



УДК 550.388

СПІЛЬНІ ІОНОЗОНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЙ КРИТИЧНОЇ ЧАСТОТИ ШАРУ F2 ІОНОСФЕРИ НАД ХАРКОВОМ І ТРОМСЬО В ПЕРІОД ОСІННЬОГО РІВНОДЕННЯ ЗА СПОКІЙНИХ І ЗБУРЕНИХ УМОВ

Т. Г. Живолуп¹, С. В. Панасенко¹, О. В. Колосков^{2,3}, В. М. Лісаченко²

¹Інститут іоносфери НАН та МОН України, м. Харків, Україна

²Радіоастрономічний інститут НАН України, м. Харків, Україна

³Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України, м. Київ, Україна

e-mail: panasenko@nas.gov.ua

За результатами спільних іонозондових досліджень варіацій критичної частоти f_oF2 шару F2 іоносфери під час низької сонячної активності над м. Харків і м. Тромсьо в період осіннього рівнодення 22 – 24 вересня 2020 р. досліджено особливості варіацій f_oF2 в середніх і високих широтах за магнітоспокійних і магнітозбурених умов. Виявлено, що у магнітоспокійну добу 22.09.2020 р. значення f_oF2 над м. Харків перевищували значення f_oF2 над м. Тромсьо на всьому часовому інтервалі спільних спостережень 02:45 – 16:45 UT. Як над м. Тромсьо, так і над м. Харків, зі сходом Сонця спостерігалось швидке зростання f_oF2 до свого локального максимального значення. Виявлено квазіперіодичні коливання f_oF2 , які у високих широтах мали меншу амплітуду в порівнянні з коливаннями f_oF2 над м. Харків. Над обома пунктами вимірювань спостерігався передзахідний локальний максимум f_oF2 . Встановлено, що під час магнітозбурених умов над м. Тромсьо і м. Харків зі сходом Сонця спостерігалися квазіперіодичні коливання f_oF2 . Коливання над м. Тромсьо мали меншу амплітуду, ніж над м. Харків, і були майже повністю придушені після початку сильного магнітного збурення у високих широтах 23.09.2020 р. Значення f_oF2 над м. Тромсьо перевищували її значення над м. Харків на часовому інтервалі 10:45 – 12:15 UT. Порівняння часового ходу f_oF2 над м. Тромсьо у магнітоспокійну добу 22.09.2020 р. і в магнітозбурену добу 23.09.2020 р. показало, що значення f_oF2 для 23.09.2020 р. з 10:15 до 15:00 UT перевищувало значення f_oF2 для 22.09.2020 р. Порівняння часового ходу f_oF2 над м. Харків в магнітоспокійний день 22.09.2020 р. і в магнітозбурений день 24.09.2020 р. показало, що значення f_oF2 для 24.09.2020 р. перевищувало її значення для 22.09.2020 р. з 03:00 до 04:45 UT і з 07:00 до 13:00 UT. Встановлено, що магнітні збурення викликали швидке зростання значень f_oF2 як над м. Харків, так і над м. Тромсьо, які перевищували значення f_oF2 під час магнітоспокійних умов, а також призвели до значного збільшення відносних амплітуд рухомих іоносферних збурень над м. Харків.

Ключові слова: іоносфера, шар F2 іоносфери, іонозондові спостереження, магнітні збурення, варіації критичної частоти шару F2 іоносфери, відмінності варіацій в середніх і високих широтах.

1. Вступ

Однією з найважливіших задач теорії та моделювання області F іоносфери є розробка таких моделей, які адекватно відображують її поведінку за різноманітних геліогеофізичних умов. Чіткі уявлення про механізми утворення та поведінки шару F2 необхідні для успішного прогнозування стану області F2 іоносфери, яка має значний вплив на поширення радіохвиль. Однак теорія шару F2 розроблена ще недостатньо, а моделювання поведінки висоти та критичної частоти шару F2 стикається з окремими труднощами [1–4]. Існують різноманітні моделі області F2 іоносфери, наприклад [5, 6], але вони не дають повного уявлення про характер поведінки висоти та критичної частоти шару F2. Тому експериментальні спостереження часових варіацій критичної частоти шару F2 (f_oF2) в середніх і високих широтах в різні сезони і за різних рівнів сонячної та магнітної активності, є актуальними не тільки для вирішення прикладних задач поширення радіохвиль, а й для фундаментальних досліджень. Зокрема, ця інформація отримана за різних геліогеофізичних умов необхідна для вдосконалення існуючих та створення нових більш досконалих теоретичних моделей іоносфери.

Метою цієї роботи є висвітлення результатів дослідження варіацій критичної частоти шару F2 на середніх і високих широтах в період осіннього рівнодення (22 – 24 вересня 2020 р.) за різних рівнів геомагнітної активності.

2. Геліогеофізична обстановка 22 і 23 вересня 2020 р.

Протягом 22 вересня 2020 р. індекс сонячної активності $F_{10.7}$ мав значення 72 (сонячна

активність була низькою). В табл. 1 наведено значення високоширотних і планетарних індексів геомагнітної активності для 22.09.2020 р. і 23.09.2020 р. З таблиці видно, що планетарний добовий індекс геомагнітної активності A_p 22 вересня 2020 р. мав значення 6, а високоширотний індекс A дорівнював 9. Трьохгодинний планетарний K_p -індекс мав значення, що в основному дорівнювали 1 і 2. Період часу 02:45 – 16:45 UT 22 вересня 2020 р., який було взято для порівняння критичних частот шару F2 (f_oF2) над Харковом і Тромсьо, був магнітоспокійним як у середніх, так і в високих широтах, оскільки K_p -індекс в цей період часу дорівнював в основному 2 і 1, а індекс K в основному дорівнював 1.

Протягом 23 вересня 2020 р. сонячна активність також була низькою: індекс сонячної активності $F_{10.7}$ мав значення 73. Планетарний добовий індекс геомагнітної активності A_p 23 вересня 2020 р. мав значення 11, а високоширотний індекс A дорівнював 29. Трьохгодинний планетарний K_p -індекс у період часу 01:30 – 17:00 UT, що було взято для порівняння критичних частот шару F2 над Харковом і Тромсьо 23 вересня 2020 р., мав значення, які в основному дорівнювали 2 і не перевищували 4, тобто цей період часу в середніх широтах був спокійним. Високоширотний індекс K дорівнював 5 і 7 в період часу 09:00 – 15:00 UT, тобто в цей період часу в високих широтах відбулося сильне магнітне збурення.

Планетарний добовий індекс геомагнітної активності A_p 24 вересня 2020 р. мав значення 19, а максимальне значення планетарного K_p -індексу дорівнювало 5. Високоширотний індекс A дорівнював 48, а максимальне значення високоширотного індексу K дорівнювало 7. Таким чином, доба 24 вересня 2020 р. була збуреною (див. табл. 1).

Таблиця 1. Відомості про геомагнітну обстановку

Дата	Високоширотні індекси		Планетарні індекси	
	A	K	A_p	K_p
22.09.2020 р.	9	1 1 4 4 2 1 1 0	6	2 3 2 2 1 1 1 1
23.09.2020 р.	29	0 0 3 5 7 3 2 2	11	2 1 2 2 4 2 4 3
24.09.2020 р.	48	2 4 7 6 6 5 0 1	19	3 4 5 4 3 3 1 1

3. Засоби спостереження

В роботі використано експериментальні дані, які отримано за допомогою іонозондів, розташованих в Іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери і в обсерваторії EISCAT поблизу м. Тромсьо, Норвегія.

3.1. Іонозонд поблизу м. Харків (49° 36' півн.ш., 36° 18' сх.д.)

Портативний когерентний іонозонд, що використовується для діагностики іоносферної плазми в Іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери, був розроблений в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України (РІ НАН України) [7].

В РІ НАН в рамках двох наукових програм (Державної програми досліджень України в Антарктиці та Цільової наукової програми НАН України з космічних досліджень спільно з Міжнародним центром теоретичної фізики імені Абдус Салама (Трієст, Італія) проведено роботи зі створення економічного портативного сучасного ВЧ-комплексу когерентного зондування іоносфери. Розроблений комплекс дозволяє проводити іоносферну діагностику в безперервному режимі та не потребує значних фінансових затрат. Під час створення макета комплексу для розширення його діагностичних можливостей застосовано оригінальні методи частотно-кутового зондування, багатопозиційної

доплероскопії іоносфери і частотно-часової селекції, що були раніше розроблені в РІ НАН України.

Основним призначенням розробленого когерентного іонозонда є вимірювання висотно-частотних характеристик (ВЧХ) іоносфери для розрахунку профілю концентрації електронів. Крім цього, він дозволяє вимірювати вертикальну складову швидкості руху областей відбиття зондуючого сигналу на різних частотах в широкому інтервалі висот. Принцип побудови іонозонда заснований на ідеях, що закладені в конструкцію аналогічних сучасних пристроїв, зокрема дігізонда DPS-4, а також на використанні технології програмного радіо SDR (Software Defined Radio) для іоносферного зондування. Основною відмінністю цього комплексу від розроблених раніше аналогів є застосування зв'язкового передавача порівняно малої потужності. Достатні для проведення вимірювань значення відношення сигнал/шум на виході комплексу та роздільної здатності за висотою забезпечуються за рахунок використання довгих фазоманіпульованих зондуючих імпульсів, їх подальшої цифрової згортки з опорними кодовими послідовностями та доплерівської фільтрації, в ході якої когерентно оброблюються та накопичуються декілька кодових посилок на кожній частоті зондування. Функції обробки та аналізу

сигналів здійснюються за допомогою персонального комп'ютера (ПК). Аналогова частина пристрою суттєво спрощена за рахунок використання стандартних малопотужного зв'язкового передатчика та програмного радіо (SDR) з широкою смугою пропускання. Використання таких серійних пристроїв значно понизило собівартість створеного макета іонозонда.

Функціонально іонозонд складається з керуючого комп'ютера, програмного радіо USRP N200 KIT (Universal Software Radio Peripheral) [<https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>], антенного комутатора ZX80-DR230 [<https://ww2.minicircuits.com/pdfs/ZX80-DR230+.pdf>] і трансівера ICOM-IC-718 з блоком живлення SP-200-13,5.

Установка функціонує наступним чином. В керуючому ПК на кожній частоті зондування формуються пробні імпульси, що складаються з послідовності фазоманіпульованих субімпульсів ("chirps"). Для генерації субімпульсів використовуються комплементарні коди, які забезпечують необхідну висотну роздільну здатність, що відповідає довжині одного субімпульса. Таке кодування покращує відношення сигнал/шум пропорційно до кількості субімпульсів ("бітності") коду. В програмному радіо USRP за допомогою цифро-аналогового перетворювача ця послідовність перетворюється в аналоговий сигнал, підсилюється до необхідного рівня на платі TX і, після підсилення трансівером ICOM, подається на передавальну антену. Відбитий від іоносфери сигнал подається на приймальну антену, а з неї – на приймальну плату RX пристрою USRP, де він підсилюється до рівня вхідних напруг АЦП. Після оцифрування прийнятий сигнал надходить в ПК, який виконує функції

керування програмним радіо, формування та обробки сигналів, відображення та збирання даних, їх зберігання та аналізу.

Основні технічні параметри комплексу зондування іоносфери (без характеристик антено-фідерної системи) наведено в табл. 2.

Для виконання зондувань необхідні дві антени: приймальна та передавальна. На практиці можуть використовуватися антени різних типів з робочою смугою частот 1.6 – 30 МГц. Для передавальної антени дозволена вхідна потужність повинна бути більшою за 100 Вт, а коефіцієнт стоячої хвилі в антено-фідерному тракті не повинен перевищувати 2.5. Параметри режиму отримання іонограмми можуть варіюватися в широких межах і вибираються в залежності від зовнішніх умов і поставленої задачі.

3.2. Іонозонд EISCAT поблизу м. Тромсьо (69° 35' півн.ш., 19° 14' сх.д.)

Для діагностики варіацій критичних частот шару F2 над Тромсьо використовувались дані цифрового іонозонду (Dynasonde), що розташований поблизу м. Тромсьо, Норвегія [8]. Він є одним з шести цифрових іонозондів, що були спроектовані та створені в Лабораторії космічного середовища (Боулдер, США) протягом 1975 – 1978 рр. Для стандартного зондування іонозонд випромінює радіоімпульси гаусівської форми тривалістю за половинною потужністю близько 128 мкс. Максимальна потужність складає 10 кВт. Два приймача використовуються з мультиплексами на входах таким чином, що різні пари шести приймальних антен можна підключати під час прийому кожного імпульсу. Ширина смуги пропускання приймача дорівнює 30 кГц.

Передавальна антена іоносферної станції введена в експлуатацію в 1980 р. і є

чотирищоголовою двоплощинною логперіодичною антеною з коефіцієнтом логперіодичності $\tau = 0.92$. Підсилення цієї антени розраховується за формулою: $G(\theta) = 6 \cos^{1.5}(\theta)$ дБ для частот, більших за 1 МГц, де θ – zenітний кут випромінювання. Приймальна антена являє собою квадратний масив з шести довгих диполів, діагональ квадрата дорівнює 141 м. Кожний диполь складається з двох алюмінієвих трубок довжиною 11 м і діаметром 15 см, що розташовані на висоті 2 м над поверхнею Землі.

Обладнання Dynasonde (передавач, приймач і антени) було вдосконалено в декілька етапів, з моменту запуску в 1980 р., а програмне забезпечення і обробка даних

постійно покращувалось. Наразі дані іонозонда є в реальному часі в мережі Інтернет з використанням більш детального аналізу, що призвело до суттєвого поліпшення деталізації і точності результатів.

З початку 2012 р. іонозонд функціонує в 2-х хвилинному режимі для більш детальних вимірювань параметрів іоносфери. В 2002 р. була встановлена автономна система аналізу даних в реальному часі DSND. Вона дозволяє отримувати більше різноманіття іоносферних параметрів, включаючи висотні профілі концентрації електронів, швидкість переносу плазми, значення критичних частот E- і F-областей тощо [8]. Дані іонозонду знаходяться в вільному доступі в мережі Інтернет (<http://dynserv.eiscat.uit.no>).

Таблиця 2. Характеристики портативного когерентного іонозонда

Діапазон робочих частот, МГц	1.6 – 30
Діапазон вимірюваних висот, км	90 – 825
Роздільна здатність за висотою, км	1.4
Максимальна імпульсна потужність випромінювання, Вт	100
Фіксована тривалість одиночної кодової послідовності, мс	0.6
Кількість елементарних субімпульсів	від 4 до 64
Кількість кодових послідовностей на одній частоті в режимі іонозонда	від 1 до 250
Споживана потужність, Вт	250
Вага, кг	10

4. Результати та обговорення

4.1. Варіації критичної частоти шару F2 у магнітоспокійну добу 22 вересня 2020 р. за даними іонозондів поблизу м. Харків і м. Тромсьо

На рис. 1 показано порівняння часових варіацій f_oF2 на часовому інтервалі 02:45 – 16:45 UT за даними іонозондів біля Тромсьо і Харкова у магнітоспокійну добу 22 вересня

2020 р. Як видно з цього рисунку, часовий хід f_oF2 над Харковом мав п'ять яскраво виражених локальних максимумів (о 06:00, 06:45, 08:00, 13:30, 15:30 UT), тоді як часовий хід f_oF2 над Тромсьо мав шість яскраво виражених локальних максимумів (о 06:30, 08:45, 10:00, 11:00, 12:00, 13:30 UT).

У магнітоспокійний день 22.09.2020 р. значення f_oF2 над м. Харків перевищували значення f_oF2 над м. Тромсьо на всьому

часовому інтервалі спільних спостережень 02:45 – 16:45 UT. Значення f_oF2 над м. Харків о 06:00 UT перевищували значення f_oF2 над м. Тромсьо на 0.64 МГц (в 1.16 рази), о 06:45 UT – на 0.84 МГц (в 1.18 рази), о 08:00 UT – на 1.01 МГц (в 1.22 рази), о 13:30 UT – на 0.59 МГц (в 1.13 рази), а о 15:30 UT – на 0.93 МГц (в 1.25 рази).

Над м. Харків зі сходом Сонця о 03:23 UT (тут і далі схід і захід Сонця визначалися на рівні землі) спостерігалось

швидке зростання f_oF2 до свого локального максимального значення, а також були виявлені квазіперіодичні коливання f_oF2 в інтервалі часу 02:45 – 16:45 UT. В Тромсьо зі сходом Сонця о 04:31 UT також спостерігалось швидке зростання f_oF2 до свого локального максимального значення і мали місце квазіперіодичні коливання f_oF2 , що мали меншу амплітуду у порівнянні з коливаннями f_oF2 над м. Харків.

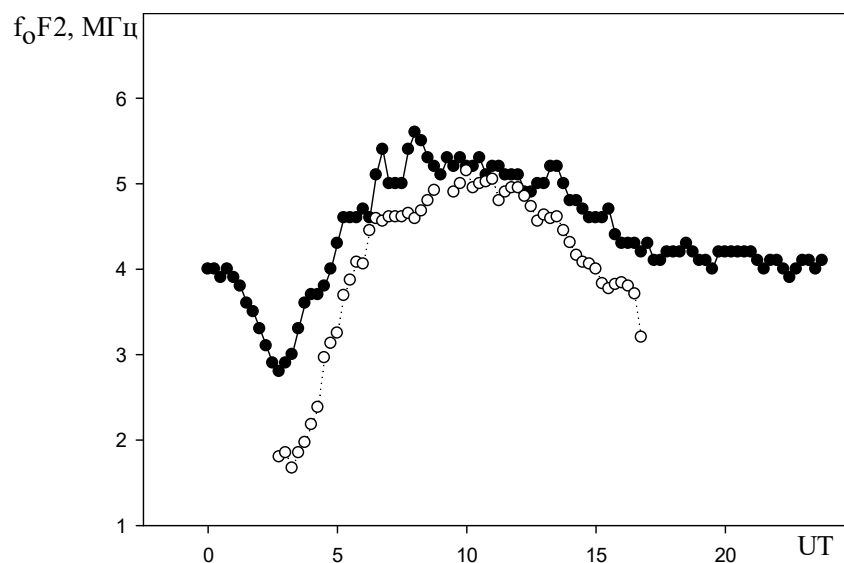


Рис. 1. Порівняння часового ходу f_oF2 за даними іонозондів поблизу м. Тромсьо (незафарбовані кружки) і м. Харків (зафарбовані кружки) для 22.09.2020 р.

О 15:30 UT над м. Харків спостерігався західний локальний максимум f_oF2 (захід Сонця в м. Харків – о 15:27 UT), і після 15:30 UT f_oF2 повільно зменшувалася до свого локального мінімуму, що дорівнював 4.2 МГц о 16:45 UT. Над м. Тромсьо спостерігався передзахідний локальний максимум f_oF2 о 16:00 UT (захід Сонця в м. Тромсьо 22.09.2020 р. – о 16:35 UT). Після заходу Сонця в м. Тромсьо f_oF2 швидко зменшилася до свого локального мінімального значення 3.2 МГц о 16:45 UT. Показане на рис. 1 перевищення значень f_oF2

над Харковом відображає типову поведінку іоносфери під час дуже спокійних умов.

4.2. Варіації критичної частоти шару F2 23 вересня 2020 р. за даними іонозондів поблизу м. Харків і м. Тромсьо

На рис. 2 показано порівняння часових варіацій f_oF2 на часовому інтервалі 01:30 – 17:00 UT за даними іонозондів поблизу м. Тромсьо і м. Харків 23 вересня 2020 р.

Як видно з рис. 2, часовий хід f_oF2 над м. Харків мав 6 яскраво виражених локальних максимумів (о 05:15, 07:00, 08:15,

09:45, 14:00, 16:45 UT), в той час як часовий хід f_oF2 над Тромсьо мав тільки 5 яскраво виражених локальних максимумів (о 08:00, 11:00, 12:00, 13:00, 15:00 UT). З цього рисунку також видно, що 23.09.2020 р. значення f_oF2 над м. Харків перевищували значення f_oF2 над м. Тромсьо на часових інтервалах спільних спостережень 01:30 –

10:30 UT і 12:30 – 17:00 UT, а значення f_oF2 над м. Тромсьо перевищували її значення над м. Харків на часовому інтервалі 10:45 – 12:15 UT. Перевищення значень f_oF2 над м. Тромсьо над її значеннями над м. Харків, очевидно, викликане сильним магнітним збуренням, що мало місце в високих широтах в період 09:00 – 15:00 UT.

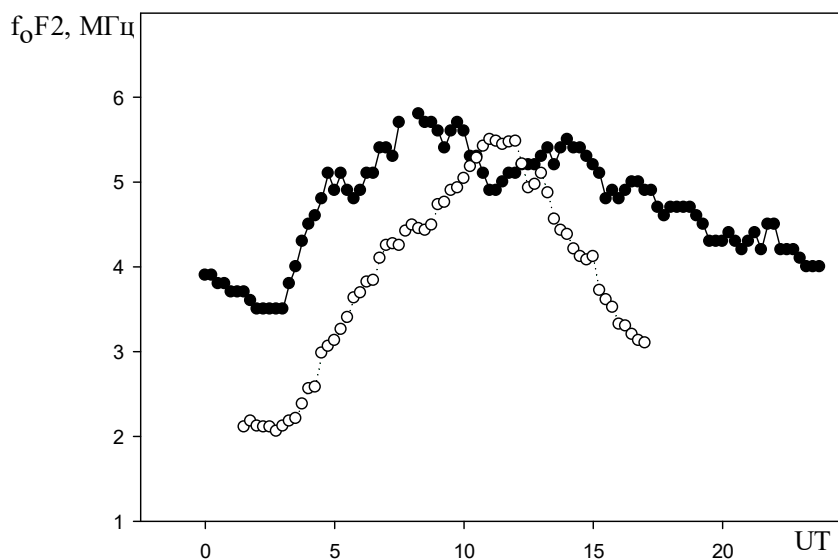


Рис. 2. Порівняння часового ходу f_oF2 за даними іонозондів поблизу м. Тромсьо (незафарбовані кружки) і м. Харків (зафарбовані кружки) для 23.09.2020 р.

Значення f_oF2 над м. Харків о 05:15 UT перевищували значення f_oF2 над м. Тромсьо на 1.84 МГц (в 1.56 рази), о 07:00 UT – на 1.15 МГц (в 1.27 рази), о 08:15 UT – на 1.35 МГц (в 1.3 рази), о 09:45 UT – на 0.77 МГц (в 1.16 рази), о 14:00 UT – на 1.12 МГц (в 1.26 рази), а в 16:45 UT – на 1.87 МГц (о 1.6 рази). В той час як значення f_oF2 над м. Тромсьо о 11:00 UT перевищувало значення f_oF2 над м. Харків на 0.6 МГц (в 1.12 рази), а значення f_oF2 о 12:00 UT – на 0.38 МГц (в 1.07 рази).

Над м. Харків і м. Тромсьо зі сходом Сонця о 03:24 і 04:35 UT, відповідно, спостерігалось швидке зростання f_oF2 до свого локального максимального значення, а

також мали місце квазіперіодичні коливання f_oF2 в інтервалі часу 01:30 – 17:00 UT. Над м. Тромсьо виявлено квазіперіодичні коливання f_oF2 , що мали меншу амплітуду в порівнянні з коливаннями f_oF2 над м. Харків, і крім того, над м. Тромсьо квазіперіодичні коливання f_oF2 були майже повністю придушені після початку сильного магнітного збурення в високих широтах.

Впродовж 23.09.2020 р. і над м. Харків, і над м. Тромсьо не спостерігалися передзахідні максимуми f_oF2 (захід Сонця над м. Харків – о 15:24 UT, над м. Тромсьо – о 16:31 UT).

4.3. Ефекти магнітних збурень в високих і середніх широтах

Для висвітлення ефекту магнітного збурення, яке відбулося в високих широтах 23.09.2020 р. в період 09:00 – 15:00 UT проведемо порівняння часового ходу f_oF2 для магнітоспокійної доби 22.09.2020 р. і магнітозбуреної доби 23.09.2020 р. за даними іонозонда поблизу м. Тромсьо.

На рис. 3 показано порівняння часових ходів f_oF2 для 22.09.2020 р. і 23.09.2020 р. Як видно з цього рисунку, після сходу Сонця над м. Тромсьо 22.09.2020 р. і 23.09.2020 р. о 04:31 і 04:35 UT, відповідно, f_oF2 швидко зростала, причому значення f_oF2 для 22.09.2020 р. перевищували значення f_oF2 для 23.09.2020 р. з 04:45 до 10:00 UT.

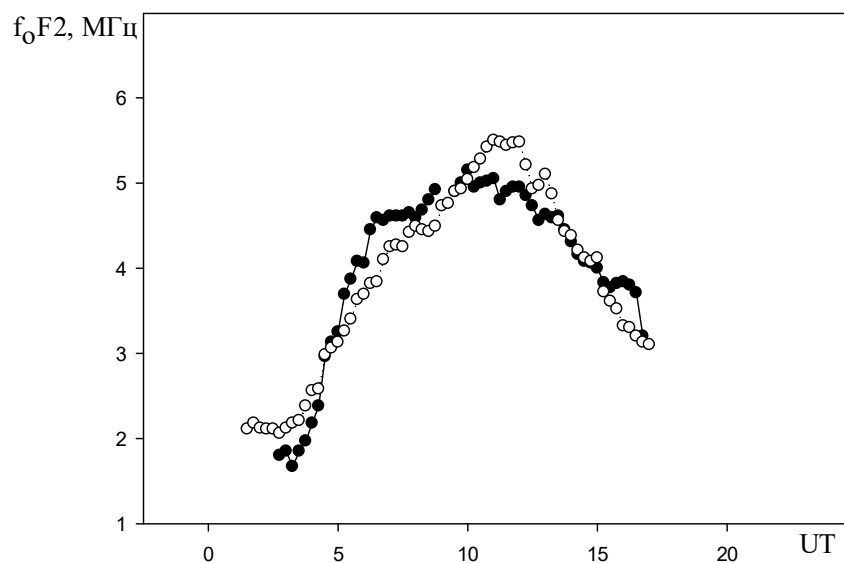


Рис. 3. Порівняння часового ходу f_oF2 за даними іонозонда поблизу м. Тромсьо для 22.09.2020 р. (зафарбовані кружки) і 23.09.2020 р. (незафарбовані кружки)

Слід зазначити, що f_oF2 23.09.2020 р. з початком магнітного збурення в високих широтах о 09:00 UT (див. табл. 1) монотонно збільшувалася з 09:00 UT до свого максимального значення 5,5 МГц о 11:00 UT. При цьому, значення f_oF2 для 23.09.2020 р. з 10:15 до 15:00 UT (тобто, до кінця періоду магнітного збурення) перевищувало значення f_oF2 для 22.09.2020 р.

Після закінчення періоду магнітного збурення о 15:00 UT значення f_oF2 для 22.09.2020 р. знову перевищували її значення для 23.09.2020 р. з 15:15 до 16:45 UT.

Таким чином, можна зробити висновок, що зростання значень f_oF2 23.09.2020 р. в

період 09:00 – 15:00 UT було викликане магнітним збуренням, яке відбулося в цей період часу в високих широтах.

Для демонстрації ефекту магнітного збурення, що мало місце в середніх широтах 24.09.2020 р. в період 03:00 – 12:00 UT (сильне магнітне збурення відбулося в період 06:00 – 09:00 UT) проведемо порівняння часового ходу f_oF2 для магнітоспокійної доби 22.09.2020 р. і магнітозбуреної доби 24.09.2020 р. за даними іонозонда поблизу м. Харків.

На рис. 4 показано порівняння часових ходів f_oF2 над м. Харків для 22.09.2020 р. і 24.09.2020 р. Як видно з цього рисунку,

часові ходи f_oF2 22.09.2020 р. і 24.09.2020 р. є подібними та близькими за значенням на часовому інтервалі 00:00 – 07:00 UT (їх різниця в основному не перевищує 0.1 – 0.2 МГц). З 07:15 UT спостерігалися швидке зростання f_oF2 та її квазіперіодичні коливання з амплітудою, що збільшувалася. Амплітуда цих коливань значно зменшилася після 13:00 UT. Значення f_oF2 для

24.09.2020 р. перевищували значення f_oF2 для 22.09.2020 р. з 03:00 до 04:45 UT (з початком магнітного збурення) і з 07:00 до 13:00 UT (в період сильного магнітного збурення та до кінця цього збурення). Локальний максимум f_oF2 спостерігався о 09:00 UT (в кінці періоду сильного магнітного збурення). Головний максимум f_oF2 спостерігався о 11:00 UT.

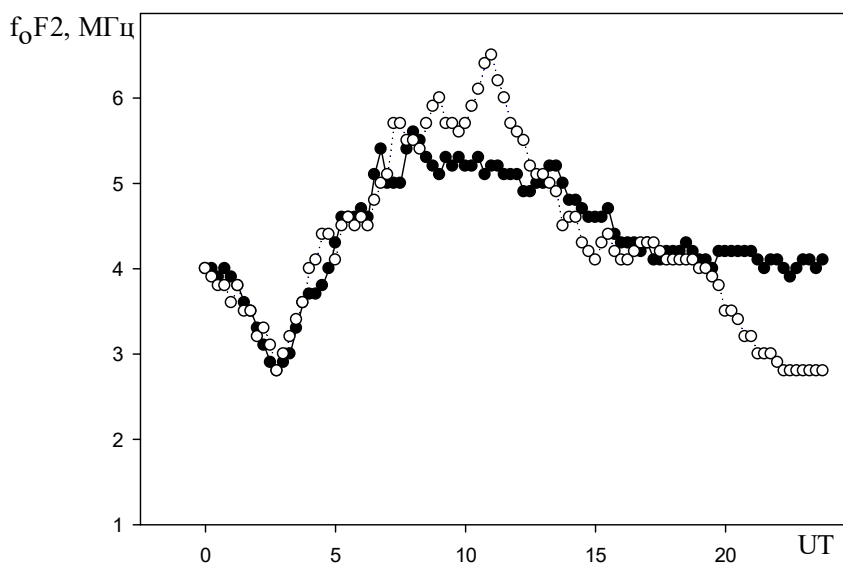


Рис. 4. Порівняння часового ходу f_oF2 за даними іонозонда поблизу м. Харків для 22.09.2020 р. (зафарбовані кружки) і 24.09.2020 р. (незафарбовані кружки)

Значення f_oF2 для 24.09.2020 р. о 07:30 UT перевищувало значення f_oF2 для 22.09.2020 р. на 0.7 МГц (в 1.14 рази), о 09:00 UT – на 0.9 МГц (в 1.18 рази), о 11:00 UT – на 1.3 МГц (в 1.25 рази).

Після закінчення періоду магнітного збурення о 12:00 UT значення f_oF2 для 22.09.2020 р. перевищували її значення для 24.09.2020 р. з 13:15 до 23:45 UT.

Таким чином, швидке зростання значень f_oF2 24.09.2020 р. над м. Харків, як і квазіперіодичні коливання з амплітудою, що збільшувалася, в період 07:15 – 13:00 UT були скоріше за все викликані магнітним збуренням, що виникло в цей період часу в середніх широтах.

5. Висновки

1. У магнітоспокійну добу 22.09.2020 р. значення f_oF2 над м. Харків перевищували значення f_oF2 над м. Тромсьо на всьому часовому інтервалі спільних спостережень 02:45 – 16:45 UT. Як над м. Тромсьо, так і над м. Харків, зі сходом Сонця спостерігалось швидке зростання f_oF2 до свого локального максимального значення і мали місце квазіперіодичні коливання f_oF2 . Амплітуда цих коливань була меншою над м. Тромсьо, ніж над м. Харків. Над обома пунктами вимірювань спостерігався передзаходний локальний максимум f_oF2 .

2. Під час магнітозбурених умов над м. Тромсьо і м. Харків зі сходом Сонця спостерігалися квазіперіодичні коливання f_oF2 . Коливання над м. Тромсьо мали меншу амплітуду, ніж над м. Харків, і були майже повністю придушені після початку сильного магнітного збурення в високих широтах 23.09.2020 р. Значення f_oF2 над м. Тромсьо перевищували її значення над м. Харків на часовому інтервалі 10:45 – 12:15 UT. Під час магнітного збурення над м. Харків 24.09.2020 р. з 07:15 UT спостерігалось швидке зростання f_oF2 та її квазіперіодичні коливання, амплітуда яких спочатку зростала, а після 13:00 UT помітно зменшилася.

3. Порівняння часового ходу f_oF2 над м. Тромсьо у магнітоспокійну добу 22.09.2020 р. і в магнітозбурену добу 23.09.2020 р. показало, що значення f_oF2 для 23.09.2020 р. з 10:15 до 15:00 UT перевищувало значення f_oF2 для 22.09.2020 р. Порівняння часового ходу f_oF2 над м. Харків у магнітоспокійний день 22.09.2020 р. і в магнітозбурений день 24.09.2020 р. показало, що значення f_oF2 для 24.09.2020 р. перевищувало її значення для 22.09.2020 р. з 03:00 до 04:45 UT і з 07:00 до 13:00 UT.

4. Магнітні збурення призвели до швидкого зростання значень f_oF2 як над м. Харків, так і над м. Тромсьо, які перевищували значення f_oF2 під час магнітоспокійних умов. Ці збурення також призвели до значного збільшення відносних амплітуд рухомих іоносферних збурень над м. Харків.

Дослідження авторів з Інституту іоносфери виконано в рамках науково-дослідницької роботи, що фінансується Національною академією наук України (номер держреєстрації 0120U100557).

Дослідження авторів з РІ НАН України проведено в рамках проектів, що фінансується Національною академією наук України (номер держреєстрації 0121U108110 та договір № 2Н/48-21).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поляков В. М., Щепкин Л. Ф., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 536 с.
2. Stubbe P. The thermosphere and the F-region: a reconciliation of theory with observations. Ionospheric Research Sci. Rep. No 418. Penn. State University, 1973. 156 p.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
4. Schunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 555 p., doi: 10.1017/CBO9780511551772.
5. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.* 2001. Vol. 36, No 2. P. 261–275, doi: 10.1029/2000RS002432.
6. Nava B., Coisson P., Radicella S. M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70, Is. 15. P. 1856–1862, doi: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.
7. 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. Т. 24, № 2. С. 10–21, doi: 10.15407/knit2018.03.010.
8. Rietveld M. T., Wright J. W., Zabolin N., Pitteway M. L. W. The Tromsø Dynasonde. *Polar Science.* 2008. Vol. 2, No 1. P. 55–71, doi: 10.1016/j.polar.2008.02.001.

REFERENCES

1. Polyakov, V.M., Shchepkin, L.F., Kazimirovsky, E.S., & Kokourov, V.D. (1968). Ionospheric processes. Novosibirsk: Nauka.
2. Stubbe, P. (1973). The thermosphere and the F-region: a reconciliation of theory with observations. (Rep. N 418). Ionospheric Research Sci. Penn. State University.

3. Bryunelli, B. Y., & Namgaladze, A. A. (1988). *Ionosphere Physics*. Nauka.
4. Schunk, R. W., & Nagy, A. F. (2000). *Ionospheres*. doi:10.1017/cbo9780511551772
5. Bilitza, D. (2001). *International Reference Ionosphere 2000*. *Radio Science*, 36(2), 261–275. doi:10.1029/2000rs002432.
6. Nava, B., Coisson, P., & Radicella, S. M. (2008). A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(15), 1856–1862. doi:10.1016/j.jastp.2008.01.015.
7. 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. *Kosmìčna Nauka i Tehnologìâ*, 24(3), 10–22. doi:10.15407/knit2018.03.010.
8. Rietveld, M. T., Wright, J. W., Zobotin, N., & Pitteway, M. L. V. (2008). The Tromsø dynasonde. *Polar Science*, 2(1), 55–71. doi:10.1016/j.polar.2008.02.001.

Joint Ionosonde Studies of F2 Layer Critical Frequency Variations in the Ionosphere Over Kharkiv and Tromsø During Fall Equinox in Quiet and Disturbed Conditions

T. G. Zhivolup¹, S. V. Panasenko¹,
O. V. Koloskov^{2,3}, V. M. Lisachenko²

¹*Institute of Ionosphere, NAS and MES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Institute of Radio Astronomy, NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

³*State Institution National Antarctic Scientific Center, MES of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

According to the results of joint ionosonde studies of variations in the ionospheric F2 layer critical frequency over Kharkiv and Tromsø during low solar activity for fall equinox on September 22 – 24, 2020, the features of foF2 variations in middle and low latitudes were investigated for magnetically quiet and magnetically disturbed conditions. On the magnetically quiet day of September 22, 2020, the foF2 values over Kharkiv were found to exceed the foF2 values over Tromsø for the entire time interval of joint observations 02:45 - 16:45 UT. Both over Tromsø and over Kharkiv, a rapid increase in foF2 to its local maximum value was observed after the sunrise.

Quasi-periodic variations in foF2 were revealed at high latitudes, which had lower amplitude compared to variations in foF2 over Kharkiv. Over both measuring sites, a pre-sunset local maximum in foF2 was observed. During magnetically disturbed conditions over Tromsø and Kharkiv, quasi-periodic fluctuations in foF2 were observed after the sunrise. Oscillations over Tromsø had lower amplitude than over Kharkiv, and were almost completely suppressed after the onset of a strong magnetic disturbance at high latitudes on September 23, 2020. The foF2 values over Tromsø exceeded its values over Kharkiv in a time interval of 10:45 – 12:15 UT. Comparison of the time variation of foF2 over Tromsø on a magnetically quiet day, September 22, 2020, and on a magnetically disturbed day, September 23, 2020, showed that the foF2 value for September 23, 2020 from 10:15 to 15:00 UT exceeded the foF2 values for the same period on September 22, 2020. Comparison of the temporal variations in foF2 over Kharkiv on a magnetically quiet day, September 22, 2020, and on a magnetically disturbed day, September 24, 2020, showed that the foF2 value for September 24, 2020 exceeded its value for September 22, 2020 from 03:00 to 04:45 UT and from 07:00 to 13:00 UT. Magnetic disturbances were found to cause a rapid increase in foF2 values both over Kharkiv and Tromsø, which exceeded foF2 values under magnetically quiet conditions, and also led to a significant increase in the relative amplitudes of traveling ionospheric disturbances over Kharkiv.

Key words: ionosphere, ionospheric F2 layer, ionosonde observations, magnetic disturbances, variations in the critical frequency of the F2 layer of the ionosphere, differences in variations in middle and high latitudes.

Совместные ионозондовые исследования вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы над Харьковом и Тромсе в период осеннего равноденствия в спокойных и возмущенных условиях

Т. Г. Живолуп¹, С. В. Панасенко¹,
А. В. Колосков^{2,3}, В. Н. Лисаченко²

¹*Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков, Украина*

²*Радиоастрономический институт НАН Украины, г. Харьков, Украина*

³Государственное учреждение
Национальный Антарктический научный
центр МОН Украины, г. Киев, Украина

По результатам совместных ионозондовых исследований вариаций критической частоты f_oF2 слоя F2 ионосферы во время низкой солнечной активности над г. Харьков и г. Тромсе в период осеннего равноденствия 22 – 24 сентября 2020 г. исследованы особенности вариаций f_oF2 в средних и низких широтах для магнитоспокойных и магнитовозмущенных условий. Обнаружено, что в магнитоспокойные сутки 22.09.2020 г. значения f_oF2 над г. Харьков превышали значения f_oF2 над г. Тромсе на всем временном интервале совместных наблюдений 02:45 – 16:45 UT. Как над г. Тромсе, так и над г. Харьков, с восходом Солнца наблюдалось быстрое возрастание f_oF2 до своего локального максимального значения. Выявлены квазипериодические колебания f_oF2 , которые в высоких широтах имели меньшую амплитуду по сравнению с колебаниями f_oF2 над г. Харьков. Над обоими пунктами измерений наблюдался предзаходный локальный максимум f_oF2 . Установлено, что во время магнитовозмущенных условий над г. Тромсе и г. Харьков с восходом Солнца наблюдались квазипериодические колебания f_oF2 . Колебания над г. Тромсе имели меньшую амплитуду, чем над г. Харьков, и были практически полностью

подавлены после начала сильного магнитного возмущения в высоких широтах 23.09.2020 г. Значения f_oF2 над г. Тромсе превышали ее значения над г. Харьков на временном интервале 10:45 – 12:15 UT. Сравнение временного хода f_oF2 над г. Тромсе в магнитоспокойные сутки 22.09.2020 г. и в магнитовозмущенные сутки 23.09.2020 г. показало, что значение f_oF2 для 23.09.2020 г. с 10:15 до 15:00 UT превышало значения f_oF2 для 22.09.2020 г. Сравнение временного хода f_oF2 над г. Харьков в магнитоспокойный день 22.09.2020 г. и в магнитовозмущенный день 24.09.2020 г. показало, что значение f_oF2 для 24.09.2020 г. превышало ее значение для 22.09.2020 г. с 03:00 до 04:45 UT и с 07:00 до 13:00 UT. Установлено, что магнитные возмущения вызывали быстрое возрастание значений f_oF2 как над г. Харьков, так и над г. Тромсе, которые превышали значения f_oF2 при магнитоспокойных условиях, а также привели к значительному увеличению относительных амплитуд перемещающихся ионосферных возмущений над г. Харьков.

Ключевые слова: ионосфера, слой F2 ионосферы, ионозондовые наблюдения, магнитные возмущения, вариации критической частоты слоя F2 ионосферы, отличия вариаций в средних и высоких широтах.

Статья надійшла до редакції 05.05.2021