

УДК 551.510.535, 621.396

ДОСЛІДЖЕННЯ ІОНОСФЕРИ НАД АНТАРКТИДОЮ У ПЕРІОДИ ЗІ СПОКІЙНОЮ КОСМІЧНОЮ ПОГОДОЮ: РЕЗУЛЬТАТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ 14–24 ВЕРЕСНЯ 2020 Р.

М. О. Шульга¹, О. В. Богомаз¹, Д. В. Котов¹, Т. Г. Живолуп¹, О. В. Колосков^{2,3},
А. В. Залізовський^{2,3,4}, В. М. Лисаченко²

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

⁴Центр космічних досліджень Польської академії наук, м. Варшава, Польща

e-mail: marina.shulga23@gmail.com

Представлено результати експериментальних досліджень варіації параметрів максимуму іонізації іоносфери (h_mF2 та N_mF2) над Українською антарктичною станцією “Академік Вернадський” в магнітоспокійних умовах. Приведено результати порівняльного аналізу результатів спостережень та прогнозів моделі іоносфери International Reference Ionosphere-2016. Мета роботи: дослідження часових варіацій двох ключових параметрів іоносфери – висоти максимуму області F2 іоносфери та концентрації електронів на цій висоті – під час дуже спокійної космічної погоди із використанням даних вертикального зондування іоносфери, що отримані на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”, та порівняння результатів спостережень з модельними значеннями. Методи і засоби: Часові залежності висоти області F2 іоносфери та концентрація електронів на цій висоті отримано шляхом реконструкції висотних профілів концентрації електронів із іонограм, які одержано за допомогою іонозонду, встановленого на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”. Для порівняння з результатами спостережень використовувалися добові варіації h_mF2 та N_mF2 , які розраховувалися за допомогою низки субмоделей моделі IRI-2016. Результати: Виявлено, що для антарктичного регіону опція моделі IRI-2016 для висоти максимуму області F2 іоносфери SHU-2015 дає кращий прогноз h_mF2 протягом всього досліджуваного періоду у порівнянні з моделлю AMTB-2013. Моделі концентрації електронів (URSI, CCIR) в цілому добре відтворюють спостережувані варіації N_mF2 у періоди відсутності нестандартних проявів космічної погоди, які можливі і для спокійних умов. Приведено гіпотези щодо ймовірних причин відмінностей у експериментальних та модельних варіаціях N_mF2 . Проведено аналіз впливу геомагнітної бурі 24 вересня 2020 р. на варіації концентрації електронів N_mF2 . Висновки: Результати, отримані в даній роботі, демонструють особливості стану системи іоносфера-плазмосфера над антарктичним півостровом в умовах дуже спокійної космічної погоди та дозволяють оцінити прогностичні можливості сучасних міжнародних довідкових моделей іоносфери. Нові знання про особливості варіацій концентрації електронів в іоносфері в магнітоспокійних умовах над антарктичним регіоном мають практичну

цінність для фахівців, які займаються дослідженнями навколоземного космічного середовища, зокрема, у високих широтах, а також працюють над корекцією глобальних моделей іоносфери.

Ключові слова: концентрація електронів, висота максимуму області F2 іоносфери, іонозонд, спокійна космічна погода, моделі іоносфери, низхідні потоки плазми.

1. Вступ

Традиційно найбільш цікавими для дослідників навколоземного плазмового середовища є ефекти збуреної космічної погоди в [1–2]. Слід, однак, зазначити, що спокійна космічна погода (а тим більше, тривалі періоди зі спокійною космічною погодою) є не менш рідкісним станом навколоземного космосу, ніж сильні збурення. Як наслідок, міжнародні емпіричні моделі, наприклад, концентрації електронів [3], побудовані на результатах спостережень, одержаних протягом збурених періодів, не завжди можуть ефективно застосовуватися в умовах спокійної космічної погоди.

Метою роботи є дослідження часових варіацій двох ключових параметрів іоносфери – висоти максимуму області F2 іоносфери та концентрації електронів на цій висоті – під час дуже спокійної космічної погоди із використанням даних вертикального зондування іоносфери (ВЗІ), що отримані на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський” (УАС), та порівняння результатів спостережень з модельними значеннями.

2. Засоби та методи

Для дослідження було обрано період поблизу осіннього рівнодення 2020 року: 14–24 вересня. Сонячна активність протягом досліджуваного періоду була низькою та стабільною (значення індексу $F_{10.7\text{daily}}$ знаходилися в діапазоні 69–75 с.п.о.). Геомагнітна обстановка була відносно спокійною (планетарний індекс геомагнітної

активності K_p не перевищував значення 4), крім 24 вересня 2020 р., коли K_p сягав значення 6–. На рис. 1 наведено часові варіації основних параметрів сонячного вітру (концентрація частинок сонячного вітру N_{sw} та швидкість V_{sw}) та індексів геомагнітної та сонячної активності, що отримані з ресурсів The Space Physics Data Facility (SPDF) OMNIWeb Service – NASA OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>), World Data Center for Geomagnetism (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>) та The Canadian High Arctic Ionospheric Network (https://chain-new.chain-project.net/echaim_downloads/apf107.dat).

Протягом більшої частини досліджуваного періоду швидкість сонячного вітру V_{sw} не перевищувала 350 км/с, індекс SYM/H змінювався в діапазоні ± 20 нТл, що свідчить про відсутність будь-яких значних збурень кільцевого струму. Зональна компонента магнітосферного електричного поля IEF_{E_y} флюктувала від -2 мВ до $+2$ мВ у магнітоспокійних умовах (14–23 вересня 2020 р.), та від -4 мВ до $+4$ мВ в слабозбурених умовах 24 вересня 2020 р.

Інструментом для дослідження іоносфери над антарктичним півостровом був іонозонд IPS-42, встановлений на УАС ($65^{\circ}15'$ півд. ш., $64^{\circ}15'$ зх. д.). Він є високоточним дослідницьким обладнанням, що було розроблено й виготовлено в Австралії [4]. Потужність імпульсу, що випромінюється передавачем іонозонду, 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. Темп реєстрації іонограм – одна іонограма кожні 15 хв [5].

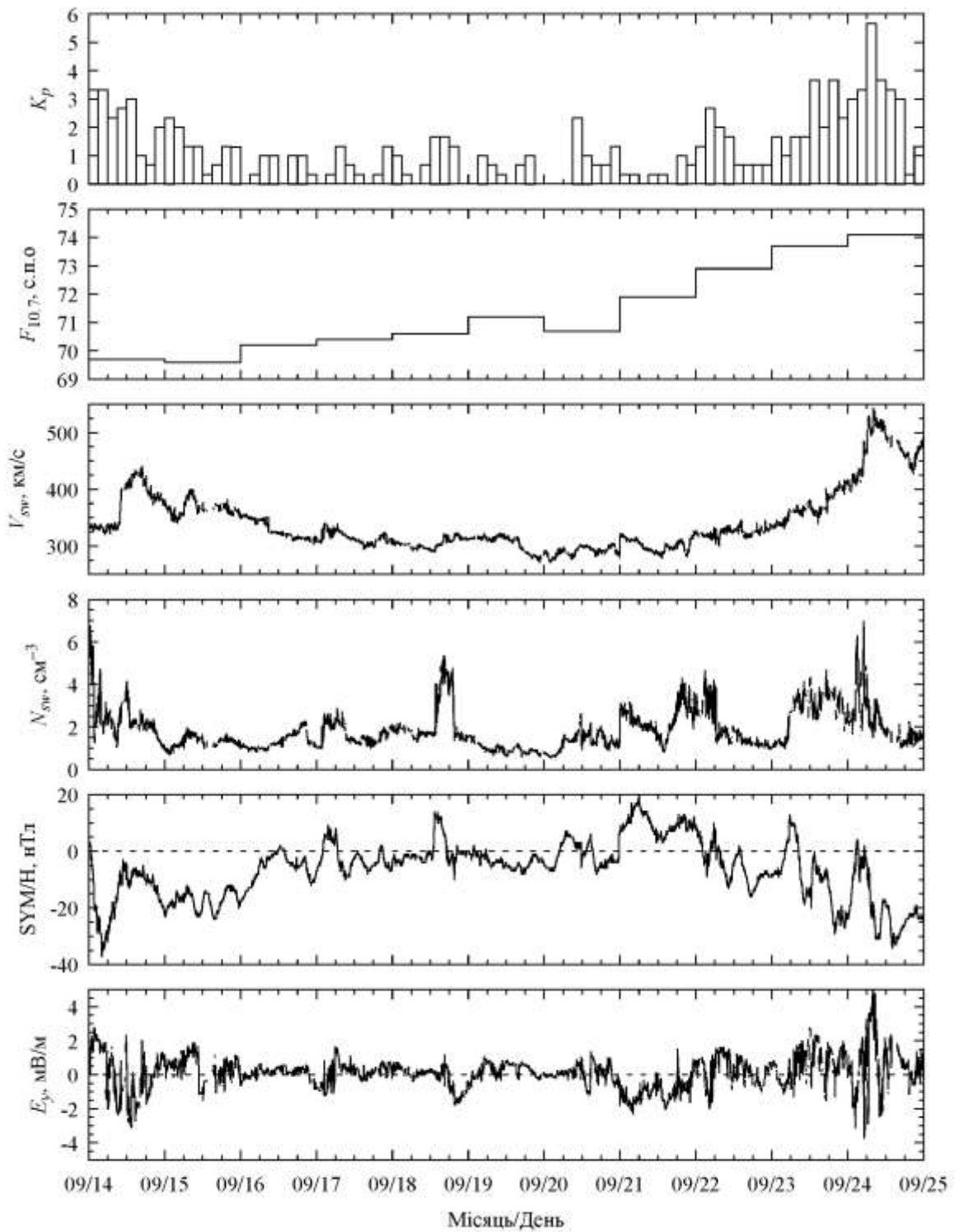


Рис. 1. Варіації зональної компоненти магнітосферного електричного поля E_y , концентрації частинок сонячного вітру (N_{sw}), швидкості (V_{sw}) сонячного вітру та $F_{10.7}$, K_p , SYM/H індексів, отримані протягом 14–24 вересня 2020 р. Час наведено за UT.

Інтерпретація іонограм виконувалася вручну у програмі IonogramViewer2 [6] із використанням рекомендацій URSI [7]. Реконструкція профілів концентрації електронів проводилася в програмі NHPC [8]. Коректність цього способу отримання висотних профілів концентрації електронів було перевірено за допомогою методу некогерентного розсіяння для Європейського регіону (м. Харків) [9].

Для порівняльного аналізу результатів спостережень та модельних значень використовувалася міжнародна модель іоносфери International Reference Ionosphere-2016 (IRI-2016). Загальний огляд та інформація про останні модифікації цієї моделі представлено в [10]. Для обчислень електронної концентрації в максимумі області F2 іоносфери (N_mF2) використовувалися такі опції моделі IRI-2016: Comité Consultatif International pour la Radio (CCIR) [11] та Union Radio Scientifique Internationale (URSI) [12]. Обидві моделі використовують подібне представлення середньомісячних добових варіацій f_oF2 (N_mF2), що спостерігаються всесвітньою мережею іонозондів, але з іншою схемою інтерполяції для районів океану. Для обчислення висоти максимуму іонізації іоносфери h_mF2 використовувалися опції SHU-2015 [13] та AMTB-2013 [14], які засновані на даних супутникових спостережень (COSMIC, GRACE та CHAMP) та даних станцій ВЗІ мережі Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO), відповідно.

3. Результати експериментальних досліджень та обговорення

На рис. 2 представлено добові варіації параметрів максимуму іонізації іоносфери h_mF2 та N_mF2 , що були розраховані із

іонограм, отриманих за допомогою іонозонду УАС для періоду 14–24 вересня 2020 р., та відповідні варіації, обчислені за допомогою міжнародної моделі іоносфери IRI-2016.

Добре видно, що варіації h_mF2 над УАС мали характер, притаманний спокійним умовам, крім 24 вересня 2020 р., коли спостерігалася позитивна фаза іоносферної бурі (близько 14:00 UT), що призвела до збільшення концентрації N_mF2 на ~50% у порівнянні з відповідним часом для усередненого по 5-ти магнітоспокійним дням значення N_mF2 . Аналіз впливу геомагнітної бурі 24 вересня 2020 р. на варіації параметрів h_mF2 та N_mF2 над УАС в даній роботі буде розглянуто окремо.

Порівняльний аналіз розрахунків за даними ВЗІ результатів h_mF2 з модельними значеннями, показав наступне. Модель SHU-2015 в цілому дуже добре описує отримані експериментальним шляхом варіації h_mF2 як у денні так і в нічні години протягом майже всього досліджуваного періоду. Найменші відхилення спостерігаються в період 16–19 вересня 2020 р., коли модель SHU-2015 в нічні години недооцінювала значення h_mF2 на ~20 км.

Висота максимуму іонізації, яку ми отримуємо при використанні моделі AMTB-2013, є значно ближчою до актуальних значень висоти максимуму в нічні години для магнітоспокійного періоду (15–19 вересня 2020 р.), але 20-го, 21-го та 23-го вересня 2020 р. модель переоцінює значення h_mF2 на ~20 км. Можливим поясненням таких відмінностей між модельними та експериментальним значеннями є те, що у збурені періоди швидкість нейтрального вітру, яка зазвичай направлена від полюса до екватора, зменшилась, що призвело до послаблення підйому h_mF2 в нічні години. Модель AMTB-2013 це зменшення не відтворила, оскільки варіації h_mF2 в IRI не залежать від геомагнітної активності. В той же

час модель AMTB-2013 суттєво (на ~40 км) іоносфера над УАС в денні години завищує значення висоти максимуму іонізації в розташовується нижче, ніж це впливає з денний час. Можна стверджувати, що прогнозів моделі AMTB-2013.

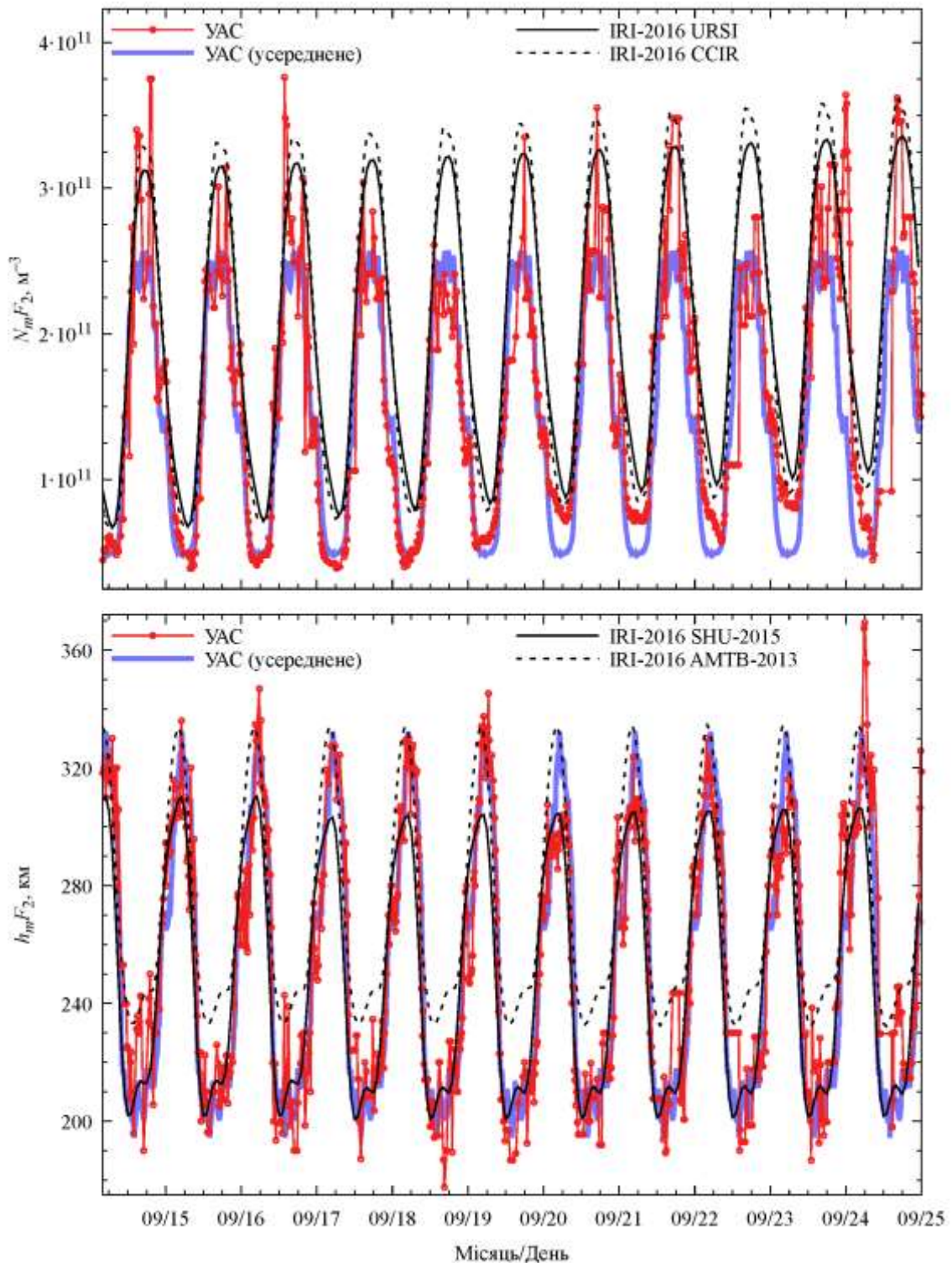


Рис. 2.Добові варіації концентрації електронів (верхня панель) та висоти максимуму області F2 іоносфери (нижня панель) в період 14–24 вересня 2020 р. Час наведено за UT.

Під час збуреного періоду 24 вересня 2020 р. близько 14:00 UT неможливо визначити, яка з моделей краще відтворює реальну картину поведінки висоти максимуму області F2 іоносфери – спостережувана варіація h_mF2 знаходиться між варіаціями, отриманими за допомогою моделей SHU-2015 та AMTB-2013. Тут також варто зазначити, що так як варіації h_mF2 в IRI не залежать від індексів геомагнітної активності, модель може відслідковувати лише рівень іонізації нейтральної атмосфери, а не варіації висоти максимуму області F2 іоносфери внаслідок впливу електричного поля чи динаміки нейтрального вітру.

Для варіацій N_mF2 порівняльний аналіз експериментальних даних і прогнозів моделей концентрації електронів (URSI та CCIR) показав, що розглянуті моделі в більшості випадків коректно розраховують значення концентрації електронів в області F2. У той же час, спостерігаються незначні відмінності між результатами спостережень та моделювання в денні години 17-го, 18-го та 22-го вересня 2020 р., коли модельні значення N_mF2 перевищують експериментальні приблизно в 1.2 рази. Така різниця у варіаціях експериментальних та модельних значень N_mF2 може бути пов'язана з тим, що моделі концентрації електронів, побудовані на результатах спостережень, одержаних протягом збурих періодів і не можуть ефективно відтворювати варіації N_mF2 в умовах спокійної космічної погоди. У нічні години в умовах дуже спокійної космічної погоди ($K_p < 2$) 15–19 вересня 2020 р. як модель URSI, так і CCIR демонструють завищення значень параметру N_mF2 приблизно в 1.5 рази у порівнянні з результатами спостережень. Можливим поясненням такої різниці між результатами спостережень та моделювання в нічні години є те, що моделі URSI та CCIR

не відтворюють реальну картину з імовірним частковим спустошенням магнітної силової трубки для регіону розташування УАС ($L \approx 2.75$) в період 15–19 вересня 2020 р. Таке часткове спустошення могло бути спричинене проникненням електричного поля магнітосферного походження напередодні 14 вересня 2020 р., що в свою чергу призвело до ослабленого потоку плазми із плазмосфери в іоносферу в нічні години наступні 5 діб. Як результат, спостерігаються низькі значення N_mF2 протягом цього періоду. Починаючи з 20 вересня 2020 р. геомагнітна силова трубка заповнилась, потоки плазми в іоносферу посилювались, і, як результат, у нічні години 20–23 вересня 2020 р. ми спостерігаємо збільшення значень електронної концентрації N_mF2 приблизно в 1.5 рази.

Додатково було проведено аналіз впливу геомагнітної бурі 24 вересня 2020 р. на варіації N_mF2 над УАС, який дозволив виявити, що спостережувані збільшення значень N_mF2 в денні години можуть бути пов'язані з підйомом висоти максимуму іонізації h_mF2 внаслідок посилення вертикального переносу плазми (рис. 2, нижня панель). Це посилення могло бути спричинено проникненням електричного поля магнітосферного походження (positive IEF_{E_y}) (рис. 1) або змінами горизонтальної термосферної циркуляції (розігрів атмосфери у високих широтах та відповідне збільшення тиску призводять до генерації поривів нейтрального вітру, які спрямовані від полюса до екватора та протидіють денній циркуляції, спрямованій до полюсу, що істотно послаблює опускання іоносфери вдень). Подібна картина відгуку h_mF2 на геомагнітне збурення проаналізована в роботі [15].

4. Висновки

У роботі отримано наступні результати:

1. Проведено аналіз добових варіацій параметрів максимуму іонізації іоносфери h_mF2 та N_mF2 над антарктичним регіоном під час дуже спокійної космічної погоди, отриманих із використанням даних іонозонду, встановленого на УАС.

2. Проведено порівняльний аналіз результатів спостережень та прогнозів моделі IRI-2016. Виявлено, що модель SHU-2015 забезпечує найкращу відповідність даним спостережень над УАС як у денні, так і в нічні години. У той же час модель АМТВ-2013 дає в цілому задовільні результати в нічні години, тоді як в денний час суттєво (на ~ 40 км) завищує значення висоти максимуму іонізації. Можна стверджувати, що іоносфера над антарктичним півостровом в денні години розташовується нижче, ніж це випливає з прогнозів моделі АМТВ-2013.

3. Порівняльний аналіз експериментальних даних і прогнозів моделей URSI та CCIR показав, що розглянуті моделі в цілому добре відтворюють спостережувані варіації N_mF2 у періоди відсутності нестандартних проявів космічної погоди, які можливі і для спокійних умов. Так, в магнітоспокійний період 15–19 вересня 2020 р. у нічні години, обидві моделі (URSI, CCIR), демонструють завищення значень параметру N_mF2 приблизно в 1.5 рази у порівнянні з результатами спостережень. Незначні відмінності (приблизно в 1.2 рази) між результатами спостережень та моделювання спостерігаються також і в денні години 17-го, 18-го та 22-го вересня 2020 р.

4. Можливим поясненням завищення модельних значень параметру N_mF2 , у нічні години 15–19 вересня 2020 р. є те, що прогнози моделей не відтворюють реальну

картину з імовірним частковим спустошенням геомагнітної силової трубки ($L \approx 2.75$) для регіону розташування УАС. Причиною завищених модельних значень N_mF2 в денні години для 17-го, 18-го та 22-го вересня 2020 р., імовірно, є те, що моделі концентрації електронів, побудовані на результатах спостережень, одержаних протягом збурених періодів і не можуть ефективно відтворювати варіації N_mF2 в умовах спокійної космічної погоди.

5. Виявлено, що ефекти іоносферних проявів геомагнітної бурі 24 вересня 2020 р. у денні години над УАС можуть бути пов'язані з підйомом висоти максимуму іонізації h_mF2 у результаті вертикального переносу плазми, який міг бути спричинений посиленням електричним полем магнітосферного походження або змінами горизонтальної термосферної циркуляції. За результатами порівняльного аналізу неможливо визначити, яка з моделей (SHU-2015 або АМТВ-2013) краще відтворює реальну картину поведінки висоти максимуму області F2 іоносфери, оскільки варіації h_mF2 в IRI не залежать від індексів геомагнітної активності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120. P. 3175–3186. <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>
2. Obana Y., Maruyama N., Shinbori A., Hashimoto K.K., Fedrizzi M., Nosé M., Otsuka, Y., Nishitani, N., Hori T., Kumamoto, A., Tsuchiya, F., Matsuda, S., Matsuoka, A., Kasahara, Y., Yoshikawa, A., Miyoshi, Y., Shinohara, Y. Response of the ionosphere-plasmasphere coupling to the September 2017 storm: What erodes the plasmasphere so severely? *Space Weather*. 2019. Vol. 17. P. 861–876. <https://doi.org/10.1029/2019SW002168>
3. Pietrella M., Nava B., Pezzopane M., Orue Y. M., Ippolito A., Scotto C. NeQuick2 and IRI2012 models

- applied to mid and high latitudes, and the Antarctic ionosphere. *Antarctic Science*. 2017. Vol. 29, No 3. P. 265–267. <https://doi.org/10.1017/S0954102016000602>
4. Broom S.M. A new ionosonde for Argentine Islands ionospheric observatory, Faraday Station. *British Antarctic Survey Bulletin*. 1984. Vol. 62. P. 1–6. URL: http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/523821/1/bulletin62_02.pdf (дата звернення: 04.12.2020).
 5. Koloskov O.V., Kashcheyev A.S., Zalizovski A.V., Kashcheyev S.B., Budanov O.V., Charkina O.V., Pikulik I.I., Lysachenko V.M., Sopin A.O., Reznichenko A.I. New digital ionosonde developed for Ukrainian Antarctic station “Akademik Vernadsky”. *IX International Antarctic Conference dedicated to the 60th anniversary of the signing of the Antarctic Treaty in the name of peace and development of international cooperation*: зб. тез доп. міжнар. антаркт. конф., м. Київ, 14–16 трав. 2019 р., Київ, 2019. P. 170–171.
 6. Bogomaz O.V., Shulha M.O., Kotov D.V., Zhivolup T.G., Koloskov A.V., Zalizovski A.V., Kashcheyev S.B., Reznichenko A.I., Hairston M.R., Truhlik V. Ionosphere over Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station under minima of solar and magnetic activities, and daily insolation: case study for June 2019. *Український антарктичний журнал*. 2019. Vol. 2, No 19. [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.154](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.154)
 7. Piggott W.R., Rawer K. URSI handbook of Ionogram interpretation and reduction: 2nd edition. *WDC-A report UAG-23*. Boulder, 1972.
 8. Huang X., Reinisch B.W. Vertical electron density profiles from the digisonde network. *Advances in Space Research*. 1996. Vol. 18. P. 121–129. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00912-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00912-4)
 9. Bogomaz O.V., Kotov D.V., Shulha M.O., Gorobets M.V. Comparison of the F2 layer peak height variations obtained by ionosonde and incoherent scatter radar. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера*. 2019. Vol. 25, No 1350. P. 58–61.
 10. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 418–429. <https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
 11. International Radio Consultative Committee (CCIR). Atlas of Ionospheric Characteristics. *Report 340*. Geneva, 1967.
 12. Rush C., Fox M., Bilitza D., Davies K., McNamara L., Stewart F., Pokempner M. Ionospheric mapping – An update of foF2 coefficients. *Telecommunications Journal*. 1989. Vol.56. P. 179–182.
 13. Shubin V. N. Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based digisonde observations. *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56, No 5. P. 916–928. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.029>
 14. Altadill D., Magdaleno S., Torta J.M., Blanch E. Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions. *Advances in Space Research*. Vol. 52, No. 10. P. 1756–1769. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.018>
 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., and. Domnin I.F. Weak Magnetic Storms Can Modulate Ionosphere-Plasmasphere Interaction Significantly: Mechanisms and Manifestations at Mid-Latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol.124. P. 9665–9675, <https://doi.org/10.1029/2019JA027076>

REFERENCES

1. Borries, C., Berdermann, J., Jakowski, N., & Wilken, V. (2015). Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 120, 3175–3186. <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>
2. Obana, Y., Maruyama, N., Shinbori, A., Hashimoto, K. K., Fedrizzi, M., Nosé, M., Otsuka, Y., Nozomu, N., Hori, T., Kumamoto, A., Tsuchiya, F., Matsuda, S., Matsuoka, A., Kasahara, Y., Yoshikawa, A., Miyoshi, Y., & Shinohara, I. (2019). Response of the ionosphere-plasmasphere coupling to the September 2017 storm: What erodes the plasmasphere so severely? *Space Weather*. 17, 861–876. <https://doi.org/10.1029/2019SW002168>
3. Pietrella, M., Nava, B., Pezzopane, M., Orue, Y.M., Ippolito, A. & Scotto C. (2017). NeQuick2 and IRI2012 models applied to mid and high latitudes, and the Antarctic ionosphere. *Antarctic Science*. 29(3), 265–267. <https://doi.org/10.1017/S0954102016000602>
4. Broom, S.M. (1984). A new ionosonde for Argentine Islands ionospheric observatory, Faraday Station. *British Antarctic Survey Bulletin*. 62, 1–6. http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/523821/1/bulletin62_02.pdf
5. Koloskov, O.V., Kashcheyev, A.S., Zalizovski, A.V., Kashcheyev, S.B., Budanov, O.V., Charkina, O.V., Pikulik, I.I., Lysachenko, V.M., Sopin, A.O., & Reznichenko, A.I. New digital ionosonde developed for Ukrainian Antarctic station “Akademik

- Vernadsky". (2019). *Proceedings of IX International Antarctic Conference dedicated to the 60th anniversary of the signing of the Antarctic Treaty in the name of peace and development of international cooperation: Physical sciences*, Ukraine, 170–171.
6. Bogomaz, O.V., Shulha, M.O., Kotov, D.V., Zhivolup, T.G., Koloskov, A.V., Zalizovski, A.V., Kashcheyev, S.B., Reznichenko, A.I., Hairston, M.R., & Truhlik V. (2019). Ionosphere over Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station under minima of solar and magnetic activities, and daily insolation: case study for June 2019. *Ukrainian Antarctic Journal, 1* (64). [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.154](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.154).
 7. Piggott, W.R., & Rawer, K. (1972). *URSI handbook of Ionogram interpretation and reduction* (2nd ed.). (WDC-A report UAG-23). National Oceanic and Atmospheric Administration.
 8. Huang, X., & Reinisch, B.W. (1996). Vertical electron density profiles from the digisonde network. *Advances in Space Research, 18*, 121–129. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00912-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00912-4)
 9. Bogomaz, O.V., Kotov, D.V., Shulha, M.O., & Gorobets, M.V. (2019). Comparison of the F2 layer peak height variations obtained by ionosonde and incoherent scatter radar. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysic and ionosphere, 25(1350)*, 58–61.
 10. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., & Huang X. (2017). International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather, 15*, 418–429. <https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
 11. International Radio Consultative Committee (CCIR). (1967). *Atlas of ionospheric characteristics*. (Report No. 340). International Telecommunication Union.
 12. Rush, C., Fox, M., Bilitza, D., Davies, K., McNamara, L., Stewart, F., & Pokempner, M. (1989). Ionospheric mapping – An update of foF2 coefficients. *Telecommunications Journal, 56*, 179–182.
 13. Shubin, V. N. (2015). Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based digisonde observations. *Advances in Space Research, 56(5)*, 916–928. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.029>
 14. Altadill, D., Magdaleno, S., Torta, J. M., & Blanch, E. (2013). Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions. *Advances in Space Research, 52(10)*, 1756–1769. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.018>
 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. (2019). Weak Magnetic Storms Can Modulate Ionosphere-Plasmasphere Interaction Significantly: Mechanisms and Manifestations at Mid-Latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124*, 9665–9675. <https://doi.org/10.1029/2019JA027076>

Investigation of the Ionosphere over Antarctica under Quiet Space Weather Conditions: Results of Vertical Sounding of the Ionosphere September 14–24, 2020

**M. O. Shulha¹, O. V. Bogomaz¹, D. V. Kotov¹,
T. G. Zhivolup¹, O. V. Koloskov^{2,3},
A. V. Zalizovski^{2,3,4}, 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*

⁴*Space Research Center, PAS, Warsaw, Poland*

We present observational results of variations in the ionospheric parameters h_mF2 and N_mF2 over the Ukrainian Antarctic station “Akademik Vernadsky” for magnetically quiet conditions. The results of comparative analysis of observational data and the International Reference Ionosphere-2016 model predictions are presented. The main objective of this study is to investigate the temporal variations of two key ionospheric parameters – the F2 layer peak height and electron density – during very quiet space weather conditions using data of vertical sounding

of the ionosphere obtained over the Ukrainian Antarctic station “Akademik Vernadsky” and comparison the observation results with model values. *Methods:* The temporal variations of the F2 layer peak height and electron density were calculated from ionograms obtained with ionosonde installed at the Ukrainian Antarctic station “Akademik Vernadsky” with subsequent electron density profile inversion. Diurnal variations of h_mF2 and N_mF2 were calculated using a set of sub-models of the IRI-2016 model for comparison with results of observational studies. *Results:* We found that for the Antarctic region option of IRI-2016 model for the F2 layer peak height SHU-2015 provides a better fit for h_mF2 through the investigated period compare to the AMTB-2013 model predictions. Electron density models (URSI, CCIR) generally well reproduce the observed variations of N_mF2 during periods of absence non-standard manifestations of space weather, which are possible for quiet conditions too. Hypotheses regarding the possible reasons for experimental and model differences in variations of N_mF2 are discussed. The analysis of effect of geomagnetic storm on September 24, 2020 on N_mF2 variations was carried out. *Conclusions:* The obtained results demonstrate peculiarities of the state of the ionosphere-plasmasphere system over the Antarctic Peninsula under very quiet space weather conditions and provide evaluation of predictive capabilities of modern international reference ionosphere models. New knowledge about the features of electron density variations in the ionosphere for magnetically quiet conditions over the Antarctic region has practical value for specialists which are engaged in the study of the near-Earth space environment, in particular, at high latitudes, and also work on correction of global ionospheric models.

Key words: electron density, F2 layer peak height, ionosonde, quiet space weather, models of the ionosphere, downward plasma flux.

Исследование ионосферы над Антарктидой в периоды со спокойной космической погодой: результаты вертикального зондирования ионосферы 14-24 сентября 2020 г.

**М. А. Шульга¹, А. В. Богомаз¹,
Д. В. Котов¹, Т. Г. Живолуп¹,**

**А. В. Колосков^{2,3}, А. В. Зализовский^{2,3,4},
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*

⁴*Центр космических исследований Польской академии наук, г. Варшава, Польша*

Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций параметров максимума ионизации ионосферы (h_mF2 и N_mF2) над Украинской антарктической станцией “Академик Вернадский” в магнитоспокойных условиях. Приведены результаты сравнительного анализа результатов наблюдений и прогнозов модели ионосферы International Reference Ionosphere-2016. *Цель работы:* исследование временных вариаций двух ключевых параметров ионосферы – высоты максимума области F2 ионосферы и концентрации электронов на этой высоте – во время очень спокойной космической погоды с использованием данных вертикального зондирования ионосферы, полученных на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”, и сравнение результатов наблюдений с модельными значениями. Средства и методы: Временные зависимости высоты области F2 ионосферы и концентрации электронов на этой высоте получены путём реконструкции высотных профилей концентрации электронов из ионограмм, полученных с помощью ионозонда установленного на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Для сравнения с результатами наблюдений использовались суточные вариации h_mF2 и N_mF2 , которые рассчитывались с помощью ряда субмоделей модели IRI-2016. *Результаты:* Выявлено, что для антарктического региона опция модели IRI-2016 для высоты максимума области F2 ионосферы SHU-2015 даёт лучший прогноз h_mF2 в течение всего исследуемого периода по сравнению с моделью AMTB-

2013. Модели концентрации электронов (URSI, CCIR) в целом хорошо воспроизводят наблюдаемые вариации N_mF2 в периоды отсутствия нестандартных проявлений космической погоды, которые возможны и для спокойных условий. Приведены гипотезы относительно возможных причин различий в экспериментальных и модельных вариациях N_mF2 . Проведен анализ влияния геомагнитной бури 24 сентября 2020 г. на вариации концентрации электронов N_mF2 . **Выводы:** Результаты, полученные в данной работе, демонстрируют особенности состояния системы ионосфера-плазмосфера над антарктическим полуостровом в условиях очень спокойной космической погоды и позволяют оценить прогностические возможности современных

международных справочных моделей ионосферы. Новые знания об особенностях вариаций концентраций электронов в ионосфере в магнитоспокойных условиях над антарктическим регионом имеют практическую ценность для специалистов, которые занимаются исследованием околоземной космической среды, в частности, в высоких широтах, а также работают над коррекцией глобальных моделей ионосферы.

Ключевые слова: концентрация электронов, высота максимума области F2 ионосферы, ионозонд, спокойная космическая погода, модели ионосферы, нисходящие потоки плазмы.

Стаття надійшла до редакції 28.12.2020