

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.057>

УДК 550.385.4, 550.358:550.388

**С. В. Кацко<sup>1</sup>, Л. Я. Ємельянов<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут іоносфери НАН та МОН України,  
вул. Кирпичова, 16, м. Харків, 61001, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна  
E-mail: sophiaharytonova@gmail.com  
leonid.ya.emelyanov@gmail.com  
Leonid.F.Chernogor@gmail.com

## Особливості іоносферної бурі 21—24 грудня 2016 р.

*Метою цієї роботи є дослідження відгуку F-області та зовнішньої іоносфери на помірну геомагнітну бурю 21 грудня 2016 р. ( $K_p \max = 6$ ). Предмет дослідження — висотно-часові варіації параметрів іоносферної плазми над Харковом. Експериментальні дані отримано за допомогою методів вертикального зондування та некогерентного розсіяння радіохвиль із використанням іонозонда та радара некогерентного розсіяння. Приведені результати базуються на кореляційному аналізі сигналу некогерентного розсіяння. Температури іонів та електронів, а також швидкості руху іоносферної плазми визначалися з набору вимірних кореляційних функцій некогерентно розсіяного сигналу. Для обчислення концентрації електронів використовувалися виміряні для ряду висот іоносфери потужності некогерентно розсіяного сигналу, температури іонів і електронів, а також концентрація електронів у максимумі іонізації області F іоносфери, яка розрахована за значеннями вимірної іонозондом критичної частоти. Помірна геомагнітна буря над Харковом супроводжувалася іоносферною бурєю зі знакозмінними фазами (першою позитивною і другою негативною). Максимальне збільшення концентрації електронів дорівнювало 1.8 раза, а її зменшення — 3.4 раза відповідно. Негативна фаза супроводжувалася невеликим підйомом шару F2 (на 20...28 км), чому могло послужити зменшення вертикальної складової швидкості руху плазми та збільшення температури електронів на 600...800 К і температури іонів на 100...160 К. Зареєстровано ефекти сильних негативних іоносферних збурень у період наступного магнітосферного*

збурення 22—24 грудня 2016 р. зі зменшенням концентрації електронів у максимумі шару F2 до 2.5...4.9 раза. Ефекти негативних збурень проявились у варіаціях температур електронів та іонів. Загалом помірна магнітна буря викликала значні зміни концентрації електронів у максимумі шару F2, які супроводжувалися нагріванням іоносферної плазми, зміни варіацій вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми та висоти максимуму іонізації під час головної фази магнітної бурі.

**Ключові слова:** космічна погода, геомагнітна буря, іоносферна буря, радар некогерентного розсіяння, іонозонд, позитивна та негативна фази бурі, концентрація електронів, температури електронів і іонів, швидкість руху плазми.

## ВСТУП

Дослідження стану космічної погоди та її впливу на процеси у магнітосфері Землі є одним із важливих і актуальних завдань сонячно-земної фізики [1, 2, 10, 12, 13]. Незважаючи на те, що на сьогоднішній день накопичено велику кількість експериментальних і теоретичних даних, все ще залишаються проблеми прогнозування реакції іоносфери в залежності від рівня сонячної активності. Складність і мінливість фізичних процесів, що формують іоносферну бурю, залежність вкладу різних фізичних механізмів від географічного регіону призводять до великого різноманіття спостережуваних явищ у різних регіонах Землі. Особливий інтерес у дослідженні викликають також помірні або слабкі магнітні бурі, здатні викликати сильні іоносферні збурення. Аналіз кожної бурі дає цінну інформацію для подальшого дослідження та моделювання фізичних процесів у системі Сонце — міжпланетне середовище — геокосмос — атмосфера — Земля, а також для прогнозування реакції іоносфери конкретного регіону на збурення на Сонці [1].

## СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Загалом у період з 18 по 24 грудня 2016 р., який ми розглядаємо, сонячна активність була низькою: потік радіовипромінювання на хвилі  $\lambda = 10.7$  см перебував у межах  $F_{10.7} = 72...75$ , спалахи були відсутні [<http://ftp.swpc.noaa.gov>]. Протягом 18—20 грудня 2016 р. значення концентрації протонів у потоці сонячного вітру  $n_{sw}$  (рис. 1) значно змінювалися приблизно від  $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  до  $13 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  в результаті наявності великої корональної діри в атмосфері Сонця [<http://spaceweather.com>]. 20 грудня швидкість сонячного вітру  $V_{sw}$  в середньому становила приблизно 350 км/с.

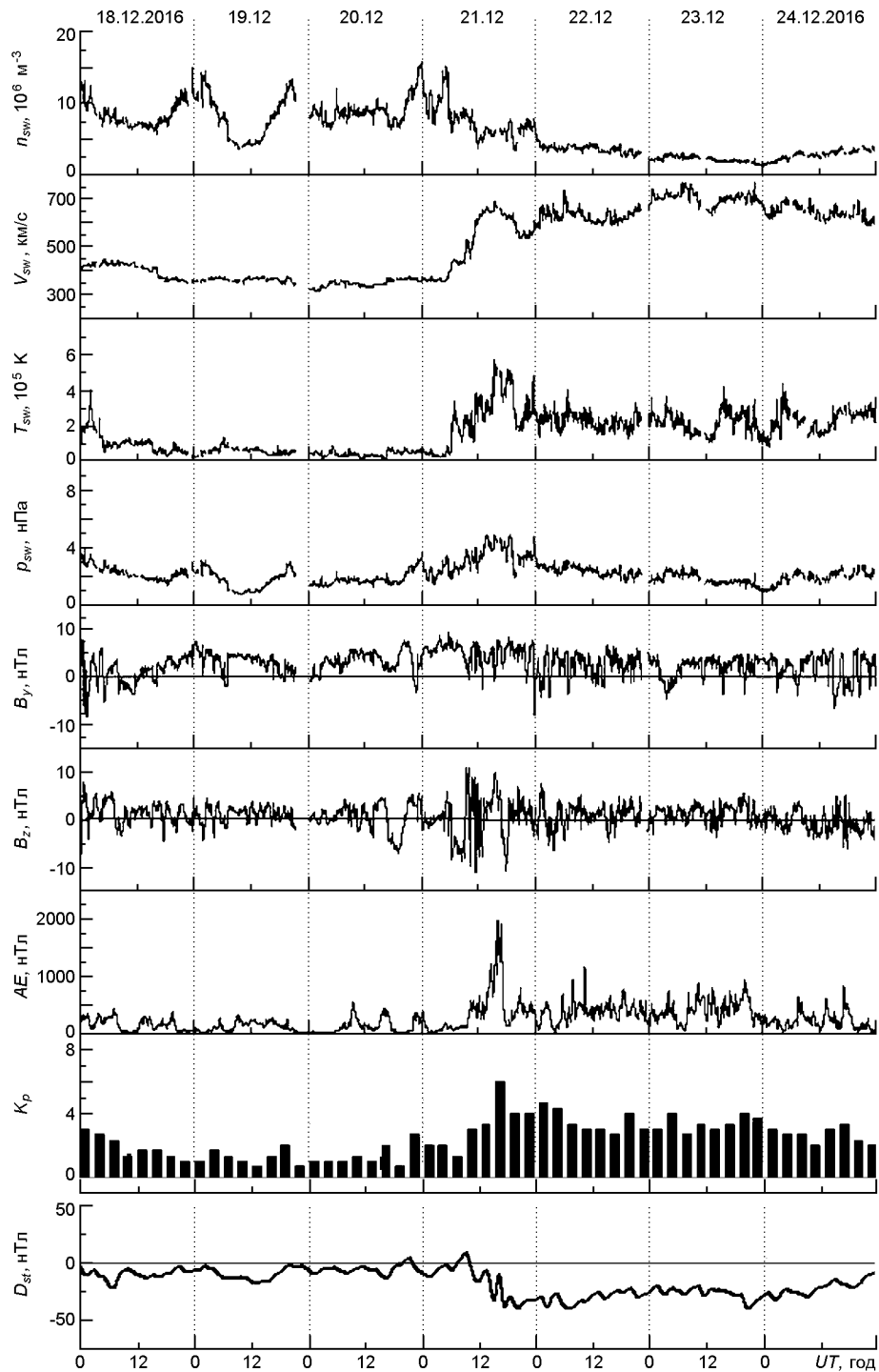


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації  $n_{sw}$ , радіальної швидкості  $V_{sw}$ , температури  $T_{sw}$  і розрахованих значень динамічного тиску  $p_{sw}$ ,  $B_y$ - і  $B_z$ -складових міжпланетного магнітного поля,  $AE$ -індексу (WDC Kyoto),  $K_p$ -індексу (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), значення  $D_{st}$ -індексу (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) протягом 18—24 грудня 2016 р.

21 грудня після 05:00 UT (тут і далі всесвітній час) швидкість почала поступово збільшуватись, і після 12:00 її значення перевищували 650 км/с. Значення температури  $T_{sw}$  сонячного вітру також суттєво змінилися: різко збільшилися від  $(0.5...1) 10^5$  К до  $(3...4) 10^5$  К, та іноді перевищували значення  $5 10^5$  К. Зі збільшенням швидкості  $V_{sw}$  21 грудня значення концентрації  $n_{sw}$  почали зменшуватися та після 12:00 дорівнювали приблизно  $6 10^6$  м<sup>-3</sup>.

Значення динамічного тиску  $p_{sw}$  у період 18...20 грудня 2016 р. варіювали згідно зі змінами концентрації  $n_{sw}$  у цей період, досягаючи 3 нПа в нічний час. 21 грудня 2016 р. зі збільшенням швидкості температури сонячного вітру тиск  $p_{sw}$  перевищував 4.5 нПа в інтервалі часу 13:00...19:00 і досягав максимуму 4.8...4.9 нПа. Друге значне збільшення  $p_{sw}$  до 4.2...4.7 нПа відмічалось в інтервалі часу 23:00...24:00 21 грудня 2016 р. при різкому стрибку температури  $T_{sw}$  у цей же час.

$B_z$ -складова міжпланетного магнітного поля 21 грудня 2016 р. після 09:00 різко повернула на південь. Перше мінімальне екстремальне значення  $-10.4$  нТл відмічалось о 09:35, друге,  $-10.6$  нТл, — близько 10:00. Слабо виражений початок магнітної бурі мав місце 21 грудня 2016 р. приблизно о 10:00 (див. варіації індексу  $D_{st}$  на рис. 1). Після 12:00 21 грудня 2016 р. авроральний індекс  $AE$  почав стрімко зростати й о 16:10 досяг максимального значення 1932 нТл. У свою чергу, індекс  $K_p$  в інтервалі часу 12:00...15:00 збільшився з 3 до 3.3, а його екстремальне значення  $K_{pmax} = 6$  зафіксовано з 15:00 до 18:00, що характерно для помірних магнітних бур згідно з класифікацією NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Space Weather Scales. При цьому значення індексу  $D_{st}$  дорівнювали  $-33$  та  $-38$  нТл о 17:00 та 18:00 відповідно. Екстремальне значення  $D_{st min} = -40$  нТл було зафіксовано о 21:00, що і визначило завершення головної фази магнітної бурі.

Протягом наступного періоду 22...24 грудня 2016 р. швидкість сонячного вітру залишалася високою (650...700 км/с), іноді перевищувала 700 км/с. Температура  $T_{sw}$  коливалася у межах  $(2...3) 10^5$ . У свою чергу, значення концентрації  $n_{sw}$  зменшилися до  $(3...4) 10^6$  м<sup>-3</sup>.

Із значень індексів  $K_p$  і  $D_{st}$  видно, що магнітосфера Землі залишалася у збуреному стані до кінця періоду спостережень. 22 грудня  $K_{p max} = 4.7$  в інтервалі часу 00:00...03:00 UT, з 03:00 до 06:00  $K_p = 4.3$  і з 18:00 до 21:00  $K_p = 4.0$ . 22 грудня 2016 р. о 03:00 індекс  $D_{st}$  відхилився до  $-39$  нТл, мінімальне значення  $-40$  нТл було зафіксовано з 07:00 до 08:00. 23 грудня 2016 р. індекс  $K_p = 4$  у часових інтервалах 03:00...06:00 і 18:00...21:00,  $D_{st}$  залишався меншим від  $-20$  нТл і о 21:00 досягнув значення  $-40$  нТл. 24 грудня 2016 р. індекс  $K_p$  досягав значень  $3...3.3$ , а індекс  $D_{st}$  залишався від'ємним і дорівнював  $-30$  нТл о 10:00.

Дамо оцінку енергетиці помірної магнітної бурі 21 грудня 2016 р. Її енергія  $E_{ms}$  визначається значенням індексу  $D_{st min}$  [7]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_M \frac{|D_{st}^*|}{B_0},$$

де  $B_0 = 3 \cdot 10^5$  Тл — значення індукції магнітного поля на екваторі,  $E_M = 8 \cdot 10^{17}$  Дж — енергія дипольного магнітного поля Землі. Скориговане значення  $D_{st}^* = D_{st \min} \cdot b p^{1/2} \cdot c$ . Тут  $b = 5 \cdot 10^5$  нТл/(Дж м<sup>-3</sup>)<sup>1/2</sup>,  $c = 20$  нТл,  $p = n_p m_p V_{sw}^2$ ,  $n_p$  і  $m_p$  — концентрація та маса протонів,  $V_{sw}$  — швидкість сонячного вітру.

Екстремальні значення індексів геомагнітної активності під час магнітної бурі дорівнювали:  $AE_{\max} = 1932$  нТл,  $K_{p\max} = 6$  і  $D_{st \min} = -40$  нТл. Для помірної бурі при  $|D_{st}^*| = 49.1$  нТл її значення дорівнює  $2 \cdot 10^{15}$  Дж, що відповідає класифікації магнітних бур [5—7, 11, 12].

## ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Спостереження іоносферних ефектів проводилися за допомогою двох інструментів: радара некогерентного розсіяння іоносферної обсерваторії Інституту іоносфери (м. Харків) і цифрового іонозонда радіофізичної обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна.

Метод некогерентного розсіяння має найбільш повні діагностичні можливості в дослідженні іоносферних і термосферних ефектів геокосмічних бур і дозволяє з високою точністю та в широкому інтервалі висот одночасно вимірювати основні параметри іоносфери. Харківський радар некогерентного розсіяння (НР) Інституту іоносфери є єдиним джерелом відомостей про варіації ряду основних параметрів іоносфери в середньоширотній Європі. Імпульсна потужність двоканального передавача досягає 3.6 МВт (середня потужність 100 кВт), коефіцієнт посилення параболічної антени 12700 (діаметр антени 100 м, її ефективна площа близько 3700 м<sup>2</sup>, ширина променя діаграми спрямованості близько 1°). Відносна похибка визначення параметрів іоносфери зазвичай не перевищує 10%. У період вимірювань із 20:00 21 грудня до 24:00 23 грудня радар працював у режимі випромінювання двочастотним складовим радіоімпульсним сигналом імпульсною потужністю 2 МВт із двома елементами тривалістю 130 і 660 мкс, що забезпечує висотне розділення 20 і 100 км у діапазонах висот 100...400 км і 200...1500 км відповідно.

Іонозонд радіофізичної обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна використовує для випромінювання та приймання радіохвиль вертикальні широкосмугові ромбічні антени Айзенберга. Висота підвісу антен дорівнює 18 м, а їхній горизонтальний розмір — 50 м. Зондувальні радіоімпульси тривалістю 100 мкс із частотою слідування 125 Гц, несучою частотою у діапазоні 1...16 МГц і потужністю до 1.5 кВт в імпульсі випромінюються широкосмуговим радіочастотним підсилювачем потужності передавача «Бриг-2». Вимірювання параметрів іоносфери

методом вертикального зондування проводилися з 13:00 19 грудня до 13:45 24 грудня 2016 р.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

*Варіації критичної частоти шару F2.* На рис. 2 представлено часові варіації критичної частоти  $f_oF_2$ , отримані за допомогою іонозонда у період 21—24 грудня 2016 р., та її відносне відхилення  $\delta f_oF_2$ . При аналізі добових варіацій критичної частоти  $f_oF_2$  як контрольні дані вибрано усереднені значення  $f_oF_2$  за 19—20 грудня 2016 р. (пунктир), коли геомагнітний індекс не перевищував значення  $K_p = 2$ . Для контрольних значень  $f_oF_2$  (а також значень концентрації електронів  $N_mF_2$  у максимумі шару F2) характерним є максимум після опівночі взимку.

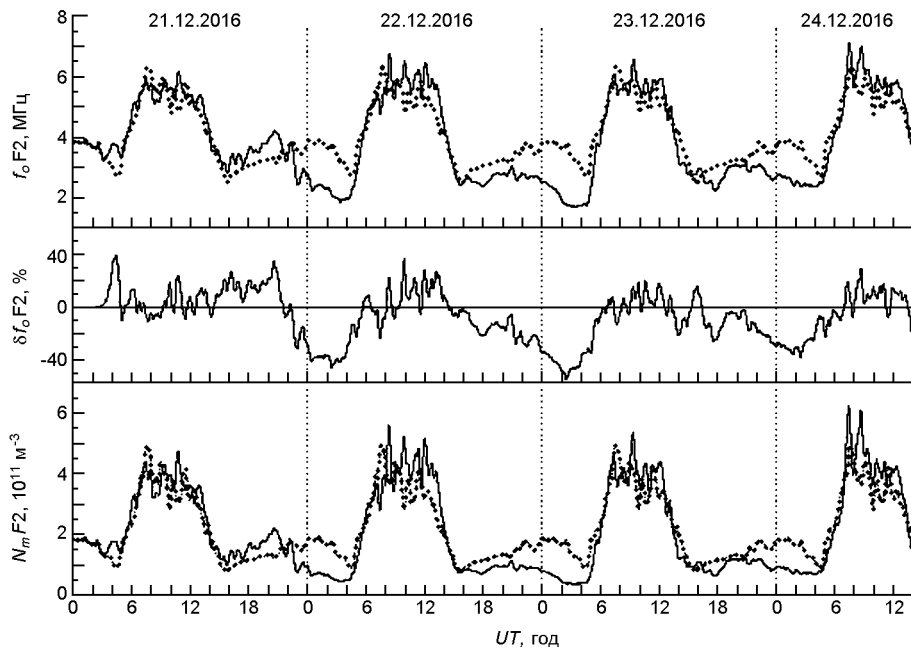


Рис. 2. Часові варіації критичної частоти  $f_oF_2$  (верхня панель) у період вимірювань із 21 по 24 грудня 2016 р. (лінія) та за магнітоспокійних умов (точкова лінія), її відносне відхилення  $\delta f_oF_2$  (середня панель) і концентрація електронів  $N_mF_2$  у максимумі шару F2 (нижня панель, лінія та точки у відповідні періоди)

Відносне відхилення критичної частоти дорівнює

$$f_oF_2 \frac{f_oF_2 - \langle f_oF_2 \rangle}{\langle f_oF_2 \rangle} 100 \%,$$

де  $f_oF_2$  — значення критичної частоти, виміряної під час експерименту,  $\langle f_oF_2 \rangle$  — усереднені значення критичної частоти в умовах незбудованої іоносфери.



Рис. 3. Однохвилинні варіації  $H$ -складової геомагнітного поля 21 грудня 2016 р.

Магнітне збурення над Україною настало близько 16:00 21 грудня 2016 р., згідно з даними варіацій  $H$ -складової геомагнітного поля (рис. 3) за спостереженнями магнітної обсерваторії «Київ» (координати: 50.72 N, 30.3 E) [<http://ottawa.intermagnet.org>]. У цей час значення частоти  $f_oF2$  почали збільшуватися (див. рис. 2) і в інтервалі часу 16:00...21:00, коли тригодинні значення  $K_p$  досягли відповідно значень 6 і 4, значення  $f_oF2$  були на 10...30 % більшими, ніж за незбурених умов. Максимальне збільшення частоти з 3.1 до 4.2 МГц (збільшення в 1.35 раза) спостерігалось приблизно о 20:45. Оскільки частоти  $f_oF2$  відображають варіації концентрації електронів  $N_mF2$  у максимумі шару F2, це відповідало збільшенню  $N_mF2$  у 1.8 раза (див. рис. 2).

Після завершення головної фази магнітної бурі о 21:00 21 грудня 2016 р. відбулося стрімке зменшення  $f_oF2$  над Харковом, що й визначило настання негативного іоносферного збурення. Після півночі 22 грудня 2016 р., коли індекс  $K_p$  знову збільшився до 4.7, відносне відхилення  $f_oF2$  перевищувало  $-30\%$ , і близько 02:30 досягало свого екстремального значення  $-45.8\%$ . Відповідно концентрація  $N_mF2$  зменшилася в 3.4 раза. У зимовий час зазвичай нічна іоносфера (а саме концентрація  $N_mF2$ ) у найбільшій мірі контролюється потоками плазми з плазмосфери.

Оскільки до кінця вимірювань спостерігалось збурення магнітного поля Землі, швидкість сонячного вітру залишалася високою, близько 650...700 км/с, це і стало причиною наступної помітної зміни добового ходу критичної частоти  $f_oF2$  протягом вимірювань.

22 грудня 2016 р. у період 12:00...14:00 значення  $f_oF2$  були більшими, ніж 20 грудня 2016 р.:  $f_oF2$  становило 15...20 %, концентрація  $N_mF2$  при цьому збільшилась у 1.4...1.6 раза. Після 21:00, коли  $K_p = 4$ ,  $f_oF2$  почала стрімко зменшуватися. Максимальне відносне відхилення  $f_oF2 = -54.6\%$  визначено о 02:30 23 грудня, а  $N_mF2$  при цьому зменшилась у 4.9 раза.

З отриманих результатів видно, що 23 грудня 2016 р. після 13:30 значення  $f_oF2$  помітно варіювали, суттєве зменшення  $f_oF2$  настало після 22:00, коли індекс  $K_p$  змінився з 4 на 3.7. Негативне іоносферне збурення в цей період було слабшим, ніж у попередні періоди. Екстремальне значення  $f_oF2$  становило  $-37.9\%$  о 02:30 24 грудня 2016 р., концентрація електронів відповідно зменшилась в 2.6 раза.

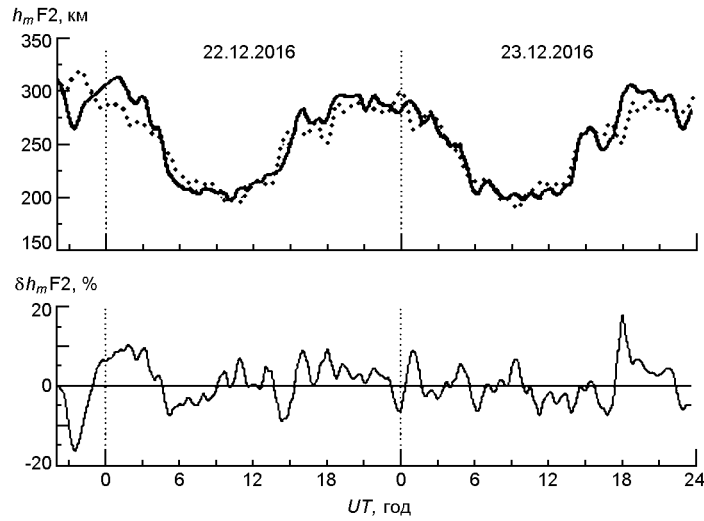


Рис. 4. Часові варіації висоти  $h_m F2$  максимуму шару F2 (верхня панель) із 21 по 23 грудня 2016 р. (лінія) та в контрольний день 22 грудня 2010 р. (точки), а також її відносного відхилення  $h_m F2$  (нижня панель)

*Варіації висоти максимуму шару F2.* Для аналізу даних, отриманих радаром некогерентного розсіяння, як контрольний день обрано 22 грудня 2010 р. Цей день найбільш близький як за часом спостереження іоносфери, так і за рівнем сонячної активності (значення потоків сонячного радіовипромінювання 22 грудня 2010 р. і 22 грудня 2016 р. дорівнювали  $F_{10.7} = 78$  і  $75$  відповідно) [[ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old\\_indices/](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/)]. У контрольний день іоносфера перебувала у спокійних геомагнітних умовах: значення індексу  $K_p$  дорівнювали  $0 \dots 0.3$ , у попередній і наступний день 21 і 23 грудня 2010 р. індекс  $K_p$  не перевищував 1.

Значення висоти максимуму шару F2  $h_m F2$  (див. рис. 4), що отримані за допомогою радара некогерентного розсіяння, під час експерименту 2016 р. добре корелюють із даними 2010 р. Помітні відмінності спостерігалися лише на початку вимірювань на радарі, по закінченню головної фази магнітної бурі 21 грудня 2016 р. і в нічний час 22 грудня, коли над Харковом спостерігалось негативне іоносферне збурення. Так, о 21:00 21 грудня 2016 р. висота максимуму шару зменшилася з 316 км до 264 км. Далі з опівночі до 03:00 22 грудня значення висоти  $h_m F2$  були більшими від значень  $h_m F2$  для контрольного дня та збільшились на 20...28 км.

*Висотний розподіл концентрації електронів.* На рис. 5 наведено висотні профілі концентрації  $N_e$  у послідовні моменти часу (через 15 хв), отримані за допомогою радара НР. Видно, що протягом періоду вимірювань спостерігались деформації профілів  $N_e(h)$  у порівнянні з даними  $N_e$  у незбурених умовах. Суттєві зміни значень концентрації відмічались на висотах 200...250 км 22 грудня 2016 р., де у денний час



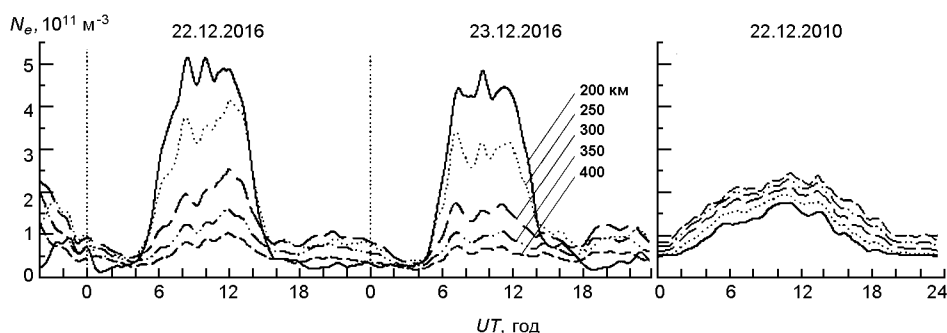


Рис. 5. Часові варіації концентрації електронів  $N_e$  на фіксованих висотах 200...400 км у період із 21 по 23 грудня 2016 р. і в контрольний день 22 грудня 2010 р.

перебувала висота максимуму шару F2. Так, протягом періоду 10:00...12:00 на висоті 200 км концентрація збільшилася до  $4.8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , на 250 км — до  $3.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , тоді як при незбуреній іоносфері значення  $N_e$  досягали  $1.6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  і  $1.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  відповідно. На висотах 300...400 км у цей же час значення концентрації електронів зменшились. На висотах 350 і 400 км зменшення було помітнішим: до  $1.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (з  $2.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  22 грудня 2010 р.) і до  $0.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (з  $2.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  у грудні 2010 р.) відповідно. В цілому профіль  $N_e(h)$  22 грудня 2016 р. під час іоносферного збурення характеризується більш пізнім підйомом і раннім спадом, і, відповідно, тривалим зменшенням у вечірній і нічний час. Після 18:00 більша концентрація електронів рееструвалась на висоті 300 км, яка в цей час приблизно відповідала висоті максимуму  $h_m F2$ .

Аналогічні варіації профілів  $N_e(h)$  спостерігалися і 23 грудня 2016 р., лише значення концентрації були дещо меншими. Стрімке збільшення  $N_e$  розпочалося після 04:00, а близько 07:00 на висоті 200 км значення  $N_e$  досягали  $(4.2...4.7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ . Після 18:00 на висоті 300 км концентрація електронів була більшою і становила приблизно  $1.2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  (до 22:00).

*Варіації температур електронів та іонів.* Порівнюючи отримані температури електронів  $T_e$  і іонів  $T_i$  із температурами в контрольний день (рис. 6), видно, що в цілому добовий хід температур змінився, екстремальні зменшення концентрації електронів  $N_m F2$  у максимумі шару F2 супроводжувалися помітним збільшенням температур електронів на всьому діапазоні досліджуваних висот 200...400 км. Так, 22 грудня 2016 р. о 02:30  $T_e$  збільшилася на висоті 200 км з 671 до 1475 К, на 250 км — з 852 до 1574 К, на 300 км — з 1041 до 1662 К, на 350 км — з 1173 до 1772 К і на 400 км — з 1266 до 1906 К. Збільшення температури  $T_i$  було не таким істотним: на 200 км — 829 К (667 К у магнітоспокійних умовах), на 250 км — 966 К (817 К), на 300 км — 1043 К (954 К), на 350 км — 1087 К (1045 К) і на 400 км — 1158 К

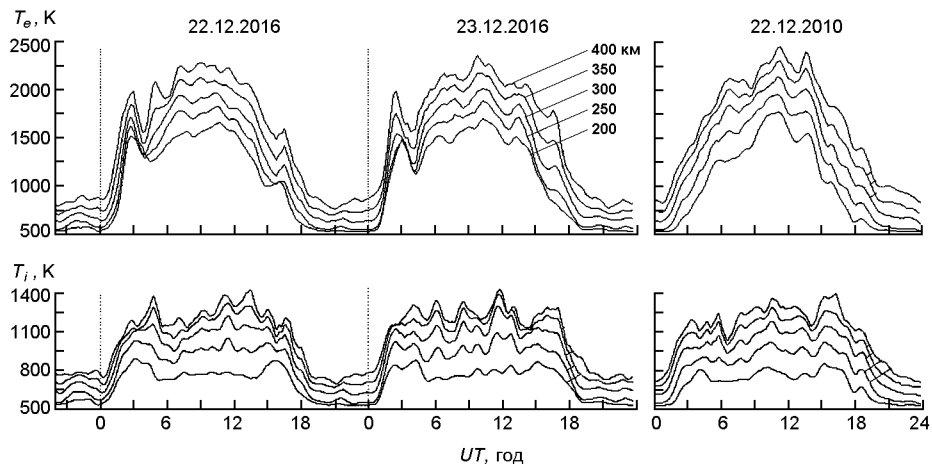


Рис. 6. Часові варіації температур електронів  $T_e$  та іонів  $T_i$  із 21 по 23 грудня 2016 р. і 22 грудня 2010 р. на фіксованих висотах

(1093 K). Під час збільшення концентрації  $N_m F2$  близько опівдня значення температур електронів  $T_e$  були дещо меншими, ніж значення у 2010 р.: меншими на 100...250 K на висотах 200...300 км і на 200...400 K — на висотах 350...400 км. Температура іонів  $T_i$  змінилася мало: після 13:00 стала перевищувати на декілька десятків кельвін значення контрольного дня, а після 13:45 з висоти 300 км і вище збільшення становило 100...200 K.

23 грудня 2016 р. поведінка температур була аналогічною. О 02:30, коли зменшення  $N_m F2$  у 4.9 раза супроводжувалося нагрівом плазми, значення  $T_e$  і  $T_i$  були приблизно такими ж, як і 22 грудня 2016 р. о 02:30. Близько опівдня збільшення  $N_m F2$  також супроводжувалося зменшенням  $T_e$  та збільшенням  $T_i$  у порівнянні з контрольним днем.

*Варіації вертикальної складової швидкості переносу іоносферної плазми.* На рис. 7 наведено результати спостережень 21—23 грудня 2016 р. вертикальної складової  $V_z$  швидкості руху іоносферної плазми. Моменти сходу та заходу Сонця на відповідних висотах позначено стрілками: жирними — для харківського радара (49 36 пн. ш., 36 18 сх. д.) і тонкими — для магнітоспряженої області (36 30 пд. ш., 52 12 сх. д.).

На нижній панелі рис. 7 із затемненням показані ділянки висотно-часової діаграми, де відношення сигнал/шум  $q < 0.1$  і, як наслідок, статистична похибка визначення швидкості на цих ділянках така, що не дозволяє вважати отримані дані достовірними. Подібні умови є типовими для зимового періоду в умовах низької сонячної активності. В цілому середня квадратична похибка швидкості протягом періоду, який аналізується, становила на висотах 198...253 км від 1 до 6 м/с, а на висотах 308...418 км — від 4 до 10 м/с вдень і до 30 м/с у ранковий час.

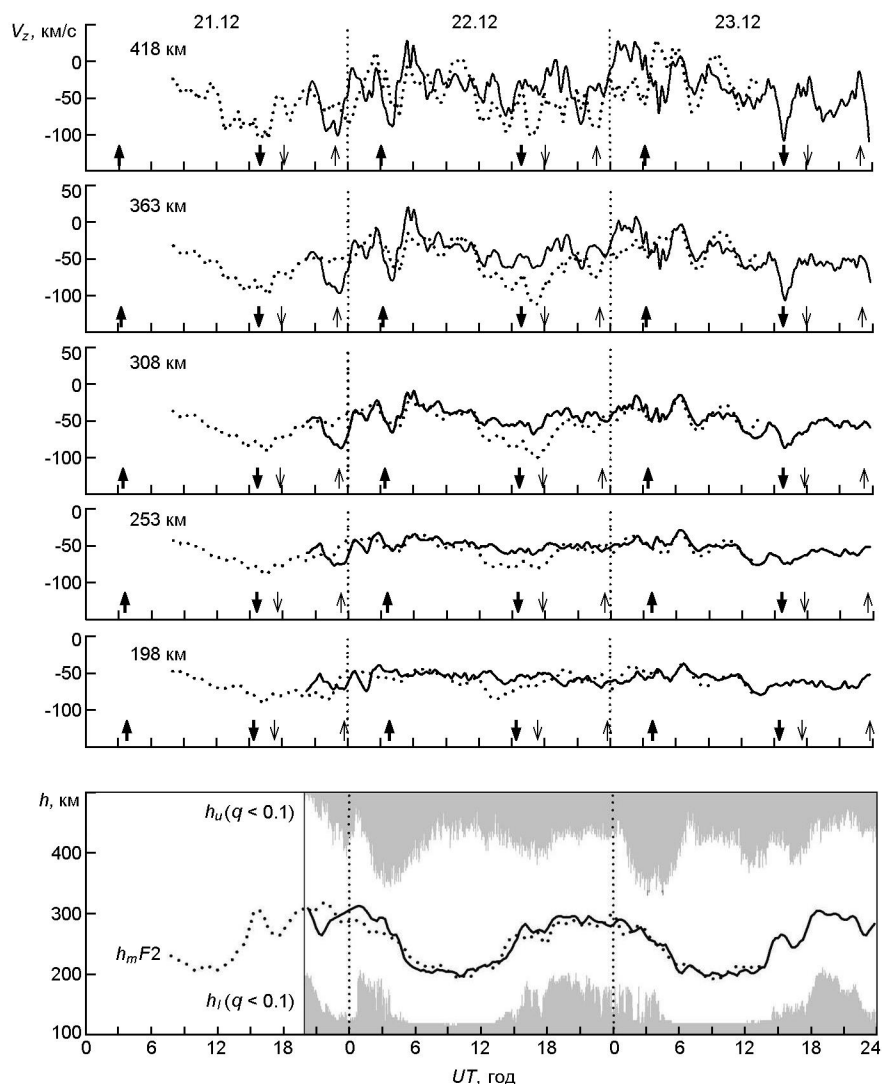


Рис. 7. Часові варіації вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми  $V_z$  для ряду висот іоносфери та висоти максимуму іонізації  $h_mF2$  у період вимірювань із 21 по 23 грудня 2016 р. (лінії) та в контрольні дні 21—23 грудня 2010 р. (точки)

Із рис. 7 видно, що варіації  $V_z$ , отримані у 2010 та 2016 рр., досить близькі. Так, збільшення абсолютної величини швидкості спрямованого вниз руху плазми ( $V_z < 0$ ) на висоті 253 км і вище у період із 02:30 до 04:00 і потім її зменшення до 05:30 спостерігалось 22 грудня в обох експериментах. Ці варіації викликані перебудовою іоносфери, пов'язаною з ранковим сонячним термінатором у магнітоспрямленій області та, у більшій мірі, у Харкові. Але є відмінності, викликані в 2016 р. магнітною бурєю.

У варіаціях  $V_z$  з 21:30 21 грудня 2016 р. по 02:30 22 грудня 2016 р. мали місце коливання, які були відсутні в 2010 р. Найбільш інтенсивне

коливання  $V_z$ , яке спостерігалось за допомогою радара НР, почалося 21 грудня 2016 р. о 21:30 (тобто приблизно через 7 год після початку магнітної бурі). Його квазіперіод становив близько 3 год, а максимальне відхилення у бік збільшення швидкості низхідного потоку плазми (відносно середнього значення  $V_z$  до початку і після завершення коливання), що спостерігалось о 23:15 21 грудня 2016 р., дорівнювало 17, 25, 43, 59 м/с на висотах 198, 253, 308 і 363 км відповідно. Амплітуда відхилення швидкості відносно значення  $V_z$  21 грудня 2010 р. о 23:15 має близькі значення: 14, 26, 40, і 50 м/с на тих же висотах відповідно.

Аналогічні коливання спостерігалися у варіаціях висоти максимуму іонізації  $h_m F2$  21 грудня 2016 р. з 20:15 до 24:45 із мінімумом о 21:30 (див. рис. 7). Із 23:00 21 грудня 2016 р. висота  $h_m F2$  продовжувала збільшуватися, і з цього моменту до 04:00 22 грудня вона була більшою, ніж висота  $h_m F2$  у 2010 р. Максимальна різниця спостерігалась приблизно о 01:00 і становила 25 км.

Друге зареєстроване коливання  $V_z$  з екстремумом (максимумом модуля швидкості) приблизно о 01:45 21 грудня 2016 р. мало квазіперіод 2 год та амплітуди 26, 20, 18, 25 і 37 м/с на висотах 198, 253, 308, 363 і 418 км відповідно, тоді як у 2010 р. подібне коливання не спостерігалось.

22 грудня 2016 р. практично був відсутній «вечірній мінімум» (збільшення модуля швидкості потоку плазми, що сходить униз ( $V_z < 0$ ) у вечірній час), тоді як 22 грудня 2010 р. він спостерігався на всіх представлених висотах із 12:00 до 19:30 (див. рис. 7а), а також зазвичай спостерігається у зимовий час протягом багатьох років. Очевидно, це є наслідком впливу магнітної бурі. Слід зазначити, що при відсутності геомагнітних збурень збільшення модуля швидкості у вечірній час, як правило, взимку проявляється виразніше, ніж улітку [16].

Таким чином, можна стверджувати, що геокосмічна буря вплинула на добові варіації вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми  $V_z$  і висоти максимуму іонізації під час головної фази бурі.

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

За результатами спостережень над Харковом видно, що помірна магнітна буря 21 грудня 2016 р. викликала інтенсивне іоносферне збурення зі знаковмінними фазами [3]. Тривале магнітосферне збурення супроводжувалося відповідно помітними змінами в іоносферній плазмі до кінця вимірювань.

Стан іоносферної плазми під час бурі залежить від великої кількості факторів. Крім того, пояснення процесів взаємодії у глобальній системі магнітосфера — іоносфера — атмосфера ускладнюється

недостатньою передбачуваністю викликаних ефектів, незважаючи на накопичену на сьогоднішній день велику статистичну картину бур.

Як стверджується у роботі [8], тривале зменшення концентрації  $N_mF2$  і повного електронного вмісту під час головної фази бурі, особливо в середніх широтах, вважається головною ознакою бурі у F2-шарі іоносфери. Перед такою негативною фазою зазвичай спостерігається позитивна фаза, яка може з'явитися під час головної фази в низьких широтах і взимку в середніх широтах, що підтверджується статистикою й аналізом великої кількості спостережень [1, 2, 9, 10, 14]. Ця особливість іоносферної бурі (збільшення  $f_oF2$  під час головної фази) узгоджується зі спостереженнями, проведеними 21—24 грудня 2016 р. Зменшення  $f_oF2$  настало після завершення головної фази магнітної бурі, після чого спостерігалось негативне іоносферне збурення, яке тривало близько 6 год. На жаль, неможливо оцінити поведінку висоти  $h_mF2$  до початку магнітної бурі та настання її головної фази через відсутність даних радара HP у цей час, як і пояснити механізми наявності позитивної фази над Харковом під час головної фази бурі. Так, однією з причин позитивних збурень є підйом шару F2 вгору (в область нижчої рекомбінації) за рахунок посилення меридіональних вітрів, спрямованих до екватора [10]. Цей механізм ефективний в денний час, коли переважають процеси іоноутворення. Для цього потрібно проаналізувати дані  $f_oF2$  і  $h_mF2$  інших прилеглих іоносферних станцій. Інший механізм пов'язаний зі зміною складу нейтральної атмосфери за рахунок осідання легких компонентів газу в низьких і середніх широтах у результаті нагрівання термосфери під час магнітної бурі. Роль другого механізму більш істотна вночі. В обох випадках вплив сонячного вітру відбувається по каналу «граничний шар хвоста магнітосфери — плазмовий шар — поздовжні струми — джоулівське нагрівання — зміна термосферної циркуляції та нейтрального складу» [10]. Також причиною збільшення частоти  $f_oF2$  могло послужити високоширотне нагрівання термосфери під час магнітної бурі та висипання м'яких частинок з енергіями  $E \approx 1$  кеВ в область денного каспу (енергія поглинається на висотах F-області 200... 300 км, викликаючи її розігрів і меридіональну циркуляцію, що сприяє переносу збагаченого атомарним киснем газу до екватора) [2]. Але через відсутність даних приладу GUVI на борту супутника TIMED над Україною, перевірка останнього механізму також виявилася неможливою.

Можна відмітити, що перша негативна фаза (з 21 на 22 грудня 2016 р.) супроводжувалася невеликим підйомом шару F2 (приблизно до 300 км) і швидким нагріванням (різким збільшенням температури електронів  $T_e$ ). Швидкість переносу іоносферної плазми (вертикальна складова) у цей час швидко зменшилась на висоті 308 км (див. рис. 7) приблизно на 50 м/с. Зменшення швидкості потоку плазми, спрямованого вниз, і збільшення температури могли послужити причиною підйому шару F2.

За даними іонозонда видно, що в наступні дні 22—24 грудня 2016 р. над Харковом спостерігалось негативне іоносферне збурення у вечірній і нічний час із відносним відхиленням  $f_oF2$  до  $-50\%$  і  $-30\%$ , що відповідає зменшенню концентрації  $N_mF2$  більше ніж у 4.5 раза у першому випадку та у 2.5 раза — у другому. У зимовий час в середніх широтах негативна фаза в нічний період пояснюється збігом напрямків (до екватору) фонові (індукованої сонячним нагрівом) та індукованої бурею циркуляції. Таким чином, повітря з нижчим відношенням  $[O]/[N_2]$  поширюється до нижчих широт, ніж у денний час. Зміна термосферного складу (зменшення  $[O]/[N_2]$ ) під час геомагнітних збурень проходить у результаті нагрівання нижньої термосфери на висотах 100...140 км в авроральній області, джерелом чого є джоулівська дисипація струмів, а також поглинання часток, що висипаються. Нагрівання призводить до зменшення відношення  $[O]/[N_2]$  по всій товщі термосфери високоширотної області й індукує свою власну циркуляцію, яка на висотах області  $F2$  намагається перенести повітря у напрямку до екватора у нижчі широти. Нагрітий газ зі зменшеним відношенням  $[O]/[N_2]$  має в термосфері вищу температуру. На висотах області  $F$  зменшення температури призводить до збільшення лінійного коефіцієнта рекомбінації. Таким чином, негативна фаза утворюється в нагрітому термосферному газі завдяки зменшенню  $[O]/[N_2]$  і збільшенню температури [15]. Як видно з рис. 2 і 6, максимальне зменшення  $N_mF2$  22 і 23 грудня 2016 р. супроводжувалося різким збільшенням температур  $T_e$  і у меншій мірі  $T_i$ . Роль  $[O]/[N_2]$ , як згадувалось вище, на даний момент невідома. Що стосується висоти максимуму шару  $F2$  (див. рис. 4), то під час другої та третьої негативної фази вона практично не змінилась порівняно з контрольними даними. Варіації вертикальної складової  $V_z$  22 грудня 2016 р. після 19:00 стали поступово відновлюватися до значень, характерних для незбурених умов.

Помірна геомагнітна буря 21 грудня 2016 р. викликала над Харковом двофазну іоносферну бурю (зі зміною фаз із позитивної на негативну). Далі до кінця вимірювань у Радіофізичній обсерваторії тривалі збурення у магнітосфері супроводжувалося сильними (за класифікацією [7]) негативними іоносферними збуреннями. Суттєві зміни під час збурень проявилися в добових варіаціях критичної частоти (та, відповідно, концентрації електронів у максимумі шару  $F2$ ) та температур плазми.

На завершення наведемо значення індексів, які описують силу іоносферної бурі.

Індекс позитивної іоносферної бурі [7]

$$I_{PI5} = 10 \lg \frac{N_{e \max}}{N_{e0}}$$

при  $N_{e \max} / N_{e0} = 1.8$  дорівнює 2.6. Така позитивна іоносферна буря,

згідно з класифікацією [7], належить до помірних, для яких  $I_{PI3} = 2.3...3.1$ .

Індекс негативної іоносферної бурі

$$I_{NIS} = 10 \lg \frac{N_{e0}}{N_{e \min}}$$

при  $N_{e0} / N_{e \min} = 4.9$  дорівнює 6.9. Згідно з класифікацією [7], така негативна іоносферна буря належить до дуже сильних, для таких бур  $I_{NIS} = 6.0...9.9$ .

При  $N_{e0} / N_{e \min} = 3.4$  і  $N_{e0} / N_{e \min} = 2.6$  маємо  $I_{NIS} = 5.3$  (сильна іоносферна буря) та  $I_{NIS} = 4.1$  (сильна іоносферна буря).

Таким чином, помірна магнітна буря супроводжувалася помірною позитивною іоносферною бурею, а також дуже сильною, та двома сильними негативними іоносферними бурями.

## ВИСНОВКИ

1. Помірна геомагнітна буря 21 грудня 2016 р. викликала двофазну іоносферну бурю над Україною з першою позитивною фазою та другою негативною фазою. Максимальне збільшення концентрації  $N_m F2$  дорівнювало 1.8 раза, а її зменшення — 3.4 раза. Негативна фаза супроводжувалася невеликим підйомом шару F2 (на 20...28 км), чому могло посприяти зменшення вертикальної складової швидкості руху та збільшення температури плазми (температура електронів збільшилася на 600...800 К, температура іонів — лише на 100...160 К).

2. Наступні збурення у магнітосфері 22—24 грудня 2016 р. викликали сильні негативні збурення (з максимальним зменшенням  $N_m F2$  в 4.9 і 2.6 рази відповідно), ефекти яких проявилися у варіаціях температур електронів та іонів. Варіації висоти шару F2 були подібними до варіацій, характерних для незбурених умов.

3. Геокосмічна буря під час своєї головної фази вплинула на добові варіації вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми  $V_z$ . Виявлено два коливання варіацій  $V_z$  у бік збільшення модуля швидкості потоку плазми, спрямованого вниз, із квазіперіодами 3 та 2 години і максимальним відхиленням о 23:15 21 грудня 2016 р., яке збільшувалося з висотою від 14 до 50 м/с на висотах 200...400 км, і максимальним відхиленням о 01:45 22 грудня 2016 р., що дорівнювало 26, 20, 18, 25 і 37 м/с на висотах 198, 253, 308, 363 і 418 км відповідно.

1. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. 25, № 5. С. 705—721.
2. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. 25, № 5. С. 768—772.

3. Емельянов Л. Я., Кацко С. В., Черногор Л. Ф. Особенности эффектов геокосмической бури 21—24 декабря 2016 г. 17-th Ukrainian Conference on Space Research (21—25 August 2017): conf. proc. Odessa, Ukraine, 2017. P. 160.
4. Кременецкий И. О., Черемних О. К. *Космічна погода: механізми та прояви*. К.: Наукова думка, 2009. 144 с.
5. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. 8, № 1. С. 59—106.
6. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. *Нелинейный мир*. 2006. 4, № 12. С. 655—697.
7. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. 2014. 408 с.
8. Van P. P., Sun S. J., Chen C., Zhao Z. W. Forecasting of low-latitude storm-time ionospheric  $f_0F_2$  using support vector machine. *Radio Sci.* 2011. 46. P. RS6008.
9. Blagoveshchenskii D. V. Effect of geomagnetic storms (substorms) on the ionosphere: 1. A review. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. 53, № 3. P. 275—290.
10. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms: A Review. *Space Sci. Rev.* 1999. 88, № 3. 24. P. 563—601.
11. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. of Rem. Sens.* 2011. 32, № 11. P. 3199—3218.
12. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2007. 7, GI3001, doi: 10.1029/2005GI000125.
13. Danilov A. D. F-2 region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. 63. P. 441—449.
14. Goncharenko L. P., Foster J. C., Coster A. J., Huang C., Aponte N., Paxton L. J. Observations of a positive storm phase on September 10, 2005. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. 69. P. 1253—1272.
15. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 1997. 102, № A8. P. 17275—17282.
16. Yemelyanov L. Ya. Radio physical observations of plasma drift velocities in the ionosphere near the maximum of solar cycle 24. *Telecommunications and Radio Eng.* 2015. 74, № 20. P. 1841—1855.

## REFERENCES

1. Danilov A. D., Morozova L. D. (1985). Ionospheric Storms in F2-layer. Morphology and Physics (Review). *Geomagnetism and Aeronomy*. 25(5), 705—721 [in Russian].
2. Danilov A. D., Morozova L. D., Mirmovich E. G. (1985). On the possible nature of the positive phase of ionospheric storms. *Geomagnetizm i aeronomiia*. 25(5), 768—772 [in Russian].
3. Emelyanov L. Ya., Katsko S.V., Chernogor L. F. (2017). Features of the geospace storm effects on December 21—24, 2016. 17-th Ukrainian Conference on Space Research (21—25 August 2017, Odessa, Ukraine) [in Russian].
4. Kremenetskiy I. O., Cheremnykh O. K. (2009). *Space weather: Mechanism and manifestations*. K. Naukova dumka. [in Ukrainian].
5. Chernogor L. F. (2006). Physics of Earth, atmosphere, and geospace from the standpoint of system paradigm. *Radio phys. radio astron.* 8(1), 59—106 [in Russian].



- 6 Chernogor L. F. (2006). Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system. 1. *Nonlinear World*. 4(12). 655—697 [in Russian].
7. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of Geospace Storms: monograph*. (Kharkiv, Ukraine: Kharkiv V. N. Karazin National University Publ.) [in Russian].
8. Ban P. P., Sun S. J., Chen C., Zhao Z. W. (2011). Forecasting of low-latitude storm-time ionospheric  $f_0F2$  using support vector machine. *Radio Sci.* 46. 1—9.
9. Blagoveshchenskii D. V. (2013). Effect of geomagnetic storms (substorms) on the ionosphere: 1. A review. *Geomagnetism and Aeronomy*, 53 (3), 275—290.
10. Buonsanto M. J. (1999). Ionospheric storms: A review. *Space Sci. Rev.* 88(3-4), 563—601.
11. Chernogor L. F. (2011). The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. of Rem. Sens.* 32 (11), 3199—3218.
12. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. (2007). Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 7 (GI3001).
13. Danilov A. D. (2001). F-2 region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 63, 441—449.
14. Goncharenko L. P., Foster J. C., Coster A. J., Huang C., Aponte N., Paxton L. J. (2007). Observations of a positive storm phase on September 10, 2005. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 69, 1253—1272.
15. Mikhailov A. V., Foster J. C. (1997). Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 102 (A8), 17275—17282.
16. Yemelyanov L. Ya. (2015). Radio physical observations of plasma drift velocities in the ionosphere near the maximum of solar cycle 24. *Telecommunications and Radio Eng.* 74 (20), 1841—1855.

S. V. Katsko<sup>1</sup>, L. Ya. Emelyanov<sup>1</sup>, L. F. Chernogor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University,  
Kharkiv, Ukraine

#### FEATURES OF THE IONOSPHERE STORM ON DECEMBER 21—24, 2016

The aim of this research work is investigation the F region and topside ionosphere response to the moderate geomagnetic storm on December 21, 2016 ( $K_p \text{ max} = 6$ ). The subject of the study is the altitude-temporal variations in the parameters of the ionospheric plasma over Kharkiv. The experimental data were obtained by the methods of vertical sounding and incoherent scatter of radio waves with the use of ionosonde and incoherent scatter radar. The study results are based on a correlation analysis of the incoherent scatter signal. The ion and electron temperatures and the ionospheric plasma drift velocity were determined from the set of measured correlation functions of the incoherent scatter signal. To calculate the electron density, we used the power of the incoherent scatter signal, ion and electron temperatures, which were measured for a number of ionosphere heights, and the ionospheric F region peak electron density calculated from the critical frequency measured by the ionosonde. The moderate geomagnetic storm over Kharkiv was accompanied by the ionosphere storm with sign-variable phases (the first positive phase and the second negative

one). The maximum increase of electron density was 1.8 times, and its decrease was 3.4 times accordingly. The negative phase was accompanied by a small the F2 layer peak increase (by 20...28 km) as a result of the decrease of the plasma vertical drift velocity and the increase of electron temperature by 600...800 K and ion temperature by 100...160 K. The effects of strong negative ionospheric disturbances were registered in a period of the next magnetospheric disturbance on December 22—24, 2016 with the F2 layer peak electron density decrease to 2.5...4.9 times. The effects of negative perturbations were manifested in variations of the electron and ion temperatures. Generally, the moderate magnetic storm has caused considerable changes in variations of the F2 layer peak electron density, which were accompanied by ionosphere plasma heating. Variations of the ionospheric plasma vertical drift velocity and the F2 layer peak height were changed during the main phase of magnetic storm.

**Key words:** space weather, geomagnetic storm, ionospheric storm, incoherent scatter radar, ionosonde, positive and negative storm phases, electron density, electron and ion temperatures, plasma drift velocity.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2020

Після доопрацювання 26.11.2020

Прийнята до друку 21.12.2020