

УДК 550.388.2

ХАРАКТЕРИСТИКИ РУХОМИХ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ НАД УКРАЇНОЮ ТА ЗАХІДНОЮ АНТАРКТИКОЮ ПІД ЧАС СИЛЬНОЇ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ ЗА ДАНИМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ

В. В. Барабаш^{1,2}, С. В. Панасенко¹, К. Д. Аксьонова³, В. М. Лисаченко³

¹ Інститут іоносфери НАН і МОН України, вул. Кирпичова, 16, м. Харків, 61001, Д-МСП, iion@kpi.kharkov.ua

² Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України, б. Шевченка, 16, м. Київ, 01601

³ Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002

Реферат. Мета роботи полягає в одержанні нової інформації про рухомі іоносферні збурення (РІЗ) над Антарктидою та Україною в період сильної геокоосмічної бурі 13 – 14 листопада 2012 р. за допомогою іонозонду Української антарктичної станції “Академік Вернадський” та радара некогерентного розсіяння Інституту іоносфери (м. Харків). **Методи.** Для виявлення і оцінки параметрів РІЗ використовувалися радіофізичні методи дистанційного радіозондування та методи системного спектрального аналізу даних. **Результати.** З метою виявлення особливостей морфології РІЗ у високих та середніх широтах проведено дослідження характеристик РІЗ над Антарктидою та Україною до, під час та після сильної геокоосмічної бурі 13-14 листопада 2012 р. Показано, що амплітуда абсолютних варіацій концентрації електронів у день бурі (14 листопада) над Антарктидою зменшилася приблизно у два рази у порівнянні з контрольним днем. Встановлено, що РІЗ присутні в обох регіонах як у спокійних умовах, так і під час геокоосмічних збурень. Над Антарктидою спостерігалися іоносферні збурення в широкому діапазоні періодів від 80 до 340 хв. В той же час над Україною їх значення, як правило, дорівнювали 60 хв і 120 – 250 хв. Для надійного відділення хвильових процесів, викликаних геокоосмічними бурями від тих, що згенеровані іншими джерелами, необхідно продовжувати спільні систематичні спостереження.

Ключові слова: іоносфера, антарктичні спостереження, дистанційне радіозондування, геокоосмічна буря, рухомі іоносферні збурення.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НАД УКРАИНОЙ И ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИКОЙ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ БУРИ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В.В. Барабаш^{1,2}, С.В. Панасенко¹, Е.Д. Аксенова³, В.Н. Лисаченко³

¹ Інститут іоносфери НАН і МОН України, г. Харків, iion@kpi.kharkov.ua

² Государственное учреждение Национальный антарктический научный центр МОН Украины, г. Киев

³ Радиоастрономический институт Национальной Академии Наук Украины, г. Харьков

Реферат. Цель работы заключается в получении новой информации про перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) над Антарктидой и Украиной в период сильной геокоосмической бури 13 – 14 ноября 2012 г. с помощью ионозонда Украинской антарктической станции “Академик Вернадский” и радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков). **Методы.** Для выявления и оценки параметров ПИВ использовались радиофизические методы дистанционного радиозондирования и методы системного спектрального анализа данных. **Результаты.** С целью выявления особенностей морфологии ПИВ в высоких и средних широтах проведены исследования характеристик ПИВ над Антарктидой и Украиной до, во время и после сильной геокоосмической бури 13 – 14 ноября 2012 г. Показано, что амплитуда абсолютных вариаций концентрации электронов в день бури (14 ноября) над Антарктидой уменьшилась примерно в два раза по сравнению с контрольным днем. Установлено, что ПИВ присутствуют в обоих регионах как в спокойных условиях, так и во время геокоосмических возмущений. Над Антарктидой наблюдались ионосферные возмущения в широком диапазоне периодов от 80 до 340 мин. В то же время, над Украиной их значения как правило равнялись 60 мин и 120 – 250 мин.

Для надежного отделения волновых процессов, вызванных геокосмическими бурями от сгенерированных другими источниками, необходимо продолжать совместные систематические наблюдения.

Ключевые слова: ионосфера, антарктические наблюдения, дистанционное радиозондирование, геокосмическая буря, перемещающиеся ионосферные возмущения.

CHARACTERISTICS OF MOVING IONOSPHERIC DISTURBANCES OVER UKRAINE AND WEST ANTARCTICA DURING THE STRONG GEOSPACE STORM ACCORDING TO DATA OF VERTICAL SOUNDING AND INCOHERENT SCATTERING

V.V. Barabash^{1,2}, S.V. Panasenko¹, K.D. Aksonova³, V.N. Lisachenko³

¹ Institute of ionosphere of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov; iion@kpi.kharkov.ua

² State Institution National Antarctic Scientific Center, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kiev

³ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov

Abstract. The aim of the work is to obtain a new information about traveling ionospheric disturbances (TIDs) over Antarctica and Ukraine during the strong geospace storm of November 13 – 14, 2012 using the ionosonde of the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station and the incoherent scatter radar of the Institute of Ionosphere (Kharkiv). **Methods.** Radiophysical technique of remote radiosensing and method of system spectral analysis of the data were used to identify and evaluate the parameters of TIDs. **Results.** In order to detect the features of the morphology of TIDs in high and medium latitudes, the studies of the characteristics of TIDs over Antarctica and Ukraine were carried out before, during and after the strong geospace storm of November 13 – 14, 2012. It is shown that the amplitude of absolute variations of the electron density over Antarctica during the day of the storm (November 14) decreased in about two times compared with the reference day. It is determined that TIDs exist in both regions both in quiet conditions and during geospace disturbances. Ionospheric disturbances over a wide range of periods from 80 to 340 min have been observed over Antarctica. At the same time, over Ukraine, their values were generally equal to 60 minutes and 120 – 250 minutes. For reliable separation of wave processes caused by geocosmic storms and generated by other sources, it is necessary to continue joint systematic observations.

Key words: ionosphere, antarctic observations, remote sensing, geospace storm, traveling ionospheric disturbances.

1. Вступ

Іоносфера є одним з основних каналів поширення радіохвиль. Вона суттєво впливає на радіохвилі в різних діапазонах частот (Альперт, 1972; Кравцов та ін., 1983). Особливу роль відіграють нестационарні процеси в іоносфері. Саме вони обмежують потенційні характеристики систем радіолокації, радіонавігації й телекомунікацій (Кравцов та ін., 1983).

Серед нестационарних процесів в іоносфері важливе місце займають квазіперіодичні (хвильові) процеси, які в іоносфері проявляють себе як рухомі іоносферні збурення (РІЗ). Їхньому дослідженню присвячена велика кількість експериментальних і теоретичних робіт (Дикий, 1969; Yen et al., 1972). Незважаючи на це, систематичне вивчення таких процесів тільки починається (див., наприклад, Бурмака та ін., 2005). Провідну роль у дослідженні хвильових процесів відіграють радіофізичні методи. До них належать методи некогерентного розсіювання, доплерівського зондування, часткових відображень, вертикального зондування тощо (Бурмака та ін., 2005; Аксенова та ін., 2016).

Для побудови моделі хвильових процесів в іоносфері потрібні безперервні спостереження в глобальних масштабах. Тому для дослідників становить інтерес спостереження тих самих подій у різних географічних точках, зокрема, у високих і середніх широтах.

Мета даної роботи – дослідження РІЗ над Антарктидою та Україною в період сильної геокоcosмічної бурі 13 – 14 листопада 2012 р.

Для оцінки характеристик РІЗ використовувалися експериментальні дані, одержані за допомогою радіофізичних методів некогерентного розсіювання та вертикального радіозондування з використанням дослідницького обладнання Національного антарктичного наукового центру (іонозонд Української антарктичної станції “Академік Вернадський”) та іоносферної обсерваторії Інституту іоносфери (радар некогерентного розсіювання).

2. Засоби і методи дослідження

Іонозонд Української антарктичної станції (УАС) “Академік Вернадський” ISP-42 розташований на острові Галіндез (65°15' півд. ш., 64°15' зах. д.) і є унікальним дослідницьким обладнанням, що було розроблено й виготовлено в Австралії. 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 діючих висот складає 0–800 км. Антено-фідерна система іонозонда IPS-42 складається з приймальних та передавальних низькочастотних (НЧ) та високочастотних (ВЧ) антен. Результати зондування представляються у вигляді іонограм, на яких діючі висоти прийнятих сигналів відображаються в залежності від частоти зондування. Темп реєстрації іонограм – одна іонограма кожні 15 хв. Обробка іонограм проводиться за стандартною методикою URSI.

Іоносферна обсерваторія Інституту іоносфери НАН та МОН України, на базі якої виконувалися дослідження в середніх широтах, не має аналогів в Україні. Радари НР метрового діапазону, один з яких має одну з найбільших у світі дводзеркальну параболічну антену діаметром 100 м, спрямовану у зеніт, а інший має повноповоротну антену діаметром 25 м, а також іоносферна станція “Базис” внесені до Державного реєстру наукових об’єктів Національного надбання України. Унікальне устаткування, що генерує та випромінює потужні електромагнітні хвилі, дозволяє проводити дослідження іоносфери в інтервалі висот від 100 до 1500 км і одержувати інформацію про іоносферні параметри, що характеризують стан середовища всього центральноєвропейського регіону.

Іоносферна обсерваторія Інституту іоносфери розташована поблизу м. Зміїв (49.6° півн. ш., 36.3° сх. д.).

Для оцінювання параметрів РІЗ застосовувалися методи системного спектрального аналізу та статистичного аналізу, що добре зарекомендували себе під час аналізу випадкових процесів.

Головним параметром, який був доступним для досліджень в Антарктиді, є критична частота іоносферного шару F_2

$$f_oF_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 N}{\epsilon_0 m}},$$

де e і m – заряд і маса електрона, – електрична стала, N – концентрація електронів. Варіації N приводять до змін δf_oF_2 . При цьому

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N} \approx 2 \frac{\delta f_oF_2}{f_oF_2},$$

Аналізувалися часові варіації флуктуацій

$$\delta f_oF_2(t) = f_oF_2(t) - \overline{f_oF_2(t)},$$

де $\overline{f_oF_2(t)}$ – тренд, що обчислюється на інтервалі часу 360 хв із дискретним ковзанням на 15 хв.

Для знаходження періодів і тривалостей переважаючих хвильових процесів використовувалося адаптивне перетворення Фур’є (АПФ). Воно є модифікацією віконного перетворення Фур’є і займає проміжне місце між ним і вейвлет перетворенням. Базисними функціями є синус і косинус, але ширина вікна змінюється (адаптується) в залежності від досліджуваного періоду таким чином, щоб її значення завжди дорівнювало трьом періодам. Це дозволяє отримати відносну роздільну здатність за періодом, що не залежить від значення періоду і є оптимальним для визначення переважаючих періодів і тривалостей коливань (Лазоренко та ін., 2005).

Дані радара некогерентного розсіяння (НР) також піддавалися спектральному аналізу на основі АПФ. Для підтвердження наявності хвильових процесів, аналіз відносних варіацій потужності НР сигналу проводився на низці висот з кроком, що перевищує роздільну здатність за висотою (близько 20 км). При цьому критерієм їх присутності було існування коливань на всіх висотах, що мають близькі періоди, спостерігаються в однакові інтервали часу та мають тривалості, що перевищують принаймні один період коливання. Оскільки роздільна здатність за висотою для плазмових температур складає близько 100 км, нижче наведено результати спектрального аналізу відносних варіацій температур лише для однієї висоти.

Для знаходження хвильових варіацій у діапазоні періодів 30 – 360 хв вихідні дані, якими були часові варіації потужності НР сигналу та плазмових температур, піддавалися процедурі знаходження тренду на інтервалі 6 годин методом найменших квадратів 3-го порядку. Після цього отримували абсолютні варіації як різницю вихідних значень і тренду, а також відносні варіації, як абсолютні варіації, що нормовані на тренд. Потім отримані відносні варіації потужності та температур підлягали усередненню на інтервалі 15 хв методом ковзного середнього. Мінімальний період визначався як подвоєне значення інтервалу усереднення. Максимальне значення періоду було втричі менше за весь час спостереження впродовж доби.

Для знаходження варіацій в діапазоні 10 – 120 хв, процедура була та ж сама, але визначення тренду виконувалося на інтервалі 2 години, а усереднення потужності та температур було зроблено на інтервалі часу 5 хв.

3. Відомості про геокосмічну бурю

Для досліджень було обрано геокосмічну бурю, що мала місце 13 – 14 листопада 2012 р. Вибір цієї події обумовлений достатньою потужністю бурі, а також наявністю якісних експериментальних даних для обох досліджуваних регіонів (Антарктида та Україна).

Геомагнітна буря протікала на фоні помірної активності Сонця (у період з 11 по 17 листопада значення індексу $F_{10.7}$ перебували в межах 135 – 146). Буря була спричинена викидами корональної маси 9 і 10 листопада.

пада 2012 р., що були спрямовані у бік Землі. Основні параметри, що описують геокоосмічну обстановку з 11 по 17 листопада 2012 р., представлені на рис. 1.

13 листопада компонента B_z , після того як близько 10:00 досягла свого максимуму (15.7 нТл), почала зменшуватися. У цей час функція Акасофу ϵ_A різко збільшилася до $50 \div 56$ ГДж/с. З 16:00 13 листопада до 10:00 14 листопада B_z – компонента була негативною, а в проміжку з 00:00 до 06:00 її значення були близькі до мінімального й становили $-(17 \div 18)$ нТл. У свою чергу функція Акасофу знову зросла й склала поблизу максимуму $26 \div 30$ ГДж/с. Як видно з рис. 1, геомагнітна буря почалася 13 листопада близько 15:00. Головна фаза магнітної бурі мала місце з 18:00 13 листопада до 06:00 14 листопада.

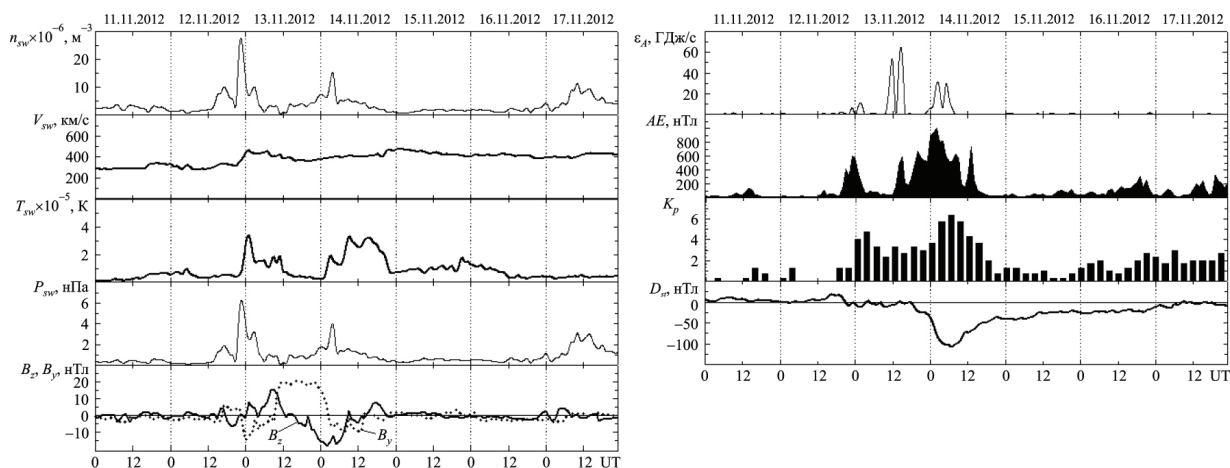


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру (концентрації n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} , температури T_{sw} і розрахованих значень динамічного тиску P_{sw}), B_y – (пунктирна лінія) і B_z – компоненти (суцільна лінія) міжпланетного магнітного поля, розрахованих значень енергії переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, а також параметрів геомагнітної активності: AE-індексу (WDC, Кіото, Японія), Kp-індексу (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), Dst-індексу (WDC-C2, Кіото, Японія) протягом 11 – 17 листопада 2012 р.

Fig. 1. Time variations of the solar wind parameters (concentration n_{sw} , radial velocity V_{sw} , temperature T_{sw} and calculated dynamical pressure P_{sw}), B_y - (dotted line) and B_z -components (continuous line) of the interplanetary magnetic field, calculated energy values transferred by the solar wind to the Earth's magnetosphere per unit time, as well as geomagnetic activity parameters: AE-index (WDC, Kyoto, Japan), Kp-index (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), Dst-index (WDC -C2, Kyoto, Japan) during November 11 - 17, 2012.

14 листопада протягом усього дня спостерігалася висока температура сонячного вітру: $T_{sw} \approx (15 \div 33) \cdot 10^4$ К. Швидкість V_{sw} становила близько 400 км/с. За головною фазою пішла фаза відновлення, яка тривала кілька діб аж до 17 листопада (рис. 1, нижня панель). Екстремальні значення індексів геомагнітної активності під час магнітної бурі склали $AE_{max} = 1009$ нТл, $K_p = +6$ і $D_{st\ min} = -108$ нТл. Згідно з загально прийнятими класифікаціями буря 13 – 14 листопада 2012 р. належить до сильних бур.

4. Обговорення і результати

4.1. Регулярні варіації концентрації електронів над Антарктидою

Відмітною рисою іоносфери над Антарктичним півостровом є аномальний добовий хід електронної концентрації влітку, що має назву іоносферна аномалія моря Уедделла. З листопада по лютий мінімум концентрації електронів спостерігається близько місцевого полудня, а максимум – близько півночі.

З 00:00 до 04:00 13.11.2012 р. спостерігалася викликане початковою фазою бурі ($K_p = 4$) різке падіння концентрації електронів до значень $\sim 0.6 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2а). Далі відбувалося поступове зменшення N , яка досягла мінімуму $(0.4 \div 0.5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ у період часу з 10:00 до 16:00 UT. Вечірнє збільшення концентрації почалося після 16:00, концентрація досягла максимуму приблизно $0.8 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ близько 20:00. Посилення бурі ($K_p = 6$) викликало стрімке зменшення електронної концентрації в період часу 21:00 \div 23:00 від значень максимуму до $0.2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

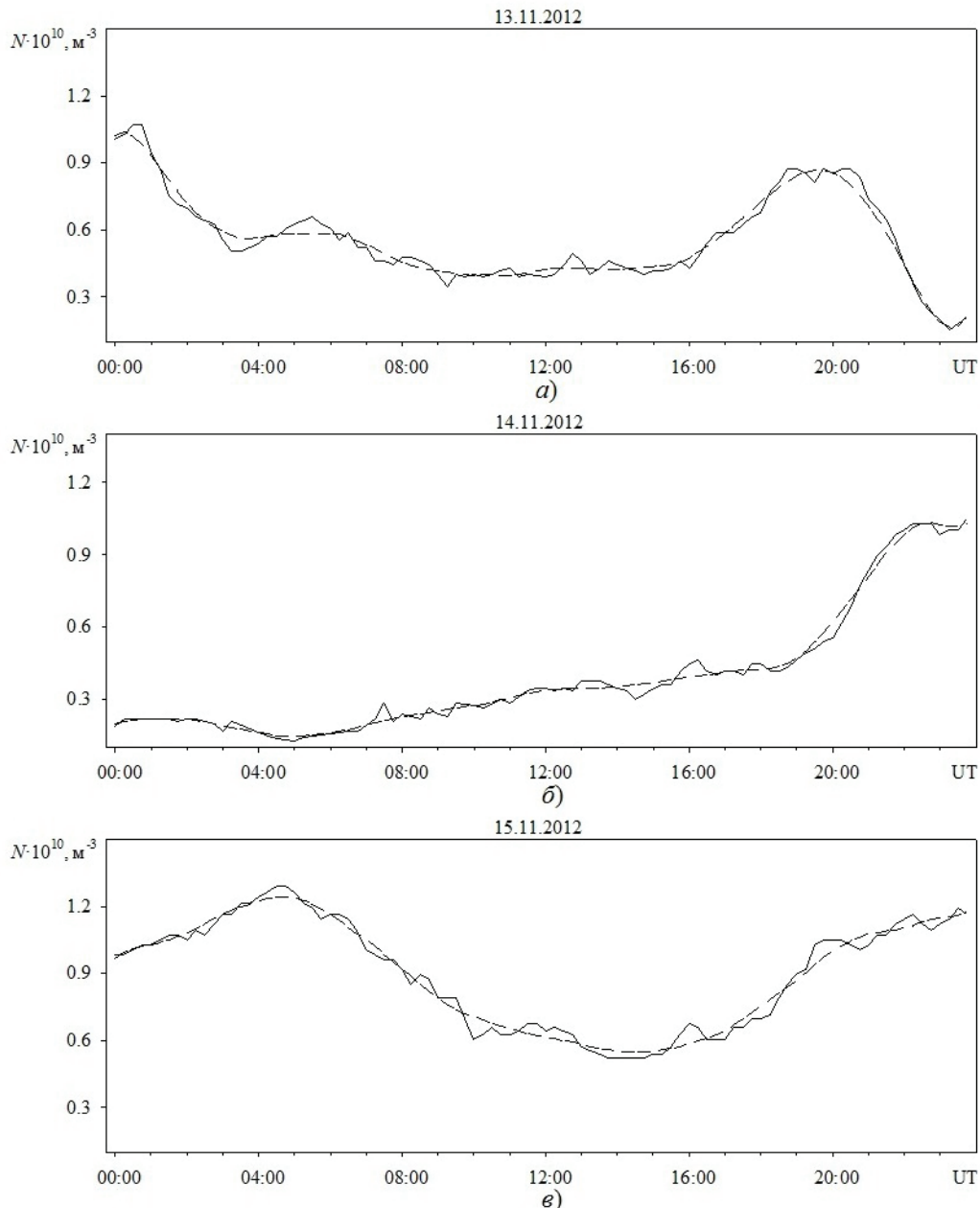


Рис. 2. Часові варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 13 листопада 2012 р. (а), 14 листопада 2012 р. (б) та 15 листопада 2012 р. (в). Штрихова лінія показує результат усереднення на інтервалі 360 хв.

Fig. 2. Time variations of the electron density at the maximum of F2 layer for November 13, 2012 (a), November 14, 2012 (b), and November 15, 2012 (c). The dashed line shows the result of averaging over an interval of 360 minutes.

Мінімальне значення концентрації спостерігалось в 05:00 UT 14.11.2012 р. і становило приблизно $0.12 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Після проходження головної фази бурі почалося повільне відновлення N до значення $0.4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, яке тривало приблизно 14 годин (рис. 2б).

З 19:00 почався різкий вечірній зріст концентрації електронів, яке закінчилося в 22:00 UT. Після 22:00 14.11.2012 р. розпочалося повільне збільшення N від $1.0 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ до $\sim 1.3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ в 05:00 15.11.2012 р. Подальший добовий хід концентрації в основному був подібний до того, що мав місце 12.11.2012 р.

У якості контрольного дня було обрано 15 листопада 2012 р. Часові варіації концентрації електронів у контрольні дні були близькі до типового добового ходу, який властивий іоносфері над Антарктидою. Оскільки період відновлення тривав з 15 по 17 листопада 2012 р., то вечірній максимум N 15 листопада досягав $1.1 \div 1.2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2в).

Аналіз добового ходу концентрації 13 – 15 листопада 2012 р. показує, що буря викликала ґрунтовну перебудову антарктичної іоносфери. Зменшення максимуму концентрації електронів у день бурі у порівнянні з контрольним днем сягало приблизно $0.8 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

На регулярні зміни $N(t)$ накладалися квазіперіодичні збурення.

4.2. Результати спектрального аналізу варіацій абсолютних значень збурень концентрації електронів над Антарктидою

13 листопада в нічний і вечірній час спостерігалися коливання з періодом $T \approx 80 \div 160$ хв уночі їх тривалість була близько 3 год., у вечірній час $4 \div 5$ год (рис. 3). На кожній панелі зліва наведено спектрограми енергій, а справа – відповідні енергограми, що є інтегралом від спектрограми за часом і відображають густину розподілу енергії за періодом. Вертикальна ось – період у хвилинах, горизонтальна – час в UT. Градаціями кольору показано значення гармонік у спектрі енергій (у відносних одиницях). Також у нічний час спостерігалися коливання з періодом $180 \div 340$ хв, їхня тривалість становила $7 \div 8$ год. Удень 13.11.2012 р., епізодично спостерігалось коливання з періодом ~ 60 хв і тривалістю 2 год.

14 листопада в період з 00:00 до 14:00 годин під впливом бурі концентрація електронів у пункті спостереження (Антарктида, станція «Академік Вернадський») значно знизилася. Яскраво виражених хвильових процесів на тлі постійних варіацій не спостерігалося. У денний і вечірній час були відзначені коливання з періодом $120 \div 250$ хв тривалістю 4 год., з $T \approx 260 \div 340$ хв тривалістю $\Delta T \approx 7 \div 8$ год. і с $T \approx 140 \div 250$ хв і $\Delta T \approx 3$ год. (рис. 4).

15 листопада переважаючим було коливання з періодом $T \approx 150 \div 300$ хв (рис. 5). Епізодично спостерігалися коливання з періодом $T \approx 60$ хв тривалістю 4 год., і $T \approx 80 \div 130$ хв тривалістю $2 \div 3$ год.

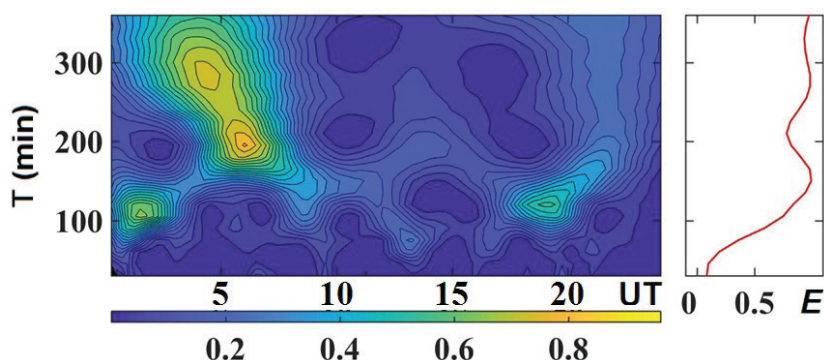


Рис. 3. Результати спектрального аналізу за допомогою АПФ для 13 листопада 2012 р. Праворуч показані відповідні енергограми.
 Fig. 3. Results of spectral analysis using the adaptive Fourier transform for November 13, 2012. The corresponding energygrams (the average power as a function of period) are given on the right.

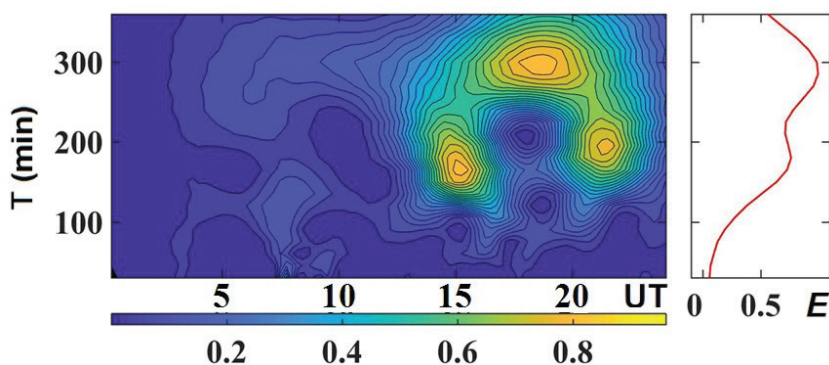


Рис. 4. Результати спектрального аналізу за допомогою АПФ для 14 листопада 2012 р. Праворуч показані відповідні енергограми.
 Fig. 4. Results of spectral analysis using the adaptive Fourier transform for November 14, 2012. The corresponding energygrams are given on the right.

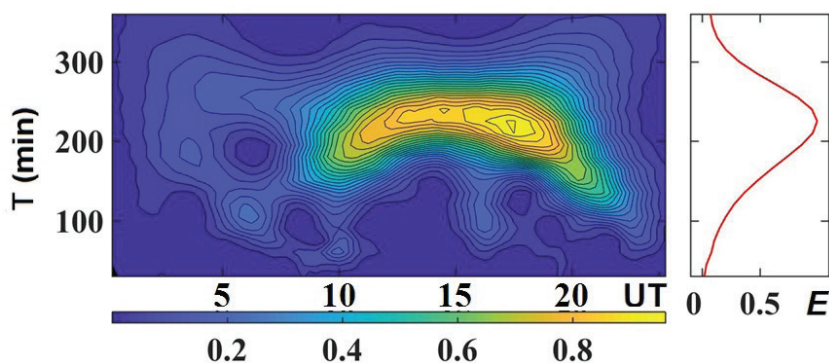


Рис. 5. Результати спектрального аналізу за допомогою АПФ для 15 листопада 2012 р. Праворуч показані відповідні енергограми.
 Fig. 5. Results of spectral analysis using the adaptive Fourier transform for November 15, 2012. The corresponding energygrams are given on the right.

4.3. Параметри хвильових процесів в іоносфері над Україною

Результати аналізу часових варіацій потужності НР сигналу, температур електронів та іонів наведено на рис. 6 – 10. Як видно з рис. 6 – 8, у всі дні спостережень у варіаціях потужності спостерігалися хвильові процеси, виходячи з критерію, описаному вище. 13 листопада мали місце хвилі з періодом 120 – 150 хв у проміжок часу 18 – 21 UT (рис. 6). 14 листопада спостерігалися хвильові збурення двох типів: перше мало переважаючий період близько 250 хв і мало місце в ранковий час, в інтервалі 2 – 8 UT, друге з періодом близько 160 хв спостерігалось у вечірній час, з 14 до 21 UT (рис. 7). 15 листопада спостерігалися хвильові процеси в широкому діапазоні періодів 120 – 220 хв протягом не менше 15 годин (3 – 18 UT). При цьому період переважаючого колювання та значення гармонійної складової спочатку зменшувалися, а потім збільшувалися. Через складну природу хвильового збурення не можна точно сказати, чи ми спостерігали одну хвилю зі змінним періодом, чи цілу низку хвильових процесів з різними параметрами.

На рис. 9 і 10 показано результати аналізу відносних варіацій плазмових температур для 15 листопада 2012 р. З рис. 9 видно, що хвильові процеси у температурах спостерігалися у близькі інтервали часу та мали близькі періоди до колювань, що мали місце у потужності (рис. 7). Також в цей день переважали хвильові збурення температур з періодом близьким до 60 хв (рис. 10).

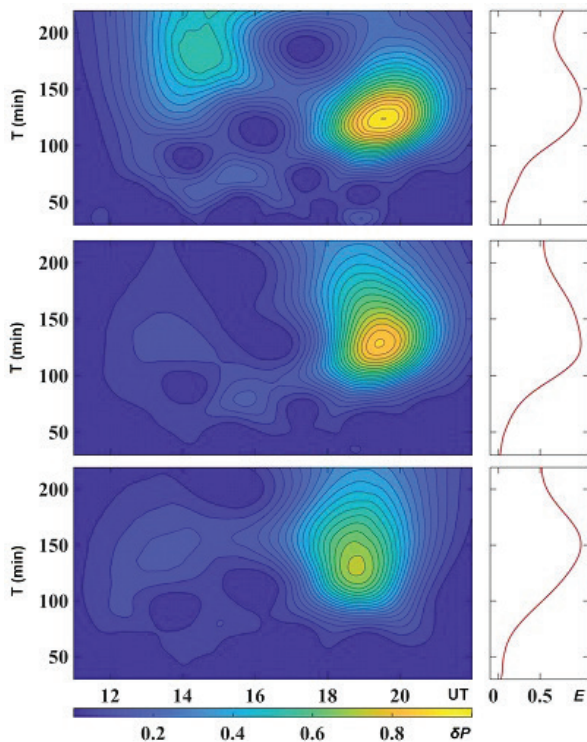


Рис. 6. Результати застосування адаптивного перетворення Фур'є до відносних варіацій потужності НР сигналу на висотах 225 км (перша панель), 250 км (друга панель) і 280 км (третя панель) для діапазону періодів 30 – 220 хв для 13 листопада 2012 р.

Fig. 6. Results of the adaptive Fourier transform using for relative variations of incoherent scatter signal power at altitudes of 225 km (first panel), 250 km (second panel) and 280 km (third panel) for a period range of 30 - 220 minutes for November 13, 2012..

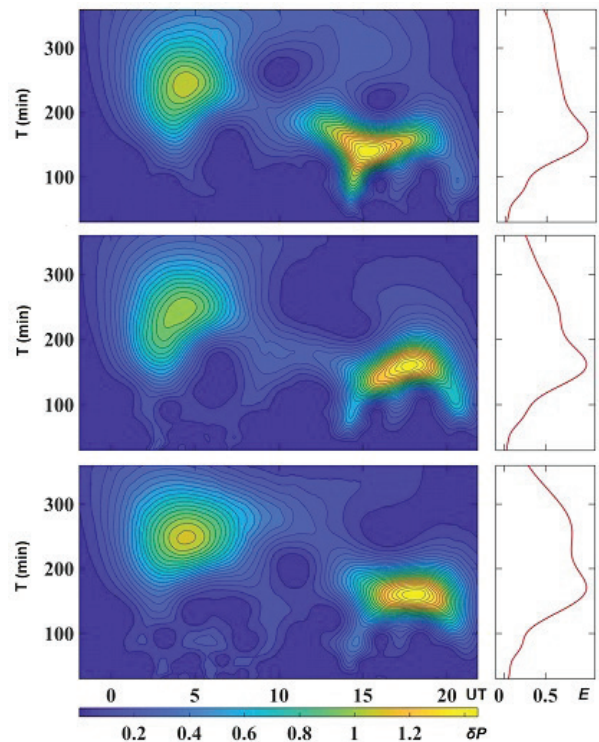


Рис. 7. Те ж, що й на рис. 6, для 14 листопада 2012 р. і діапазону періодів 30 – 360 хв.

Fig. 7. Same as in Fig. 6, for November 14, 2012 and the period range of 30 - 360 min.

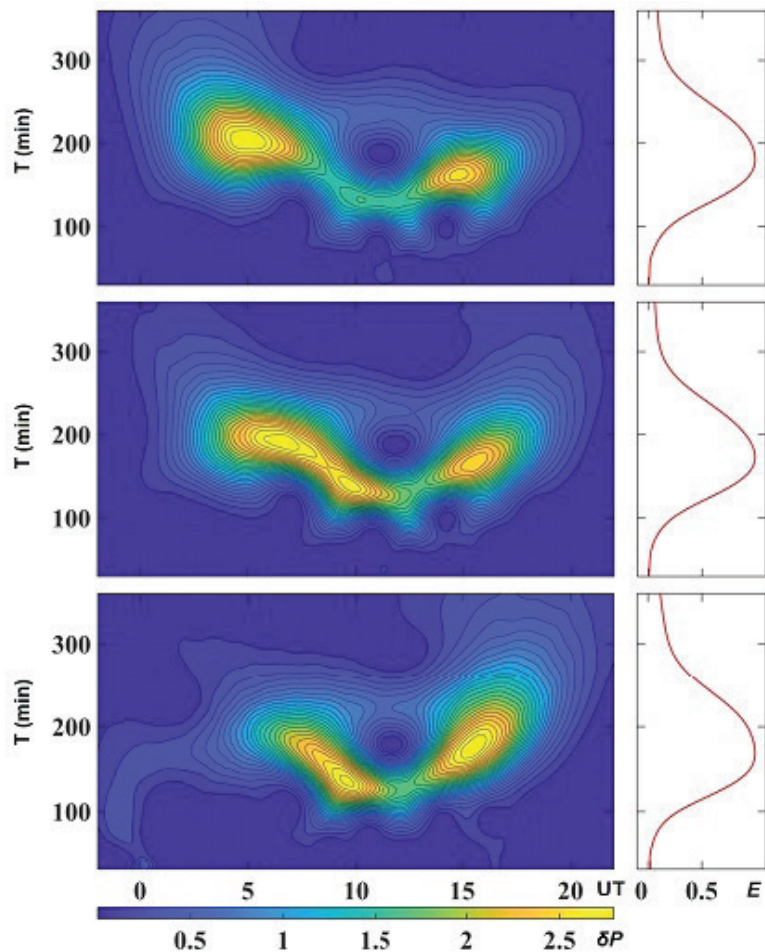


Рис. 8. Те ж, що й на рис.6, для 15 листопада 2012 р. і діапазону періодів 30 – 360 хв.

Fig. 8. Same as in Fig. 6, for November 15, 2012 and the period range of 30 - 360 min.

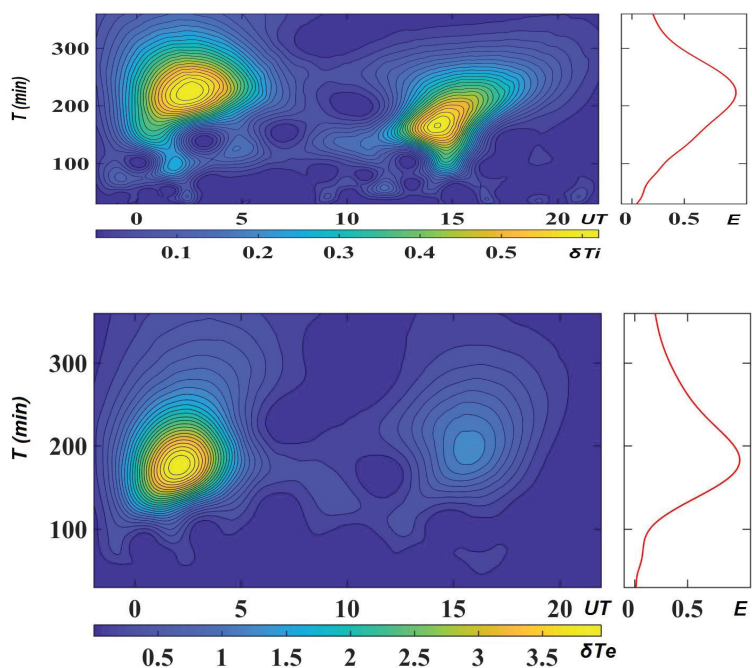


Рис. 9. Результати застосування адаптивного перетворення Фур'є до відносних варіацій температур іонів (верхня панель) і електронів (нижня панель) на висоті 260 км для 14 листопада 2012 р. і діапазону періодів 30 – 360 хв.

Fig. 9. Results of the adaptive Fourier transform using for relative variations of ion (upper panel) and electron (bottom panel) temperatures at the altitude of 260 km for November 14, 2012 and a period range of 30–360 min.

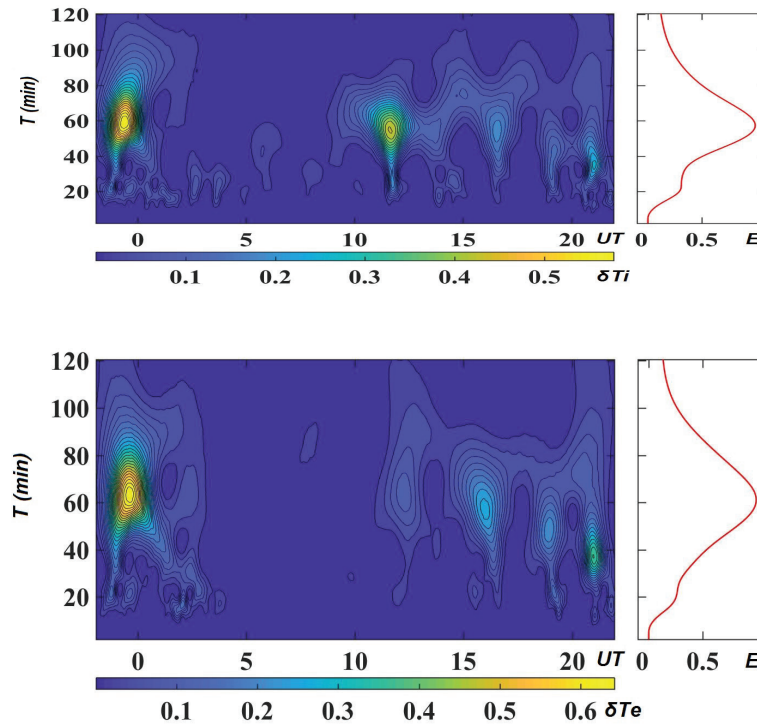


Рис. 10. Те ж, що на рис. 9, для діапазону періодів 10 – 120 хв.

Fig. 10. Same as in Fig. 9, for a period range of 10 - 120 min.

Виявлені хвильові процеси можуть бути викликані протіканням геокоосмічної бурі, а також іншими природними високоенергійними джерелами. Те, що вони часто спостерігалися в ранковій і вечірній часи, вказує на сонячний термінатор як найбільш ймовірне джерело їх генерації. Для надійного відділення хвильових процесів, викликаних геокоосмічними бурями від тих, що згенеровані іншими джерелами, необхідно продовжувати спостереження для можливості застосування статистичного аналізу отриманих результатів.

5. Висновки

За результатами аналізу даних іонозонду Української антарктичної станції «Академік Вернадський» і радара НР Інституту іоносфери, одержаних до, під час та після сильної геокоосмічної бурі 13 – 14 листопада 2012 року, можна зробити наступні висновки.

1. Встановлено, що РІЗ присутні в обох регіонах як у спокійних умовах, так і під час геокоосмічних збурень.

2. Періоди переважаючих РІЗ над Антарктидою складали 80 – 340 хв. Над Україною спостерігалися збурення з періодами близько 60 хв і 120 – 250 хв. При цьому хвильові процеси у плазмових температурах спостерігалися у близькі інтервали часу та мали близькі періоди до коливань, що мали місце у потужності НР сигналу.

3. За даними іонозонду УАС «Академік Вернадський» амплітуда абсолютних коливань концентрації електронів у день бурі (14 листопада) зменшилася приблизно у два рази у порівнянні з контрольним днем. Амплітуда відносних коливань була майже незмінною.

4. Для більш чіткого розділення РІЗ, викликаних геомагнітною бурєю та іншими процесами, необхідний статистичний аналіз іоносферних варіацій, що мали місце впродовж цілої низки бур з подібними характеристиками. Більшість параметрів хвильових процесів (переважаючі періоди, тривалості, відносні амплітуди тощо), що супроводжували геомагнітні бурі, мають близькі значення до тих, що викликані іншими природними або штучними високо енергійними джерелами. Доцільним є продовження спільних досліджень з метою накопичення результатів, що дозволить зробити впевнені висновки про відмінності морфології рухомих іоносферних збурень у високих та середніх широтах.

В Радіоастрономічному інституті НАН України дослідження виконувалися відповідно до робочих планів відомчої НДР «Ятаган-3» (016U000035) та НДР ДУ НАНЦ МОН України «Геліомакс» (017U006837с).

6. Подяки

Автори висловлюють подяку Державній установі Національний антарктичний науковий центр МОН України за надані первинні дані та матеріали, отримані на УАС «Академік Вернадський» під час Українських антарктичних експедицій.

7. Література

1. Аксенова Е. Д., Панасенко С. В. Сезонные вариации параметров волновых процессов в ионосфере по данным харьковского радара некогерентного рассеяния. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Радіофізика та іоносфера*. 2016. № 34 (1206). С. 73–77.
2. Альперт Я. Л. *Распространение электромагнитных волн и ионосфера*. М.: Наука, 1972. 564 с.
3. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 3. С. 4–35.
4. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния. *Геоматизм и аэрономия*. 2006. Т. 46, № 2. С. 193–208.
5. Дикий Л. А. *Теория колебаний земной атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 196 с.
6. Кравцов Ю. А., Фейзулин З. И., Виноградов А. Г. *Прохождение радиоволн через атмосферу Земли*. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.
7. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2005. Т. 10, № 10. С. 39–49.
8. Yen K. S., Liu C. H. *Theory of ionospheric waves*. N.Y., London: Academic Press, 1972. 464.

8. References

1. Aksenova, E. D., Panasenko, S. V. 2016. Seasonal variations of wave processes in the ionosphere according to the method of incoherent scattering [Seasonal variations in the parameters of wave processes in the ionosphere according to the method of incoherent scattering]. *Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu "HPI". Radiofizika ta ionosfera* [Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere], 34 (1206), 73-77.
2. Al'pert, Ja. L. 1972. *Rasprostranenie jelektromagnitnyh voln i ionosfera* [The propagation of electromagnetic waves and the ionosphere]. М.: Nauka, 564.
3. Burmaka, V. P., Taran, V. I., Chernogor, L. F. 2005. Rezul'taty issledovaniya volnovykh vozmushhenij v ionosfere metodom nekogerentnogo rassejaniya [Results of investigation of wave perturbations in the ionosphere by the method of incoherent scattering]. *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 3, 4-35.
4. Burmaka, V. P., Taran, V. I., Chernogor, L. F. 2006. Volnovye processy v ionosfere v spokojnyh i vozmushhennyh uslovijah. 1. Rezul'taty nabljudenij na har'kovskom radare nekogerentnogo rassejaniya [Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy], 46 (2), 193-208.
5. Dikij, L. A. 1969. *Teorija kolebanij zemnoj atmosfery* [The theory of oscillations of the Earth's atmosphere]. L.: Gidrometeoizdat, 196.
6. Kravcov, Ju. A., Fejzulin, Z. I., Vinogradov, A. G. 1983. *Prohozhenie radiovoln cherez atmosferu Zemli* [The passage of radio waves through the earth's atmosphere]. М.: Radio i svjaz', 224.
7. Lazorenko, O. V., Panasenko, S. V., Chernogor, L. F. 2005. Adaptivnoe preobrazovanie Fur'e [Adaptive Fourier Transform]. *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 10 (10), 39-49.
8. Yen, K. S., Liu, C. H. 1972. *Theory of ionospheric waves*. N.Y., London: Academic Press, 464.