

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.02.016>

УДК 550.388

С. В. Кацко, Л. Я. Ємельянов

Інститут іоносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України
вул. Кирпичова, 16, м. Харків, Україна, 61001
sophiaharytonova@gmail.com,
leonid.ya.emelyanov@gmail.com

Варіації параметрів середньоширотної іоносфери над Україною під час вельми помірної магнітної бурі 18 грудня 2019 р.

Багаторічні дослідження показують, що слабкі і помірні магнітні бурі можуть викликати значні і не прогнозовані зміни стану іоносфери. Питання прогнозування реакції іоносфери в конкретному регіоні на зміни космічної погоди залишаються сьогодні актуальними, адже фізичні процеси, що відбуваються в іоносферній плазмі, є мінливими та складними. Особливий інтерес становлять іоносферні збурення зі змінними фазами в середніх широтах та їхні проникнення у низькі широти, виникнення сильних іоносферних бур у результаті помірних чи слабких магнітних бур. Мета роботи — експериментальні дослідження варіацій параметрів іоносферної плазми над Україною під час вельми помірної магнітної бурі 18 грудня 2019 р. Дослідження проведено з використанням методу некогерентного розсіяння радіохвиль, який має найбільш повні діагностичні можливості, та методу вертикального зондування. Спостереження провадилися в іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України (м. Харків) за допомогою радара некогерентного розсіяння. Значення критичних частот одержано за допомогою портативного іонозонду. Також використано геофізичну інформацію про параметри космічної погоди та магнітосфери. Проаналізовано реакцію іоносфери над Харковом на геокосмічну бурю 18 грудня 2019 р. Встановлено, що вельми помірні магнітні бурі ($K_p = 4$) викликала позитивне іоносферне збурення. Підвищення критичної частоти (до 1.6 раза) і відповідне збільшення концентрації електронів у максимумі шару F2 (до 2.6 раза) супроводжувалися ланцюгом змін у варіаціях основних параметрів іоносферної плазми: висоти максимуму шару F2 (зменшенням на 30 км), концентрації елек-

тронів у всьому діапазоні досліджуваних висот 200...450 км, температур електронів і іонів, вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми (зменшенням швидкості низхідного руху плазми V_z опівдні після початку магнітної бурі з подальшим відновленням швидкості, виникненням о 15:40 UT на висотах 360...420 км коливань у варіаціях V_z із квазіперіодом 1 год 50 хв і послабленням ефекту вечірнього екстремуму у варіаціях V_z з максимальними зменшеннями швидкості на цих висотах до 40...70 м/с). Наведено обґрунтування дії такого механізму формування позитивної іоносферної бурі: у денний зимовий час у середньоширотній іоносфері спрямований вниз дрейф плазми послаблюється через те, що звичайна циркуляція послаблена спрямованою у протилежну сторону циркуляцією, індукованою бурею. Вельми помірна магнітна буря 18 грудня 2019 р. викликала помітні зміни параметрів іоносферної плазми в усьому діапазоні досліджуваних висот. Отримані дані дали додаткову інформацію для вивчення сонячно-земних зв'язків і прогнозування стану іоносфери.

Ключові слова: сонячно-земні зв'язки, геліофізична активність, магнітна буря, іоносферне збурення, іоносферна плазма, некогерентне розсіяння, позитивна іоносферна буря.

ВСТУП

Дослідження залежності стану іоносфери від геліофізичної та сонячної активності сприяють визначенню характеру сонячно-земних зв'язків, які мають безпосередній вплив на життєдіяльність людей. Питання у прогнозуванні реакції іоносфери в конкретному регіоні на зміни в космічній погоді залишається сьогодні актуальним, адже фізичні процеси, що відбуваються в іоносферній плазмі, мінливі та складні. Особливий інтерес становлять іоносферні збурення зі змінними фазами на середніх широтах та їхні проникнення в низькі широти, виникнення сильних іоносферних бур у результаті помірних чи слабких магнітних бур [3, 7, 9, 14]. У роботах [8, 16] виявлено, що після завершення 24-го циклу сонячної активності взаємозв'язок між іоносферними параметрами та показниками сонячної активності не є стабільним. Залежність від показників сонячної активності середньорічних значень критичних частот f_oF2 і f_oE (шарів $F2$ і E іоносфери), які в значній мірі контролюються цими показниками, виявляється різною для окремих циклів сонячної активності, також змінюється відношення між непрямыми показниками (зокрема індексом сонячної активності $F_{10.7}$ та потоком випромінювання Лайман-альфа F) сонячної активності. Спеціалісти з області фізики Сонця активно обговорюють природу та механізми спостережуваних явищ у зазначених роботах, адже довгий час вважалося, що взаємозв'язок між іоносферними параметрами та непрямыми показниками сонячної активності стійкий з часом.

В роботі розглянуто ефекти вельми помірної магнітної бурі 18 грудня 2019 р., під час якої індекс геомагнітної активності K_p сягав 4. 2019 р. є перехідним роком від завершення 24-го та початку 25-го циклу сонячної активності. Протягом усього 2019 р. рівень сонячної активності був мінімальним: активність Сонця була настільки низькою, що найсильніша геомагнітна буря 14 травня 2019 р. сягала рівня помірної за шкалою NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) з екстремальними індексами геомагнітної активності $K_p \max = 6+$ і $D_{st \min} = -65$ нТл. Відхилення зазначених індексів від нуля (або від значень у магнітоспокійних умовах) були найбільшими протягом 2019 р.

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ

Спостереження іоносфери провадилися методами некогерентного розсіяння (НР) радіохвиль та вертикального зондування за допомогою засобів, розташованих у іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України поблизу м. Харкова.

Метод НР 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. Радар НР Інституту іоносфери є єдиним джерелом відомостей про варіації ряду основних параметрів іоносфери в середньоширотній Європі [10]. Імпульсна потужність його двоканального передавача сягає 3.6 МВт, коефіцієнт посилення параболічної антени 12700 (діаметр антени 100 м, її ефективна площа близько 3700 м^2 , ширина променя діаграми спрямованості близько 1°). Відносна похибка визначення параметрів іоносфери зазвичай не перевищує 10%. У період вимірювань із 13:00 UT 16 грудня до 24:00 UT 18 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.

Значення критичної частоти f_oF2 одержано за допомогою портативного когерентного іонозонду, розробленого в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України [2], і на той час розташованого в Іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери НАН і МОН поруч з радаром НР. Для зондування було використано ромбічні антени станції вертикального зондування іоносфери «Базис» [4]. Зондування здійснювалося в діапазоні частот від 1 до 9.9 МГц із потужністю випромінювання близько 100 Вт і змінним за лінійним законом кроком за частотою від 45 до 100 кГц з використанням фазової маніпуляції сигналу 32-розрядними комплементарними кодами. Діапазон висот 90...796 км, роздільна здатність за висотою 0.75 км.

ГЕЛЛОГЕОФІЗИЧНА ОБСТАНОВКА

18 грудня 2019 р. індекс сонячної активності становив $F_{10.7} = 70$. Зв'язок із параметрами міжпланетного магнітного поля та процесом передачі енергії сонячного вітру до іоносфери високих широт показано на рис. 1. Магнітне збурення виникло в результаті взаємодії магнітосфери з сонячним вітром високої швидкості, що надходив із корональної діри на Сонці [spaceweather.com]. 18 грудня близько 02:30 UT (Universal Time) концентрація протонів у потоці плазми стрімко сягнула $24.2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Зі стрімким збільшенням концентрації протонів відповідно стрімко збільшився і динамічний тиск сонячного вітру на Землю, сягнувши майже 5.3 нПа. Після цього поступово збільшувалася і швидкість сонячного вітру та його температура. Близько 12:00 UT швидкість V_{sw} перевищила 500 км/с і сягала 530 км/с, температура T_{sw} перевищила $20 \cdot 10^5 \text{ К}$, і о 13:00 UT сягнула свого максимального значення $34 \cdot 10^5 \text{ К}$.

Одночасно з різким збільшенням динамічного тиску азимутальна складова міжпланетного магнітного поля (ММП) B_y стрімко змінила свій напрямок з -2 нТл о 01:00 UT до $+5.7 \text{ нТл}$ о 04:00 UT. Зі швидким зменшенням p_{sw} складова B_y зменшилася до -0.8 нТл о 06:00 UT. Далі до 10:00 UT значення тиску p_{sw} коливалися у межах $2 \dots 2.6 \text{ нПа}$, відповідно значення складової B_y залишалися в інтервалі $+6 \dots +6.5 \text{ нТл}$.

Після стрімкого спаду динамічного тиску спостерігалися різкі зміни напрямку та значень складової B_z . Об 02:00 UT значення B_z становило $+2.8 \text{ нТл}$, о 03:00 UT зменшилося до $+1.1 \text{ нТл}$, о 04:00 UT знову збільшилося до $+4.2 \text{ нТл}$, о 05:00 UT в черговий раз зменшилося до $+0.7 \text{ нТл}$. Об 07:00 UT значення B_z сягнуло свого максимуму $+5.1 \text{ нТл}$, а об 11:00 UT — свого мінімуму -5.3 нТл .

Енергетична функція Акасофу A (енергія, що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу) зі стрімким збільшенням динамічного тиску збільшилася до 5.6 ГДж/с, потім, відповідно до значень швидкості сонячного вітру та складових ММП, о 07:00 UT спостерігався її наступний максимум близько 6.3 ГДж/с. Перше збільшення індексу K_p до 3+ відбулося о 09:00...12:00 UT, а в наступний тригодинний період збільшився до 4-. У проміжок часу 15:00...18:00 UT складова B_y змінила свій напрямок, а її значення стрімко змінилися з $+4.7 \text{ нТл}$ о 15:00 UT до -1.2 нТл о 16:00 UT. Значення складової B_z з 15:00 до 16:00 UT становили -4.7 нТл . До 18:00 UT енергетична функція A максимально збільшилася до 9.3 ГДж/с і відповідно до цих змін індекс K_p становив 4.

На рис. 2 наведено часові варіації аврорального індексу геомагнітної активності AE . Видно, що для 17 грудня характерні вельми спокійні геомагнітні умови. 18 грудня перше значне збільшення індексу AE більш ніж на 1100 нТл відбулося близько 11:50 UT після того, як складова B_z , повернувши до півдня, сягнула свого мінімуму -5.3 нТл об 11:00 UT. Після другого мінімуму $B_z = -4.7 \text{ нТл}$ о 15:00...16:00 UT

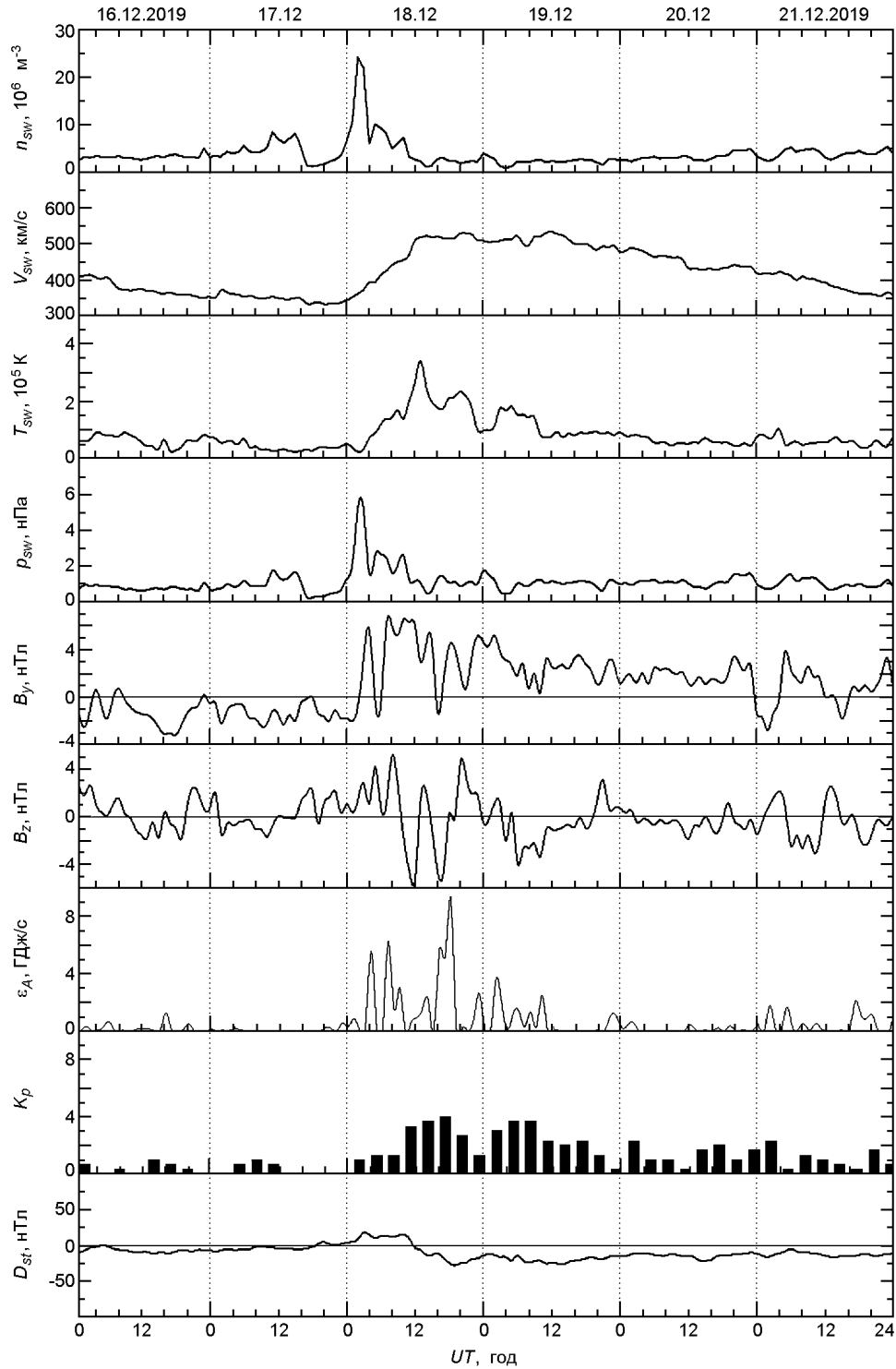


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} , температури T_{sw} та розрахованих значень динамічного тиску p_{sw} , складових B_y і B_z міжпланетного магнітного поля, розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу, індексів геомагнітної активності K_p та D_{st} у період 16...21 грудня 2019 р.

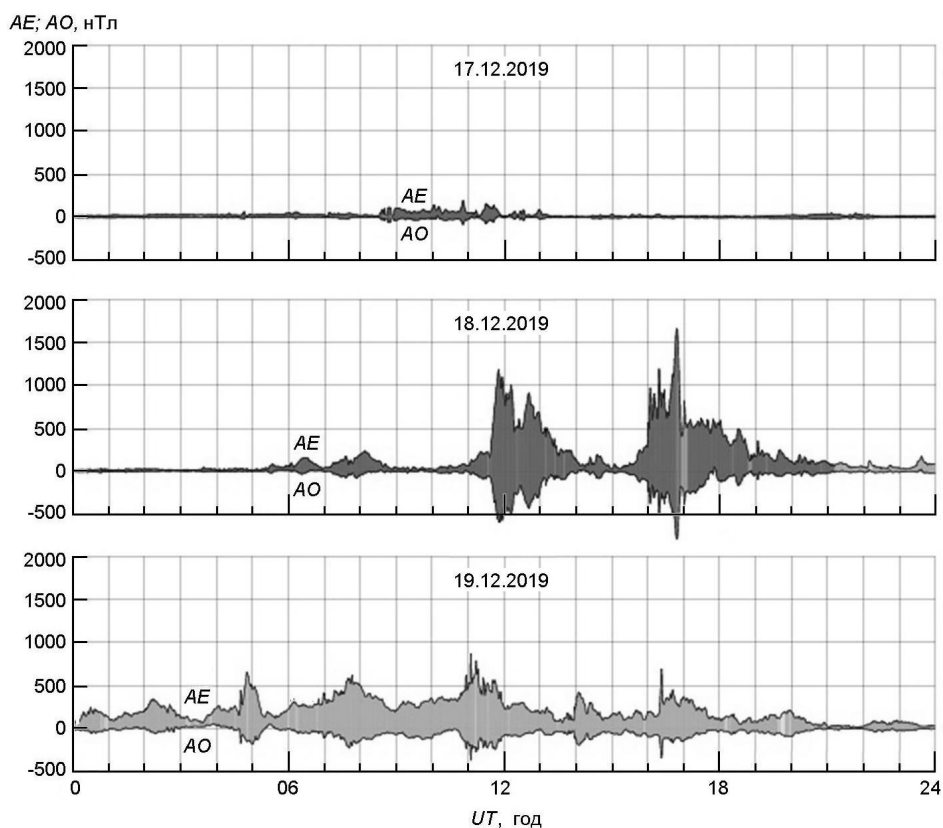


Рис. 2. Часові варіації авроральних індексів геомагнітної активності AE та AO протягом 17...19 грудня 2019 р.

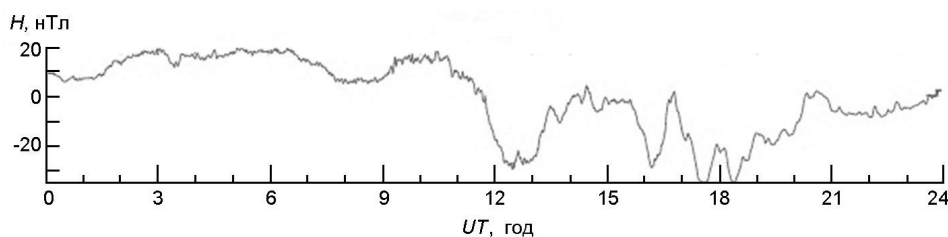


Рис. 3. Однохвилинні варіації H -складової геомагнітного поля. Дані магнітної обсерваторії KIV у Києві 18 грудня 2019 р. [www.intermagnet.org]

та значного збільшення енергетичної функції Акософу до $A = 9.3$ ГДж/с, індекс AE сягнув майже 1700 нТл близько 16:50 UT. Наступного дня 19 грудня спостерігалось збільшення індексу AE до 500...700 нТл.

Магнітна буря почалася близько 11:00 UT, негативне відхилення індексу D_{st} було незначним (-28 нТл) о 19:00 UT, коли було зафіксовано наступний значний максимум $B_z = +4.6$ нТл.

На рис. 3 представлено часові варіації H складової геомагнітного поля за даними обсерваторії в Києві (координати: 50.72 N, 30.3 E). Як видно, вельми помірна магнітна буря 18 грудня 2019 р. не мала раптового початку. Горизонтальна складова H близько 11:00 UT змінила

свій напрямок, її фактичні значення почали зменшуватися. Після 11:44 UT відбувся сплеск складової H , і її модуль стрімко збільшився — розпочалася магнітна буря. Саме в цей час відбулося перше збільшення геомагнітного індексу AE до 1000 нТл (див. рис. 2). Близько 16:40 UT зафіксовано помітний сплеск H -складової — це реакція на приплив енергії з міжпланетного простору. Індекс AE в цей час знову збільшився до 1000 нТл, а в деякі моменти часу сягав 1600 нТл.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Над Харковом магнітна буря 18 грудня викликала позитивну іоносферну бурю тривалістю близько 5 годин (див. рис. 4). Як контрольні дані вибрано значення критичної частоти для 16 грудня 2019 р., коли індекс геомагнітної активності K_p не перевищував 1. Під час позитивного збурення відносне відхилення критичної частоти f_oF2 сягало +60 % близько 14:30...14:45 UT (частота f_oF2 збільшилась у 1.6 раза). Часові інтервали, коли f_oF2 перевищувало +20 % 18 грудня: 16:30...17:00 і 18:30...19:00 UT. Збільшення значень критичної частоти відповідно сягало 1.3 і 1.2 раза. Концентрація електронів у максимумі шару $F2$ N_mF2 (із розрахунку) під час, коли відхилення критичної частоти становило $f_oF2 = +60$ %, збільшилась у 2.6 раза.

17 грудня виявлено коливання відносного відхилення критичної частоти від -16 % до +23 %, скоріш за все пов'язані з повільною перебудовою напрямку складової B_z магнітного поля у цей час і збіль-

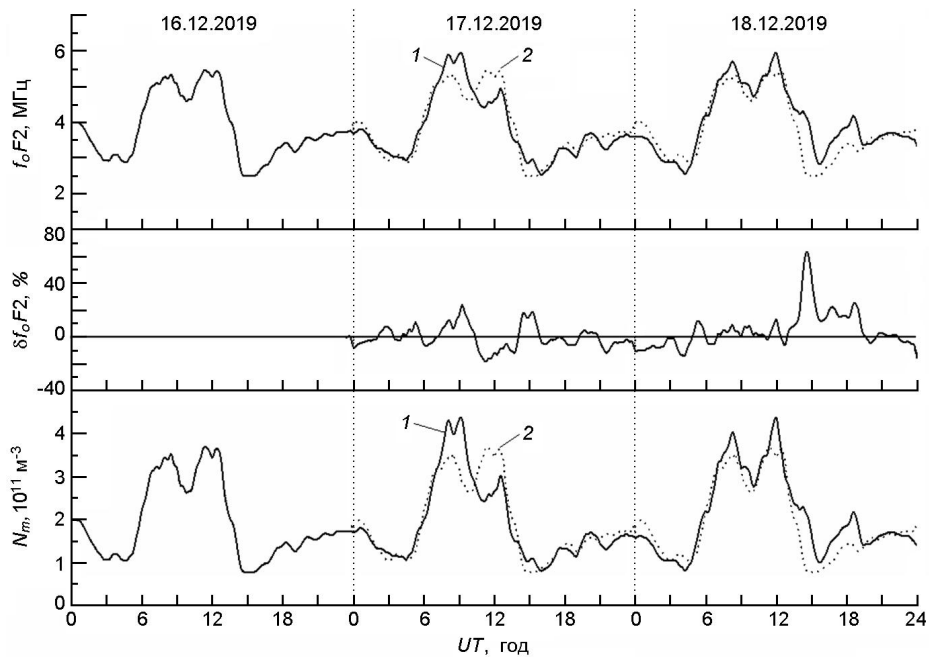


Рис. 4. Часові варіації критичної частоти f_oF2 та її відносного відхилення f_oF2 (1 — експеримент, 2 — контрольний день 16 грудня 2019 р.) і відповідної концентрації електронів N_mF2 у максимумі шару $F2$ у період 16...18 грудня 2019 р.

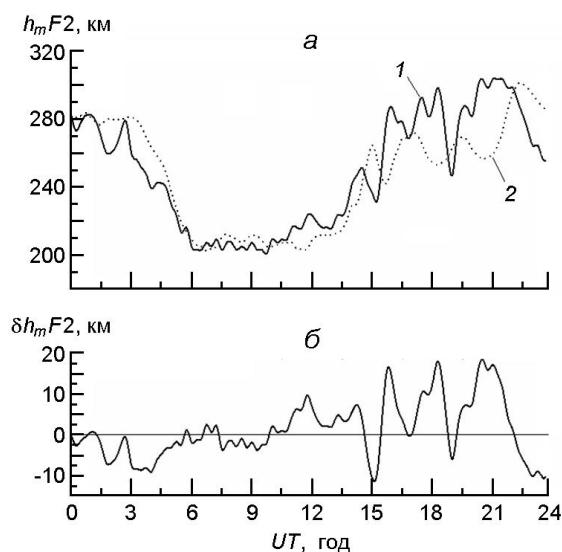


Рис. 5. Порівняння варіацій висоти максимуму шару $F2$ $h_m F2$ 18 грудня (крива 1) і 17 грудня (крива 2) 2019 р. (а) та варіації відносного відхилення $h_m F2$ (б)

шенням концентрації електронів у сонячному вітрі з $4 \cdot 10^6$ до $(8 \dots 9) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Порівнюючи значення варіації висоти максимуму шару $F2$ $h_m F2$ 17 та 18 грудня 2019 р. між собою (див. рис. 5), можна помітити, що максимальне збільшення відносного відхилення критичної частоти $f_o F2$ до $+60\%$ близько 14:30...14:45 UT супроводжувалося зменшенням висоти $h_m F2$ з 264 до 235 км о 15:00 UT, після чого слідував підйом до 280...285 км, відхилення $h_m F2$ при цьому сягало $+16\%$. У проміжку часу 16:30...17:00 UT значення висоти для 17 і 18 грудня були близькими, тоді як критична частота $f_o F2$ збільшилася приблизно на 0.6 МГц, $f_o F2 = 20 \dots 22\%$. Надалі висота $h_m F2$ почала поступово збільшуватися, о 18:15 UT відхилення $h_m F2$ становило 18% , тоді як о 18:45 UT частота $f_o F2$ знову збільшилась ($f_o F2 = 25\%$), у проміжку часу 18:45...19:45 UT відхилення висоти $h_m F2$ перебувало у звичайних межах (до $\pm 10\%$). Надалі значення критичної частоти стали наближатися до значень, характерних для магнітоспокійних умов, а значення висоти максимуму шару $F2$, навпаки, були помітно більшими: $h_m F2$ збільшилася на 40...45 км в інтервалі часу 20:15...21:15 UT ($h_m F2 = 15 \dots 18\%$).

На рис. 6 наведено висотно-часові варіації концентрації електронів N_e , отримані за допомогою радара НР. На графіках порівнюються дані 18 грудня 2019 р. під час магнітної бурі та 17 грудня 2019 р. у магнітоспокійних умовах у діапазоні висот 200...450 км.

На висоті 200 км у проміжку часу 10:00...13:00 UT концентрація електронів збільшилася від $2.5 \cdot 10^{11}$ до $3.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, тобто майже у 1.4 раза. На висоті 250 км і вище збільшення концентрації N_e тривало з 10:00 до 15:30 UT. Максимальне збільшення N_e спостерігалось на висоті 300 км. Далі зі збільшенням висоти різниця між значеннями N_e

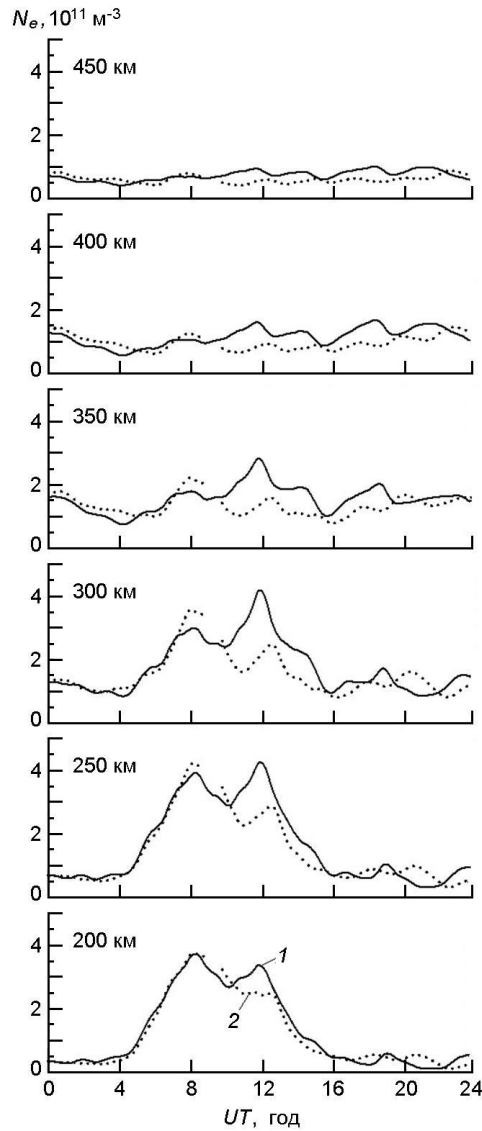


Рис. 6. Висотно-часові варіації концентрації електронів N_e 18 грудня (1) і 17 грудня (2) 2019 р.

у збурених і спокійних умовах зменшувалася, а на висоті 450 км різниця була зовсім малою.

Розглянемо варіації температур електронів T_e та іонів T_i у діапазоні висот 200...450 км (рис. 7). 18 грудня варіації температур дещо змінилися. Видно, що порівняно з 17 грудня полуденний максимум спостерігався приблизно на 1 годину раніше — близько 10:00 UT, причому на висотах 250...450 км значення T_e були більшими, добовий хід температур T_i в цілому був помітно змінений. Зростання концентрації електронів у максимумі шару $F2$ після 12:00 UT та зменшення висоти $h_m F2$ супроводжувалися зменшенням температури T_e на висотах 300...450 км. Після 14:15 UT концентрація електронів $N_m F2$ знову

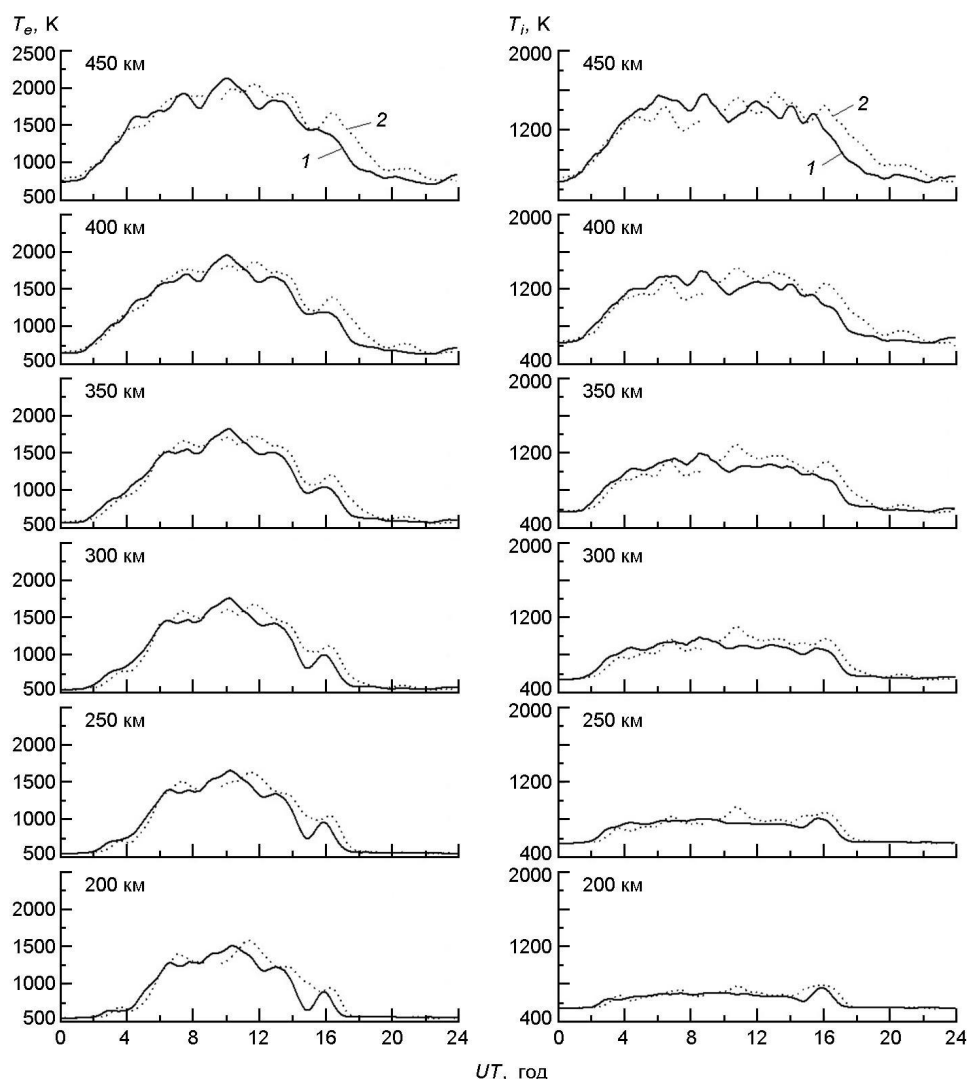


Рис. 7. Висотно-часові варіації температур електронів T_e та іонів T_i 18 грудня (крива 1) і 17 грудня (крива 2) 2019 р.

збільшувалась, при цьому після 15:00 UT висота максимуму $h_m F2$ почала теж збільшуватися, що супроводжувалося зменшенням температур близько 15:00 UT у діапазоні висот 200...400 км у порівнянні з попереднім днем 17 січня. Максимального зменшення спочатку сягнули температури іонів о 14:45 UT, а о 15:00 UT — температури електронів (див. табл. 1, 2).

Збільшення висоти $h_m F2$ 18 грудня після 17:00 UT також супроводжувалося зменшенням значень температур: зміни значень T_e та T_i під час збільшення $h_m F2$ з 252 до 298 км о 18:15 UT ($h_m F2 = 18\%$) були доволі помітними в усьому діапазоні досліджуваних висот 200...450 км.

Геомагнітна буря вплинула на варіації вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми V_z (рис. 8).

Таблиця 1. Порівняння значень температури іонів T_i під час магнітоспокійних і збурених умов

Висота, км	T_{i0} , К	T_i , К	$T_i - T_{i0}$, К	T_{i0} , К	T_i , К	$T_i - T_{i0}$, К
	17.12.2019 р.	18.12.2019 р.		17.12.2019 р.	18.12.2019 р.	
	14:45 UT	14:45 UT	14:45 UT	16:15 UT	16:15 UT	16:15 UT
200	749	625	-124	798	765	-33
250	843	717	-126	877	803	-74
300	937	811	-126	976	861	-115
350	1053	979	-74	1109	928	-181
400	1187	1132	-55	1264	1035	-229
450	1281	1300	19	1441	1208	-233

Таблиця 2. Порівняння значень температур електронів T_e під час магнітоспокійних і збурених умов

Висота, км	T_{e0} , К	T_e , К	$T_e - T_{e0}$, К	T_{e0} , К	T_e , К	$T_e - T_{e0}$, К
	17.12.2019 р.	18.12.2019 р.		17.12.2019 р.	18.12.2019 р.	
	14:45 UT	14:45 UT	14:45 UT	16:15 UT	16:15 UT	16:15 UT
200	1012	658	-354	931	890	-41
250	1034	755	-279	1035	956	-79
300	1050	833	-217	1110	1006	-104
350	1083	976	-107	1181	1052	-129
400	1226	1168	-58	1339	1191	-148
450	1452	1434	-189	1587	1391	-196

18 грудня о 12:00 UT (за 20 хв після різкої зміни індексу AE) на висотах 190...360 км швидкість низхідного ($V_z < 0$) руху плазми почала зменшуватися порівняно зі значеннями швидкості 17 грудня з подальшим відновленням V_z приблизно до значень попередньої доби.

З 15:40 18 грудня під час головної фази магнітної бурі виникли коливання у варіаціях V_z на висотах 360...420 км із квазіперіодом 1 год 50 хв, що не спостерігалось 17 грудня. Коливання тривали до 19:00 UT. Також на цих висотах 18 грудня було значне послаблення ефекту вечірнього екстремуму варіацій V_z , який проявляється як збільшення абсолютної величини швидкості низхідного руху плазми з подальшим її зменшенням, що зазвичай спостерігається взимку [11], і зокрема, спостерігався 17 грудня. А саме, на цих висотах значно зменшилася швидкість низхідного руху плазми порівняно з попереднім магнітоспокійним днем: максимальні відмінності спостерігалися приблизно о 18:20 UT і становили 40 м/с на висоті 363 км та 70 м/с на висоті 418 км.

На висотах 190...260 км з 16:00 приблизно до 17:30 UT спостерігався зворотний ефект — незначне недовготривале збільшення швидкості низхідного руху плазми з подальшим відновленням. Мак-

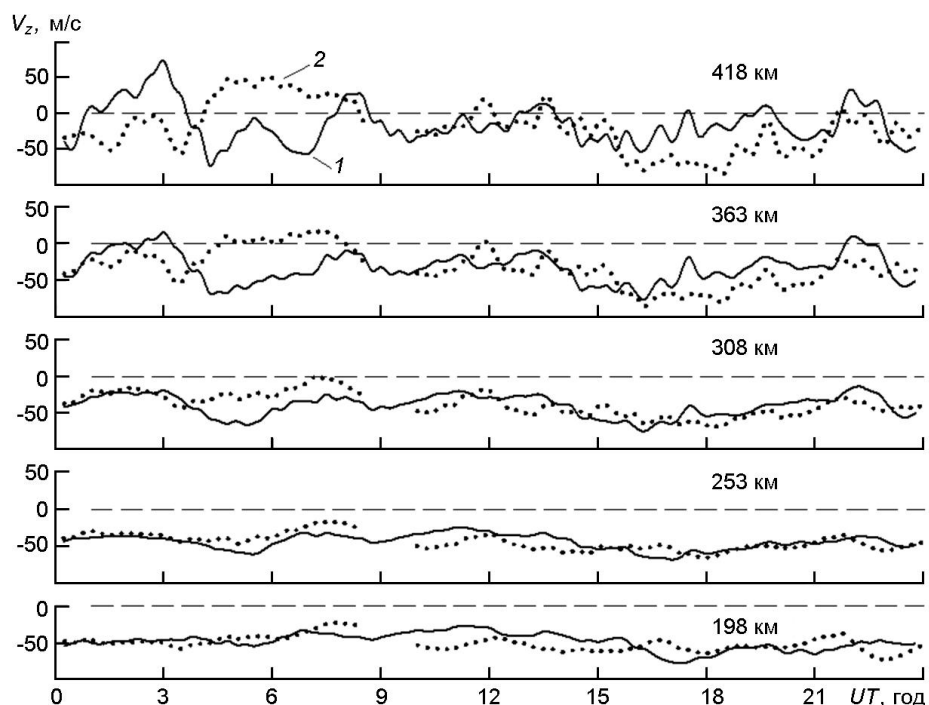


Рис. 8. Часові варіації вертикальної складової швидкості руху іоносферної плазми V_z для низьки висот іоносфери в періоди вимірювань 18 грудня (крива 1) та 17 грудня 2019 р. (крива 2)

симальні відмінності V_z 17 і 18 грудня становили 30 та 20 м/с на висотах 198 та 253 км відповідно.

Обидва ефекти (з 12:00 та 16:00 UT) розпочиналися після двох стрімких змін у варіаціях індексу геомагнітної активності AE (див. рис. 2) і H -складової геомагнітного поля (див. рис. 3), за 2 год 30 хв після першої зміни знаку (повороту на південь) складової міжпланетного магнітного поля B_z і за 1 год 30 хв після другої зміни знаку B_z (див. рис. 1).

З 21:30 UT швидкість низхідного руху плазми почала зменшуватися на всіх висотах, а на висотах 363...418 км рух плазми змінив на деякий час напрямок з низхідного на висхідний. З 21:40 до 23:00 модуль швидкості 18 грудня був меншим, ніж 17 грудня. Максимальна відмінність спостерігалася у період із 22:10 до 22:50 на висотах 418...198 км відповідно і становила на різних висотах від 30 до 60 м/с.

Слід зазначити, що до початку геомагнітного збурення 18 грудня з 03:15 до 06:45 UT зареєстровано помітну зміну добових варіацій V_z , яка проявилася у зменшенні швидкості висхідного ($V_z > 0$) руху плазми на висотах, більших від 360 км, і збільшенні модуля низхідного ($V_z < 0$) руху на всіх досліджуваних висотах з подальшим відновленням V_z . Максимальне відхилення V_z відносно значень 17 грудня сталося близько 05:00 UT і становило 13, 20, 32, 61, 86 м/с на висотах 198, 253, 308, 363, 418 км відповідно.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Узимку в середньоширотній іоносфері в денний час зона зменшеного відношення $[O]/[N_2]$ «зачинена» у високих широтах, оскільки звичайна циркуляція перешкоджає проникненню нагрітого газу в середні широти. Водночас звичайна циркуляція послаблюється направленою у протилежну сторону циркуляцією, індукованою бурєю, і тому направлений вниз дрейф плазми стає слабшим. Це призводить до нових рівноважних умов у максимумі шару $F2$, причому його висота $h_m F2$ збільшується і відповідно збільшується концентрація електронів. Це є причиною домінування позитивної фази в цих умовах. Такий механізм формування позитивної іоносферної бурі добре узгоджується з отриманими результатами. Збільшення $f_o F2$ після 12:00 UT 18 грудня супроводжувалося дещо більшими значеннями висоти максимуму шару $F2$ у порівнянні з 17 грудня. У цей час спостерігалось помітне збільшення концентрації електронів у діапазоні досліджуваних висот 200...350 км, а вертикальна складова швидкості руху іоносферної плазми V_z низхідного напрямку дещо зменшилась. Близько 14:00 UT значення температур T_e на цих же висотах 200...350 км були нижчими. Подібний механізм формування позитивної фази бурі описано також іншими вченими [13]. Після того як відносно відхилення критичної частоти $f_o F2$ досягло +60 %, близько 14:30...14:45 UT спостерігалось різке зменшення критичної частоти (стали переважати механізми формування негативної іоносферної бурі), що супроводжувалося стрімким зменшенням $h_m F2$. Концентрація електронів N_e у цей період стрімко почала зменшуватися в усьому діапазоні досліджуваних висот, а модуль низхідного ($V_z < 0$) руху вертикальної складової V_z на всіх висотах залишався майже незмінним.

Далі механізми формування позитивних іоносферних бур знову стали переважати: після 15:00 UT висота $h_m F2$ почала збільшуватися, і в 15:45 UT вона зросла з 242 до 282 км, після чого значення $f_o F2$ теж збільшились. Після 16:00 UT значення температур електронів T_e почали зменшуватися порівняно з попереднім днем, концентрація N_e і модуль вертикальної складової V_z низхідного руху плазми почали збільшуватися на висотах понад 300 км. Цей же механізм формування позитивної бурі спостерігався і близько 18:00 UT, за винятком того, що модуль швидкості низхідного руху плазми був меншим, ніж 17 грудня.

Після 21:30 UT спостерігалися значні зміни вертикальної складової швидкості V_z : модуль швидкості низхідного руху плазми почав зменшуватися, а на висотах 363...418 км рух плазми змінив на деякий час напрямок з низхідного на висхідний. У вечірній час поведінка висотно-часових варіацій N_e на певних висотах відрізнялася: на висотах 200...350 км почала зменшуватися, а на 400...450 км, навпаки, — збільшуватися. Температури електронів та іонів були меншими відносно відповідних температур у попередню (контрольну) добу.

Взагалі дослідженню ефектів слабких магнітних збурень приділяється менше уваги, ніж сильних. Але навіть при слабких бурях стан іоносфери та плазмосфери, які взаємодіють між собою, є дуже чутливим. Статистичне дослідження [12] виявило, що слабкі магнітні бурі взимку можуть спричинити помітне (порядку 20 %) зменшення загального вмісту електронів (ТЕС) у середніх широтах вночі через виснаження плазмосфери під час бурі. У роботі [15] показано, що навіть слабкі магнітні збурення призводять до значної модуляції іоносферно-плазмосферних потоків іонів H^+ . Ця модуляція спричинена коливаннями концентрації іонів O^+ у верхній іоносфері, спричиненими рухом висоти $h_m F2$, що, найімовірніше, викликано змінами термосферного горизонтального вітру, або проникаючими через магнітосферу електричними полями. Обидва зазначені механізми тісно пов'язані зі змінами складової B_z міжпланетного магнітного поля.

Зазначимо, що раніше в іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери вже спостерігалася вельми помірна магнітна буря ($K_p = 4$) також в умовах низької сонячної активності ($F_{10.7} = 82 \dots 83$) у зимовий час 20...21 січня 2010 р., яка викликала зовсім інші ефекти в іоносферній плазмі над Харковом [1, 5]. На відміну від магнітної бурі 2019 р., буря 2010 р. супроводжувалася зменшенням концентрації електронів $N_m F2$ у максимумі шару $F2$, невеликим зменшенням температур електронів T_e та взагалі незначними змінами параметрів іоносфери. Іншими словами, обидві магнітні бурі однакової потужності в умовах низької сонячної активності супроводжувалися зовсім різними іоносферними процесами в одному і тому самому пункті спостережень.

У роботі [6] проведено порівняння даних $N_m F2$ у різних пунктах спостережень під час слабкої бурі ($K_p = 3+$) 24 грудня 2017 р. ($F_{10.7} = 76$) та виявлено зменшення $N_m F2$ у 1.5...2 рази у високих та середніх широтах, причому в іоносфері над Харковом концентрація електронів зменшилася досить суттєво — у 1.5 рази. У низьких широтах зміни були незначні.

ВИСНОВКИ

Вельми помірна магнітна буря 18 грудня 2019 р. над Україною викликала позитивне іоносферне збурення. Результати вимірювань часових варіацій концентрації електронів N_e , отриманих за допомогою радара НР в діапазоні висот 200...450 км, свідчать про збільшення N_e 18 грудня та підтверджують факт про збільшення значень критичної частоти цього дня у порівнянні зі спокійними магнітними умовами. Зазначимо такі особливості:

1. Вельми помірна геомагнітна буря 18 грудня 2019 р. ($K_p = 4$) над Україною супроводжувалася позитивним іоносферним збуренням. Відносне відхилення значень критичної частоти $f_o F2$ сягало +60 %, частота $f_o F2$ збільшилась в 1.6 рази, концентрація $N_m F2$ збільшувалась

лася до 2.5...2.6 раза, при цьому висота $h_m F2$ зменшилась з 264 до 235 км.

2. Протягом чотирьох годин з 15:00 до 19:00 UT значення $f_o F2$ сягало +20 %. Іоносферна буря супроводжувалася збільшенням концентрації електронів з 10:00 до 15:00 UT в діапазоні висот 200...450 км. Часові варіації висоти шару $F2$ помітно змінилися через дію механізмів формування ефектів у збуреній іоносфері, та її значення були переважно збільшеними, ніж напередодні.

3. До початку іоносферної бурі значення температур електронів були збільшеними, ніж у магнітоспокійних умовах, але з розвитком іоносферних збурень температура була нижчою.

4. Під час геомагнітної бурі 18 грудня 2019 р. виявлено зміну добових варіацій швидкості V_z , яка проявилася після 12:00 UT під час головної фази бурі у зменшенні швидкості низхідного руху плазми порівняно зі значеннями швидкості у магнітоспокійний день 17 грудня з подальшим відновленням V_z , а з 15:40 UT — виникненням коливань у варіаціях V_z на висотах 360...420 км із квазіперіодом 1 год 50 хв і послабленням ефекту вечірнього екстремуму у варіаціях V_z : на цих висотах максимальне зменшення швидкості низхідного руху плазми порівняно з 17 грудня становило 40...70 м/с відповідно. На висотах 190...260 км з 16:00 до 17:30 UT спостерігалось незначне (до 30 м/с) недовготривале збільшення швидкості низхідного руху плазми з подальшим відновленням.

Автори вдячні О. В. Колоскову за надання можливості використання даних портативного когерентного іонозонду, а також О. В. Богомазу і Т. Г. Живолупу за допомогу в обробці цих даних.

Роботу виконано за фінансової підтримки в рамках держбюджетних НДР Інституту іоносфери, заданих Національною академією наук та Міністерством освіти і науки України.

1. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Харитоновна С. В., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере в течение весьма умеренной магнитной бури 20—21 января 2010 г. *Космічна наука і технологія*. 2011. 17. № 4. С. 26—40. DOI: 10.15407/knit2011.04.026.
2. Зализовский А. В., Кашеев А. С., Кашеев С. Б., Колосков А. В., Лисаченко В. Н., Пазнухов В. В., Пикулик И. И., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М. Макет портативного когерентного ионозонда. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24. № 3. С. 10—22. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010>.
3. Кацко С. В., Смельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Особливості іоносферної бурі 21—24 грудня 2016 р. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2021. 37. № 2. С. 57—74. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.057>.
4. Чепурный Я. Н., Тиняков Г. М. Моделирование ромбических антенн ионосферной станции “Базис”. *Вестник Нац. техн. ун-та “ХПИ”*: сб. науч. тр. Темат. вып.: *Радиофизика и ионосфера*. Харьков: НТУ ХПИ. 2013. № 33 (1066). С. 25—28. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/5164>.
5. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь*: Монография. Харьков: нац. ун-т им. В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. 408 с.

6. Шульга М. А., Котов Д. В., Богомаз А. В. Исследование реакции концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы на слабую геомагнитную бурю 24 декабря 2017 г. в разных широтах европейского региона. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Радіофізика та іоносфера*. 2018. № 43 (1319). С. 18—23. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43386>.
7. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Varney R. H., Eastes R. Salient midlatitude ionosphere-thermosphere disturbances associated with SAPS during a minor but geo-effective storm at deep solar minimum. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. 126, Is. 7. e2021JA029509. DOI: 10.1029/2021JA029509.
8. Danilov A. D. Behavior of F2-layer parameters and solar activity indices in the 24th cycle. *Adv. in Space Res.* 2021. 67, Is 1. P. 102—110. DOI: 10.1016/j.asr.2020.09.042.
9. Danilov A. D., Konstantinova A. V. Long-term variations in the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere (review). *Geomagnetism and Aeronomy.* 2020. 60. № 4. P. 397—420. DOI: 10.1134/S0016793220040040.
10. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. Kharkiv incoherent scatter facility. *Bull. Nat. Techn. Univ. "Kharkiv Politechnic Institute": scientific papers. Series: Radiophysics and ionosphere*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2014. № 47 (1089). P. 28—42. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7.
11. Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Motion of Ionospheric Plasma: Results of Observations above Kharkiv in Solar Cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. 58. № 4. P. 533—547. DOI: 10.1134/S001679321802007X.
12. Förster M., Jakowski N. Geomagnetic storm effects on the topside ionosphere and plasmasphere: A compact tutorial and new results. *Surveys in Geophys.* 2000. 21(1). P. 47—87. <https://doi.org/10.1023/A:1006775125220>.
13. 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. № 10/11. P. 1253—1272.
14. Katsko S. V., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. *Ionosphere response to space weather events on 21—23 March 2017 in the central region of Europe*. URSI GASS 2021, Rome, Italy, 28 August — 4 September 2021. Conf. Proc. 2021. DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560587.
15. Kotov D. V., Richards P. G., Truhlik V., Maruyama N., Fedrizzi M., Shulha M. O., Bogomaz O. V., Lichtenberger J., Hernández-Pajares M., Chernogor L. F., Emelyanov L. Ya., Zhivolup T. G., Chepurnyy Ya. M., Domnin I. F. Weak magnetic storms can modulate ionosphere-plasmasphere interaction significantly: Mechanisms and manifestations at mid-latitudes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. 124. <https://doi.org/10.1029/2019JA027076>.
16. Lastovicka J. Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? *Geophys. Res. Lett.* 2019. 46. Is 24. P. 14208—14213. DOI: 10.1029/2019GL085033.

REFERENCES

1. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Pazyura S. A., Kharitonova S. V., Chernogor L. F. (2011). Dynamic processes in the ionosphere during the very moderate magnetic storm on 20—21 January 2010. *Space Sci. and Technol.* 17(4). 26—40. DOI: 10.15407/knit2011.04.026 [in Russian].

2. Zalizovski A. V., Kashcheyev A. S., Kashcheyev S. B., Koloskov A. V., Lisachenko V. N., Paznukhov V. V., Pikulik I., Sopin A. A., Yampolski Yu. M. (2018). A prototype of a portable coherent ionosonde. *Space Sci. and Technol.* 24(3). 10—22. DOI:10.15407/knit2018.03.010 [in Russian].
3. Katsko S. V., Emelyanov L. Y., Chernogor L. F. (2021). Features of the ionosphere storm on December 21—24, 2016. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 37(2). 57—74. DOI: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.057>.
4. Chepurnyy Ya. N., Tinyakov G. M. (2013). Modeling of rhombic antennas of the ionospheric station “Bazis”. *Bull. Nat. Techn. Univ. “KhPI”: Radiophysics and ionosphere*, 33(1066). 25—28. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/5164> [in Russian].
5. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geocosmic storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [in Russian].
6. Shulha M. O., Kotov D. V., Bogomaz O. V. (2018). Investigation of the ionospheric F2-layer electron density peak reaction to weak geomagnetic storm of December 24, 2017 for different latitudes of the European region. *Bull. Nat. Techn. Univ. “KhPI”. Ser.: Radiophysic and ionosphere*, 43(1319). 18—23. [in Russian]. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43386>.
7. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Varney R. H., Eastes R. (2021). Salient midlatitude ionosphere-thermosphere disturbances associated with SAPS during a minor but geo-effective storm at deep solar minimum. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 126(7). e2021JA029509. DOI: 10.1029/2021JA029509.
8. Danilov A. D. (2021). Behavior of F2-layer parameters and solar activity indices in the 24th cycle. *Adv. in Space Res.* 67(1). 102—110. DOI: 10.1016/j.asr.2020.09.042.
9. Danilov A. D., Konstantinova A. V. (2020). Long-term variations in the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere (review). *Geomagnetism and Aeronomy*, 60(4). 397—420. DOI: 10.1134/S0016793220040040.
10. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. (2014). Kharkiv incoherent scatter facility. *Bull. Nat. Techn. Univ. “Kharkiv Politechnic Institute”: scientific papers. Series: Radiophysics and ionosphere*. Kharkiv: NTU “KhPI”, 47 (1089), 28—42. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7.
11. Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. (2018). Motion of Ionospheric Plasma: Results of Observations above Kharkiv in Solar Cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58(4). 533—547. DOI: 10.1134/S001679321802007X.
12. Förster M., Jakowski N. (2000). Geomagnetic storm effects on the topside ionosphere and plasmasphere: A compact tutorial and new results. *Surveys Geophys.* 21(1), 47—87. <https://doi.org/10.1023/A:1006775125220>.
13. 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(10/11). 1253—1272. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.09.011>.
14. Katsko S. V., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. (2021). *Ionosphere response to space weather events on 21—23 March 2017 in the central region of Europe*. URSI GASS 2021, Rome, Italy, 28 August—4 September 2021. Conf. Proc. DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560587.
15. Kotov D. V., Richards P. G., Truhlík V., Maruyama N., Fedrizzi M., Shulha M. O., Bogomaz O. V., Lichtenberger J., Hernández-Pajares M., Chernogor L. F., Emelyanov L. Ya., Zhivolup T. G., Chepurnyy Ya. M., Domnin I. F. (2019). Weak

magnetic storms can modulate ionosphere plasmasphere interaction significantly: Mechanisms and manifestations at mid-latitudes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 124. <https://doi.org/10.1029/2019JA027076>.

16. Lastovicka J. (2019). Is the relation between ionospheric parameters and solar proxies stable? *Geophys. Res. Lett.* 46(24), 14208—14213.
DOI: 10.1029/2019GL085033.

S. V. Katsko, L. Ya. Emelyanov

Institute of Ionosphere of the National Academy of Sciences of Ukraine
and of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

VARIATIONS IN THE PARAMETERS OF THE MIDDLE-LATITUDE IONOSPHERE
OVER UKRAINE DURING THE VERY MODERATE MAGNETIC STORM
ON DECEMBER 18, 2019

Many years of research show that weak and moderate magnetic storms can cause significant and unpredictable changes in the state of ionosphere. Questions in ionosphere response forecasting in specific region on changes of space weather stay topical today, because physical processes which take place in ionospheric plasma are variable and complicated. Of particular interest are ionospheric disturbances with variable phases at middle latitudes and their penetration to low latitudes, occurrence of strong ionospheric storms as a result of moderate or weak magnetic storms. The aim of this work is experimental study of variations of ionospheric plasma parameters over Ukraine during the very moderate magnetic storm on December 18, 2019. The study is based on the use of incoherent scattering, which gives the most complete diagnostic capabilities, and the vertical sounding method. Observations were performed at the Ionospheric Observatory of the Institute of Ionosphere (Kharkiv, Ukraine) using incoherent scattering radar. The critical frequency values were obtained using a portable ionosonde. Geophysical data of space weather and magnetosphere were also used. Ionosphere response over Kharkiv on geospace storm on December 18, 2019, was analyzed. We established, that the very moderate storm ($K_p = 4$) caused a positive ionospheric disturbance. The critical frequency increasing (to 1.6 times) and accordingly the increase of electron density in the F_2 layer peak (to 2.6 times) were accompanied by variations in the main ionospheric plasma parameters: the height of the F_2 layer peak (decrease by 30 km), electron density over the entire range of studied altitudes of 200...450 km, electron and ion temperatures, and the vertical component of the ionospheric plasma velocity (a decrease in the downward plasma drift velocity V_z at noon after the onset of the magnetic storm with subsequent recovery of the velocity, the occurrence at 15:40 UT at altitudes of 360...420 km of oscillations in V_z variations with a quasi-period of 1 h 50 min, and a weakening of the evening extremum effect in V_z variations with a maximum decrease in velocity at these heights to 40...70 m/s). The substantiation of the action of the following mechanism of a positive ionospheric storm formation is given: in the daytime winter at middle latitude ionosphere, the downward drift of plasma is weakened due to the fact that normal circulation is weakened by the oppositely directed circulation induced by the storm. The very moderate magnetic storm on December 18, 2019 caused significant changes in all parameters of ionospheric plasma over the entire range of studied heights. Obtained data provided additional information for studying of solar-terrestrial relationships and ionosphere state prediction.

Keywords: solar-terrestrial relationships, heliophysical activity, magnetic storm, ionospheric disturbance, ionospheric plasma, positive ionosphere storm.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2022

Після доопрацювання 19.08.2022

Прийнята до друку 20.12.2022