

УДК 550.388

ОДНОЧАСНІ ІОНОЗОНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЙ КРИТИЧНОЇ ЧАСТОТИ І ВИСОТИ МАКСИМУМУ ШАРУ F2 ІОНОСФЕРИ НА ОБОХ КІНЦЯХ ГЕОМАГНІТНОЇ ТРУБКИ

С. В. Панасенко¹, Т. Г. Живолуп¹, Д. В. Котов¹, О. В. Колосков^{2,3}, В. М. Лисаченко²

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

² Радіоастрономічний інститут НАН України, м. Харків, Україна

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

e-mail: panasenko@nas.gov.ua

За результатами одночасних іонозондових спостережень під час низької сонячної та слабкої магнітної активностей знайдено взаємозв'язок між добовими та квазіперіодичними варіаціями параметрів іоносфери над магнітоспряженими регіонами, де розташовані Українська антарктична станція (УАС) та обсерваторія Міллстоун Хілл. Виявлено значний вплив літньої півкулі на нічні варіації критичної частоти F2 шару f_oF2 в магнітоспряженому регіоні в зимовій півкулі. Найбільш характерним проявом цього впливу є контроль варіацій f_oF2 над УАС не місцевим заходом (сходом) Сонця, а заходом (сходом) Сонця над Міллстоун Хілл. Встановлено, що захід Сонця над Міллстоун Хілл призводить до зростання f_oF2 над УАС, схід – до зменшення f_oF2 з подальшим різким збільшенням. Обидва феномени пов'язані зі змінами потоку фотоелектронів з північної півкулі, відповідними змінами температури електронів в іоносфері над УАС та впливом цих змін на стиснення або розширення іоносферної плазми та зміну плазмосферних потоків іонів H^+ . Показано, що перехід від нічних до денних умов над обома пунктами спостережень характеризувався значним зменшенням висоти максимуму шару F2, а відмінність у значеннях цього іоносферного параметру над Міллстоун Хілл та УАС у нічні години обумовлена сезонними відмінностями термосферної циркуляції та різницею у поведінці параметрів іоносфери у Північній і Південній півкулях. Виявлено прояви атмосферних гравітаційних хвиль, викликаних проходженням локальних ранкових сонячних термінаторів, у вигляді рухомих іоносферних збурень з періодами близько 90 і 75 – 120 хв над Міллстоун Хілл і УАС, відповідно. Ці хвилі, скоріш за все, були згенеровані у області, розташованій між іоносферними шарами F1 і F2, де мають місце різкі градієнти концентрації електронів та іонів під час зміни інтенсивності сонячного випромінювання. Підтверджено, що хвильові збурення параметрів атмосфери та іоносфери можуть переноситися між магнітоспряженими регіонами повільними магнітогідродинамічними хвилями, які генеруються як на висотах динамо-області іоносфери через модуляцію атмосферними хвилями параметрів атмосфери та іоносфери та виникнення сторонніх струмів, так і на вершині плазмосферної трубки, де відбувається різке стиснення та нагрівання або розрідження та охолодження плазми під час проходження сонячного термінатору.

Ключові слова: іоносфера, шар F2, іонозондові вимірювання, геомагнітна трубка, взаємозв'язок магнітоспряжених регіонів, атмосферні гравітаційні хвилі, рухомі іоносферні збурення, генерація повільних магнітогідродинамічних хвиль.

1. Вступ

Фізико-хімічні та динамічні процеси в іоносферній плазмі досліджуються вже близько століття як теоретично, так і експериментально з використанням цілої низки наземних і космічних засобів [1 – 3]. Не дивлячись на те, що за цей час досягнуто великого прогресу в розумінні та моделюванні взаємозв'язаних варіацій іоносферних параметрів у різних широтах, на різних висотах та під час різних рівнів сонячної та магнітної активностей, достовірне прогнозування поведінки іоносфери над конкретним регіоном у заданий проміжок часу в майбутньому є дотепер нерозв'язною задачею. Справа в тому, що іоносфера є доволі тонким прошарком, що зазнає значного впливу як з боку високоенергійних процесів, що відбуваються на Сонці, міжпланетному середовищі та магнітосфері, так і процесів у нижній і середній атмосфері, на землі та під її поверхнею. Важливо, що іоносферний відгук часто має нелінійний характер з активацією локальних тригерних процесів [4 – 6], а також значною мірою залежить від стану геокосмосу не тільки в досліджуваній часовий інтервал, а й у попередні тривалі проміжки часу (до декількох діб). Враховуючи вище сказане, важливою геофізичною задачею ще й досі є проведення систематичних досліджень іоносферних процесів одночасно над великою кількістю регіонів земної кулі та сумісна інтерпретація отриманих результатів.

Найбільш поширеним засобом дослідження поведінки такого параметру іоносфери, як концентрація електронів, на висотах до максимуму F-області іоносфери, наразі залишаються спостереження методом вертикального радіозондування, що часто проводяться майже безперервно. Зараз у світі нараховується більше ста діючих іонозондів і

станцій вертикального зондування, що розташовані на всіх континентах. Іонограми, отримані більшістю цифрових іонозондів, знаходяться у вільному доступі в базі даних цифрових іонограм DIDBase (<https://ulcar.uml.edu/DIDBase/>).

Геомагнітне поле має визначний вплив на рух заряджених частинок іоносферної плазми на висотах більше 130 – 150 км. Крім того, завдяки взаємодії атмосфери, іоносфери, плазмосфери та магнітного поля, відбувається ефективна передача енергії та імпульсу вздовж геомагнітної трубки з північної півкулі у південну та навпаки. Наприклад, в роботі [7] виявлено квазіперіодичні варіації магнітного поля в регіоні Нова Англія (США), які були викликані проходженням потужних атмосферних фронтів над Антарктичним півостровом, що є магнітоспрямленим регіоном. В роботі [8] показано наявність геомагнітних пульсацій з періодами 10 – 12 хв, що були згенеровані рухом сонячного термінатора (СТ) через магнітоспрямлену область.

Метою цієї роботи є аналіз одночасних варіацій критичної частоти f_oF_2 і висоти максимуму h_mF_2 шару F2 іоносфери у магнітоспрямлених регіонах західної півкулі, що спостерігалися в період низької сонячної та слабкої магнітної активностей.

Геометрія експерименту представлена на рис. 1. Скоординовані спостереження було проведено 10 червня 2017 р.

2. Геліогеофізична обстановка 9 і 10 червня 2017 р.

Впродовж 9 червня 2017 р. індекс сонячної активності $F_{10.7}$ мав значення 74 (сонячна активність була низькою). В табл. 1 наведено значення високоширотних і планетарних індексів геомагнітної активності в дні 09.06.2017 р. та 10.06.2017 р. З таблиці

видно, що планетарний добовий індекс геомагнітної активності A_p 09.06.2017 р. мав значення 5, а високоширотний індекс A дорівнював 1. Планетарний K_p -індекс мав значення, що не перевищують 3 (в основному, дорівнював 1), а високоширотний індекс K дорівнював 1 і 0.

У день спостережень 10 червня 2017 року сонячна активність також була

низькою: $F_{10,7}$ мав значення 75. Значення A_p 10.06.2017 р. дорівнювало 4, $A = 2$. Значення K_p -індексу 10.06.2017 р. складало 1, а K -індекс дорівнював 1 і 0.

Таким чином, можна зробити висновок, що в день вимірювань 10.06.2017 р., як і в попередню добу, мали місце дуже низька сонячна та слабка магнітна активності.

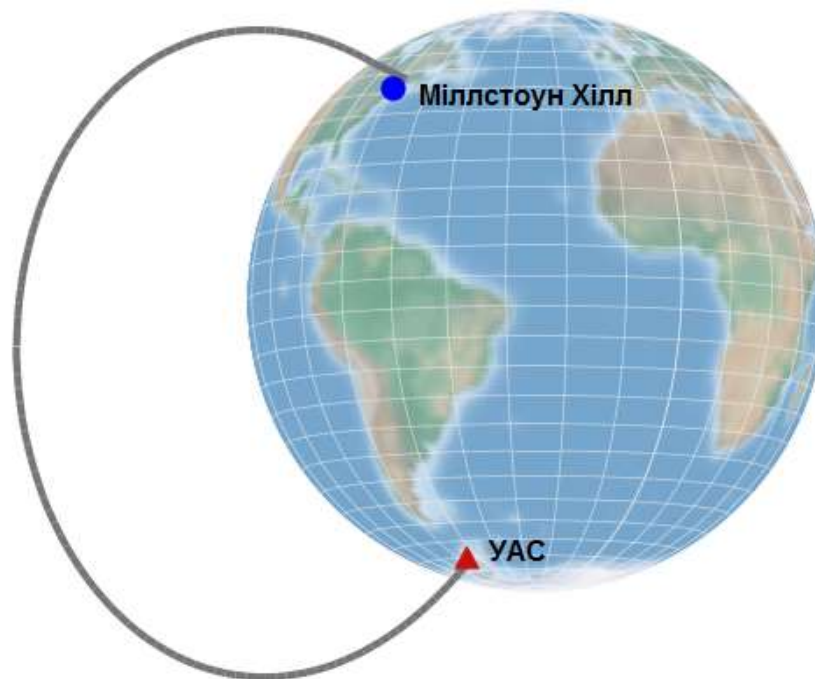


Рис. 1. Розташування іонозондів на Українській антарктичній станції (УАС) і в Міллстоун Хілл біля двох кінців геомагнітної трубки з параметром Макілвейна $L = 2.74$ (відповідно до моделі IGRF-13, https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/igrf_vitmo.php).

Таблиця 1. Відомості про геомагнітну обстановку

Дата	Високоширотні індекси		Планетарні індекси	
	A	K	A_p	K_p
09.06.2017	1	1 1 0 1 0 0 0 0	5	3 1 1 1 1 1 1 1
10.06.2017	2	1 1 1 1 0 0 0 0	4	1 1 1 1 1 1 1 1

3. Засоби спостереження

В роботі використано експериментальні дані, які отримано за допомогою іонозондів, розташованих на Українській антарктичній станції (УАС) і в обсерваторії Міллстоун-Хілл.

Іонозонд УАС “Академік Вернадський” IPS-42 розташований на острові Галіндез ($65^{\circ}15'$ півд. ш., $64^{\circ}15'$ зх. д.) і є унікальним дослідницьким обладнанням, що було розроблено й виготовлено в Австралії [9]. Потужність імпульсу, що випромінюється

передавачем, становить 5 кВт, тривалість імпульсу ~ 40 мкс. Діапазон частот, у якому проводиться радіозондування, становить 1.0 – 22.6 МГц. Частота зондування змінюється в геометричній прогресії таким чином, що весь діапазон зондування складається з 576 фіксованих частот. Інтервал віртуальних висот складає 0 – 800 км. Антенна система іонозонда IPS-42 складається з приймальних та передавальних НЧ та ВЧ антен. Результати зондування представляються у вигляді іонограм, на яких віртуальні висоти прийнятих сигналів відображаються в залежності від частоти зондування. Темп реєстрації іонограм – одна іонограма кожні 15 хв. Обробка іонограм проводиться за стандартною методикою URSI.

В обсерваторії Міллстоун Хілл ($42^{\circ}36'$ півн. ш., $71^{\circ}30'$ зх. д.) використовується невеликий портативний цифровий іонозонд Digisonde Portable Sounder (DPS). Він випромінює 500-мікросекундні (“широкі”) імпульси для вертикального зондування та 8.5-мікросекундні (“вузькі”) імпульси для похилого зондування. Використання внутрішньоімпульсного кодування та стиснення імпульсів призводить до роздільної здатності 67 мкс для обох сигналів. Застосування методики автомасштабування похилих іонограм дозволяє отримувати висотні профілі електронної концентрації з використанням моделі квазіпараболічних шарів. Більш детальний опис іонозону міститься у роботі [10].

4. Результати експериментальних досліджень

На рис. 2 показано порівняння часових варіацій критичної частоти шару F2 (f_oF2) на часовому інтервалі 00:15 – 23:45 UT за

даними іонозондів УАС і Міллстоун Хілл в дуже спокійну добу 10.06.2017 р. Як видно з рис. 2, часовий хід f_oF2 над Міллстоун Хілл має один явно виражений максимум о 13:30 UT, в той час як часовий хід f_oF2 над УАС має два явно виражених максимуми о 14:45 і 17:00 UT.

Рис. 2 також демонструє, що в спокійний день 10.06.2017 р. значення f_oF2 над Міллстоун Хілл перевищували значення f_oF2 над УАС на всьому часовому інтервалі спільних спостережень 00:15 – 23:45 UT. Значення f_oF2 над Міллстоун Хілл о 13:30 UT перевищувало значення f_oF2 над УАС на 3.56 МГц (в 2.32 рази), значення f_oF2 о 16:00 UT – на 1.96 МГц (в 1.61 рази), значення f_oF2 в 17:00 UT – на 0.54 МГц (в 1.12 рази), а о 20:15 UT – на 2.7 МГц (в 2.2 рази).

В цей же день над Міллстоун Хілл після заходу Сонця (о 00:23 UT, тут і далі час сходу і заходу Сонця визначався на рівні землі) спостерігалось поступове зменшення f_oF2 з плином часу від 6.4 МГц о 00:30 UT до її мінімуму 2.75 МГц, який мав місце з 08:15 до 08:45 UT. Після локального сходу Сонця (о 09:06 UT) значення f_oF2 збільшувалися до свого максимуму 6.26 МГц, який спостерігався о 13:30 UT. Крім того, після сходу Сонця в Міллстоун Хілл спостерігався квазіперіодичний коливальний процес f_oF2 з невеликою амплітудою близько 0.1 МГц, як і в іоносфері над УАС.

Дані про висоту максимуму шару F2 (h_mF2) над Міллстоун Хілл і УАС 10.06.2017 р. були отримані в результаті обробки іонограм за програмою SAO-X, що розроблена в Центрі атмосферних досліджень Массачусетського університету.

На рис. 3 показано порівняння часових варіацій h_mF2 на часовому інтервалі 00:15 – 23:45 UT за даними іонозондів УАС і

Міллстоун Хілл. Як видно з цього рисунку, часовий хід h_mF2 над УАС мав два локальних максимуми о 04:00 UT і 06:30 UT, а також один мінімум о 16:00 UT. Часовий хід h_mF2

над Міллстоун Хілл мав два явно виражених максимуми о 01:45 і 06:30 UT, а також два явно виражених мінімуми о 10:00 і 15:15 UT.

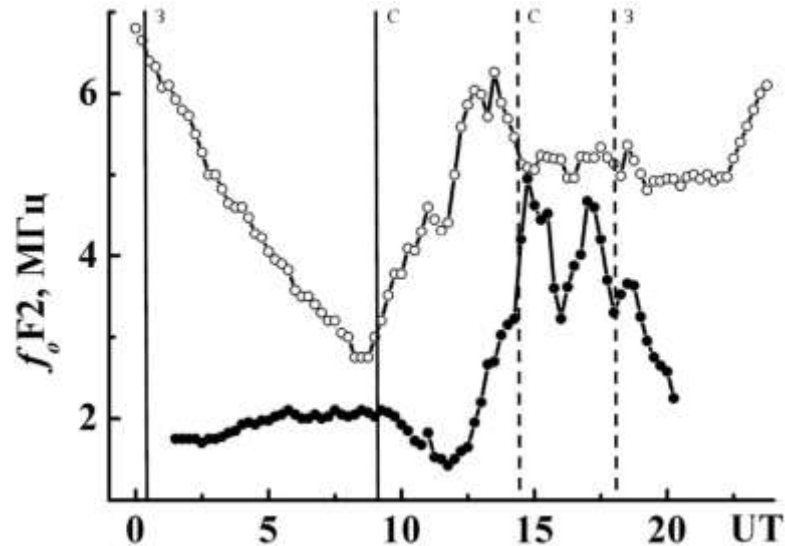


Рис. 2. Порівняння часового ходу f_oF2 за даними іонозондів УАС і Міллстоун Хілл для 10.06.2017 р.

Тут і далі варіації параметрів іоносфери над УАС і Міллстоун Хілл позначено за допомогою зафарбованих і незафарбованих кружків, відповідно, суцільні лінії вказують час сходу (C) і заходу (Z) Сонця в Міллстоун Хілл, а штрихові лінії – в УАС.

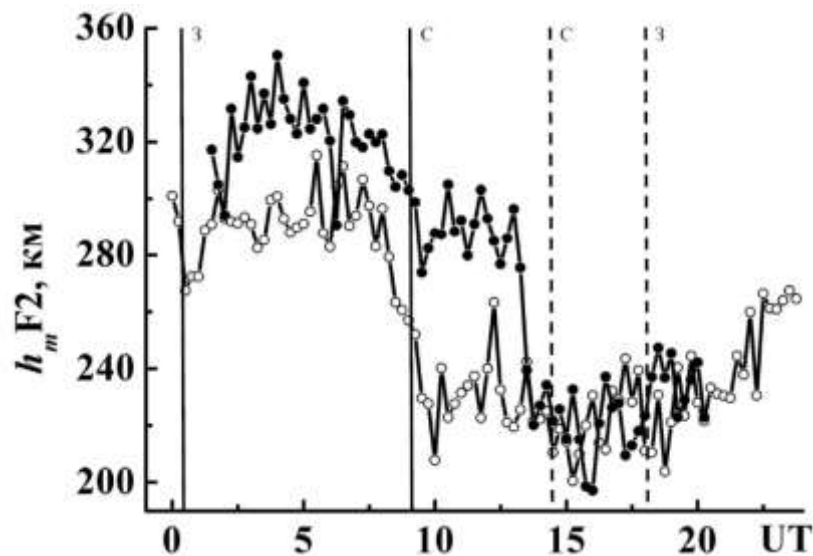


Рис. 3. Порівняння часового ходу h_mF2 за даними іонозондів УАС і Міллстоун-Хілл для 10.06.2017 р.

Продемонстровано, що значення h_mF2 над УАС перевищували значення h_mF2 над Міллстоун Хілл на часовому інтервалі 01:30 – 15:15 UT. На інтервалі 16:00 –

19:15 UT над Міллстоун Хілл і УАС спостерігалися квазіперіодичні коливання h_mF2 .

З рис. 3 також видно, що в спокійний день 10.06.2017 о 04:00 UT значення h_mF2 над УАС перевищували значення h_mF2 над Міллстоун Хілл на 49.65 км, о 06:30 UT – на 23.0 км, а о 11:45 UT – на 80.42 км.

Амплітуда зміни h_mF2 над Міллстоун Хілл на часовому інтервалі 16:00 – 19:15 UT дорівнювала 39.74 км, а над УАС – 50.2 км, тобто перевищувала амплітуду зміни h_mF2 над Міллстоун Хілл у 1.26 рази. Амплітуда зміни h_mF2 над Міллстоун Хілл на часовому інтервалі 00:15 – 23:45 UT дорівнювала 103.61 км, а над УАС – 153.3 км, тобто перевищувала амплітуду зміни над Міллстоун Хілл у 1.48 рази.

Нами також було оцінено параметри хвильових процесів над обома станціями. Для цього використовувалися часові залежності відносних варіацій f_oF2 і h_mF2 (δ_f і δ_h , відповідно), для яких застосовувався спектральний аналіз на основі адаптивного перетворення Фур'є (АПФ) [11, 12]. Значення δ_f і δ_h розраховувалися за наступними виразами:

$$\delta_f = \frac{f_oF2 - \overline{f_oF2}}{\overline{f_oF2}}, \quad \delta_h = \frac{h_mF2 - \overline{h_mF2}}{\overline{h_mF2}},$$

де $\overline{f_oF2}$ і $\overline{h_mF2}$ є згладженими на часовому інтервалі 180 хв методом найменших квадратів третього порядку варіації f_oF2 і h_mF2 , тобто трендові залежності цих параметрів. Цей метод знаходження тренду має переваги над загально поширеним методом ковзного середнього, оскільки дозволяє відстежувати аперіодичні збільшення або зменшення сигналу, які можуть привести до виявлення хибних коливань після застосування спектрального аналізу [13].

Результати порівняння часових варіацій δ_f над обома пунктами спостережень, а також

періодів і часових локалізацій переважаючих коливань представлені на рис. 4. З цього рисунку видно, що амплітуда варіацій δ_f була приблизно вдвічі більшою над УАС, ніж над Міллстоун Хілл. Над Міллстоун Хілл мало місце яскраво виражене коливання з періодом T близько 90 хв і тривалістю біля двох періодів, що виникло десь через 1 – 2 години після локального сходу Сонця.

Над УАС спостерігався потужний коливальний процес з початковим $T \approx 120$ хв, що розпочався з локальним сходом Сонця (о 14:29 UT) й тривав близько п'яти годин. При цьому, період коливання поступово зменшувався до значення біля 75 хв. Слід відзначити, що над Міллстоун Хілл в цей же проміжок часу теж мало місце коливання δ_f зі значно меншою амплітудою, але дуже близькими тривалістю та початковим періодом (біля 110 хв), який так само поступово зменшувався з плином часу до значення 70 – 75 хв (див. рис. 4б і 4г).

На рис. 5 показано результати порівняння часових варіацій δ_h і параметрів переважаючих коливань. Амплітуди відносних змін h_mF2 були близькими. Як видно з періодограм та енергограм, періоди переважаючих коливань над Міллстоун Хілл і УАС склали 80 і 110 хв, відповідно. Отже, коливання f_oF2 і h_mF2 з найбільшою енергією мали дуже близькі характеристики над кожним з пунктів спостереження.

Слід також відзначити значну схожість періодограм варіацій δ_h , що спостерігались над магнітоспряженими регіонами. Так і над Міллстоун Хілл, і над УАС можна виділити три групи коливань, що мали періоди 60, 80 і 110 хв, відповідно, і були присутні майже в одні й ті ж самі інтервали часу над обома пунктами (див. рис. 4б і 4г).

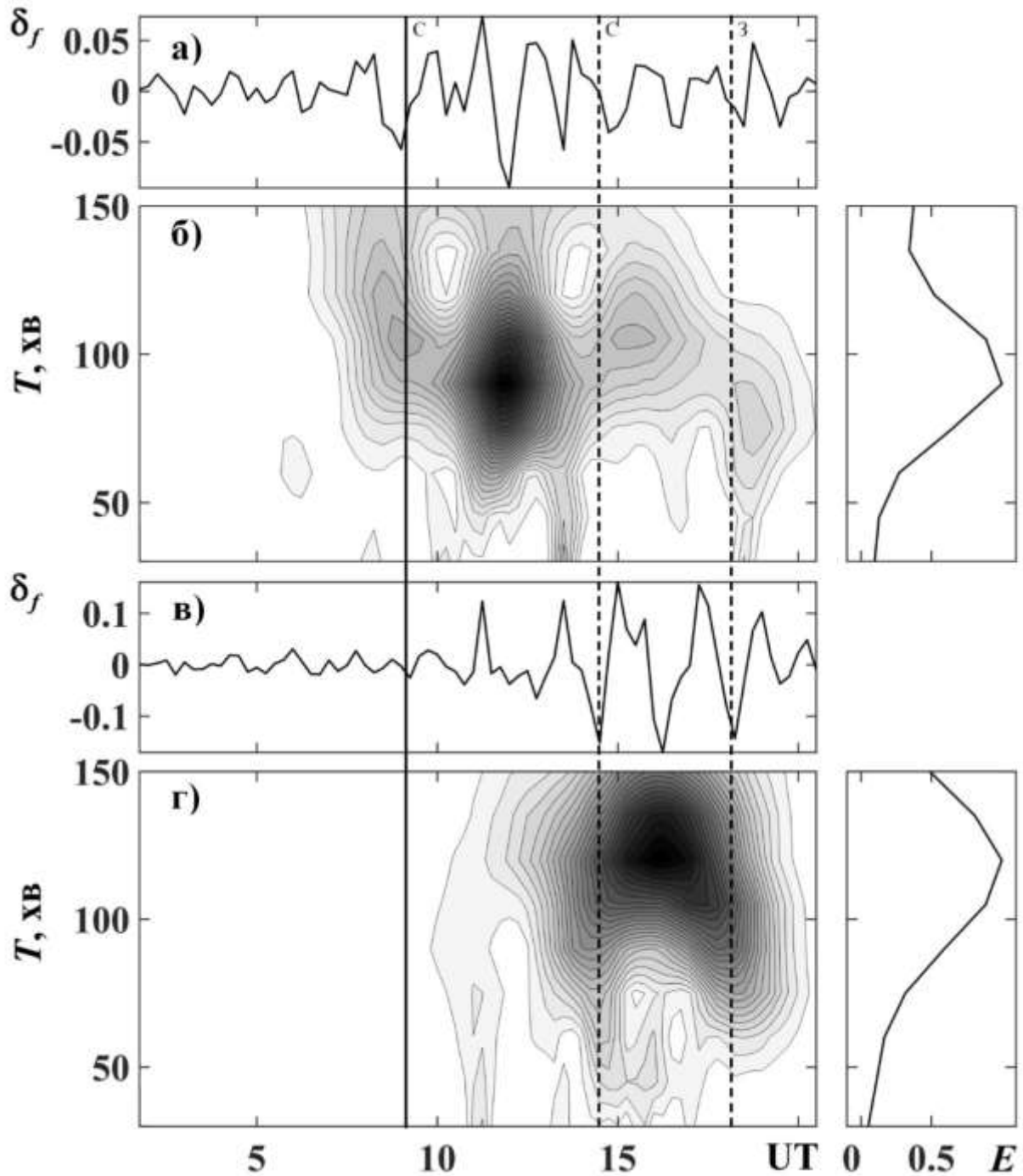


Рис. 4. Порівняння відносних варіацій f_oF2 (а, в) та їх періодограмм, отриманих з використанням АПФ (б, г) над Міллстоун Хілл (а, б) і УАС (в, г) для 10.06.2017 р. Також наведено відповідні енергограми (Е). Тут і далі періодограми представлено у відносних одиницях у вигляді градацій сірого кольору, де білий колір відповідає значенню 0, а чорний – значенню 1 (нормування на максимальне значення спектральної густини потужності).

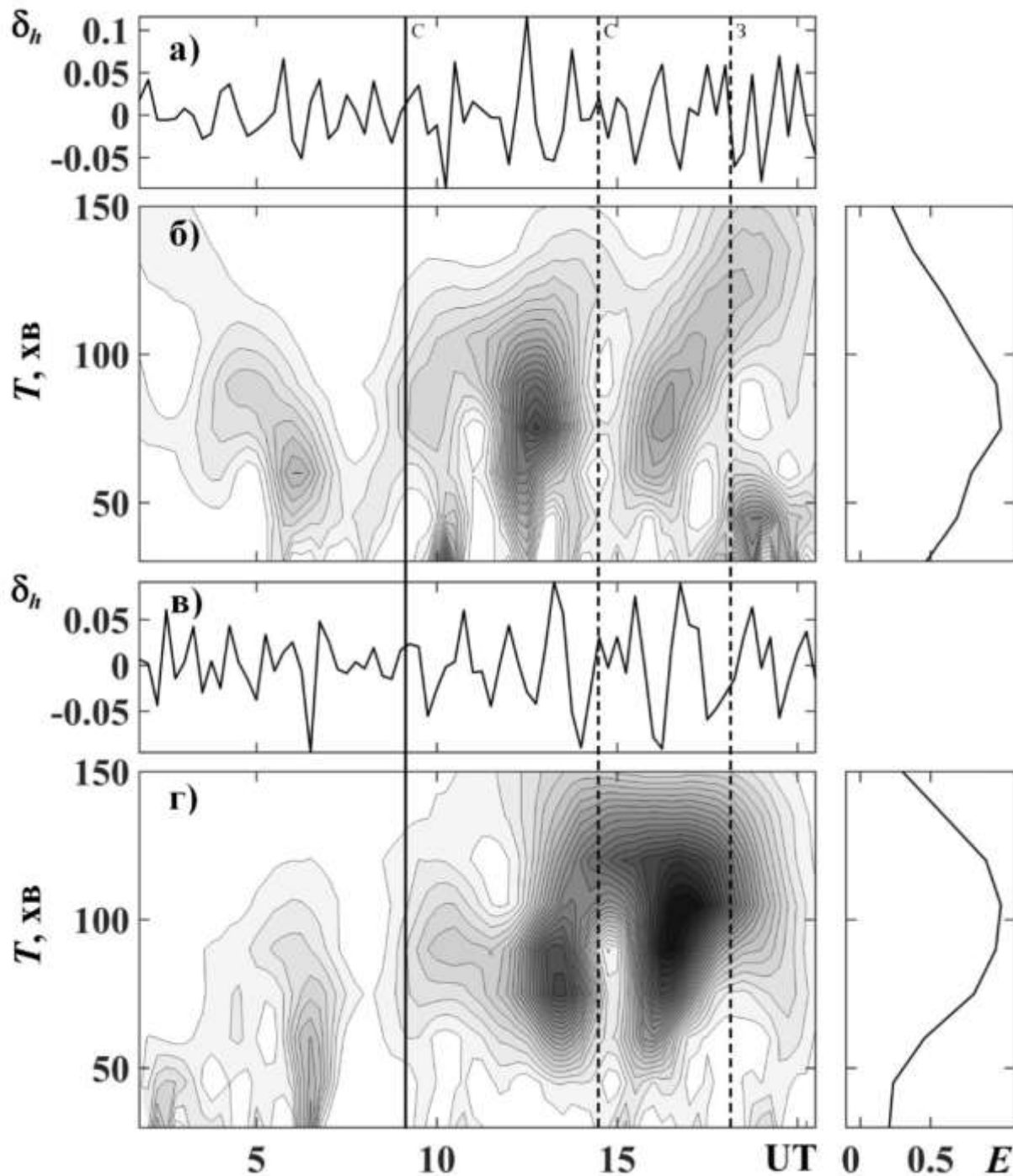


Рис. 5. Те ж, що й на рис. 4, для відносних варіацій $h_m F_2$.

5. Обговорення

З рис. 2 видно, що 10.06.2017 р. значення $f_o F_2$ над Міллстоун Хілл перевищували значення $f_o F_2$ над УАС на всьому часовому інтервалі спільних спостережень 00:15 – 23:45 UT. Таку відмінність в значеннях критичних частот

частково можна пояснити сезонними особливостями поведінки іоносфери. Оскільки в пункті УАС була зима, а в Міллстоун Хілл – літо, середньодобова швидкість іоноутворення над Міллстоун Хілл була вище. Ще однією причиною відмінностей в $f_o F_2$ є те, що у високих

широтах, де розташована УАС швидкість рекомбінації іонів O^+ є більшою, ніж у середніх широтах, що й призвело до більш суттєвого зменшення концентрації електронів у максимумі F2 шару, а значить, і зменшення критичної частоти.

Варіації частоти f_oF2 над УАС у нічні години є яскравою демонстрацією значного впливу магнітоспряженого регіону в літній півкулі на локальну зимову іоносферу.

Зростання f_oF2 після $\sim 03:00$ UT, що вочевидь викликане посиленням потоку іонів H^+ з плазмосфери в нічну іоносферу, є типовим явищем для локальної зими. В червні потік спрямований переважно в південну півкулю через те, що тиск плазми на північному кінці плазмосферної трубки навіть вночі є вищим, ніж на південному її кінці. Цікавою особливістю є те, що нічне зростання f_oF2 над УАС почалося не після заходу Сонця над УАС (18:01 UT), а після заходу Сонця над Міллстоун Хілл. До цього моменту північна півкуля була джерелом фотоелектронів, які нагрівали плазму також і на південному кінці плазмосферної трубки, призводячи до двох ефектів, що спричинили зменшення концентрації електронів в максимумі шару F2. По-перше, збільшувалася висота однорідної атмосфери плазми, що привело до перерозподілу плазми за висотою та відповідного зменшення f_oF2 . По-друге, більш висока температура плазми та збільшення її концентрації в зовнішній іоносфері, викликане згаданим перерозподілом плазми, збільшили тиск плазми на кінці плазмосферної трубки, заважаючи виникненню сильного низхідного потоку іонів H^+ .

Суттєве зменшення f_oF2 , яке спостерігалось над УАС одразу після сходу Сонця над Міллстоун Хілл, пов'язане з тими самими ефектами, викликаними постачанням

фотоелектронів з магнітоспряженого регіону: нагріванням та розширенням плазми і послабленням низхідного потоку іонів H^+ .

Цікавим результатом спостережень є виявлення значного зростання частоти f_oF2 над УАС протягом двох годин перед місцевим сходом Сонця (з 12:30 UT до 14:30 UT). Найбільш імовірним поясненням цього ефекту є зменшення кількості фотоелектронів, які сягають південного кінця плазмосферної трубки, внаслідок зростання концентрації плазми в північній півкулі. Це призвело до охолодження плазми над УАС і, в результаті, до виникнення значного низхідного потоку іонів H^+ . На додачу до цього, плазмосферний резервуар заповнювався протягом періоду, що розглядається, з північного кінця трубки. Це додатково посилило потік іонів H^+ , спрямований в південну півкулю.

Значне зменшення h_mF2 , що мало місце над обома пунктами спостережень було викликане переходом від нічних до денних умов (див. рис. 3). В інтервалі часу 01:30 – 09:00 UT (нічні умови в Міллстоун Хілл і на УАС) значення h_mF2 над УАС були більше ніж над Міллстоун Хілл, що може бути обумовлено сезонними відмінностями термосферної циркуляції та різницею у поведінці параметрів іоносфери у Північній і Південній півкулях [14]. Перевищення цих значень в інтервалі часу 09:00 – 14:30 UT очевидно пов'язане з тим, що на УАС ще були нічні умови, в той час як в магнітоспряженій області вже настав день.

Близькі значення характеристик коливань, отриманих за часовими варіаціями двох незалежних параметрів (f_oF2 і h_mF2) свідчать про те, що ці коливання не з'явилися випадково, а, скоріш за все, є проявами хвильових процесів у іоносфері – рухомих іоносферних збурень (PI3), викликаних проходженням атмосферних гравітаційних

хвиль (АГХ). З рис. 4 і 5 видно, що переважаючі коливання спостерігалися близько або після сходу Сонця над обома пунктами, тобто вказують на АГХ, згенеровані проходженням локальних ранкових СТ. Джерела таких АГХ можуть знаходитися або в стратосфері та мезосфері, де виникають значні температурні градієнти через нагрівання озону та молекулярного кисню (генеруються лише середньомасштабні АГХ), або між іоносферними шарами F1 і F2, де мають місце різкі градієнти концентрації електронів та іонів під час зміни інтенсивності сонячного випромінювання (генеруються як середньомасштабні, так і великомасштабні АГХ). Оскільки значення періодів виявлених нами хвиль (90 і 75 – 120 хв) вказують на те, що АГХ були великомасштабними [15], ймовірним джерелом генерації залишається лише друга область. Характеристики (відносні амплітуди, періоди, тривалості) таких АГХ суттєво залежать від географічного положення, сезону, рівнів сонячної та магнітної активностей.

Наявність коливань з близькими періодами та часовою локалізацією одночасно над обома пунктами спостережень вказує на можливість взаємозв'язку між хвильовими процесами над магнітоспряженими регіонами, що здійснюється за допомогою магнітогідродинамічних (МГД) хвиль. Про виявлення РІЗ, що мають МГД походження, і викликані проходженням СТ над магнітоспряженим регіоном повідомлялося у роботі [16]. Дослідження, проведені низкою авторів [8, 16], показують, що такі збурення, скоріш за все, переносяться повільними МГД (ПМГД) хвилями. При цьому, існують щонайменше два механізми перетворення енергії руху плазми у енергію варіацій геомагнітного поля.

По-перше, геомагнітні коливання можуть генеруватися на висотах динамо-області іоносфери через модуляцію АГХ параметрів атмосфери та іоносфери, що призводить до модуляції тензора провідності іоносферної плазми і, в кінцевому підсумку, густини іоносферних струмів [7, 17]. Поширення АГХ призводить також до виникнення періодичного стороннього струму в цій області через значну різницю між частотою зіткнень нейтральних частинок з електронами та нейтральних частинок з іонами [17]. Наявність промодульованого та стороннього струмів призводить до генерації магнітних коливань та їх поширення у вигляді ПМГД хвиль.

По-друге, під час проходження ранкового (вечірнього) СТ відбувається швидке нагрівання (охолодження) нижньої іоносфери, що спричиняє значний потік плазми, спрямований вгору (вниз) вздовж геомагнітних ліній. Цей потік викликає стискання та нагрівання (розрідження та охолодження) плазми на вершині плазмосферної трубки, що й призводить до генерації ПМГД хвиль [18].

Важливо відзначити, що низька сонячна та слабка магнітна активності в день спостережень стали сприятливим фактором для знаходження описаних в цій роботі ефектів, оскільки вплив нестационарних процесів на Сонці та в магнітосфері Землі, що міг завадити виявленню та правильній інтерпретації отриманих результатів, був незначним.

6. Висновки

1. Проведено спостереження параметрів іоносферної плазми в максимумі F2 шару іоносфери одночасно на обох кінцях геомагнітної трубки під час низької сонячної та слабкої магнітної активностей з

використанням даних іонозондів. Показано, що значення критичної частоти F2 шару над Міллстоун Хілл перевищували її значення над УАС протягом всієї доби вимірювань, що викликано сезонними та широтними особливостями пунктів вимірювання.

2. За варіаціями f_oF2 над УАС у нічні години виявлено значний вплив магнітоспряженого регіону в літній півкулі на локальну зимову іоносферу. Найбільш характерним проявом цього впливу є контроль варіацій f_oF2 над УАС не місцевим заходом (сходом) Сонця, а заходом (сходом) Сонця над Міллстоун Хілл.

3. Показано, що значне зменшення висоти максимуму шару F2 h_mF2 , яке мало місце над обома пунктами спостережень, було викликане переходом від нічних до денних умов. Більші значення h_mF2 над УАС протягом ночі в обох регіонах обумовлені сезонними відмінностями термосферної циркуляції та різницею у поведінці параметрів іоносфери у Північній і Південній півкулях.

4. Виявлено атмосферні гравітаційні хвилі, викликані проходженнями локальних ранкових сонячних термінаторів, що мали іоносферний прояв у вигляді рухомих іоносферних збурень з періодами близько 90 і 75 – 120 хв над Міллстоун Хілл і УАС, відповідно. Найбільш ймовірна область генерації таких хвиль розташована між іоносферними шарами F1 і F2, де мають місце різкі градієнти концентрації електронів та іонів під час зміни інтенсивності сонячного випромінювання.

5. Підтверджено можливість взаємозв'язку між хвильовими процесами над магнітоспряженими регіонами, що здійснюється за допомогою магнітогідродинамічних хвиль. Такі збурення, скоріш за все, переносяться

повільними МГД хвилями, які генеруються як на висотах динамо-області іоносфери через модуляцію АГХ параметрів атмосфери та іоносфери та виникнення сторонніх струмів, так і на вершині плазмосферної трубки, де відбувається різке стискання та нагрівання або розрідження та охолодження плазми під час проходження сонячного термінатору.

Автори вдячні О. В. Богомазу за допомогу в підготовці графічного матеріалу. Дослідження авторів з Інституту іоносфери виконано в рамках науково-дослідницьких робіт, що фінансуються Міністерством освіти і науки України та Національною академією наук України (номери держреєстрації 0117U004133, 0120U100557, 0120U102038). Робота авторів з Радіоастрономічного інституту НАН України також виконувалась в рамках низки національних проєктів (номери держреєстрації: 0116U000035, 0120U104223, 0120U101273).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yigit E. Atmospheric and Space Sciences: Ionospheres and Plasma Environments: Volume 2. Springer, 2017.
2. Abdu M. A, Pancheva D. (eds), Bhattacharyya A. (co-ed) Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. Springer Science & Business Media. 2011. V. 2.
3. Bothmer V., Daglis I. A. Space weather: physics and effects. Springer Science & Business Media, 2007.
4. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космична наука і технологія. 2003. Т. 9. №. 5/6. С. 96 – 105.
5. Черногор Л. Ф. Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая система // Журнал проблем эволюции открытых систем. 2011. Т. 1. №. 13. С. 22 – 66.
6. Chernogor L. F. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes // International

- journal of remote sensing. 2011. V. 32. No. 11. P. 3199 – 3218.
7. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс, К., Молдвин, М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9. № 2. С. 130 – 151.
 8. Черногор Л. Ф. Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие движению солнечного терминатора через магнитосопряженную область // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17. № 1. С. 57 – 66.
 9. Broom S. M. A new ionosonde for Argentine Islands ionospheric observatory, Faraday Station // British Antarctic Survey Bulletin. 1984. V. 62. P. 1 – 6.
 10. Reinisch B. W., Haines D. M., Kuklinski W. S. The new portable Digisonde for vertical and oblique sounding. // Proceedings of the AGARD EPP 50th Symposium. London, England. 1 – 5 June 1992. V. 11. P. 1 – 11.
 11. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т. 10. № 10. С. 39 – 50.
 12. Chernogor L. F. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results // Geomagnetism and Aeronomy. 2008. Т. 48. № 5. С. 652 – 673.
 13. Панасенко С. В., Мамедов А. О. Обнаружение перемещающихся ионосферных возмущений в квазипериодических вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. 2013. № 33 (1066). С. 12 – 18.
 14. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – Наука, 1988.
 15. Hunsucker R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // Reviews of Geophysics. 1982. V. 20. No. 2. P. 293 – 315.
 16. Afraimovich E. L. et al. MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophysical research letters. 2009. V. 36. No. 15. L15106.
 17. Черногор Л. Ф., Шамота М. А. Геомагнитные пульсации вблизи г. Харькова, сопутствовавшие прохождению солнечного терминатора. 2. Результаты статистического анализа // Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 6. С. 14 – 19.
 18. Huba J. D., Joyce G., Fedder J. A. Ion sound waves in the topside low latitude ionosphere // Geophysical research letters. 2000. V. 27. No. 19. P. 3181 – 3184.

REFERENCES

1. Yiğit, E. (2017). Atmospheric and Space Sciences: Ionospheres and Plasma Environments: Volume 2. Springer.
2. Abdu M. A, Pancheva D. (Eds), & Bhattacharyya A. (Co-ed) (2011). Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
3. Bothmer, V., & Daglis, I. A. (2007). Space weather: physics and effects. Springer Science & Business Media.
4. Chernogor, L. F. (2003). The Earth–atmosphere–geospace environment system as an opened dynamic nonlinear one. Space Science and Technology, 9(5/6), 96–105.
5. Chernogor, L. F. (2011). Earth–Atmosphere–Ionosphere–Magnetosphere as Opened Dynamic Nonlinear Physical System. Journal of problems of evolution of open nonequilibrium dynamic systems, 1(13), 22–66.
6. Chernogor, L. F. (2011). The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. International journal of remote sensing, 32(11), 3199–3218.
7. Yampolski, Yu. M., Zalizovski, A. V., Lytvynenko, L. N., Lizunov, G. V., Groves, K., & Moldwin, M. (2004). Variations in Antarctica and the Conjugate Region (New England) Stimulated by Cyclone Activity. Radio Physics and Radio Astronomy, 9(2), 130–151.
8. Chernogor, L. F. (2012). Geomagnetic pulsations, accompanied the solar terminator moving through magnetoconjugate region. Radio Physics and Radio Astronomy, 17(1), 57–66.
9. Broom, S. M. (1984). A new ionosonde for Argentine Islands ionospheric observatory, Faraday Station. British Antarctic Survey Bulletin, 62, 1–6.
10. Reinisch, B. W., Haines, D. M., & Kuklinski, W. S. (1992). The new portable Digisonde for vertical and oblique sounding. Proceedings of the AGARD EPP 50th Symposium, London, England, 1 – 5 June 1992, 11, 1–11.
11. Lazorenko, O. V., Panasenko, S. V., & Chernogor, L. F. (2005). Adaptive Fourier transform. Electromagnetic waves and electronic systems, 10(10), 39–50.

12. Chernogor, L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*, 48(5), 652–673.
13. Panasenko S. V., & Mamedov A. O. (2013) Detection of traveling ionospheric disturbances in quasi-periodic variations in the incoherent scatter signal power // *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. Series “Radiophysics and ionosphere”, 33 (1066), 12–18.
14. Bryunelli, B. Y., & Namgaladze, A. A. (1988). *Ionosphere Physics*. Nauka.
15. Hunsucker, R. D. (1982). Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review. *Reviews of Geophysics*, 20(2), 293–315.
16. Afraimovich, E. L., Edemskiy, I. K., Leonovich, A. S., Leonovich, L. A., Voeykov, S. V., & Yasyukevich, Y. V. (2009). MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator. *Geophysical research letters*, 36(15), L15106.
17. Chernogor, L. F., & Shamota, M. A. (2009). Geomagnetic pulsations associated with solar terminators near Kharkiv city. 2. Statistical analysis. *Space Science and Technology*, 15(6), 14–19.
18. Huba, J. D., Joyce, G., & Fedder, J. A. (2000). Ion sound waves in the topside low latitude ionosphere. *Geophysical research letters*, 27(19), 3181–3184.

Simultaneous Ionosonde Investigations of the Ionospheric F2 Layer Critical Frequency and Peak Height at Both Ends of the Geomagnetic Tube

**S. V. Panasenko¹, T. G. Zhivolup¹,
D. V. Kotov¹, 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*

Based on the results of simultaneous ionosonde observations during low solar and weak magnetic activities, a coupling was found between diurnal and quasi-periodic variations in ionospheric parameters over magnetically conjugated regions, where the Ukrainian

Antarctic Station (UAS) and Millstone Hill Observatory are located. A significant impact of the summer hemisphere on the nighttime variations of the F2 layer critical frequency f_oF2 in the magnetically conjugated region in the winter hemisphere was found. The most characteristic manifestation of this impact is the control of f_oF2 variations over the UAS not by the local sunset (sunrise), but by the sunset (sunrise) over Millstone Hill. It was found that the sunset over Millstone Hill leads to an increase in f_oF2 over the UAS, while the sunrise leads to a decrease in f_oF2 with a subsequent sharp increase. Both phenomena are associated with changes in the photoelectron flux from the northern hemisphere, corresponding changes in the electron temperature in the ionosphere above the UAS and the effect of these changes on the compression or rarefaction of the ionospheric plasma and changes in the plasmaspheric fluxes of H^+ ions. It was shown that the transition from nighttime to daytime conditions over both observation points was characterized by a significant decrease in the F2 layer peak height, and the difference in the values of this ionospheric parameter over Millstone Hill and UAS at night is due to seasonal differences in the thermospheric circulation and the difference in the behavior of the ionospheric parameters in the Northern and Southern hemispheres. Manifestations of atmospheric gravity waves, caused by the passage of local sunrise terminators, as traveling ionospheric disturbances with periods of about 90 and 75 – 120 mins over Millstone Hill and UAS, respectively, were found. These waves were most likely generated in the region located between the ionospheric F1 and F2 layers, where the sharp gradients in the electron and ion densities occur during changes in the intensity of solar radiation. It is confirmed that wave disturbances in atmospheric and ionospheric parameters can be transferred between magnetically conjugated regions by slow magnetohydrodynamic waves generated both at the heights of the ionospheric dynamo region due to the modulation of atmospheric and ionospheric parameters by atmospheric waves and the occurrence of external currents, and at the top of the plasmaspheric tube, where sharp plasma compression and heating or rarefaction and cooling occur during the passage of the solar terminator.

Key words: the ionosphere, F2 region, ionosonde measurements, geomagnetic field tube, magnetoconjugate region coupling, atmospheric gravity waves, traveling ionospheric disturbances, generation of slow magnetohydrodynamic waves.

Одновременные ионозондовые исследования вариаций критической частоты и высоты максимума слоя F2 ионосферы на обоих концах геомагнитной трубки

С. В. Панасенко¹, Т. Г. Живолуп¹,
Д. В. Котов¹, 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

³ Государственная организация
Национальный антарктический научный
центр МОН Украины, г. Киев, Украина

По результатам одновременных ионозондовых наблюдений во время низкой солнечной и слабой магнитной активностей найдена взаимосвязь между суточными и квазипериодическими вариациями параметров ионосферы над магнитосопрежженными регионами, где расположены Украинская антарктическая станция (УАС) и обсерватория Миллстоун Хилл. Обнаружено значительное влияние летнего полушария на ночные вариации критической частоты F2 слоя f_oF2 в магнитосопрежженном регионе в зимнем полушарии. Наиболее характерным проявлением этого влияния является контроль вариаций f_oF2 над УАС не местным заходом (восходом) Солнца, а заходом (восходом) Солнца над Миллстоун Хилл. Установлено, что заход Солнца над Миллстоун Хилл приводит к возрастанию f_oF2 над УАС, восход – к уменьшению f_oF2 с последующим резким увеличением. Оба феномена связаны с изменениями потока фотоэлектронов из северного полушария, соответствующими изменениями температуры электронов в ионосфере над УАС и влиянием этих изменений на сжатие или разрежение ионосферной плазмы и изменение плазмосферных потоков ионов H^+ . Показано, что переход от ночных к дневным условиям над обоими пунктами наблюдений характеризовался значительным уменьшением высоты максимума слоя F2, а различие в значениях этого ионосферного параметра над Миллстоун Хилл и УАС в ночные часы обусловлено сезонными отличиями термосферной циркуляции и различием в поведении параметров ионосферы в Северном и Южном полушариях. Обнаружены проявления атмосферных

гравитационных волн, вызванных прохождением локальных утренних солнечных терминаторов, в виде перемещающихся ионосферных возмущений с периодами около 90 и 75 – 120 мин над Миллстоун Хилл и УАС, соответственно. Эти волны, скорее всего, были сгенерированы в области, расположенной между ионосферными слоями F1 и F2, где имеют место резкие градиенты концентрации электронов и ионов во время изменения интенсивности солнечного излучения. Подтверждено, что волновые возмущения параметров атмосферы и ионосферы могут переноситься между магнитосопрежженными регионами медленными магнитогидродинамическими волнами, генерируемыми как на высотах динамо-области ионосферы из-за модуляции атмосферными волнами параметров атмосферы и ионосферы и возникновения сторонних токов, так и на вершине плазмосферной трубки, где происходит резкое сжатие и нагрев или разрежение и охлаждение плазмы во время прохождения солнечного терминатора.

Ключевые слова: ионосфера, слой F2, ионозондовые измерения, геомагнитная трубка, взаимосвязь магнитосопрежженных регионов, атмосферные гравитационные волны, перемещающиеся ионосферные возмущения, генерация медленных магнитогидродинамических волн.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2020