілий арсенал методів [4 – 9]. У нашому дослідженні використано метод трансіоносферного зондування, що належить до методів ГНСС-технологій, за допомогою якого і будуються глобальні іоносферні мапи [10].

Мета роботи – опис результатів дослідження регіональних особливостей збурень в іоносфері шляхом аналізу похідних від глобальних іоносферних мап, а саме мап відсоткових приростів значень повного електронного вмісту (ПЕВ).

Стаття побудована наступним чином. Після короткого опису загальних відомостей про геокозмичну бурю 4-5 листопада 2023 року, аналізу стану космічної погоди, методів та методології дослідження наведено результати аналізу мап відсоткових приростів ПЕВ. Обговорення отриманих результатів закінчується висновками.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГЕОКОСМІЧНУ БУРЮ 4-5 ЛИСТОПАДА 2023 РОКУ

Магнітна буря 4-5 листопада 2023 року була класифікована як буря категорії G3, тобто сильна. Магнітні бурі цього класу здатні викликати полярні сйива навіть у середніх широтах (включно до 50°). Тобто їх можливо спостерігати, наприклад, в Центральній Європі та північних районах США. Виникають сильні радіозавади та шуми в різних діапазонах хвиль, що значно погіршує якість функціонування радіосистем різного призначення, зокрема, систем глобального позиціонування.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Згідно з даними сайтів [11] і [12] стан космічної погоди був наступний.

До середини доби 4 листопада концентрація частинок сонячного вітру не перевищувала $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. У другій половині доби 4 і 5 листопада це число зросло до значень 50 і $42 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ відповідно.

Швидкість частинок сонячного вітру 4 листопада коливалася біля 400 км/с. Після 8:00 UT вона флукутувала, збільшуючись до 735 км/с. Так тривало до кінця доби 8 листопада.

Температура частинок сонячного вітру до початка доби 5 листопада складала близько 10^5 К . 5-8 листопада вона сильно флукутувала, збільшуючись до $(3-5) \cdot 10^6 \text{ К}$. Максимальне значення спостерігалось 6 листопада — $5,1 \cdot 10^6 \text{ К}$.

Розрахункові значення тиску сонячного вітру у спокійних умовах становили приблизно 1 нПа. Майже синхронно з концентрацією частинок сонячного вітру тиск зріс до 11 та 16 нПа 4 та 5 листопада відповідно. З 6 по 8 листопада значення не перевищували 5 нПа. З 2 по початок доби 4 листопада значення проекції міжпланетного магнітного поля не перевищували одиницю нТл. Найбільші їх варіації спостерігалися 5 листопада — $B_y = -31,8 \text{ нТл}$, $B_z = -23,5 \text{ нТл}$.

Значення параметра Акасуфу у спокійних умовах коливалися близько 1 ГДж/с, 4 і 5 листопада максимумами, відповідно, становили 3 і 23 ГДж/с.

До другої половини доби 4 листопада значення K_p -індексу не перевищували 2+. О 18:00 цього дня значення індексу досягло 5+. Далі спостерігалось зменшення значень аж до 09:00 5 листопада з подальшим виходом на максимум о 15:00 до 8- одиниць. Далі до 06:00 7 листопада значення індексу коливалися навколо 5-, після чого пішли на спад до значень 3-4 одиниці 8 листопада.

До першої половини доби 4 листопада значення Dst -індексу коливалися в межах $\pm (11-15) \text{ нТл}$. Після незначного збільшення (до 14 нТл) з 12:00 до 16:00 UT 4 листопада спостерігалось досить різке падіння величини Dst -індексу до значення -62 нТл. Після значних флукутацій з 14:00 до 16:00 UT спостерігалися раптові і більш значні зменшення величини індексу — від -50 нТл до -172 нТл. Після 22:00 5 листопада розпочалася фаза відновлення, яка тривала аж до 8 листопада.

МЕТОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

Для дослідження іоносферних ефектів використано ГНСС-технології, а саме створені за допомогою методу трансіоносферного зондування глобальні іоносферні мапи [13, 14]. Спочатку проводяться виміри ПЕВ на окремих приймальних ГНСС-станціях, що утворюють собою розвинуту мережу. Вимірювання ПЕВ, в основному, проводяться за допомогою двочастотних приймачів, що значно підвищує точність вимірювань. Суть вимірювань полягає в наступному: з супутника, що знаходиться в зоні радіовидимості приймача посилюється закодований спеціальним чином сигнал на двох частотах, що містить в собі так зване навігаційне повідомлення. Воно містить, зокрема, інформацію про час випромінювання сигналу.

Цей сигнал, проходячи крізь іоносферу, зазнає затримки I_{delay} , величина якої є мірою кількості електронів на шляху поширення сигналу, тобто мірою ПЕВ (англійською мовою – TEC):

$$I_{delay} = 40.3 \frac{N_L}{f^2}, \quad (1)$$

де затримка вимірюється в секундах, N_L – ПЕВ на похилій трасі супутник-приймач, m^{-2} , а f – носійна частота, Гц. Зазвичай, ПЕВ вимірюється в одиницях TECU: $1 \text{ TECU} = 10^{16} m^{-2}$.

Далі області між приймачами розбиваються на трикутні зони, в яких обчислюється середнє значення ПЕВ та нормується на площу трикутника. Потім проводиться процедури інтерполяції за всіма трикутними областями, після чого на сітці широт і довгот, відповідно, в межах від $87.5^\circ \dots -87.5^\circ$ та $180^\circ \dots -180^\circ$ отримуються значення ПЕВ, які й будуть візуалізовуватись на глобальних іоносферних мапах. В нашій роботі ми пропонуємо до аналізу похідну від глобальної іоносферної мапи, а саме мапу відсоткових приростів значень ПЕВ, які можна трактувати як індекс I_{di} збуреності іоносфери. Обчислюються значення приростів на сітці широт і довгот з розрізненням 2.5° за широтою та 5° за довготою наступним чином:

$$I_{di} = \frac{VTEC - VTEC_{average}}{VTEC_{average}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де I_{di} – значення відсоткового приросту, $VTEC$ – обчислене значення ПЕВ в елементарній комірці глобальної іоносферної мапи, $VTEC_{average}$ – медіанне значення ПЕВ в цій комірці за певний проміжок часу (в нашій роботі ми використовували медіанне значення за попередні 30 днів перед бурею).

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Результати обчислень мап відсоткових приростів ПЕВ для періоду часу з 3 по 7 листопада 2023 року представлені на Рис.1 - 4.

Розглянемо мапи відсоткових приростів ПЕВ для 3 листопада 2023 року. Результати представлені на Рис.1. Для магнітоспокійного, фоновового дня, були характерні наступні показники: відсоткові прирости ПЕВ відносно медіанних значень за попередні 30 днів не виходили за рамки 100% для європейського та середньоазійського регіонів.

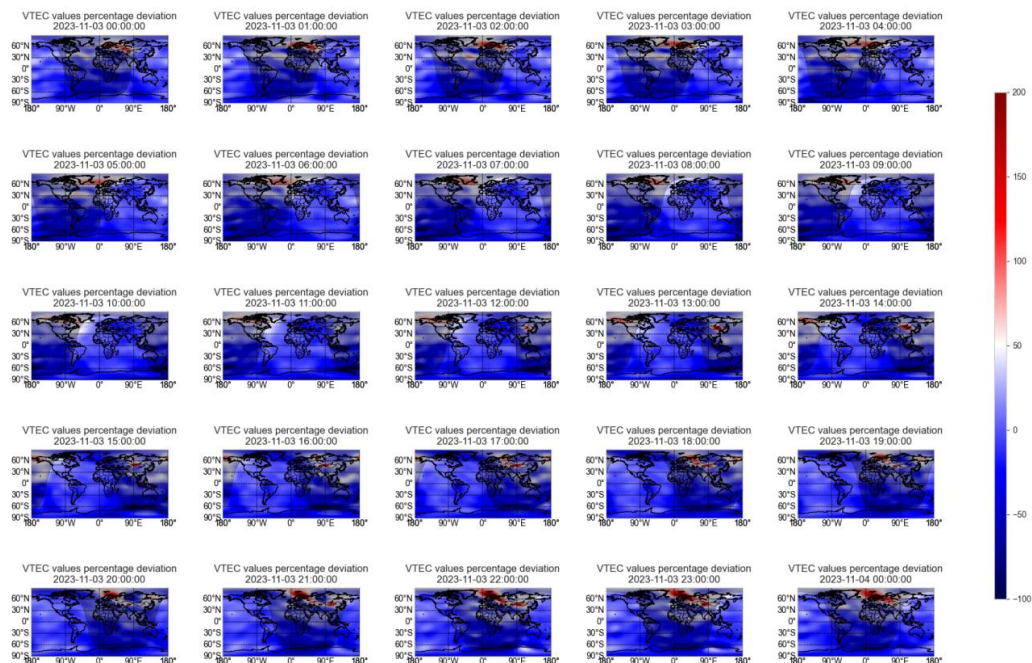


Рис.1. Мапи відсоткових приростів ПЕВ в день 3 листопада 2023 року
Fig.1 Maps of percentage deviation of TEC on November 3, 2023

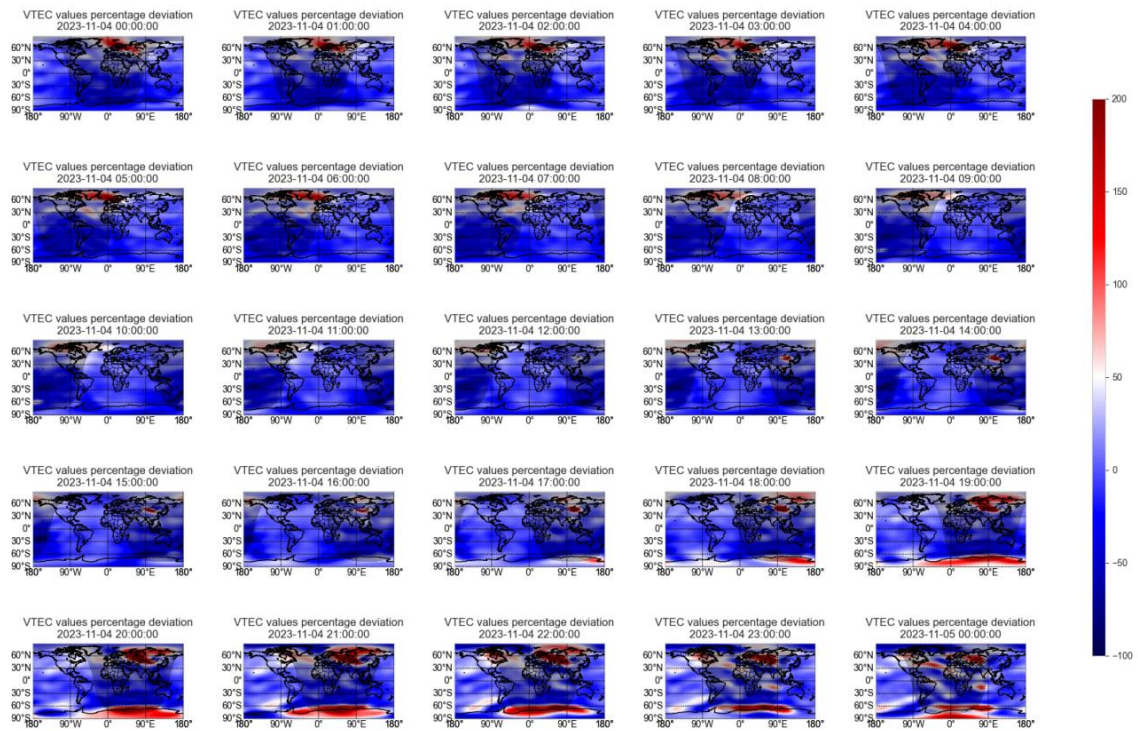


Рис.2: Мапи відсоткових приростів ПЕВ в день 4 листопада 2023 року

Fig.2 Maps of percentage deviation of TEC on November 4, 2023

У перший день бурі, 4 листопада 2023 року, до моменту початку магнітної бурі о 18:00 UT значення процентних приростів не перевищували 70% для європейського та північноатлантичного регіону. Після 18:00 UT спостерігалось значне зростання приростів ПЕВ для східноазійського та північно-східного регіону Азії, а також Антарктики в межах широт від 90°S до 60°S та в межах довгот від 90°W до 180°E .

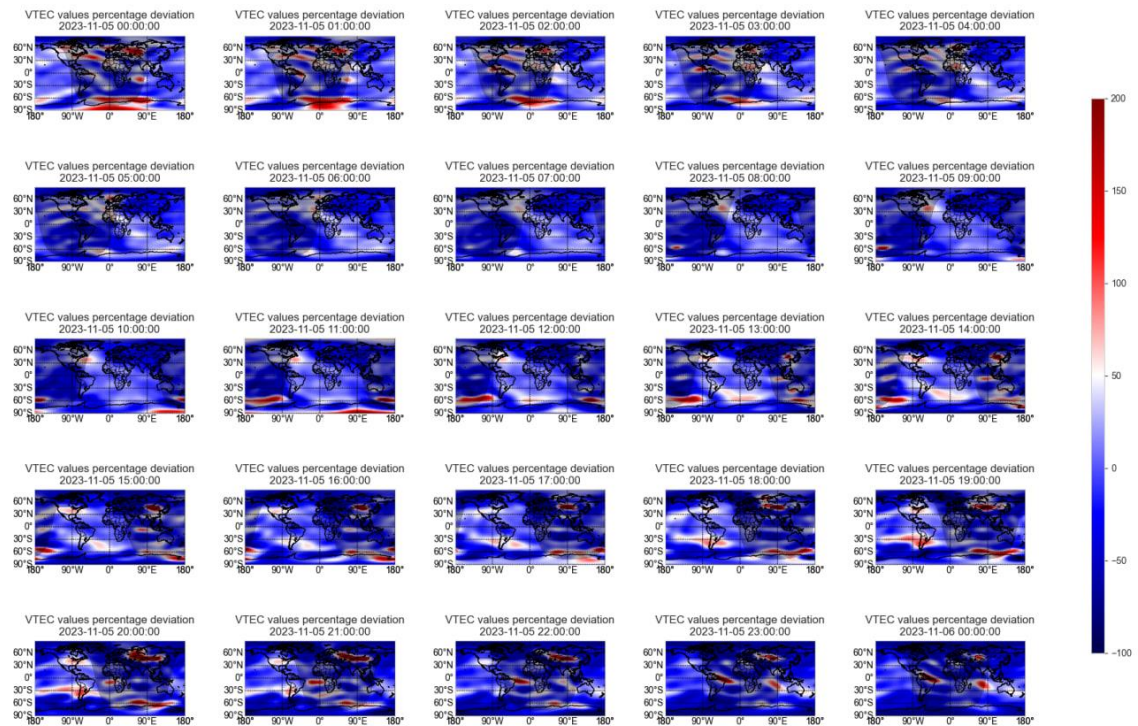


Рис.3: Мапи відсоткових приростів ПЕВ в день 5 листопада 2023 року

Fig.3 Maps of percentage deviation of TEC on November 5, 2023

5 листопада 2023 року до 03:00 UT спостерігалися сильні збурення зі значеннями процентних приростів ПЕВ близько 140% для європейського, північноамериканського регіонів та Антарктики в межах широт 90°S - 60°S і в інтервалі довгот 90°W - 90°E . У період з 04:00 UT по 10:00 UT мали місце незначні прирости ПЕС на різних широтах, після чого о 10:00 UT активізуються збурення в південній півкулі. Потім о 13:00 UT виникають також збурення і в північній півкулі. Значення процентних приростів не перевищували 150%.

Для цього дня характерно те, що після 15:00 немає основної області збурення, яка би плавно еволюціонувала в часі. Після 15:00 видно, як основна область збурення в високих широтах в південній півкулі розпадається на серію менших за площею та амплітудою збурень. Далі збурення спостерігаються на абсолютно всіх широтах в обох півкулях.

Для дня настання фази відновлення були характерні збурення на середніх та екваторіальних широтах, які не перевищували 80% у піку о 22:00 UT для екваторіальних широт. Неможливо виділити конкретний осередок або область збурень, як це було в попередні дні: збурення спостерігаються на всіх широтах як в південній, так і в північній півкулі.

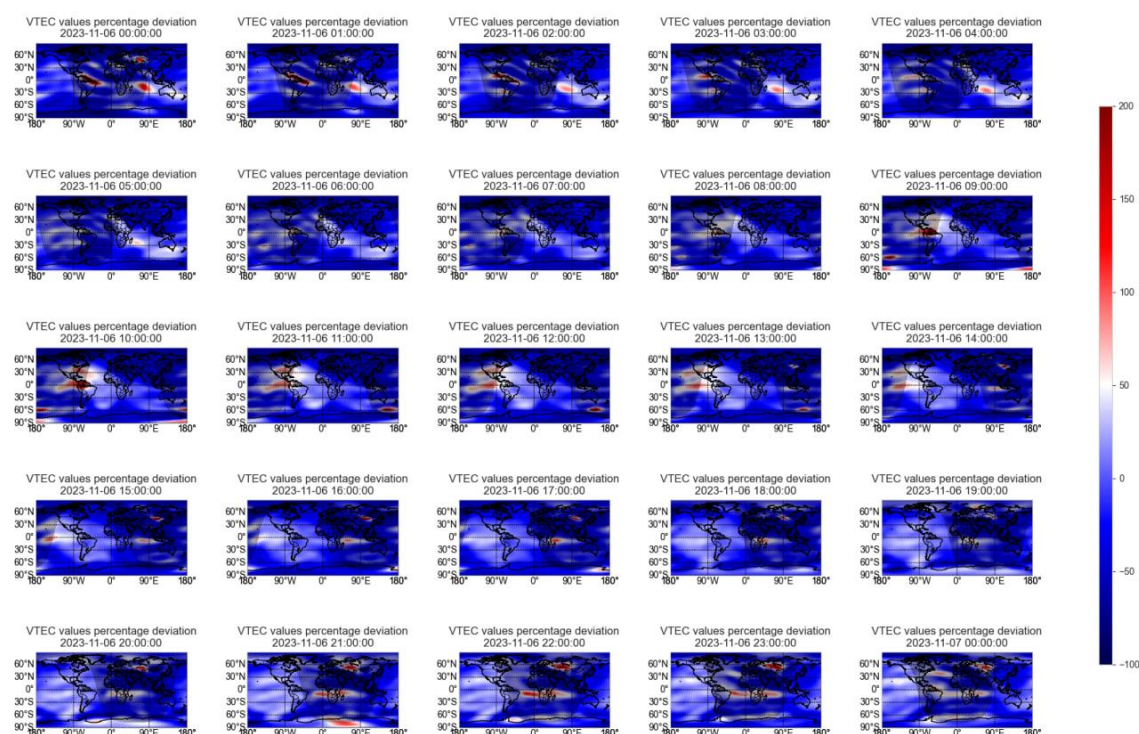


Рис.4: мапи відсоткових приростів ПЕВ в день 6 листопада 2023 року

Fig.4 Maps of percentage deviation of TEC on November 6, 2023

ОБГОВОРЕННЯ

Аналізуючи мапи відсоткових приростів ПЕВ, можна прийти до наступних висновків.

3 листопада 2023 року дійсно був фоновим незбуреним днем з відносно спокійною іоносферою навіть в авроральних областях. Наступного ж дня почалася магнітна буря. Раптовий початок бурі відбувся о 18:00 UT. Можна сказати, що магнітна буря почалася в східній півкулі, де були яскраво виражені збурення в її північному секторі. Однак далі видно, що збурення синхронно поширювалися на захід в обох, північній та південній, півкулях. Збурення в основному спостерігалися в високих широтах, однак в деяких регіонах вони досягали широт $\pm 30^{\circ}$. 5 листопада 2023 року картина була загалом схожою, проте спостерігався розпад великих областей збурень у північній і південній півкулях на низку менших груп збурень, що виникали на всіх широтах, включно з екваторіальними. 6 листопада 2023 року було днем настання фази відновлення, однак певна активність зберігалася на широтах в смузі між $\pm 30^{\circ}$, що свідчить про активні динамічні процеси в області екваторіальної іоносферної аномалії.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Встановлено, що магнітна буря запускає динамічні процеси в системі ЗАІМ, які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення магнітної бурі, про що свідчать мапи відсоткових приростів ПЕВ за 6 листопада 2023 року.
2. В піки активності відсоткові прирости ПЕВ досягали величини в 180%.
3. Збурення іоносфери можна пояснити значною перебудовою іоносферно-магнітосферної системи струмів.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Levis C, Johnson T, Teixeira L. Radiowave Propagation: Physics and Applications. John Wiley & Sons Inc. WILEY. 2010. 320 p.
2. Allnutt J. Satellite to Ground Radiowave Propagation. IET. 2011. 696 p.
3. Cherkogor L. Physics of geospace storms. Space Sci. & Technol. 2021;27(1):03– 77. DOI:[10.15407/knit2021.01.003](https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003)
4. Liu J, Lou W, Zhang X, Shen X. A Comparison Study of f oF2 Derived from Oblique Sounding Network and Vertical Ionosonde in Northern China. Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2016; 27(6):933– 941. DOI:[10.3319/TAO.2016.03.06.01\(AA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2016.03.06.01(AA))
5. Akbari H, Bhatt A, La Hoz C, Semeter J. Incoherent Scatter Plasma Lines: Observations and Applications. Space Science Reviews. 2017;212: 249–294. DOI:[10.1007/s11214-017-0355-7](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0355-7)
6. Hu G, Ma B, Chang H. The velocity distribution function and incoherent scattering spectra of ion in high-latitude ionosphere. Fangzhi Gaoxiao Jichukexue Xuebao. 2013;26:397–402.
7. Li J, Sheng Z, Fan Z, Zhou S, Shi W. Data Analysis of Upper Atmosphere Temperature Detected by Sounding Rockets in China. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017; 34(3):555–565. DOI:[10.1175/JTECH-D-16-0104.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0104.1)
8. Wang C, Wang, L, Zhao H, Xiao P, Chen L, Cao L. Ionospheric Electron Density Reconstruction Based on Space-Borne SAR in Alaska Regions. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2024;21:1–5. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202003619>
9. Zalizovski A, Koloskov O, Kashcheyev A, Kashcheyev S, Yampolsky Yu, Charkina O. Doppler vertical sounding of the ionosphere at the Akademik Vernadsky station. Ukrainian Antarctic Journal. 2020;(1):56–68. DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2020.379>
10. Cooper C, Mitchell N, Wright J, Jackson R, Witvliet A. Measurement of ionospheric total electron content using single-frequency geostationary satellite observations. Radio Science. 2019;54:10–19. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018RS006575>
11. Site of the OmniWeb mission. Available from: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>
12. Site of the World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Available from: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>
13. Site of the Center for Orbit Determination in Europe. Available from: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>
14. Site of the Crustal Dynamics Data Information System. Available from: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>

Стаття надійшла до редакції: 15 жовтня 2024

Рекомендовано до друку: 29 листопада 2024

REGIONAL FEATURES OF IONOSPHERIC DISTURBANCES DURING THE INTENSE GEOSPACE STORM OF NOVEMBER 4-5, 2023

L. F. Chernogor, M. Yu. Tkachenko

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

Relevance. The ionosphere is the main channel that ensures the functioning of radio communication, radionavigation, radar, remote radio sensing, and radio astronomy systems. The parameters of this channel significantly affect the quality and functionality of both terrestrial and space technological systems. The channel parameters are shaped by various factors within the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere (EAIM)

system. The most influential factor is solar storms, which are accompanied by solar flares, solar cosmic radiation, and coronal mass ejections. These events greatly disturb the atmosphere–ionosphere–magnetosphere radio channels, leading to disruptions in the operation of radio systems for various purposes. Therefore, comprehensive research into radio channel disturbances is a relevant task.

The aim of this work is to describe the results of research on the regional peculiarities of ionospheric disturbances through the analysis of derivatives from global ionospheric maps, specifically maps of percentage increases in total electron content (TEC) values.

Methods and Methodology. The primary data used for this study are global ionospheric maps compiled by the Center for Orbit Determination in Europe, which are freely available on the website of The Crustal Dynamic Data Information System.

Results. For the first time, using GNSS technologies, maps of percentage increases in TEC values in the ionosphere were constructed and studied, which can be interpreted as an ionospheric disturbance index. The response of TEC to the powerful geospace storm of November 4-5, 2023, was investigated. It was found that during most of the main phase of the magnetic storm, the largest ionospheric disturbances were observed at latitudes significantly lower than the Arctic and Antarctic Circles, indicating a reconfiguration of the ionosphere–magnetosphere current system, the emergence of significant currents, and a change in ionospheric weather conditions.

KEYWORDS: ionosphere, magnetic storm, total electron content, ionospheric disturbances, ionosphere response features.

The article was received by the editors: October 15 2024

The article is recommended for printing: November 29 2024