

Інститут іоносфери
Національна академія наук України та Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРАБАШ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 550.388

ДИСЕРТАЦІЯ

«АПЕРІОДИЧНІ ТА ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ В ІОНОСФЕРІ:
РЕЗУЛЬТАТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ»

Спеціальність 01.04.03 – «Радіофізика»

(Природничі науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В. В. Барабаш

(ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Чорногор Леонід Феоктистович, доктор фізико-математичних наук, професор.

Харків-2019

АНОТАЦІЯ

Барабаш В.В. Аперіодичні та хвильові збурення в іоносфері: результати вертикального зондування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 «Радіофізика». – Інститут іоносфери Національна академія наук та Міністерство освіти і науки України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

У цей час у геокосмосі, який являє собою комбінацію верхньої атмосфери, іоносфери та магнітосфери, функціонують тисячі штучних супутників Землі (ШСЗ). Ці супутники за допомогою радіосигналів забезпечують землян даними про космічну погоду, про атмосферну погоду, про процеси під землею, на землі й у космосі. Геокосмічне середовище є основним радіоканалом для засобів телекомунікації, радіолокації, радіонавігації та моніторингу процесів у різних середовищах. Крім регулярних варіацій параметрів іоносфери, у ній виникають аперіодичні та квазіперіодичні збурення, які через їхній випадковий момент виникнення, значні амплітуди та тривалості, обмежують потенційні можливості засобів телекомунікації, радіолокації та радіонавігації. Тому дослідження геокосмоса й, зокрема, іоносфери, а також варіацій характеристик радіохвиль, викликаних впливом на іоносферу потужних джерел енерговиділення, є *актуальною радіофізичною задачею*.

Дана дисертація присвячена вивченню хвильових варіацій концентрації електронів в F-області іоносфери в характерні геофізичні періоди, а також аперіодичних і квазіперіодичних збурень в іоносфері, викликаних сонячними затемненнями, польотом і вибухом Челябінського метеороїда, впливом потужного радіовипромінювання, віддаленої на тисячі кілометрів потужної радіосистеми.

Метою дисертаційної роботи є дослідження іонозондовим методом реакції іоносфери (в основному F-області) на вплив ряду потужних джерел енерговиділення, а також добово-сезонних варіацій концентрації електронів при рості та спаді сонячної активності.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися наступні *задачі*. Дослідження реакції концентрації електронів F-області іоносфери на сонячні затемнення 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. над м. Харків, а також над Європою. Дослідження реакції концентрації електронів F-області іоносфери на падіння Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 р. Дослідження реакції іоносфери на вплив на неї потужного радіовипромінюванням радіотехнічної системи, віддаленої від місця спостереження на відстань близько 1000 км. Дослідження добово-сезонних варіацій концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери в періоди росту та спаду сонячної активності.

Об'єкт дослідження – нижня та середня іоносфера.

Предмет дослідження – регулярні та нерегулярні варіації концентрації електронів у нижній і середній іоносфері в природних і збурених потужними джерелами енерговиділення умовах.

Методи дослідження – для спостережень за станом іоносфери в дисертації використовується найпоширеніший у світовій практиці радіофізичний метод вертикального зондування іоносфери. Для аналізу результатів спостережень використовувалися методи математичної статистики та статистичної радіофізики, а також системний спектральний аналіз, в основу якого покладені віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення.

Наукова новизна дисертації полягає у наступному. Встановлено, що СЗ 4 січня 2011 р. викликало істотні варіації параметрів іонограм, що свідчать про значну перебудову іоносфери протягом затемнення. Сонячне затемнення супроводжувалося збільшенням відносної амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів приблизно у два рази. Періоди цих збурень відповідали параметрам атмосферних гравітаційних хвиль. Вперше проведено дослідження просторового розподілу в масштабах Європи збурень в іоносфері протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. Встановлена залежність величини збурень від фази затемнення, визначені основні параметри аперіодичних і квазіперіодичних збурень в F-області іоносфери. Вперше за допомогою мережі

іонозондів, розташованих на відстанях до 2.2 тис. км від джерела впливу, виявлені великомасштабні збурення в нижній іоносфері, викликані впливом на іоносферу потужним періодичним радіовипромінюванням. Встановлено, що мінімальна частота, яка спостерігалася на іонограмах збільшувалася від 1.8 до 3.2 МГц, а концентрація електронів у нижній іоносфері при цьому – на сотні відсотків. Вперше за допомогою мережі іонозондів, віддалених до 2.2 тис. км, виявлені аперіодичні великомасштабні збурення концентрації електронів у шарі F2, які викликані впливом потужного періодичного радіовипромінювання, на тлі помірних геокоsmічних бур. Встановлені основні параметри цих збурень. Вперше за допомогою мережі іонозондів, віддалених на відстані 1.5–3.1 тис. км від місця падіння космічного тіла, виявлені великомасштабні квазіперіодичні збурення концентрації електронів в іоносфері, які викликані прольотом і вибухом Челябінського метеороїда. Швидкість поширення збурень становила 600–700 м/с, період – 70–135 хвилин, відносна амплітуда 10–20 %. Для чотирьох характерних геофізичних періодів, на фазі росту та спаду сонячної активності в 24-ому циклі, виконані систематичні дослідження в спокійних умовах аперіодичних і квазіперіодичних збурень у шарі F2 іоносфери та встановлені основні параметри цих збурень.

Практична значимість дисертації полягає у наступному.

Вивчені природні збурення для чотирьох характерних геофізичних періодів на стадії росту та спаду сонячної активності є тим тлом, на якому розвертаються збурення іншої природи. Дослідження реакції іоносфери на два СЗ, у тому числі й реакції іоносфери в масштабах Європи, дозволяють змоделювати вплив збуреної затемненням іоносфери на умови поширення радіохвиль, що випромінюються радіотехнічними системами різного призначення. Дослідження реакції іоносфери й, у першу чергу, хвильових збурень, викликаних падінням Челябінського космічного тіла, дозволили встановити дальність поширення та амплітуду збурень концентрації електронів при такій унікальній події, а отже одержати вихідні дані для моделювання збуреного іоносферного радіоканалу. Практичне значення також має виявлення величини реакції та визначення

дальності її дії при нагріванні іоносфери радіовипромінюванням потужного радіотехнічного стенда, віддаленого на відстань приблизно в 1000 км. Отримані при цьому вихідні дані дозволяють прогнозувати вплив виникаючих збурень на іоносферні канали телекомунікації, радіонавігації та радіолокації. Вивчені в дисертаційній роботі квазіперіодичні та аперіодичні збурення, в остаточному підсумку, обмежують потенційні характеристики радіосистем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації та т.п.

Основні результати розділу 1 такі. Метод вертикального зондування широко використовується для дослідження як спокійної, так і збуреної іоносфери. За допомогою цього методу отримано великий обсяг знань про фізичні процеси, що протікають в іоносфері під час геокосмічних бур, сонячних затемнень, падінь великих космічних тіл, а також про вплив на іоносферу потужного радіовипромінювання та великих ракет, що стартують. Метод вертикального зондування дає відомості як про регулярні процеси іоносфери, так і про хвильові збурення з періодами від 10 до 360 хв.

В розділі 2 встановлене наступне. Регулярні добово-сезонні варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 в основному відповідають існуючим уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері й даним інших досліджень. Мається на увазі, що ці варіації відстежували добові, сезонні, висотні зміни тощо. На регулярний хід $N(t)$ накладалися квазіперіодичні варіації концентрації електронів. В усі сезони в шарі F2 іоносфери проявлялося переважне квазіперіодичне коливання N з періодом 140–200 хв, що має амплітуду $(0.2-2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ і відносну амплітуду, рівну 0.1–0.2. Тривалість переважаючого коливання становила 5–7 год, а в період літнього сонцестояння досягала 24 год. Епізодично в спектрі варіацій N також виникали коливання з періодами від 60–100 до 300 хв. Їх амплітуда була в кілька раз менше амплітуди переважаючого коливання.

Головні результати розділу 3 такі. СЗ 4 січня 2011 р. викликало істотні варіації параметрів іонограм, що свідчить про значну перебудову іоносфери протягом затемнення. Зокрема, критичні частоти шарів F2 і E поблизу головної

фази зменшилися на 1.9 МГц і 0.4 МГц, або на 31 % і 16 % відповідно. СЗ 4 січня 2011 р. супроводжувалося помітним зменшенням концентрації електронів на висотах середньої іоносфери. Так, у максимумі шару F2 відносно зменшення концентрації електронів рівнялося приблизно 52 %. Час запізнювання варіацій N становило близько 16.0 ± 1.4 хв. В E^- -області N зменшилося приблизно на 30 %. СЗ 4 січня 2011 р. привело до збільшення діючої висоти відбиття в максимумі шару F2 до 70 км. Протягом затемнення іонограми були дифузійними, що відображало факт сильної турбулізації іоносфери. Підтверджено, що в максимумі шару F2 справедливий лінійний закон рекомбінації, в E^- -області – квадратичний закон. СЗ супроводжувалося підсиленням відносної амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів приблизно в 2 рази (до 8 і 16% для періодів 30 і 60 хв). Різнилися й періоди коливань. Часткове СЗ 20 березня 2015 р. над Європою з фазою 0.55–0.95 призвело до значного збурення F-області іоносфери. Критична частота f_oF2 зменшувалася на 1–2 МГц або на 5–25%. Тривалість збурення досягала 2.5–3 год. Мінімальні значення f_oF2 запізнювалися стосовно моменту часу настання головної фази затемнення на 5–30 хв. Зменшення концентрації електронів досягало 23–51 %. СЗ супроводжувалося хвильовими збуреннями з періодом 30–100 хв. Крім того, поблизу головної фази спостерігався збій фази коливання. Амплітуда хвильових збурень на більшості іоносферних станцій у день затемнення була приблизно у 2–3 рази більше, ніж у контрольний день.

В розділі 4 встановлене наступне. Падіння Челябінського космічного тіла супроводжувалося помітними змінами характеру часових варіацій частоти f_oF2 і їх спектрального складу. Від місця падіння метеорита поширювалися хвильові збурення, що мали середню швидкість близько 600–700 м/с, амплітуду відносних збурень концентрації електронів – 10–20 % і період 70–135 хв. Хвильові збурення поширювалися на відстані не менше 3 тис. км від місця падіння метеорита.

Основні результати розділу 5 наступні. Випромінювання нагрівного стенда в режимі [+30 хв; –30 хв] супроводжувалося збільшенням мінімальної частоти

$f_{\min}$, що спостерігалася на іонограмах, з періодами 0.5 і 1 год. Найбільші сплески $f_{\min}$ мали місце для іонозонда в м.Троїцьк (відстань від нагрівного стенда 560 км). При цьому $f_{\min}$ збільшувалася від 1.8 до 3.0–3.2 МГц. Збільшення $f_{\min}$ для станцій «Гайдари» (960 км), «Прухониць» (2200 км) та «Васильсурськ» (0 км) (тут та далі назви станцій відповідають населеним пунктам поблизу яких вони розташовані) (в дужках вказана відстань до нагрівного стенду) 29 серпня 2012 р. не перевищувало 0.4 і 0.3 МГц відповідно. Збільшення $f_{\min}$ свідчило про зростання концентрації електронів N і поглинання зондуємих радіохвиль, і по своїх часових масштабах не могло бути пов'язане зі збільшенням температури електронів. Оцінки показали, що N збільшувалася в нижній іоносфері в середньому по висоті в 3, 1.4, 1.3 і 1.3–1.4 рази над іонозондами в м. Троїцьку, с. Гайдари, м. Прухониць та с.м.т. Васильсурську. У часових варіаціях критичної частоти шару F2 виявлені аперіодичні сплески величиною 0.1–0.4 МГц, що супроводжували вплив на іоносферу потужного радіовипромінювання тривалістю 15 хв. Час запізнення збурень відносно моменту включення нагрівного стенда становив 5–15 хв, а його тривалість 10–15 хв. Горизонтальний розмір збуреної області іоносфери був не менше 2200 км. Величина збурень зі збільшенням відстані від нагрівного стенда трохи зменшувалася. У ряді випадків спостерігався «ефект накопичення» збурень, коли аперіодичні сплески виникали при роботі нагрівного стенда в режимі [+5 хв; –5 хв]. Аперіодичні сплески критичної частоти свідчать про збільшення на 1–10% концентрації електронів в області F іоносфери, це викликано, швидше за все, висипанням високоенергійних електронів з радіаційного пояса Землі, який перебував в метастабільному стані. Такий стан міг бути підготовлений слабкими та помірними геокосмічними бурями, що мали місце в період вимірювальної кампанії.

Ключові слова: іоносфера, вертикальне зондування, аперіодичні збурення, хвильові збурення, сонячне затемнення, потужне радіовипромінювання, великомаштабні збурення, Челябінський метеороїд, добово-сезонні варіації.

ABSTRACT

Barabash V.V. Aperiodic and wave disturbances in the ionosphere: the results of vertical sounding. – Qualifying scientific paper, manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.03 " Radiophysics". – Institute of Ionosphere of National Academy of Sciences and Ministry of Education and Science of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

At present, thousands of artificial Earth satellites operate in geospace, which is a combination of the upper atmosphere, the ionosphere and the magnetosphere. These satellites, using radio signals, provide peoples with data on space weather, atmospheric weather, about processes under the Earth, on the Earth and in space. The geospace environment is the main radio channel for telecommunication, radar, radio navigation and monitoring of processes in various environments. In addition to regular variations in the parameters of the ionosphere, it produces aperiodic and quasiperiodic disturbances, which limit the potential capabilities of telecommunication, radar and radio navigation, due to their random moment of occurrence, considerable amplitudes and duration. Therefore, the study of geospace and, in particular, the ionosphere, as well as variations in the characteristics of radio waves caused by the influence on the ionosphere of powerful sources of energy, is an *important radio physics problem*.

This dissertation is dedicated to the study of wave variations in the electron density in the F-region of the ionosphere in main geophysical periods, as well as aperiodic and quasiperiodic disturbances in the ionosphere caused by solar eclipses, flight and the explosion of the Chelyabinsk meteoroid, by the influence of powerful radio transmission, spaced by thousands kilometers from a powerful radio system.

The purpose of the dissertation is study of the ionosphere reaction (mainly F-region) at the influence of a number of high-energy source, as well as diurnal and seasonal variations of electron density with growth and decline of solar activity by ionosonde.

To achieve this goal, the following tasks were solved. Research of the reaction of the electron concentration of the F-region of the ionosphere to the solar eclipse on

January 4, 2011 and March 20, 2015, over Kharkiv, and over Europe. Research of the reaction of the electron density F-region of the ionosphere at the fall of the Chelyabinsk meteoroid February 15, 2013. Research of the ionosphere reaction at the powerful radio transmission of the radio engineering system spaced from the observation site at a distance of about 1000 km. Research of diurnal and seasonal variations of the electron density at the ionospheric F2-peak during periods of growth and decline of solar activity.

The object of the study is the lower and middle ionosphere.

The subject of research is regular and irregular variations of the electrons density in the lower and middle ionosphere during natural and disturbed by powerful sources of energy release conditions.

In order to observe the state of the ionosphere the radiophysical method of vertical sounding of the ionosphere in the dissertation was used. For the analysis of the results of observations, methods of mathematical statistics and statistical radio physics were used, as well as system spectral analysis, based on the windowing Fourier transform, adaptive Fourier transform, and also wavelet transform.

The scientific novelty of the dissertation is as follows. It was found that on January 4, 2011, the solar eclipse (SE) caused significant variations in the parameters of ionograms, indicating a significant reorganization of the ionosphere during the eclipse. The total eclipse was accompanied by an increase in the relative amplitude of quasi-periodic variations in the electron density by a factor of two. The periods of these disturbances corresponded to the parameters of atmospheric gravity waves. For the first time the spatial distribution of disturbances in the ionosphere over the Europe during the solar eclipse on March 20, 2015 was studied. The relation of the disturbances on the eclipse phase is established, the main parameters of the aperiodic and quasi-periodic disturbances in the F-region of the ionosphere are determined. For the first time, using a network of ionosonds located at distances up to 2.2 thousand km from the source of influence, large-scale disturbances in the lower ionosphere, caused by the influence on the ionosphere by powerful periodic radio transmission, were discovered. It was determined that the minimum frequency observed on ionograms

increased from 1.8 to 3.2 MHz, and the electron density in the lower ionosphere at the same time increased by hundreds of percents. For the first time, the aperiodic large-scale disturbances of the electron density in the F2 layer caused by the influence of a powerful periodic radio transmission against the background of moderate geospace storms were detected with the aid of a network of ionosonds, spaced to 2.2 thousand km. The basic parameters of these disturbances are determined. For the first time, large-scale quasi-periodic disturbances of the electron density in the ionosphere caused by the flight and explosion of the Chelyabinsk meteoroid were detected using a network of ionosonds spaced from 1.5–3.1 thousand km from the cosmic body falling place. The velocity of disturbances propagation was 600–700 m/s, the period was 70–135 minutes, the relative amplitude was 10–20 %. In the phase of rise and the decline of solar activity in its 24-th cycle, systematic investigations of periodic and quasiperiodic disturbances in the F2-layer of ionosphere for four characteristic geophysical periods were carried out in quiet conditions and basic parameters of these disturbances were determined.

The practical significance of the dissertation is as follows.

Investigated natural disturbances for the four characteristic geophysical periods at the stage of growth and the decline of solar activity are the background in which the disturbances of another nature develop. Research of the ionosphere reaction on two solar eclipses (SE), including the ionospheric response over Europe, enables to model the influence of ionospheric disturbances on the conditions of the propagation of radio waves transmitted by radio engineering systems of various applications. Research of the ionosphere reaction and, first of all wave disturbances caused by the fall of the Chelyabinsk cosmic body, allowed determining the propagation range and the amplitude of disturbances of the electron density at such a unique event, and thus to obtain the initial data for the modeling of disturbed ionospheric radio channel. Detecting of the magnitude of the reaction and determining range of the ionosphere reaction during its heating by radio transmission of a powerful radio technical focility, which remote for a distance of approximately 1000 km is of practical importance. The initial data thus obtained will anable to predict the effect of the onset

of disturbances at the ionospheric channels of the telecommunications, radionavigation and radar. The quasiperiodic and aperiodic disturbances researched in the dissertation work, ultimately, limit the potential characteristics of telecommunication radio systems, radionavigation, radar, etc.

The main results of section 1 are as follows. The method of vertical sounding is widely used to study both quiet and disturbed ionosphere. With this method, a large amount of knowledge about the physical processes occurring in the ionosphere during geospace storms, solar eclipses, falls of large cosmic bodies, influence on the ionosphere of powerful radio transmission and launch of large rockets have been obtained. The method of vertical sounding gives information on both regular processes of the ionosphere, and about wave disturbances with periods from 10 to 360 min.

In Section 2, the following is shown. Regular diurnal and seasonal variations in the electron density at the maximum of the F2-layer are fully agree with existing conceptions about of the physical and chemical processes in the ionosphere and data of other researchers. On a regular dependence $N(t)$, quasiperiodic variations of the electron density were superimposed. Et al seasons, in the F2-layer of the ionosphere, a prevailing quasi-periodic oscillation of N with a period of 140–200 min, with an amplitude $(0.2-2) \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$ and a relative amplitude equal to 0.1–0.2 was observed. The duration of the prevailing fluctuations was 5–7 h, and during the summer solstice it reached 24 h. Episodically, in the spectrum of N , with periods from 60–100 min to 300 min also occurred fluctuations. Their amplitude was several times lower than the amplitude of the prevailing fluctuations.

The main results of section 3 are as follows. SE at January 4, 2011 caused significant variations in the parameters of ionograms, indicating a significant reorganization of the ionosphere during the eclipse. In particular, the critical frequencies of the F2 and E layers near the main phase decreased by 1.9 MHz and 0.4 MHz, or by 31% and 16% respectively. SE at January 4, 2011 was accompanied by a significant decrease in the electron density at the altitudes of the middle ionosphere. Thus, in the maximum of a layer F2, the relative decreasing of the electron density was approximately 52%. The delay time of variations of N was about 16.0 ± 1.4

min. In E-region, N decreased by about 30 %. SE at January 4, 2011 led to an increase of the virtual height in the maximum of F2-layer to 70 km. During the eclipse, the ionograms were diffusive, reflecting the fact that the ionosphere was strongly turbulating it was. Confirmed, in the maximum of the F2-layer, the linear recombination law is valid, in the E-region is the quadratic law. SE was accompanied by an amplification of the relative amplitude of quasi-periodic variations of the electron density by a factor of two (up to 8 and 16% for periods of 30 and 60 minutes). The periods of fluctuations were different too. Partial SE at March 20, 2015 over Europe with a phase of 0.55–0.95 has led to significant disturbance of the F-region of the ionosphere. The critical frequency f_oF2 decreased by 1–2 MHz or by 5–25%. The duration of disturbances reached 2.5–3 h. The minimum values of f_oF2 delayed at 5–30 min in relation to the time of the onset of the main phase of the eclipse. The decrease in the electron density reached 23–51%. SE was accompanied by wave disturbances with a period of 30–100 minutes. In addition, near the main phase there was a failure of the phase of fluctuation. The amplitude of wave disturbances on the majority of ionospheric stations on the day of the eclipse was approximately by a factor of 2–3 greater than on a reference day.

In section 4, the following is shown. The fall of the Chelyabinsk space body was accompanied by significant changes in the behavior of the time variations of the frequency of F2 and their spectral composition. Wave disturbances propagated, from the place of the meteorite fall, with an average velocity of about 600–700 m/s, the amplitude of relative disturbances of the electron density was 10–20% and period was of 70–135 min. Wave disturbances propagated at a distance of at least 3 thousand kilometers from the place of the meteorite fall.

The main results of section 5 are as follows. The operation of the ionospheric heater in mode [+30 min; –30 min] was accompanied by an increase in the minimum frequency $f_{\min}$ observed on the ionograms, with periods of 0.5 h and 1 h. The largest $f_{\min}$ bursts took place for the ionosonde in Troitsk. At the same time $f_{\min}$ increased from 1.8 MHz to 3.0–3.2 MHz. The increase in $f_{\min}$ in Haidary, Pruhonice and Vasilsursk on August 29, 2012 did not exceed 0.4 MHz and 0.3 MHz, respectively. An increase in

$f_{\min}$ indicated an increase of the electron density N and the sounding radio waves absorption, and could not be associated with an increase in the temperature of electrons in its time scales. Estimates showed that N in the lower ionosphere increased by height with an average in 3, 1.4, 1.3 and 1.3–1.4 times above the ionosondes in Troitsk, Haidary, Pruhonice and Vasilsursk. In time variations of the critical frequency of the layer F2, aperiodic bursts of 0.1–0.4 MHz were found that accompanied the influence on the ionosphere of a powerful radio transmission with duration of 15 minutes. The time delay of disturbances relative to the moment of the start of the ionospheric heater was 5–15 minutes, and its duration was 10–15 minutes. The horizontal dimension of the disturbed region of the ionosphere was not less than 2,200 km. The magnitude of disturbances with an increase in the distance from the ionospheric heater decreased slightly. In some cases an "accumulation effect" of disturbances was observed when aperiodic bursts arose during the operation of the ionospheric heater in [+5 min; –5 min]. Aperiodic bursts of critical frequency indicate of 1–10% increase of electron density in F region of the ionosphere, which is most likely caused by the precipitation of high-energy electrons from the Earth's radiation belt in the metastable state. This condition could be prepared by weak and moderate geospace storms which occurred during the measurement campaign.

Key words : ionosphere, vertical sounding, aperiodic disturbances, wave disturbances, solar eclipse, powerful radio transmission, large-scale disturbances, Chelyabinsk meteoroid, diurnal and seasonal variations.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в наукових фахових виданнях України:

1. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 4. С. 353–361.

(Особистий внесок здобувача: обробка та фізичне тлумачення експериментальних даних, а також написання окремих розділів.)

2. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения сопровождавшие пролет челябинского тела. *Кинематика и физика небесных тел : науч.- теорет. журн.* 2014. Т. 30, № 3. С. 27–42. (Scopus).

(Особистий внесок здобувача: первинна обробка та спектральний аналіз експериментальних даних, написання окремих розділів.)

Chernogor L. F., Barabash V. V. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2014. Vol. 30, № 3. P. 126–136. DOI: 10.3103/0884591314030039

3. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20, № 4. С. 311–331.

(Особистий внесок здобувача: обробка експериментальних даних, фізичне тлумачення отриманих результатів, а також написання окремих розділів.)

4. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: суточно-сезонные вариации в период спада солнечной активности. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 3. С. 212–221.

(Особистий внесок здобувача: обробка та спектральний аналіз експериментальних даних, фізичне тлумачення отриманих результатів, підготовка окремих розділів.)

5. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 4. С. 41–52.

(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експеримента. Обробка та фізичне тлумачення експериментальних даних, а також підготовка окремих розділів.)

Наукові праці в зарубіжних наукових фахових виданнях:

6. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Аперiodические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере. *Известия вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57, № 2. С. 110–128. (Scopus).

(Особистий внесок здобувача: проведення спектрального аналізу експериментальних даних, інтерпретація отриманих результатів, написання окремих розділів.)

Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Aperiodic large-scale disturbances in the lower ionosphere: ionosonde observation results. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2014. Vol. 57, № 2. P. 100–116. DOI: 10.1007/s11141-014-9496-7.

7. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Эффекты воздействия мощными радиоизлучением на ионосферу на фоне умеренных геокосмических бурь: результаты наблюдений с помощью ионозондов. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2016. № 2 (30). С. 6–27. (РИНЦ).

(Особистий внесок здобувача: проведення спектрального аналізу експериментальних даних, інтерпретація отриманих результатів, написання окремих розділів.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Барабаш В. В., Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда. *Дистанционное радиозондирование ионосферы: сборник тезисов конференции молодых ученых.* (г. Харьков, 12 – 15 апреля 2011 г.). Харьков, 2011. С. 52.

9. Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождавших солнечное затмение 4 января 2011 г. *11-th Ukrainian conference on space research: abstracts.* (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, August 29 – September 2, 2011). Kyiv, 2011. P. 35.

10. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождавших падение Челябинского метеорита. *13-th Ukrainian conference on space research: abstracts.* (Yevpatoria, Crimea, Ukraine. 2 – 6 September, 2013). Kyiv, 2013. P. 48.

11. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Результаты ионозондовых наблюдений крупномасштабных апериодических возмущений в нижней ионосфере. *Remote Radio Sounding of the Ionosphere: Book of Abstracts International School-Conference.* (Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine September, 30 – October, 4, 2013.). Kharkiv, 2013. P. 42.

12. Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Сезонно-добові варіації хвильових збурень концентрації електронів в іоносферному шарі F2. *XXI Міжнародна науково-практична конференція: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: збірник тез доповідей.* Ч. III. Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. (Харків, Україна, 29–31 травня 2013 р.). Харків, 2013. С. 207.

13. Barabash V., Chernogor L., Panasenko S., and Domnin I. Ionospheric manifestations of acoustic-gravity waves under quiet and disturbed conditions. *EGU General Assembly–2014: Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-6162, 2014. P. 6162.*

14. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения аperiodических крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере. *Международная научная конференция MicroCAD: Секція №17–Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера: збірник тез.* (Харків, НТУ «ХПИ», 2014). Харків, 2014. Ч. III.– С. 246.

15. Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Large-scale aperiodic disturbances in the D- and E-regions of ionosphere due to the impact of HF high-power radio transmission: data from a network of ionosondes. *10-th International Conference "Problems of Geocosmos": Book of Abstracts.* (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6 – 10, 2014). St. Petersburg, 2014. P. 140.

16. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения эффектов солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Европой. Взаимодействие *полей и излучения с веществом: XIV конференция молодых ученых: труды конференции.* (г. Иркутск, Россия, 14–18 сентября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 98–99.

17. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации вблизи максимума солнечной активности. *17-th Ukrainian conference on space research.* (Odesa, Ukraine, August, 21 – 25, 2017). Odesa, 2017. P. 154.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Радіофізика та іоносфера".* 2011. № 44. С. 107–111.

19. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Изменения концентрации электронов в слое F2 вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствия. *Вісник національного технічного університету "ХПИ". Серія: Радіофізика та іоносфера.* 2013. № 33 (1066). С. 56–61.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	31
1.1 Метод вертикального зондування	31
1.2 Іонозонди	34
1.3 Морфологія незбуреної середньої іоносфери	36
1.4 Джерела збурень іоносфери	39
1.5 Результати дослідження збурень у середній іоносфері	40
1.5.1 Ефекти іоносферних бур	40
1.5.2 Ефекти сонячних затемнень	42
1.5.3 Ефекти Челябінського метеороїда	43
1.5.4 Ефекти впливу потужного радіовипромінювання	46
1.5.5 Ефекти стартів і польотів ракет	49
1.6 Засоби та методи дослідження аперіодичних і хвильових збурень в іоносфері	50
1.6.1 Іонозонд	50
1.6.2 Методика аналізу	51
Висновки до розділу 1	52
Постановка задачі	54
РОЗДІЛ 2 СЕРЕДНЯ ІОНОСФЕРА УКРАЇНСЬКОГО РЕГІОНУ В СПОКІЙНИХ УМОВАХ	55
2.1 Стан космічної погоди	55
2.2 Регулярні варіації концентрації електронів	55
2.3 Хвильові збурення концентрації електронів	57
2.4 Результати спектрального аналізу	58
2.4.1 Спектральний склад добово-сезонних варіацій абсолютних значень збурень концентрації електронів	59
2.4.2 Спектральний склад добово-сезонних варіацій	

відносних значень збурень концентрації електронів	60
2.5 Обговорення	62
Висновки до розділу 2	64
РОЗДІЛ 3 ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ У СЕРЕДНІЙ ІОНОСФЕРІ	65
3.1 Загальні відомості про сонячне затемнення 4 січня 2011 р.	65
3.1.1 Короткі відомості про затемнення	65
3.1.2 Стан космічної погоди	65
3.2 Варіації параметрів іоносфери протягом сонячного затемнення 4 січня 2011 р.	66
3.2.1 Часові варіації критичних частот	66
3.2.2 Часові варіації діючих висот	70
3.2.3 Часові варіації висоти h_p	72
3.2.4 Часові варіації концентрації електронів у максимумі іонізації	73
3.3 Хвильові збурення	74
3.4 Обговорення результатів спостереження	76
3.4.1 Варіації параметрів іонограм	76
3.4.2 Дифузні відбиття	76
3.4.3 Варіації концентрації електронів	77
3.5 Загальні відомості про сонячне затемнення 20 березня 2015 р.	80
3.6 Варіації параметрів іоносфери протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. над Європою	82
3.6.1 Часові варіації критичної частоти f_oF2	82
3.6.2 Часові варіації висоти h_p	82
3.7 Хвильові збурення протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. над Європою	85
3.7.1 Часові варіації збільшень критичної частоти f_oF2	85
3.7.2 Часові варіації збільшень висоти h_p	90
3.7.3 Результати системного спектрального аналізу	91
3.8 Обговорення	96

Висновки до розділу 3	99
РОЗДІЛ 4 ЕФЕКТИ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА У СЕРЕДНІЙ ІОНОСФЕРІ	101
4.1 Загальні відомості	101
4.2 Засоби та методи дослідження	102
4.3 Часові варіації частоти f_oF2	104
4.4 Результати спектрального аналізу	108
4.5 Обговорення результатів спостережень	110
Висновки до розділу 4	117
РОЗДІЛ 5 АПЕРІОДИЧНІ ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ЗБУРЕННЯ В ІОНОСФЕРІ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ НАГРІВАННЯ ІОНОСФЕРИ ПОТУЖНИМ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯМ	118
5.1 Загальні відомості	118
5.2 Стан космічної погоди	119
5.3 Засоби та методи досліджень	120
5.3.1 Нагрівний стенд «Сура»	120
5.3.2 Засоби спостереження	121
5.4 Результати спостережень	123
5.4.1 Приклади іонограм	123
5.4.2 Варіації $f_{\min}$ 27 серпня 2012 р.	125
5.4.3 Варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р.	126
5.4.4 Варіації $f_{\min}$ 29 серпня 2012 р.	128
5.4.5 Варіації $f_{\min}$ 30 серпня 2012 р.	129
5.5 Обговорення результатів спостереження	131
5.5.1 Варіації $f_{\min}$ у с.м.т. Васильсурську	131
5.5.2 Варіації $f_{\min}$ у м. Троїцьк	132
5.5.3 Варіації $f_{\min}$ у м. Гайдари	133
5.5.4 Варіації $f_{\min}$ у м. Прухониць	134
5.5.5 Результати розрахунків	135
5.5.6 Оцінка потоків електронів	138

5.6 Експеримент 2013 р.	140
5.6.1 Методика аналізу	140
5.6.2 Стан космічної погоди	140
5.6.3 Часові варіації критичної частоти поблизу с. Гайдари	148
5.6.4 Часові варіації критичної частоти поблизу м. Троїцьк	149
5.6.5 Часові варіації критичної частоти поблизу м.Прухониць	152
5.6.6 Частота появи сплесків f_0F2	154
5.6.7 Час запізнювання та тривалість сплесків f_0F2	155
5.6.8 Амплітуда сплесків критичної частоти та концентрації електронів	156
5.6.9 Зв'язок з роботою нагрівного стенда	157
5.7 Залежність від режиму роботи нагрівного стенда	157
5.7.1 Характер збурень	161
5.7.2 Механізм аперіодичних збурень	162
Висновки до розділу 5	164
ВИСНОВКИ	167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
ДОДАТОК Список публікацій здобувача за темою дисертації	193

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

UT – Universal Time (світовий час)

АПФ – адаптивне перетворення Фур'є

ВГХ – внутрішні гравітаційні хвилі

ВЗ – вертикальне зондування

ЗАІМ – Земля – атмосфера – іоносфера –магнітосфера

ІБ – іоносферна буря

ШСЗ – штучний супутник Землі

МГД – магнітогідродинамічна

СЗ – сонячне затемнення

СМСМІАЗ – Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля

НІБ – негативна іоносферна буря

ВПФ – віконне перетворення Фур'є

ПІБ – позитивна іоносферна буря

РПдП – радіопередавальний пристрій

РПП – радіоприймальне пристрій

СА – сонячна активність

ХЗ – хвильові збурення

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Геокосмос, який являє собою комбінацію верхньої атмосфери, іоносфери та магнітосфери, є об'єктом спостереження тисяч штучних супутників Землі (ШСЗ). Ці супутники за допомогою радіосигналів забезпечують землян даними про космічну погоду, про атмосферну погоду, про процеси під землею, на землі й у космосі. Геокосмічне середовище є основним радіоканалом для засобів телекомунікації, радіолокації, радіонавігації та моніторингу процесів у різних середовищах.

Крім регулярних варіацій параметрів іоносфери, у ній виникають аперіодичні та квазіперіодичні збурення, які через їхній випадковий момент виникнення, значні амплітуди та тривалості обмежують потенційні можливості засобів телекомунікації, радіолокації та радіонавігації.

Відомо, що іоносфера є «дзеркалом», у якому відбиваються процеси, що відбуваються під землею, на землі й у космосі, інакше кажучи, іоносфера є підсистемою систем Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (її внутрішні оболонки) і Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера. Іоносфера також відповідальна за взаємодію підсистем у зазначених системах. Оскільки згадані процеси накладаються один на один, виникає необхідність їх селекції.

Розв'язання задачі селекції збурень в іоносфері, викликаних певним джерелом енерговиділення (землетрусами, цунамі, виверженнями вулканів, грозами, падіннями великих космічних тіл, спалахами на Сонце, викидами корональної маси, сонячним термінатором, сонячними затемненнями, стартами та польотами космічних апаратів, потужними вибухами, потужним радіовипромінюванням, викидами хімічних реагентів і т.п.), вимагає безперервних спостережень у глобальних масштабах. У цей час такі спостереження тільки розпочинаються. Прикладом такого проекту є проект GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory). Уже існують карти повного

електронного змісту, які відображають глобальні варіації цього параметру.. Поки що дослідники обмежуються вивченням реакції геокосмічного середовища на джерело енерговиділення заданої природи.

Тому дослідження геокосмоса й, зокрема, іоносфери, а також варіацій характеристик радіохвиль, викликаних впливом на іоносферу потужних джерел енерговиділення, є актуальною радіофізичною задачею.

Аперіодичні та квазіперіодичні процеси в іоносфері в спокійних і збурених умовах досліджувалися раніше Є. Л. Афраймовичем, Б. М. Гершманом, В. Г. Галушком, В. І. Дробжевим, В. А. Місьюрою, В. М. Сорокіним, Г. В. Федоровичем, В. І. Тараном, Л. Ф. Черногором, Ю. М. Ямпольским, K. Davies, J. C. Foster, C. O. Hines, K. Hocke, S. H. Francis, K. Schlessel, P. J. S. Williams і багатьма іншими.

Незважаючи на існуючий потужний доробок у галузі досліджень аперіодичних та квазіперіодичних процесів у іоносфері, існує низка прогалин. Так, мало вивчені аперіодичні та квазіперіодичні збурення під час такої унікальної події як вибух Челябінського метеороїда, під час рідкісних явищ на зразок сонячних затемнень, під час дії віддаленого на 1000 км потужного радіовипромінювача, тощо.

Дана дисертація присвячена вивченню хвильових варіацій концентрації електронів в F-області іоносфери в характерні геофізичні періоди, а також аперіодичних і квазіперіодичних збурень в іоносфері, викликаних сонячними затемненнями, польотом і вибухом Челябінського метеороїда, впливом потужного радіовипромінювання, віддаленої на тисячі кілометрів потужної радіосистеми.

Дослідженню реакції іоносфери на сонячні затемнення присвячена значна кількість робіт. Опублікована перша у світі монографія «Фізичні ефекти сонячних затемнень в атмосфері та геокосмосі» [1]. Проте, дослідження реакції іоносфери залишається актуальною задачею. Справа в тому, що відгук іоносфери залежить від стану атмосферної та космічної погоди, місця та часу доби, а також фази сонячного затемнення (СЗ).

Вивченню реакції іоносфери на вплив потужного радіовипромінювання також присвячена велика кількість робіт. Відомо кілька монографій, присвячених цим питанням [2–6]. Як правило, при цьому досліджуються збурення, що виникають у межах діаграми спрямованості антени, і тільки монографія [5] присвячена вивченню великомасштабних (порядку 1000 км) збурень. Ефекти, вперше виявлені та описані в монографії [5], досліджуються й у даній роботі.

Унікальні ефекти в іоносфері, що супроводжували падіння Челябінського космічного тіла, мають особливу новизну. Оскільки такі події трапляються один раз приблизно за сотню років, то подібні дослідження мають велике значення.

Наведені вище аргументи свідчать про актуальність і затребуваність досліджень, проведених у дисертації.

У даній дисертаційній роботі досліджується реакція іоносфери на два сонячні затемнення, падіння Челябінського космічного тіла, вплив потужного радіовипромінювання системи, віддаленої приблизно на 1000 км від джерела.

Крім того, проведене спостереження за природними (фоновими) збуреннями в іоносфері для чотирьох характерних геофізичних періодів (весняне та осіннє рівнодення, зимове та літнє сонцестояння) у періоди росту та спаду сонячної активності в 24 циклі його активності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

У дисертації наведені результати досліджень, виконані автором самостійно або з його науковим керівником протягом 2010–2017 рр. відповідно до наукових робіт Інституту іоносфери НАНУ та МОНУ. Основними НДР є:

«Комплексні дослідження варіацій середньоширотної іоносфери при різних рівнях геомагнітної активності», номер держреєстрації 0108U001259; (здобувач – виконавець);

«Хвильові збурення в іоносфері над Україною за даними харківського радару некогерентного розсіяння », номер держреєстрації 0111U001428; (здобувач – виконавець);

«Дослідження хвильових процесів в іоносфері методом некогерентного розсіяння», номер держреєстрації 0114U002623; (здобувач – виконавець);

«Дослідження хвильових процесів в іоносфері методом некогерентного розсіяння», номер держреєстрації 0116U005029; (здобувач – відповідальний виконавець);

«Дослідження хвильових процесів в іоносфері методом некогерентного розсіяння», номер держреєстрації 0117U001259; (здобувач – відповідальний виконавець).

Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є дослідження іонозондовим методом реакції іоносфери (в основному F-області) на вплив ряду потужних джерел енерговиділення, а також добово-сезонних варіацій концентрації електронів при рості та спаді сонячної активності.

Для досягнення поставленої мети розв'язувалися наступні задачі.

1) Дослідження реакції концентрації електронів F-області іоносфери на сонячні затемнення 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. над м. Харків, а також над Європою.

2) Дослідження реакції концентрації електронів F-області іоносфери на падіння Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 р.

3) Дослідження реакції іоносфери на вплив на неї потужного радіовипромінюванням радіотехнічної системи, віддаленої від місця спостереження на відстань близько 1000 км.

4) Дослідження добово-сезонних варіацій концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери в періоди росту та спаду сонячної активності.

Об'єкт дослідження – нижня та середня іоносфера.

Предмет дослідження – регулярні та нерегулярні варіації концентрації електронів у нижній і середній іоносфері в природних і збурених потужними джерелами енерговиділення умовах.

Методи дослідження

Для спостережень за станом іоносфери в дисертації використовується найпоширеніший у світовій практиці радіофізичний метод вертикального зондування іоносфери. Для аналізу результатів спостережень використовувалися методи математичної статистики та статистичної радіофізики, а також системний спектральний аналіз, в основу якого покладені віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Встановлено, що СЗ 4 січня 2011 р. викликало істотні варіації параметрів іонограм, що свідчать про значну перебудову іоносфери протягом затемнення. Фізико-хімічні процеси в цих шарах відповідали існуючим уявленням. Зокрема, сонячне затемнення супроводжувалося збільшенням відносної амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів приблизно у два рази. Періоди цих збурень відповідали параметрам атмосферних гравітаційних хвиль.

2. Вперше отримано просторовий розподіл в масштабах Європи збурень в іоносфері протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р., та встановлена залежність величини збурень від фази затемнення, визначені основні параметри аперіодичних і квазіперіодичних збурень в F-області іоносфери.

3. Вперше за допомогою мережі іонозондів, розташованих на відстанях до 2.2 тис. км від джерела впливу, виявлені великомасштабні збурення в нижній іоносфері, викликані впливом на іоносферу потужним періодичним радіовипромінюванням. Встановлено, що мінімальна спостережувана на іонограмах частота збільшувалася від 1.8 до 3.2 МГц, а концентрація електронів у нижній іоносфері при цьому – на сотні відсотків.

4. Вперше за допомогою мережі іонозондів, віддалених до 2.2 тис. км, виявлені аперіодичні великомасштабні збурення концентрації електронів у шарі F2, які викликані впливом потужного періодичного радіовипромінювання, на тлі помірних геокосмічних бур. Встановлені основні параметри цих збурень.

5. Вперше за допомогою мережі іонозондів, віддалених на відстані 1.5–3.1 тис. км від місця падіння космічного тіла, діагностована картина відгуку

іоносфери на падіння великого метеороїду, виявлені великомасштабні квазіперіодичні збурення концентрації електронів в іоносфері, які викликані прольотом і вибухом Челябінського метеороїда. Швидкість поширення збурень становила 600–700 м/с, період – 70–135 хвилин, відносна амплітуда 10–20 %.

6. Вперше на фазі росту та спаду сонячної активності в її 24-ому циклі виконані систематичні дослідження в спокійних умовах аперіодичних і квазіперіодичних збурень у шарі F2 іоносфери для чотирьох характерних геофізичних періодів і встановлені основні параметри цих збурень.

Практичне значення одержаних результатів

Вивчені в дисертаційній роботі квазіперіодичні та аперіодичні збурення, в остаточному підсумку, обмежують потенційні характеристики радіосистем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації та т.п. Цим визначається практична значимість отриманих у роботі результатів.

Зокрема, дослідження реакції іоносфери на два СЗ, у тому числі й реакції іоносфери в масштабах Європи, дозволяють змодельовати вплив збуреної затемненням іоносфери на умови поширення радіохвиль, що випромінюються радіотехнічними системами різного призначення.

Практичне значення також має виявлення величини реакції та визначення дальності її дії при нагріванні іоносфери радіовипромінюванням потужного радіотехнічного стенда, віддаленого на відстань приблизно в 1000 км, що дозволяє одержати вихідні дані для моделювання збуреного іоносферного радіоканалу.

Природні іоносферні збурення є тлом, на якому розгортаються збурення іншої природи. Проведене у дисертаційній роботі дослідження вказаного тла для чотирьох характерних геофізичних періодів на стадії росту та спаду сонячної активності необхідно для розв'язання практичної задачі – селекції збурень, що викликаються заданим джерелом енерговиділення.

Особистий внесок здобувача

Розв'язання задач, поставлених у дисертації, виконано її автором особисто або за його безпосередньої участі.

Результати дисертації опубліковані в 7 статтях [7–13] в фахових виданнях і додатково в 2 не фахових виданнях [14, 15]. Також матеріали було докладено на 10 конференціях [16–25]. При підготовці цих робіт автор дисертації приймав участь в підготовці та проведенні експериментів. Провів обробку даних вимірювань проведених на мережі іонозондів. Приймав участь у аналізі результатів обробки, тлумаченні отриманих результатів і написанні окремих розділів статей і тез.

Апробації результатів дисертації

Результати дисертації доповідалися на міжнародних і національних конференціях.

Міжнародні конференції. XXI Міжнародна науково-практична конференція: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (м. Харків, Україна, 2013 р.); International School-Conference "Remote Radio Sounding of the Ionosphere" (Malyi Mayak, Ukraine, 2013); 2014 EGU General Assembly -2014(м. Відень, Австрія); Міжнародна наукова конференція Microcad 2014 (м. Харків, Україна, 2013 р.); 10-th International Conference "Problems of Geocosmos".(St. Petersburg, Russia, 2014); ION-2014 (Tromso, Norway, 2014).

Національні конференції. 11-th, 17-th Ukrainian conference on space research. (Ukraine, 2011, 2017pp.).

Місцеві конференції. Конференція молодих учених "Дистанційне радіозондування іоносфери"(м. Харків, Україна, 2013 р.).

Публікації

Основні результати дисертації опубліковані в 5 статтях українських видань [7, 8, 10, 11, 13] (1 входить до бази Scopus [10]), у 2 статтях зарубіжних видань [9, 12] (1 входить бази Scopus [9], 1 до бази РІНЦ), що є фаховими для спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Додатково опубліковано в 2 статтях українських не фахових виданнях для спеціальності 01.04.03 – радіофізика. [14, 15] і 10 тезах доповідей [16–25] міжнародних і вітчизняних конференцій.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі списку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 196 сторінок. Дисертація містить 40 рисунків (з них 13 на 13 окремих сторінках) і 20 таблиць (з них 3 на 6 окремих сторінках). Список використаних джерел на 21 сторінці налічує 209 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Іоносфера – один з основних каналів поширення радіохвиль. Вона суттєво впливає на характеристики радіохвиль із довжиною хвилі від сантиметрів до тисяч кілометрів (див., наприклад, [26–30]). Особливу роль відіграють нестационарні процеси в іоносфері. Саме вони обмежують потенційні характеристики систем радіолокації, радіонавігації та телекомунікацій (див., наприклад, [27]).

Серед нестационарних процесів в іоносфері важливе місце займають квазіперіодичні (хвильові) процеси. Їхньому дослідженню присвячена велика кількість експериментальних і теоретичних робіт. Незважаючи на це, систематичне вивчення таких процесів тільки починається (див., наприклад, [31–52]). Провідну роль у дослідженні хвильових процесів відіграють радіофізичні методи. До них відносяться методи некогерентного розсіювання, доплеровського зондування, часткових відбиттів, вертикального зондування та ін..

Для побудови моделі хвильових процесів в іоносфері потрібні безперервні спостереження в глобальних масштабах. Поки це неможливо. Тому дослідники обмежуються вимірами для характерних геофізичних періодів. До них відносяться весняне та осіннє рівнодення, а також літнє та зимове сонцестояння.

1.1 Метод вертикального зондування

Експериментальне дослідження іоносфери ведеться головним чином за допомогою радіофізичних методів, тобто шляхом вивчення умов проходження, відбиття та розсіювання радіохвиль в іоносфері.

Одним з методів, що використовуються для одержання оперативних відомостей про іоносферу, є метод вертикального зондування іоносфери.

Метод заснований на відбитті радіохвилі від неоднорідної плазми, в тому числі випадково неоднорідної, саме такою є висотна структура іоносфери Землі. Радіоприймальна апаратура дозволяє вимірювати та робити аналіз часу запізнювання (або діючої висоти) відбитих від іоносфери радіоімпульсів як функції несучої частоти, що поступово змінюється.

Залежність висоти відбиттів від частоти називається висотно-частотною характеристикою (іонограмою) (рис. 1.1).

З іонограм визначаються основні параметри, такі як величина діючої висоти кожного шару (що позначаються як $h'E$, $h'F1$ і $h'F2$ і т.д.) і частота, при якій діюча висота стає нескінченно великою внаслідок того, що хвиля досягає рівня максимальної електронної концентрації у даному шарі (що позначаються як f_oE , f_oF1 і f_oF2 і т.д.) [34].

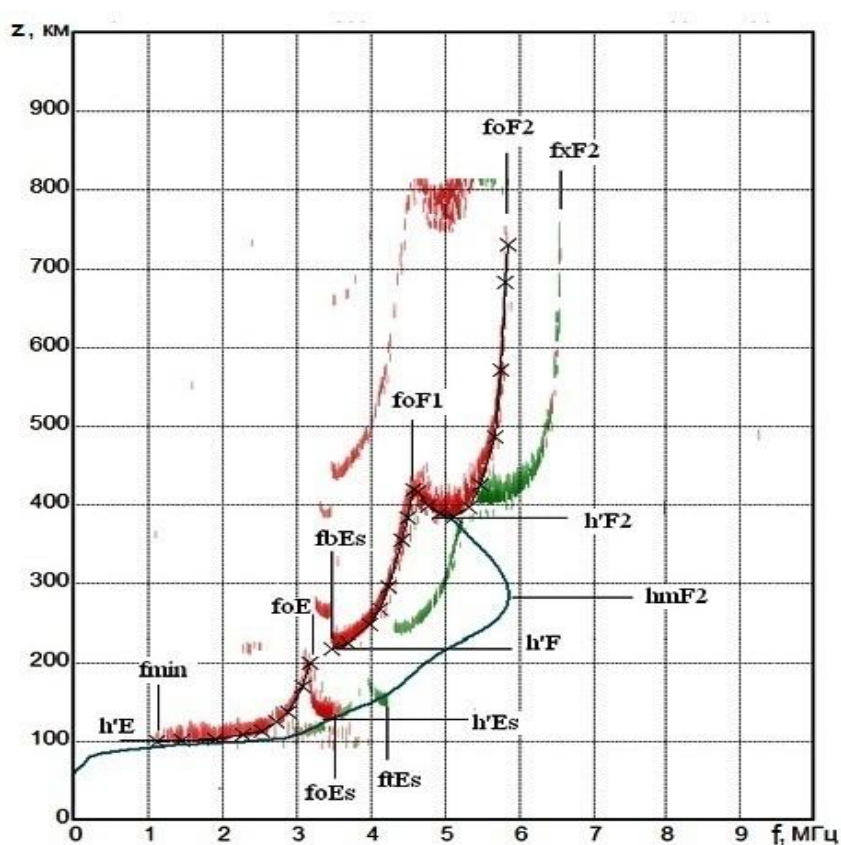


Рис. 1.1 Вигляд висотно-частотної характеристики іоносфери, знятою наземною станцією

Діюча висота завжди більше дійсної. Це походить від того, що сигнал поширюється із груповою швидкістю v меншої швидкості світла у вакуумі c . Для подолання певної відстані сигналу необхідний час

$$\Delta t = \int_s \frac{ds}{v}.$$

Якщо сигнал поширюється вертикально вгору до висоти відбиття z , то отримаємо

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_0^z \frac{dz}{n} = \frac{h'}{c},$$

де

$$h' = \int_0^z \frac{dz}{n}.$$

n – показник заломлення. Величина h' – діюча висота. Оскільки в ізотропній плазмі $v = cn = c\sqrt{1 - \omega_p^2/\omega^2}$ завжди буде менше швидкості електромагнітної хвилі у вакуумі c , то Δt завжди менше часу поширення сигналу у вакуумі, звідси випливає що, $h' \geq z$.

Метод дозволяє одержати профілі електронної концентрації $N(z)$ на висотах приблизно від 100 до 350–400 км.

В області F відбувається розщеплення відбиттів від шару F2. Це відбувається через те, що уздовж зовнішнього магнітного поля можуть поширюватися дві хвилі, діелектричні проникності для яких по визначенню рівні

$$\varepsilon_{o,x} = \varepsilon_{xx} \mp i\varepsilon_{xy}$$

тут $\varepsilon_{xx} = 1 - \omega_p^2/(\omega^2 - \omega_B^2)$ і $\varepsilon_{xy} = i(\omega_p^2\omega_B/\omega(\omega^2 - \omega_B^2))$ – компоненти тензора діелектричної проникності, ω_p – плазмова частота, ω_B – гірочастота електронів. Підставивши ε_{xx} і ε_{xy} і зробивши перетворення, одержимо

$$\varepsilon_{o,x} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \omega_B)}.$$

Хвилі, відповідні до індексів «о» і «х», називають звичайною та незвичайною. Визначення “незвичайна хвиля” пов'язане з тим, що для неї при

$\omega \rightarrow \omega_B$ з'являється особливість у знаменнику. Фізично вона пов'язана з тим, що кутова швидкість обертання вектора електричного або магнітного поля збігається по величині та напрямку з кутовою швидкістю обертання електронів (гірочастотою). Це явище називається гірорезонансом.

Наведений вище вираз є точним при поздовжньому поширенні досить високочастотних хвиль у холодній плазмі без зіткнень.

1.2 Іонозонди

Основні експериментальні дані про іоносферу отримані за допомогою радіоапаратури. Інструментом, що одержав найбільше поширення в дослідженнях іоносфери стала, іоносферна станція (іонозонд).

Основні частини іонозонда, який по суті є радаром, це радіопередавальний пристрій (РПдП), антени що приймають та передають, радіоприймальний пристрій (РПП), реєстратор. Для іоносферної станції основне завдання полягає в одержанні висотно-частотних характеристик.

РПдП випромінює радіохвилі короткими імпульсами, їх тривалість $\tau = 10\text{--}100$ мкс, а частота повторення імпульсів $F = 50\text{--}100$ Гц. У силу того, що $\tau F \ll 1$ є досить часу щоб випромінений імпульс зміг відіб'ється від досліджуваного об'єкта та повернутися назад. Відбитий імпульс приймається РПП, розташованим поряд з передавачем.

Приймальнопередаюча антена іонозонда влаштована так, що випромінювання відбувається вертикально вгору. РПдП через антену випромінює короткі послідовності радіоімпульсів, а РПП, за допомогою приймальної антени, у режимі приймання вловлює радіохвилі, відбиті від іоносфери. Тому, знаючи час початку випромінювання та включаючи приймач через певні проміжки часу, можна одержати висоту шару, що відбиває.

Іонозонд випромінює не на одній фіксованій частоті, а в діапазоні частот. Останні можуть змінюватися безупинно або дискретно. За час, рівний приблизно одній хвилині, діапазон частот може змінюватися від 0.5 до 20 МГц. Низькі

частоти відбиваються від нижніх іоносферних шарів (частоті 0.5 МГц відповідає концентрація електронів N приблизно $2.5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ і висота відбиття близько до 100 км), а високі частоти — від верхніх шарів, де $N \approx (5-15) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Зміни частоти та висоти шару, що відбиває, реєструють за допомогою різних видів апаратури.

При роботі з іонограмами використовується міжнародна інструкція з обробки та інтерпретації іонограм URSI [53]. Вивчення висотно-частотних характеристик дозволяє одержати різні параметри іоносферних шарів.

Таблиця 1.1

Географічне положення та типи іонозондів, використаних у даній роботі

Іонозонд	Широта	Довгота	Тип іонозонда
Tromsö	69.6°N	19.2°E	DPS-4
Fairford	51.7°N	1.5°W	DISS
Dourbes	50.1°N	4.6°E	DGS-256
Juliusruh	54.6°N	13.4°E	DPS-1
Pruhonicе	50.0°N	14.6°E	DPS-4
Rocuetes	40.8°N	0.5°E	DGS-256
El Arinosillo	37.1°N	6.7°W	DGS-256
Москва	55.5°N	37.3°E	DPS-4
San Vito	40.6°N	17.8°E	DISS
Харків	49.6°N	36.3°E	НЦІ
Athens	38.0°N	23.5°E	DGS-128

Наземне розташування іонозонда накладає обмеження на одержувану інформацію про іоносферу. Так, можна досліджувати тільки ту частину іоносфери, яка розташована нижче головного максимуму, тобто до висоти 300–350 км.

В даний час існує міжнародна мережа з 164 іонозондів різних типів (моделей), що дозволяє здійснювати широкомасштабний моніторинг стану

іоносфери.

У таблиці 1.1. наведені географічне положення та типи іонозондів, за допомогою яких отримані дані, використані в роботі.

1.3 Морфологія незбуреної середньої іоносфери

Вперше гіпотезу про існування провідного шару у верхній атмосфері висунув Стюарт в 1878 р. для пояснення особливостей збурення геомагнітного поля. Першими хто експериментально довів присутність шарів, що відбивають радіохвилі, були Епплтон, Брейт, Барнет і Тьюв [28]. Вони ж і стали основоположниками систематичного вивчення іоносферних областей.

Іоносфера – іонізована область земної атмосфери, яка починається з висот близько 60 км і поширюється до висоти 1000 км. Іоносфера являє собою слабоіонізовану плазму, яка перебуває в магнітному полі Землі. Її існування обумовлене впливом електромагнітного та корпускулярного випромінювань Сонця.

Відомо, що концентрація електронів в іоносфері розподілена по висоті нерівномірно. Існують області, де концентрація досягає максимуму (рис. 1.2).

Нижче 90 км розташована область D, яка в середніх широтах у нічний час практично відсутня. На високих широтах область D є присутня практично завжди. Це відбувається тому, що у високоширотній іоносфері іонізація на висотах менш 100 км підтримується за рахунок проникнення в атмосферу корпускул. Цей процес одержав назву висипання часток. Роль магнітного поля на цих висотах підвищена, тут сильно проявляється плазмова турбулентність.

E-область перебуває на висотах 90–140 км. На цих же висотах, епізодично, виникає спорадичний шар Es. Іонізація утворена в основному ультрафіолетовим випромінюванням. У цій області починає проявлятися вплив геомагнітного поля та протікають найбільш сильні струми. E-область іоносфери найбільш стабільна.

Вище розташована область F. Уночі F-область піднімається до висот 250–400 км, а вдень, в основному влітку, роздвоюється на шар F1, розташований на

висотах 150–200 км і шар F2, який перебуває на висотах 200–1000 км. В області F, на висоті 300–400 км, знаходиться головний максимум іонізації. Основним джерелом іонізації є короткохвильове сонячне випромінювання. У даній області яскраво виражений вплив магнітного поля, дифузія заряджених часток і інші електродинамічні процеси. F-область, на відміну від E-області, є нестабільною.

Висотний поділ шарів в іоносфері обумовлено зміною умов її утворення на різних висотах. До максимуму іонізації температури електронів T_e та іонів T_i , а також концентрація електронів N стрімко ростуть. У верхній частині іоносфери, на висотах області F, ріст $T_{e,i}$ і N уповільнюється. Вище області F відбувається зменшення N спочатку поступово до висот 15–20 тис. км (плазмопауза), а потім більш різко, переходячи до низьких концентрацій N у міжпланетному середовищі. Характеристики іоносфери змінюються із широтою, розрізняють середньосиротну, екваторіальну, авроральну та полярну іоносфери. Найбільш регулярно є середньосиротна іоносфера.

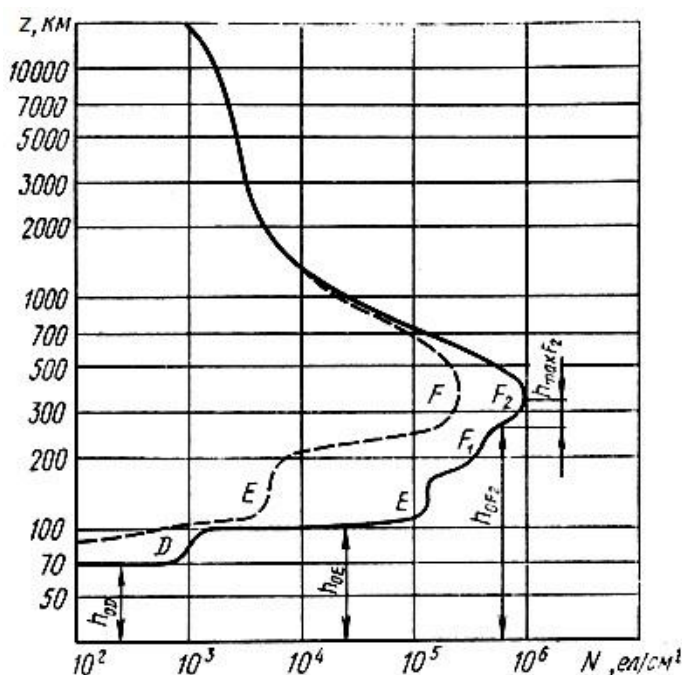


Рис. 1.2 Типовий розподіл по вертикалі електронної концентрації N в іоносфері: — вдень; - - - вночі; буквами відзначене положення різних областей

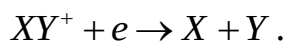
Структура спокійної іоносфери регулярно змінюється в часі: протягом дня,

сезону та 11-літнього сонячного циклу. Від мінімуму до максимуму сонячного циклу N змінюється від $N_{\min}$ до $N_{\max}$, ростуть температура електронів і іонів, висота шарів іоносфери, зменшується коефіцієнт рекомбінації α . Середньостатистичні дані про параметри іоносфери наведені в табл. 1.2 [54] Іоносфера – система, якій властиві хімічні та динамічні процеси. Під дією електромагнітного та корпускулярного випромінювань в іоносфері утворюються вільні електрони. Їхня швидкість утворення $q_e \sim 10^7 - 10^{11} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Одночасно з утворенням електронів має місце їх зникнення із швидкістю q_r . Зміна N у часі з урахуванням вертикального переносу плазми зі швидкістю V_z описується рівнянням балансу концентрації електронів

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(NV_z) = q_e - q_r. \quad (1.1)$$

Додамо, що транспорт плазми необхідно враховувати лише на висотах більших 250–300 км.

Аналогічно вводяться рівняння балансу позитивних N^+ і негативних N^- іонів, причому має місце закон збереження заряду, тобто $N + N^- = N^+$. Електрони зникають через рекомбінацію, яка йде за схемою

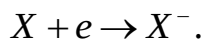


При $N \gg N^-$ маємо

$$q_r = \alpha N N^+ \approx \alpha N^2,$$

оскільки при $z \geq 80 \text{ км}$ $N^+ \approx N$.

На висотах $z \leq 80 \text{ км}$ густина атмосфери значна та досить велика ймовірність процесу прилипання електронів, який протікає за схемою



Важливо, що $q_r = \beta N$, де β – швидкість прилипання.

В іоносфері також мають місце динамічні процеси. Причини їх виникнення такі ж, як і в нейтральній атмосфері. Це відбувається тому, що при $z \leq 400 - 500$ км іонізований компонент, є малою домішкою, захоплюється нейтральним середовищем.

Таблиця 1.2

Значення параметрів областей іоносфери для середніх широт [54]

Область (шар) іоносфери	Висота максимуму, км	T_i , К	День		Ніч N , м^{-3}	α , $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$
			$\min N$, м^{-3}	$\max N$, м^{-3}		
D	70	220	10^8	$2 \cdot 10^8$	10^7	10^{-12}
E	110	270	$1.5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{10}$	10^{-13}
F1	180	800– 1500	$3 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{11}$	–	$3 \cdot 10^{-14}$
F2 (зима)	220–280	1000–	$6 \cdot 10^{11}$	$25 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{11}$	$2 \cdot 10^{-16}$
F2 (літо)	250–320	2000	$2 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{11}$	$\sim 3 \cdot 10^{11}$	10^{-16}

Однак, на висотах більш 100 км значний вплив починають виявляти електродинамічні процеси, не властиві нейтральній атмосфері.

В іоносфері, зокрема, мають місце дифузія, термодифузія та теплопровідність. Динамічні процеси відносяться насамперед до рухливих електронів, однак через кулонівські сили останні рухаються разом з іонами. Тому говорять про амбіполярну дифузію та амбіполярну термодифузію.

Електродинамічні сили приводять до струмів і дрейфу заряджених частинок. Електродинамічні процеси обумовлені магнітним полем Землі та електричним полем іоносферно-магнітосферного походження.

1.4 Джерела збурення іоносфери

Джерела збурень в іоносфері можуть бути класифіковані по енергетиці,

напрямку впливу на іоносферу, викликуваним збуренням, походженню і т.д. Найважливішим і найбільше «впливовим» джерелом є Сонце, інші джерела менше впливають на іоносферу. Більш докладно параметри джерел збурень описані в роботі [55].

1.5 Результати дослідження збурень у середній іоносфері

Метод вертикального зондування успішно використовується для спостереження процесів не тільки в спокійній іоносфері, але й в іоносфері, збуреній сонячними спалахами, викидами коронарної маси, сонячними затемненнями, падінням великих космічних тіл, стартами ракет, потужним радіовипромінюванням і т.п.

1.5.1 Ефекти іоносферних бур

Іоносферна буря – одна зі складових геокосмічних бур [55]. Вона являє собою порівняно швидкі й істотні відхилення параметрів іоносфери від їхнього незбуреного значення, властивого спокійної іоносфері.

Іоносферна буря належить до нерегулярних явищ. Час наростання бурі може варіюватися від декількох хвилин до декількох годин, її тривалість становить 1–7 діб. Приблизні характеристики магнітних збурень і класифікація магнітних бур наведені в табл. 1.3, 1.4.

Одним з основних ефектів, що проявляються в іоносфері під час бурі, є зменшення значення критичної частоти шару F2, рідше відзначається зменшення значення критичної частоти для шару F1.

Явище зменшення N називають негативною фазою іоносферної бурі, а її збільшення – позитивною фазою бурі [55].

Розвиток бурі приводить до появи нижче E області шару, з сильним поглинанням, який часто екранує відбиття радіохвиль від іоносфери.

Епізодично, при слабких магнітних бурях, може виникати «потужний» спорадичний шар Es. Даний ефект переважає у високих широтах.

При подальшому розвитку бурі спостерігається збільшення мінімальної висоти шару F2.

Таблиця 1.3

Класифікація негативних іоносферних бур (НІБ) і їх основні параметри [55]

ТИП ІБ	Назва НІБ	$\frac{N_{m0}}{N_{mmin}}$	$I_{sb}, \text{дБ}$	$\frac{T_e}{T_{e0}}$	$\frac{T_i}{T_{i0}}$	Тривалість ІБ, години	Кількість ІБ у циклі СА
NIS5	Украй сильна	>10	>10	3–4	2–2.5	70–100	2–4
NIS4	Дуже сильна	4–10	6–10	2–3	1.5–2	50–70	50–150
NIS3	Сильна	2–4	3–6	1.5–2	1.3–1.5	30–50	150–300
NIS2	Помірна	1.4–2	1.5– 3.0	1.2– 1.5	1.1–1.3	20–30	400–800
NIS1	Слабке збурення	1–1.4	0–1.5	1–1.2	1–1.1	5–20	1000–2000

Усі бурі, що спостерігалися мають різну морфологію [56]. Відзначимо, що результати спостережень однієї й тієї ж бурі на різних станціях мають істотні відмінності. Вони викликані географічним розташуванням станції спостереження, відмінністю місцевого часу, моментів щодо сходу або заходу Сонця і т.д.

Іоносферна буря, яка є відгуком на геомагнітну бурю, має набір розрізняювальних характеристик. Існує класифікація іоносферних бур залежно від інтенсивності [55].

Таблиця 1.4

Характеристики позитивних іоносферних бур в F- і E- областях іоносфери

ТИП ІБ	Назва ПІБ	Ефекти ПІБ	Індекс ПІБ, дБ	Кількість ІБ у циклі СА
PIS5	Украй сильна	Збільшення до 2–3 раз ПЕВ, збільшення частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, збільшення в 1.5– 2 рази коефіцієнта поглинання гектометрових, декаметрових і метрових радіохвиль	>4.8	1–3
PIS4	Дуже сильна	Те ж	4.0	~100
PIS3	Сильна	Те ж	3.2	~200
PIS2	Помірна	Те ж	2.3	~600
PIS1	Слабка	Збільшення на десятки відсотків ПЕВ, частотної ємності декаметрового каналу радіозв'язку, коефіцієнта поглинання гектометрових, декаметрових і метрових радіохвиль	1.0	1000–2000

1.5.2 Ефекти сонячних затемнень

Сонячне затемнення (СЗ) представляє дослідникові унікальну можливість простежити за динамікою системи Земля (її внутрішні оболонки) – атмосфера – іоносфера – магнітосфера та варіаціями геофізичних полів на інтервалі часу в кілька годин [1]. Збурення в цій системі, викликані різними СЗ, суттєво відрізняються. Параметри цих збурень залежать від часу настання СЗ, стану космічної погоди, сезону, положення в циклі сонячної активності, географічних координат і величини покриття диска Сонця [1].

Дослідження ефектів СЗ в іоносфері має столітню історію. Перші радіофізичні спостереження ефектів СЗ були виконані ще в 1912 р. [57]. Спочатку вивчався вплив затемнень на поширення радіохвиль в іоносфері. Починаючи з СЗ 31 серпня 1932 р., стали вивчатися динамічні процеси в

іоносфері, що супроводжували затемнення [58]. Найпоширенішим методом спостереження був метод вертикального зондування, що використовує іоносферні станції (іонозонди) [59–64]. Арсенал використовуваних методів значно розширився в 1960-х рр. стали широко використовуватися супутникові та ракетні методи [65–69], метод некогерентного розсіяння [70–78], а також цілий ряд інших методів (див., наприклад, [79–91]). У цих роботах описане зменшення концентрації електронів у всіх областях іоносфери, зменшення температур електронів і іонів, зміна швидкості руху плазми, потоків плазми та тепла, генерація хвильових збурювань у верхній іоносфері та інші ефекти, що супроводжували СЗ із різними фазами в різних регіонах земної кулі.

Результати іонозондових спостережень минулих років представлені в роботах [59–64]. До сучасних робіт відносяться [73–77].

Іонозондові спостереження показали, що СЗ супроводжуються рядом стійких ефектів: зменшенням концентрації електронів N , збільшенням діючої висоти відбиття, запізнюванням зменшень N відносно моменту настання максимальної фази затемнення, а також генерацією квазіперіодичних (хвильових) збурень в іоносфері. У той самий час слід мати на увазі, що кожному затемненню властиві свої, індивідуальні, особливості.

1.5.3 Ефекти Челябінського метеороїда

Вибух Челябінського космічного тіла над населеними пунктами, що супроводжувався яскравим спалахом і гуркотом, знайшов резонансний відгук у розумах великої кількості людей. Частково постраждали будівлі, переважно вікна, двері, стіни та стелі. У м. Челябінськ вибухом було вибито близько 20 тис. м² шибок. У Челябінській області постраждало від дрібних поранень більш 1.6 тис. чоловік. Жертв, на щастя, не було. Нанесений збиток перевищував 30 млн дол. США.

Вихідні дані про Челябінське космічне тіло представлені на сайті [92].

Метеороїд увійшов в атмосферу Землі 15 лютого 2012 р. в 03:20:26 UT. Космічне тіло рухалося приблизно зі сходу на захід (азимут становив близько 270°) під кутом до горизонту близько 20° . Початкова маса тіла $m_0 \approx 11$ кт, початкова швидкість $v_0 \approx 18.5$ км/з, а початковий діаметр тіла $d_0 \approx 18$ м (див., наприклад, [92]). Знайдені осколки метеорита свідчать про те, що він був кам'яним, точніше, космічне тіло являло собою хондрит типу LL5, у складі якого були металеве залізо, олівін і сульфіти. Залишки тіла впали в озеро Чебаркуль і поблизу нього.

Фізика метеорних явищ обговорюється у великій кількості робіт (див., наприклад, [93–95]).

Особливості падіння великих космічних тіл описані в цілому ряді робіт (див., наприклад, [94–99]). Принциповою особливістю є генерація сильної ударної хвилі великими тілами.

У роботах [100–104] теоретично оцінені основні фізичні ефекти, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда. При цьому використовувалася теорія, викладена в книгах [93, 94, 96, 99, 101, 103]. В [101, 103] показано, що основне енерговиділення величиною близько 0.2 Мт ТНТ (тринитротолуол) мало місце поблизу висоти 25 км, де швидкість втрати маси була порядку 10 кт/с, енергія оптичного випромінювання досягала декількох сотень тераджоулів. У роботах [101, 103] обґрунтовано, що падіння тіла повинно було привести до збурення не тільки нижньої, але й верхньої атмосфери, а також іоносфери на відстані не менше декількох тисяч кілометрів від місця падіння.

Результати перших спостережень ряду ефектів в іоносфері та геомагнітному полі, які супроводжували падіння Челябінського метеороїда, описані в роботах [102, 105, 106].

Становить безсумнівний інтерес пошук збурень в атмосфері та іоносфері на значних відстанях від місця падіння Челябінського метеорита. Як відомо, його вторгнення в атмосферу Землі відбулося зненацька. Тому цілеспрямовані виміри всього комплексу фізичних ефектів падіння космічного тіла у всіх середовищах (у всіх геосферах) виявилися неможливими. Частина ефектів зареєстрована

«черговими» засобами. До них відноситься мережа іонозондів, яка дозволяє проводити практично безперервний моніторинг іоносфери майже в глобальних масштабах.

Падіння Челябінського космічного тіла викликало відгук в іоносфері. Величина ефектів, що фіксувалися за допомогою різних радіофізичних засобів спостереження, залежала від місця реєстрації.

Найближчим джерелом інформації про вплив прольоту та вибуху метеороїда є радар ЕКВ (ЕКВ – Ekaterinburg, Єкатеренбург) Інститут сонячно-земної фізики Сибірського відділення Російської академії наук (ІСЗФ СВ РАН) і іонозонд «Вітрило» Інститут геофізики Уральського відділення Російської академії наук (ІГФ УрВ РАН). Радар і іонозонд перебувають приблизно на відстані 200 км від місця падіння метеороїда [107–116]. Збурення мали високу амплітуду та динаміку, але в перші години не викликало змін середніх параметрів іоносфери над центром збурення. Основні ефекти були зафіксовані на відстанях від 200 до 1500 км. Падіння та вибух метеороїда спричинили сплеск електронної концентрації на висотах 80–120 км. Час формування неоднорідності приблизно збігся з моментом падіння метеороїда [116].

В F-області експериментально встановлені швидкості переміщення збурень становили 250, 400 і 800 м/с. Збільшення концентрації електронів було близько 15%. Масштаб збуреної області склав близько 200 км. Радіальний характер збурень спостерігався протягом 80–100 хв.

Широкомасштабні спостереження, проведені на станціях, віддалених від місця падіння великих космічних тіл, дозволяють визначити ступінь впливу їх прольоту та вибуху в атмосфері Землі на іоносферу. Падіння Челябінського метеороїда, спостережуване на станціях, приблизно віддалених на 200, 1400, 1700 і 1900 км, викликало відгук в іоносфері. Він виражався в зміні електронної концентрації та висоти максимуму шару h_mF2 . Збурення були зафіксовані на висотах іоносфери від 100 до 250 км [116–138]. Перший відгук іоносфери був зафіксований у м. Свердловськ (200 км) і мав вигляд потужного спорадичного шару Es приблизно через годину після падіння метеороїда. На відстані близько

1400 і 1700 км шар Es виник через 4.5 і 6 годин відповідно. Про наявність спорадичного шару над м. Санкт-Петербург дані відсутні.

В області F відгук іоносфери виражався в зміні ходу критичної частоти f_oF2 . Він полягав у накладенні на регулярні зміни критичних частот коливань величиною від 1.2 до 3.9 МГц. При цьому спостерігався різкий ріст значень f_oF2 до максимального рівня, після чого слідував глибокий провал з наступним поверненням до початкових частот.

Зміна електронної концентрації N у максимумі шару F2 досягала 2.7 раз протягом 1–1.5 годин. Враховуючи той факт, що відгук іоносфери на падіння метеороїда був зафіксований на станції, що розташована в м. Санкт-Петербург (1900 км), можна стверджувати, збурення поширювалися на відстань мінімум 2000 км [116–138].

Найбільш повна інформація про Челябінський метеороїд наведена в роботах [111–117].

1.5.4 Ефекти впливу потужного радіовипромінювання

Дослідженню впливу потужного радіовипромінювання на іоносферу присвячена безліч статей і наукових праць, наприклад [137–152]. Є єдина монографія, у якій описані великомасштабні (~ 1000 км) збурення в іоносфері [5].

Викликані впливом потужного радіовипромінювання збурення плазми в межах області, що опромінюється, називаються локалізованими [5]. Горизонтальний розмір таких збурень – 10–100 км. Основним визначальним параметром є ширина діаграми спрямованості антени (ДНА) і процеси переносу частинок і тепла. Локалізовані збурення викликані нагрівним, стрикційним і іонізаційним механізмами нелінійності. Поряд із цим вплив потужного радіовипромінювання в геокосмосі викликає ефекти, які пов'язані із взаємодією підсистем у системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера (ЗАІМ), з переносом збурень на значні відстані. Такі збурення називаються

великомасштабними [5]. Їм властивий горизонтальний розмір порядку 1–3 тис. км. Потужне радіовипромінювання відіграє роль стимулятора процесів, подібних природнім.

Уперше ефекти, стимульовані потужним радіовипромінюванням гектометрового діапазону, були виявлені у вересні 1972 р. (див., наприклад, [5]).

З 1983 р. на полігоні Науково-дослідного радіофізичного інституту (НДРФІ) (с. Васильсурськ, Росія) почав роботу нагрівний стенд декаметрового діапазону «Сура». Це дозволило авторів [5] проводити систематичні експериментальні дослідження великомасштабних збурень поблизу м. Харків. Діагностика великомасштабних збурень проводилася за допомогою устаткування Радіофізичної обсерваторії (РФО) Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, (відстань між полігоном НДРФІ та обсерваторією – близько 960 км).

У ході досліджень було встановлено, що вплив потужного радіовипромінювання на іоносферу призводить до виникнення в навколоземному середовищі (геокосмосі) цілого комплексу геофізичних і радіофізичних ефектів [5].

До виявлених проявів геофізичних ефектів можна віднести наступні:

- утворення шарів іонізації на висотах $z \approx 70\text{--}100$ км із характерним горизонтальним масштабом не менше 1000 км;
- генерація або підсилення спорадичного шару Es (висоти $z \geq 100$ км);
- підсилення неоднорідної структури в нижній, середній і верхній іоносфері ($L_{\perp} \approx 1000$ км);
- генерація та поширення хвильових збурень концентрації плазми в середній іоносфері ($z \approx 150\text{--}300$ км), що мають швидкість 0.3–0.6 км/с і період 10–60 хв ($L_{\perp} \approx 1000$ км);
- збільшення температури електронів на 200–500 К у зовнішній іоносфері з $L_{\perp} \approx 1000\text{--}2000$ км;
- збільшення температури та концентрації електронів приблизно на 200 К і 10 % відповідно в магнітоспряженій для нагрівного стенда області;

– збільшення на 1–4 нТл рівня геомагнітного поля, що реєструється на поверхні Землі ($L_{\perp}$ не менш 500 км).

Прикладами стимульованих радіофізичних ефектів є:

- варіації рівня електромагнітних шумів у діапазоні частот не менш 1-20 МГц, що реєструються на поверхні Землі;
- підсилення рівня крайньо низько частотних (КНЧ) та дуже низько частотних (ДНЧ) випромінювань у зовнішній іоносфері ($L_{\perp} \approx 500\text{--}700$ км);
- генерація квазіпостійних електричних полів з напруженістю близько 30 мВ/м у зовнішній іоносфері ($L_{\perp} \approx 1000$ км);
- збільшення приблизно в три рази частоти появи свистів.

З перерахованого комплексу ефектів належить виділити явища в магнітній силовій трубці й у магнітоспряженій області, а також хвильові збурення з $v \approx 0.3\text{--}0.6$ км/с [5]. Перші пов'язані з переносом тепла та енергії НЧ-випромінювань (свисти та ін.) уздовж силової трубки. Другі – з поширенням хвиль густини (уздовж іоносфери) від місця розташування джерела збурення. Ефекти, що залишилися, саме й належать до групи, стимульованих потужним радіовипромінюванням. Механізм їх генерації та переноса не настільки очевидний і ще вимагає детального вивчення.

На користь того, що ці ефекти є процесами стимульованого типу, свідчать наступні аргументи [5]. Збурення розвивалися через 1–10 хв після включення потужного радіовипромінювання. Після припинення впливу джерела збурення могли закінчуватися до або ж тривати (навіть підсилюватися), тобто спостерігався ефект вичерпання. Збурення могли виникати не при першому циклі періодичного нагрівання плазми, тобто відзначався ефект нагромадження або ефект інерції системи на вплив. Вимикання джерела могло приводити до ефектів, подібних тим, що виникали при його включенні, тобто мав місце ефект перемикавання. Збурення спостерігалися на віддаленнях до $R \approx 1000\text{--}2000$ км від потужної радіосистеми. Величина збурень і частота їх появи суттєво залежали від геофізичної обстановки (стану космічної погоди). Ці факти свідчать про те,

що потужне нестаціонарне радіовипромінювання виступає в ролі стимулятора природніх процесів.

На основі спостережень за період з 1972 р. по 2012 р. автором [5] експериментально встановлено та теоретично пояснено раніше невідоме явище виникнення великомасштабних (порядку 1000 км) збурень у нижній іоносфері, що супроводжувалися варіаціями рівня геомагнітного поля та квазіперіодичних процесів у середній іоносфері, що були стимульовані впливом на іоносферу потужного нестаціонарного радіовипромінювання декаметрового та гектометрового діапазонів.

1.5.5 Ефекти стартів і польотів ракет

Ефекти, що виникають в іоносфері при стартах і польотах потужних ракет, досліджуються близько 60 років. Спостережувані ефекти залежать від стану космічної погоди, віддалення від місця старту, типу ракети і т.д. Це надає право говорити про те, що відгук іоносфери на старт двох однакових ракет буде різним. Окреме місце в цих дослідженнях відведене вивченню великомасштабних і глобальних збурень. Вони характеризуються горизонтальними розмірами близько 1000 і 10000 км відповідно.

Для вивчення ефектів стартів ракет активно використовується іонозондовий метод [153–159]. У цих роботах показано, що потужні ракети, що стартують, можуть викликати не тільки локалізовані (~ 10 – 100 км), але й великомасштабні (~ 1000 км) і навіть глобальні збурення в іоносфері. Для їхнього дослідження застосовувався іонозондовий [160–163] і доплерівський [160] методи, а також метод некогерентного розсіяння [160, 164–166].

Основні ефекти старту ракет підсумовані в монографіях [160, 167–169].

На прикладі дослідження відгуків прольоту ракет «Протон» і «Союз» можна виділити основні ефекти, які виражаються в генерації збурень різної природи [161, 162, 166]. Вони характеризуються швидкістю поширення збурень, що доівнює 1.5 – 3.5 км/с і 375 – 440 м/с. Такі швидкості властиві повільним

магнітогідродинамічним (ПМГД) і внутрішнім гравітаційним хвилям (ВГХ) відповідно. Період, довжина хвилі та відносна амплітуда хвильових збурень концентрації електронів, пов'язаних із ВГХ, становили 90 хв, 2000–2400 км і 2.5–5 %. При старті ракети “Союз” виявлено дві групи збурень, що мали швидкості поширення близько 2 км/с і 600 м/с. Такі швидкості, що неодноразово спостерігалися раніше, властиві повільним МГД хвилям і ВГХ відповідно. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів досягала 5–7 %, а величина квазіперіода – близько 2–3 год.

1.6 Засоби та методи дослідження аперіодичних і хвильових збурень в іоносфері

1.6.1 Іонозонд

У даній роботі спостереження за станом іоносфери здійснювалися за допомогою модифікованого іонозонда «Базис» із цифровою реєстрацією параметрів відбитого сигналу. Іонозонд розташований в Іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери (49°36' п.ш., 36°18' с.д.) поблизу м. Харків.

Передавач іонозонда «Базис» працює в діапазоні частот 0.3–20 МГц. Вихідна потужність становить 10 кВт, тривалість імпульсу, що випромінюється – 100 мкс. Частота повторення імпульсів може змінюватися від 3.125 до 25 Гц.

Прийомне обладнання іонозонда «Базис» створене на основі супергетеродина з перетворенням частоти: у діапазоні частот від 0.3 МГц до 2.3 МГц із подвійним перетворенням, від 2.3 МГц до 40 МГц – з потрійним.

Приймальна та передавальна антени іонозонда – ідентичні та розташовані ортогонально. Кожна з антен складається із двох широкосмугових вертикальних ромбів. Малий ромб працює в діапазоні частот 6–20 МГц, великий – у діапазоні частот 0.3–6 МГц.

Темп реєстрації іонограм – одна іонограма кожні 15 хв.

Похибка відліку частоти на іонограмах – 25 кГц.

1.6.2 Методика аналізу

Для спектрального аналізу квазіперіодичних варіацій концентрації електронів використовувалися віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) і вейвлет-перетворення (ВП) [170–173]. Крім спектрограм, аналізувалися також енергограми (розподіл енергії коливань по періодах). Формат подання даних аналізу такий же, як у роботі [173].

Перед спектральним аналізом спочатку визначався тренд за допомогою ковзного середнього на інтервалі 120 або 180 хв. Крок ковзання дорівнював 1, 5 або 15 хв в залежності від темпу реєстрації іонограм. Оскільки нас цікавили періоди більше 10 – 30 хв., спотворення спектру за рахунок використання прямокутного вікна було несуттєвим.

Після усунення тренду виконувався спектральний аналіз за допомогою віконного та адаптивного перетворень Фур'є, а також вейвлет-перетворення [173]. Метою спектрального аналізу було отримання спектрограм і енергограм. Тут і надалі під спектрограмою розуміється залежність інтенсивності спектральних складових від періоду та часу, під енергограмою – залежність нормованої енергії спектральних складових від періоду.

Межі спектрального аналізу наступні. Мінімальний період згідно теореми Найквіста визначається двома вдліками іонозонду (2, 10 або 30 хв в різних вимірювальних кампаніях). Максимальний період визначається вікном ковзного середнього 120–180 хв.

Далі для ВПФ і АПФ у роботі використовуються наступні вирази [173]:

$$Sf(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{ws}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t - \tau}{t_{ws}/2}\right) \exp\left(i \frac{2\pi t}{T}\right) dt,$$

$$A_v f(T_v, \tau) = \sqrt{\frac{2}{v T_v}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t - \tau}{v T_v/2}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi}{T_v} (t - \tau)\right) dt,$$

де t_{ws} – ширина вікна для ВПФ; $T = 2\pi/\omega$ і $T_v = 2a/v$ – величини, що мають фізичний зміст періодів коливань.

У даній роботі для ВПФ і АПФ у якості $g(t)$ використовувалося вікно Хеммінга, що має вигляд:

$$g_H(t) = \gamma[0.54 + 0.46 \cos \pi t],$$

де $\gamma \approx 1.12$ – множник, що нормує, t – безрозмірний час.

Безперервне ВП функції $f(t)$ здійснювалися на підставі виразу:

$$Wf(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

де символом $*$ позначається комплексне сполучення, а розкладання проводиться по базису вейвлетів

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{a^{1/2}} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right),$$

у яким a – параметр масштабування ($a > 0$), b – параметр зсуву.

Для ВП у якості $\psi(t)$ застосовувався вейвлет Морле.

Крім функцій $P_S(\tilde{T}, \tau)$, $P_A(\tilde{T}, \tau)$ і $P_W(\tilde{T}, \tau)$, у роботі також використовуються енергограми, тобто розподіл енергії по періодах [173]:

$$E_S(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_S(\tilde{T}, \tau) d\tau, E_A(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(\tilde{T}, \tau) d\tau, E_W(\tilde{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_W(\tilde{T}, \tau) d\tau.$$

Додамо, що доцільність одночасного застосування трьох інтегральних перетворень (віконного та адаптивного перетворень Фур'є, а також вейвлет–перетворення) обґрунтована в роботах [173, 186]. Перше з них має кращу локалізацію за часом, друге – за періодом. Вейвлет-перетворення більш наочно демонструє динаміку спектрів, трансформацію одних коливань в інші.

Висновки до розділу 1

1. Метод вертикального зондування, що використовує іонозонди, широко застосовується для дослідження іоносфери в різних точках Земної кулі. У світі є більше 160 іонозондів.

2. Отримані за допомогою іонозондів відомості про іоносферу на висотах від 100 приблизно до 300–400 км суттєво доповнюють відомості, що даються радаром некогерентного розсіяння та супутниковими методами.

3. Метод вертикального зондування широко використовується для дослідження як спокійної, так і збуреної іоносфери. За допомогою цього методу отримані великий обсяг знань про фізичні процеси, що протікають в іоносфері під час геокозмічних бур, сонячних затемнень, падінь великих космічних тіл, про вплив на іоносферу потужного радіовипромінюванням та великих ракет, що стартують.

4. Метод вертикального зондування дає відомості як про регулярні процеси іоносфери, так і про хвильові збурення з періодами від 10 до 360 хв.

5. Похибка одержання параметрів регулярних і нерегулярних процесів в іоносфері методом вертикального зондування звичайно не перевищує 10–20%.

6. Для побудови динамічної моделі основних процесів в іоносфері потрібні безперервні виміри її параметрів у глобальних масштабах. В Україні дослідники обмежуються окремими вимірювальними кампаніями різної тривалості в окремих регіонах Земної кулі (у місцях розташування іоносферних обсерваторій).

В Україні є всього три обсерваторії, у яких ведуться іоносферні дослідження. В Іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України виконані дослідження, представлені в цій роботі.

7. Фізичні ефекти різних іоносферних бур, сонячних затемнень, падінь великих космічних тіл, впливів потужного радіовипромінювання та стартів великих ракет, крім стійких характеристик, мають особливості, властиві кожному з перерахованих джерел. Немає однакової реакції іоносфери на вплив того самого джерела збурень.

Постановка задачі

Виходячи з вищевикладеного, перед даною дисертаційною роботою ставилися наступні задачі.

1. Дослідження реакції іоносфери як у масштабах України, так і в масштабах Європи на сонячні затемнення 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. Оцінка основних параметрів регулярних і нерегулярних процесів в F-області іоносфери.

2. Дослідження реакції іоносфери над м. Харків на вплив потужного радіовипромінювання радіотехнічної системи, віддаленої на відстань близько 1000 км, у період ряду помірних геокосмічних бур.

3. Дослідження реакції іоносферної F-області на падіння Челябінського метеороїда в масштабах Європи.

4. Дослідження добово-сезонних варіацій концентрації електронів і її хвильових збурень в F-області іоносфери.

РОЗДІЛ 2

СЕРЕДНЯ ІОНОСФЕРА УКРАЇНСЬКОГО РЕГІОНУ В СПОКІЙНИХ УМОВАХ

Мета розділу – дослідження добово-сезонних варіацій концентрації електронів і їх хвильових збурень у максимумі шару F2 іоносфери в спокійних умовах, у період, близький до мінімуму сонячної активності (в 2011 р.).

2.1 Стан космічної погоди

Стан сонячної активності оцінювався по числах Вольфа W і індексу $F 10.7$, а геомагнітної активності – по індексах K_p , D_{st} , AE (табл. 2.1). З табл. 2.1 видно, у періоди вимірів Сонце залишалося спокійним. Стан геомагнітного поля також був незбуреним. Тому описані нижче варіації концентрації електронів були викликані добовими та сезонними процесами.

2.2 Регулярні варіації концентрації електронів

Під час весняного та осіннього рівнодень часові варіації концентрації електронів N у максимумі шару F2 у цілому були подібними (рис. 2.1а та 2.1б). В інтервалі часу 00:00–04:00 LT (тут і далі час місцевий) $N \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Після сходу Сонця на висотах шару F2 концентрація електронів поступово збільшувалася до значень $(6\text{--}7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ у період весняного рівнодення та до значень $(1.0\text{--}1.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ у період осіннього рівнодення. Максимальне значення N мало місце в інтервалах часу 12:00–13:00 і 10:00–12:00 у періоди осіннього та весняного рівнодень відповідно. Після цього спостерігалось повільне зменшення N до $(5\text{--}7) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до моменту заходу Сонця на рівні Землі. Після заходу Сонця в іоносфері швидкість зменшення N збільшувалася. До 22:00 досягалось мінімальне значення N (близько $(2\text{--}3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$).

Розглянемо часові зміни концентрації електронів у період літнього сонцестояння. У цей період Сонце на висотах більше 300 км не заходить.

Таблиця 2.1

Стан космічної погоди

Дата	W	F 10.7	K_p		D_{st} , нТл		AE , нТл	
			max	min	max	min	max	min
22 березня 2011 р.	32	100	3.3	0	13	-17	345	23
23 березня 2011 р.	30	105	3.3	2	8	-12	587	51
24 березня 2011 р.	39	108	1.7	0.7	6	-3	89	22
20 червня 2011 р.	26	96	2.7	1	12	-13	472	49
21 червня 2011 р.	33	95	2.7	1	9	-5	445	64
22 червня 2011 р.	33	93	4	1.3	9	-10	552	64
19 вересня 2011 р.	92	141	1	0	1	-20	107	17
20 вересня 2011 р.	80	144	3	0.7	-2	-16	280	29
21 вересня 2011 р.	70	144	2	0	4	-11	417	18
20 грудня 2011 р.	72	137	2.7	0.7	4	-11	359	23
21 грудня 2011 р.	73	145	2.7	0.3	5	-20	470	20
22 грудня 2011 р.	69	146	2.7	0.3	-7	-21	157	25

З 00:00 і до 04:00 мало місце падіння N приблизно від $(3-4) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до $(2-2.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2.1б). Потім спостерігався ріст N до $(5-6) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, який настав в інтервалі часу 09:00–10:00. Після 10:00–12:00 виникло короткочасне зменшення N до $4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Далі мав місце вечірній ріст N . Максимальні значення N у вечірній час досягали до $5.5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ приблизно в 20:00.

Далі опишемо добові варіації N у період зимового сонцестояння (рис. 2.1г). В інтервалі часу з 19:00 до 05:00 (наступної доби) значення N були близькі до $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. З 06:00 і до 10:00–11:00 спостерігався ріст N до значень $(8-10) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Після 11:00–12:00 протягом 6 годин N зменшувалося до нічних значень $(2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3})$.

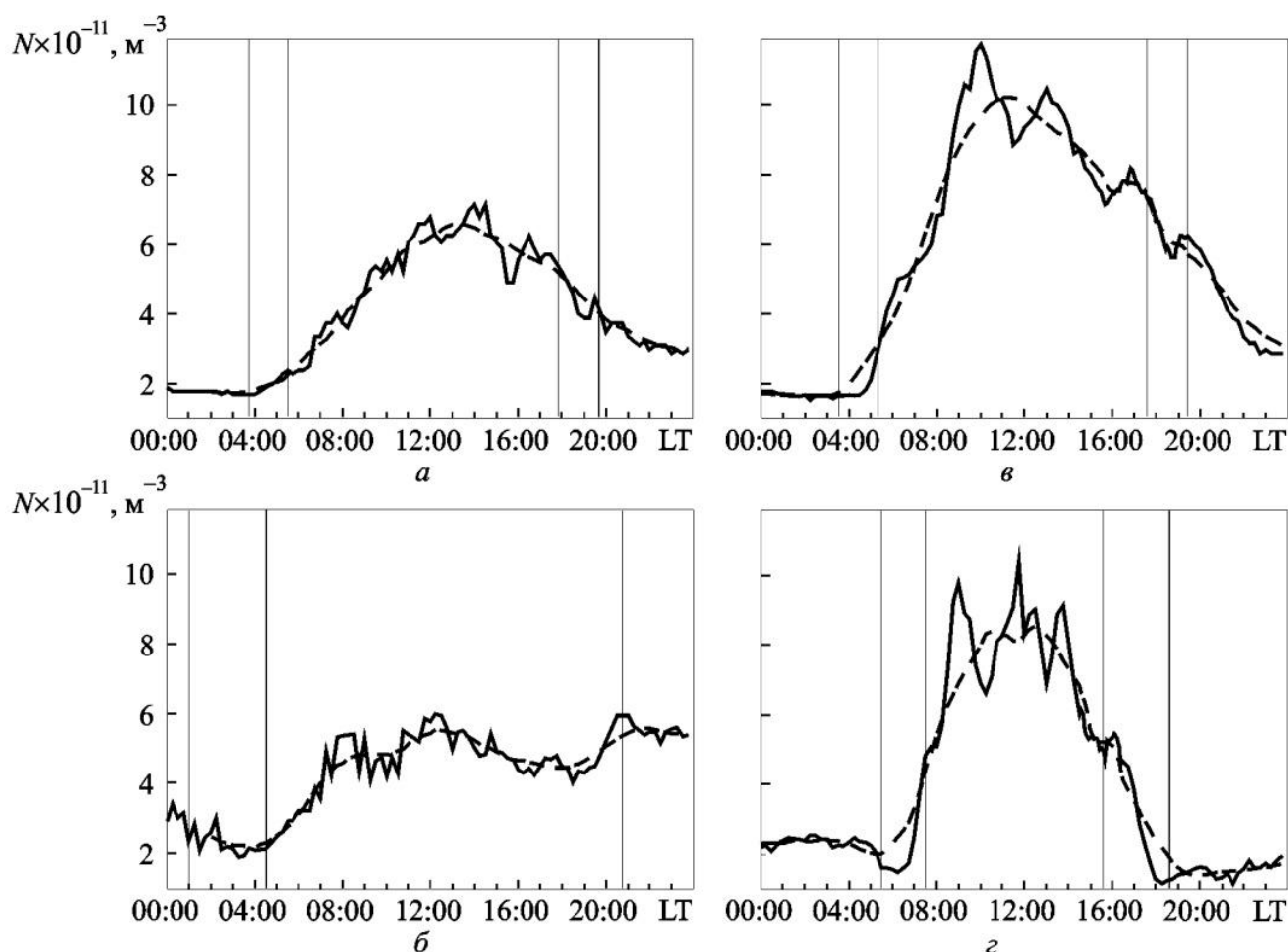


Рис. 2.1 Часові варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 23 березня 2011 р. (а); 21 червня 2011 р. (б); 20 вересня 2011 р. (в); 21 грудня 2011 р. (г). Штрихова лінія – результат усереднення на інтервалі часу 3 год. Вертикальними лініями тут і далі показані моменти сходу Сонця на висотах 300 і 0 км і моменти заходу Сонця на висотах 0 і 300 км

У сусідні дні із днями рівнодень і сонцестоянь часові варіації N у цілому були подібними.

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

2.3 Хвильові збурення концентрації електронів

У період весняного рівнодення збурення концентрації електронів ΔN носили квазіперіодичний характер (мал. 2.2а, верхня панель). У нічний час

амплітуда ΔN_a була близько $(1-2) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в денний час – $(5-6) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, тобто в 3–10 раз більше (рис. 2.2а, верхня панель).

Поблизу літнього сонцестояння збурення $\Delta N(t)$ були досить хаотичними, але й у них виділялися квазіперіодичні коливання, амплітуда яких практично не залежала від часу доби та становила $(2-5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2.2б, верхня панель).

У період осіннього рівнодення в нічний час $\Delta N_a \approx (1-5) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в денний час – $\Delta N_a \approx (1.0-3.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, тобто в 3–10 раз більше (мал. 2.2в, верхня панель).

Поблизу зимового сонцестояння збурення ΔN також суттєво залежали від часу доби. У нічний час $\Delta N_a \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, а в денний час $\Delta N_a \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (рис. 2.2г, верхня панель). Відмінність в ΔN_a досягало порядку величини.

Часові варіації відносних збурень концентрації електронів $\delta_N = \Delta N / \bar{N}$, де $\bar{N}(t)$ – регулярні варіації N , наведені на верхніх панелях рис. 2.3. Із цих малюнків видно, що залежності $\delta_N(t)$ в основному повторювали залежності $\Delta N(t)$.

У період весняного рівнодення максимальні значення δ_N мали місце в денний час. Вони досягали значень 0.15, але в середньому амплітуда коливань δ_{Na} була близько 0.1 (див. рис. 2.3а).

Наприкінці червня добові варіації δ_N практично були відсутні. Флуктуації δ_N звичайно не перевищували ± 0.15 , у середньому їхня амплітуда становила 0.1 (див. рис. 2.3б).

Під час осіннього рівнодення варіації $\delta_N(t)$ були подібними варіацій під час весняного рівнодення. У середньому $\delta_{Na} \approx 0.1$ (див. рис. 2.3в).

В період зимового сонцестояння флуктуації δ_N досягали ± 0.4 (див. рис. 2.3г). У середньому $\delta_{Na} \approx 0.2$.

2.4 Результати спектрального аналізу

Тут і надалі спектральний аналіз виконувався як для часових варіацій первинних параметрів іонограм, так і абсолютних і відносних збурень концентрації електронів. Оскільки частотні спектри абсолютних і відносних збурень концентрації електронів відрізняються, виникала необхідність

спектральною оцінювання як абсолютних, так і відносних збурень концентрації електронів.

2.4.1 Спектральний склад добово-сезонних варіацій абсолютних значень збурень концентрації електронів

Як видно із спектрограмм у період весняного рівнодення в денний час переважали коливання N з періодом, що повільно збільшується, T від 140 до 230 хв і тривалістю $\Delta T \approx 10$ –12 год, епізодично також спостерігалось коливання з $T \approx 40$ хв і $\Delta T \approx 1$ –2 год (див. рис. 2.2а). Тут і надалі під спектрограмою розуміється залежність інтенсивності спектральних складових від періоду та часу, під енергограмою – залежність нормованої енергії спектральних складових від періоду. У вечірній час також мало місце коливання з $T \approx 60$ –100 хв.

Поблизу літнього сонцестояння в денний і нічний час переважали коливання з $T \approx 200$ хв (див. рис. 2.2б). Їхня тривалість $\Delta T \approx 5$ год. Крім цих коливань, спостерігалися процеси з $T \approx 100$ –150 хв, їхня амплітуда була приблизно в 2 рази менше переважаючих коливань. Епізодично також виникали коливання з $T \approx 40$ хв і $\Delta T \approx 1$ –2 год.

У період осіннього рівнодення в ранковий і денний час було яскраво виражене коливання з $T \approx 170$ –210 хв (див. рис. 2.2в). Його тривалість була не менше 10 год. У вечірній і нічний час основним було коливання з $T \approx 230$ –300 хв і $\Delta T \approx 6$ –7 год.

Під час зимового сонцестояння вранці і вдень переважали коливання з періодом 120–160 і 180–220 хв (див. рис. 2.2г). Їх тривалість становила 5–6 год. У вечірній і нічний час період переважаючого коливання був близький до 180–220 хв, $\Delta T \approx 5$ –6 год.

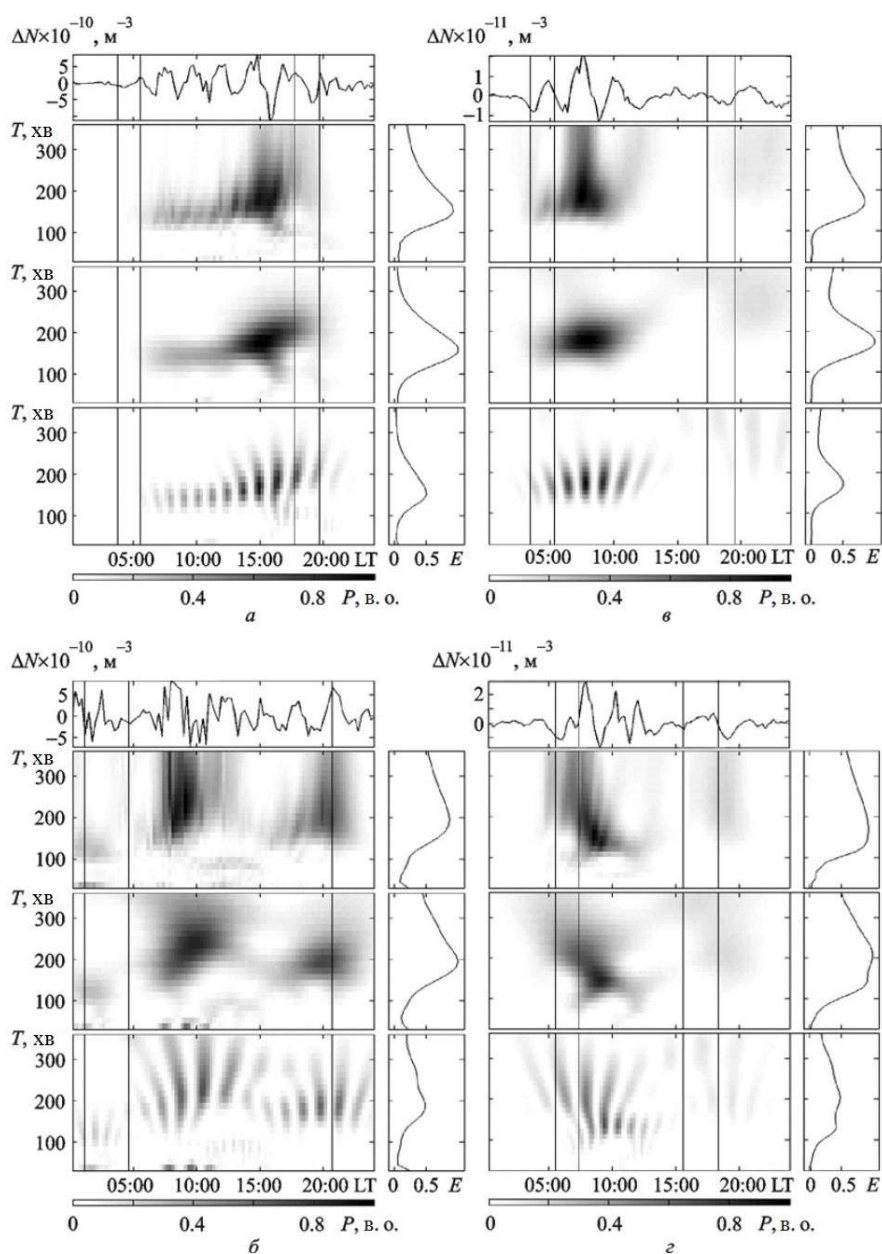


Рис. 2.2 Залежність $\Delta N(t)$ для 23 березня 2011 р. (а), 21 червня 2011 р. (б), 20 вересня 2011 р. (в) і 21 грудня 2011 р. (г). Результати спектрального аналізу за допомогою ВПФ, АПФ, і ВП (панелі зверху вниз). Праворуч показані відповідні енергограми

2.4.2 Спектральний склад добово-сезонних варіацій відносних значень збурень концентрації електронів

Результати спектрального аналізу $\delta_N(t)$ представлені на рис. 2.3. З рис. 2.3а видно, що в період весняного рівнодення вдень період основного коливання був

близький до 120–160 хв. У передзахідний і нічний час чітко виділялися два коливання з періодами близькими 60–70 і 180–220 хв.

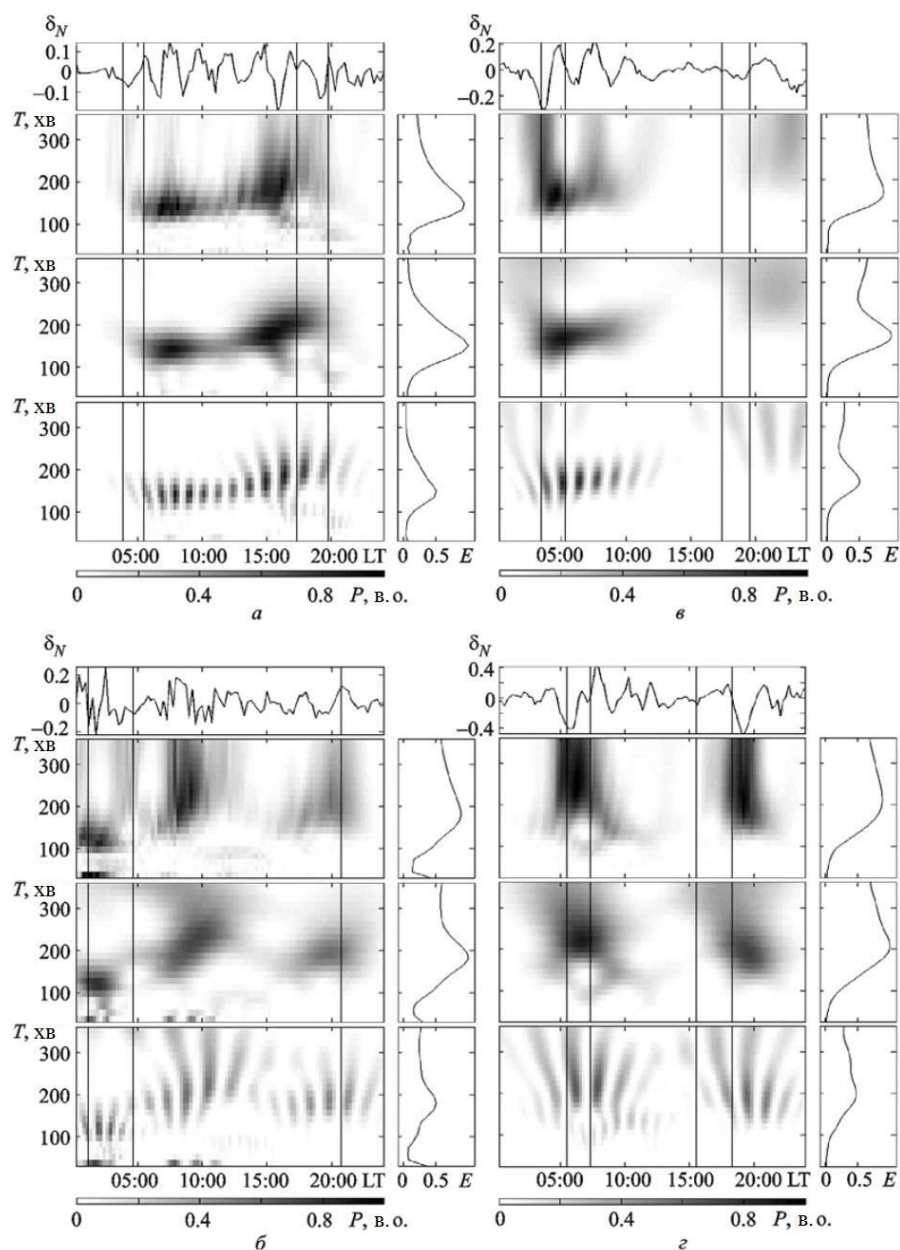


Рис. 2.3 Залежність $\delta_N(t)$ для 23 березня 2011 р. (а), 21 червня 2011 р. (б), 20 вересня 2011 р. (в), 21 грудня 2011 р. (г) і результати ВПФ, АПФ, і ВП (панелі зверху вниз). Праворуч показані відповідні енергограми

Поблизу літнього сонцестояння протягом майже всієї доби 21 червня 2011 р. переважало коливання з $T \approx 150\text{--}240$ хв. Крім нього, епізодично виникали

коливання з періодами 100–120 і близько 300 хв (див. рис. 2.3б). Їх тривалість становила від 4 до 6 год.

Під час осіннього рівнодення вранці і вдень переважало коливання з $T \approx 140\text{--}190$ хв. Його тривалість досягала 10 год (див. рис. 2.3в). Уночі головним було коливання з $T \approx 230\text{--}300$ хв і $\Delta T \approx 6\text{--}7$ год.

У період зимового сонцестояння найбільші варіації $\delta_N(t)$ мали місце при проходженні сонячних термінаторів і протягом 4–5 год після цього (див. рис. 2.3г). Період основного коливання становив 180–240 хв. Крім цього коливання, також епізодично спостерігалися коливання з періодами 60–110 і 280–330 хв. Для них $\Delta T \approx 6\text{--}10$ год.

2.5 Обговорення

Добово-сезонні варіації регулярних значень $\bar{N}$ повністю відповідають наявним уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері (див., наприклад, [31-56]). Отримані в 2011 та 2016 рр. дані добре узгоджуються з виміряними методом некогерентного розсіяння значеннями $\bar{N}$ в даному регіоні в період росту сонячної активності [50-52].

Зупинимося докладніше на квазіперіодичних варіаціях концентрації електронів. Узагальнені відомості про ці варіації наведені в табл. 2.2. З таблиці видно, що найбільші значення амплітуд ΔN_a мали місце в зимовий період, трохи менші значення – в осінній період. У нічний час (крім періоду, близького до літнього сонцестояння) амплітуда ΔN_a в 3–10 раз менше, чим у денний час.

Відносні амплітуди квазіперіодичних змін концентрації електронів у денний час були близькі до 0.1, а в період зимового сонцестояння досягали 0.2. У нічний час значення δ_N в усі сезони були приблизно в 2 рази менше, чим у денний час.

Період переважаючих коливань у різні сезони року становили 140, 180, 175 і 200 хв (див. табл. 2.2). Цей період близький до періоду третьої гармоніки приливних процесів в атмосфері, що дорівнює 180 хв. Епізодично також з'являлося коливання з меншими δ_N і періодами близько 60, 100, 220 і 300 хв.

Можливо, що ці періоди відносяться до гармонік єдиного процесу з періодом близько 300 хв. Хвильові процеси із зазначеними періодами та амплітудами властиві внутрішнім гравітаційним хвилям.

Таблиця 2.2

Основні параметри квазіперіодичних процесів в денний (нічний) час

Сезон	Амплітуда коливань, m^{-3}	Відносна амплітуда коливань	Період переважаючого коливання, хв	Тривалість квазіперіодичного процеса, год
Весіннє рівнодення	$(5 \div 6) \cdot 10^{10}$ $((1 \div 2) \cdot 10^{10})$	0.1 (0.05)	120 ÷ 160 (60 ÷ 70, 180 ÷ 220)	15
Літнє сонцестояння	$(2 \div 5) \cdot 10^{10}$	0.1 (0.1)	150 ÷ 240 (100 ÷ 120, 300)	24 (4 ÷ 6)
Осіннє рівнодення	$(1.0 \div 1.5) \cdot 10^{11}$ $((1 \div 5) \cdot 10^{10})$	0.1 (0.05)	140 ÷ 190 (230 ÷ 300)	10 (6 ÷ 7)
Зимове сонцестояння	$2 \cdot 10^{11}$ $(2 \cdot 10^{10})$	0.2 (0.1)	180 ÷ 240 (60 ÷ 110, 280 ÷ 330)	5 ÷ 6 (6 ÷ 10)

Тривалість переважаючих коливань була значною: від 5–7 до 24 год (у період літнього сонцестояння).

Виявилося, що добові варіації $\Delta N(t)$ і $\delta_N(t)$ в основному відслідковували добові зміни $\bar{N}(t)$. Коефіцієнти взаємної кореляції значень амплітуди ΔN_a і $\bar{N}$, а також δ_{N_a} і $\bar{N}$ становили 0.6–0.8 для різних сезонів.

Отримані відомості про квазіперіодичні процеси у максимумі шару F2 в 2011 та 2016 рр. у цілому також добре узгоджуються з результатами наших спостережень у цьому ж регіоні на радарі некогерентного розсіяння (див., наприклад, [50–52]).

Висновки до розділу 2

1. Отримані регулярні добово-сезонні варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 повністю відповідають існуючим уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері й даним інших досліджень, що непрямо підтверджує коректність методу даної роботи.

2. На регулярний хід $N(t)$ накладалися квазіперіодичні варіації концентрації електронів.

3. В усі сезони в шарі F2 іоносфери проявлялося переважне квазіперіодичне коливання N з періодом 140–200 хв, що має амплітуду $(0.2–2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ і відносну амплітуду, рівну 0.1–0.2.

4. Тривалість переважаючого коливання становила 5–7 год, а в період літнього сонцестояння досягала 24 год.

5. Епізодично в спектрі варіацій N також виникали коливання з періодами від 60–100 до 300 хв. Їх амплітуда була в кілька раз менше амплітуди переважаючого коливання.

Результати цього розділу відображені в роботах автора [8, 13, 15, 20, 21, 24, 25].

РОЗДІЛ 3

ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ У СЕРЕДНІЙ ІОНОСФЕРІ

У цьому розділі описані результати дослідження ефектів сонячного затемнення (СЗ), що мали місце 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. у середній іоносфері.

3.1 Загальні відомості про сонячне затемнення 4 січня 2011 р.

3.1.1 Короткі відомості про затемнення

СЗ спостерігалось після сходу Сонця в Північній Африці. Так, головна фаза (0.37) у Марокко мала місце близько 07:38 (тут і далі світовий час). Затінена область перетнула всю Європу та частина Азії. СЗ закінчилося приблизно в 10:25 над Пакистаном (фаза 0.09). Ширина області повного СЗ становила близько 200 км, а швидкість її руху – близько 700–800 м/с.

У місці проведення вимірів (поблизу м. Харків, с.м.т. Зміїв) покриття діаметра диска Сонця становило близько 0.78. При цьому максимальна затінена площа диска $A_{\max} \approx 0.71$. СЗ почалося в 07:30, а закінчилося в 10:29, головна фаза мала місце в 08:59.

3.1.2 Стан космічної погоди

Коротко опишемо стан космічної погоди в період з 1 січня по 5 січня 2011 р., яку зручно представляти в термінах часових варіацій концентрації, швидкості, температури та тиску сонячного вітру, індукції міжпланетного магнітного поля, енергетичної функції Акасофу ϵ_A , а також індексів магнітної активності (K_p і D_{st}).

З 1 по 5 січня флуктуації густини, швидкості, температури та тиску сонячного вітру не перевищували відповідно $1.5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, 420 км/с, $1.3 \cdot 10^5 \text{ К}$ и

4 нПа. Всплески ε_A досягали 6 ГДж/с. Затемненню передувало малосуттєве магнітне збурення (індекс K_p змінювався від 0 до 3). Компонента B_z хаотично варіювалася в межах $\pm (5-6)$ нТл. Малосуттєвими були флуктуації рівня B_y (близько $\pm (4-6)$ нТл). Значення індекса D_{st} також хаотично флуктували в межах $\pm (10-15)$ нТл.

Можна стверджувати, що день затемнення, 4 січня 2011 р., і контрольний день, 5 січня 2011 р., були спокійними. Ця обставина істотно полегшувала ідентифікацію збурень, викликаних відгуком середньої іоносфери на СЗ.

3.2 Варіації параметрів іоносфери протягом сонячного затемнення 4 січня 2011 р.

У цих дослідженнях іонограми реєструвалися з частотою одна іонограма за 15 хв.

3.2.1 Часові варіації критичних частот

На рис. 3.1 представлені часові варіації критичних частот області F іоносфери: f_oF2 . На цих і наведених нижче рисунках суцільною лінією із крапками позначені варіації параметрів іоносфери в день СЗ 4 січня 2011 р. і в контрольний день 5 січня 2011 р. Суцільною тонкою лінією на рисунках позначені варіації параметрів, оброблені методом ковзного середнього на інтервалі часу в 60 хв. Трьома вертикальними лініями на всіх рисунках відзначені моменти початку, головної фази та закінчення. Затемнення поблизу м. Харкова почалося в ранковий час, коли мало місце стрімке зростання f_oF2 .

З рис. 3.1 видно, що до затемнення f_oF2 збільшувалася від 3.5 до 6.4 МГц. Незначне зменшення f_oF2 почалося приблизно за 20 хв до початку СЗ. По мірі покриття диска Сонця значення f_oF2 зменшувалися приблизно від 6.2 до 4.3 МГц. Їм відповідало зменшення концентрації електронів від $N \approx 4.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ до $N_{min} \approx 2.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Максимальне значення зменшення критичної частоти F2-шару $\delta f_oF2 \approx 1.9 \text{ МГц}$.

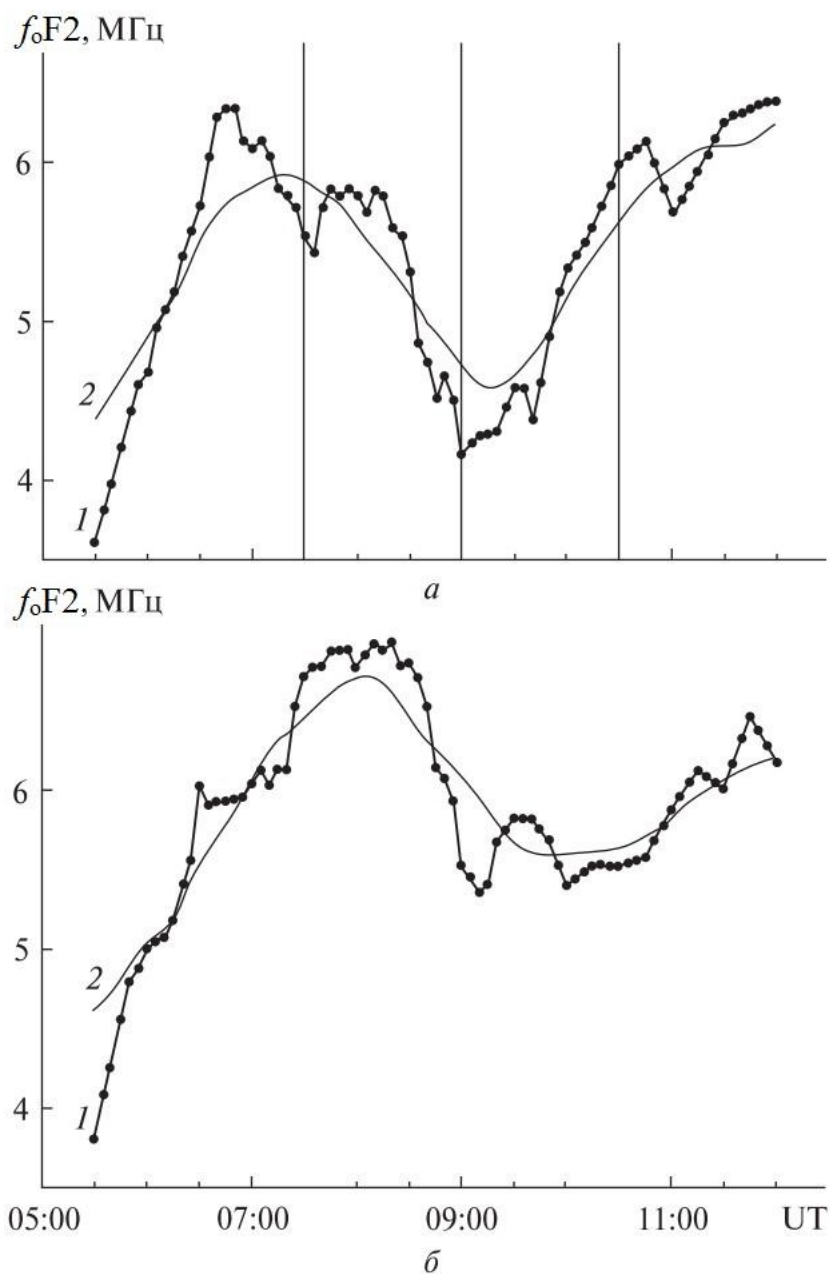


Рис. 3.1 Часові варіації критичної частоти f_oF2 : *a* – у день затьмарення 4 січня 2011 р. (1 – вихідна залежність, 2 – згладжена методом ковзного середнього на інтервалі часу в 90 хв), *б* – те ж для контрольного дня 5 січня 2011 р. Вертикальні лінії тут і далі – моменти початку, головної фази та закінчення затемнення

При цьому зменшення концентрації електронів $\Delta N = 2.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $N_{min} / N \approx 0.48$ і $\delta_N = \Delta N / N \approx 52 \%$. Відзначимо, що мінімальне значення f_oF2 , а, виходить, і електронної концентрації в максимумі шару F2, спостерігалось в 09:15, тобто із затримкою близько 16 хв відносно моменту головної фази СЗ.

Майже відразу ж після початку СЗ значення f_oF2 змінювалися по квазіперіодичному закону. Величина квазіперіодів T склала 30 і 60 хв, а їх амплітуда $\delta f_{oa}F2 = 0.2$ і 0.4 МГц. Відносну амплітуду квазіперіодичних збурень можна оцінити з наступної формули:

$$\delta_{Na} = \frac{\Delta N}{N} \approx 2 \frac{\delta f_{oa}F2}{f_oF2}, \quad (3.1)$$

де f_oF2 – середнє за період значення f_oF2 . Вважаючи $f_oF2 = 5$ МГц, з (3.1) одержимо, що для T , рівних 30 і 60 хв, δ_{Na} становила 8 і 12 % відповідно. Тривалість цього процесу була близько 2 годин.

У контрольний день подібного зменшення значень f_oF2 (і електронної концентрації) не спостерігалось. Відзначимо, що дані вимірів f_oF2 до початку СЗ і після закінчення реакції критичної частоти на СЗ близькі до значень f_oF2 , отриманим у відповідні моменти часу в контрольний день.

Доцільно порівняти зменшення f_oF2 у день СЗ із контрольним днем. Поблизу 09:15 у контрольний день у середньому $f_oF2 \approx 6.2$ МГц. Тоді зменшення f_oF2 у день СЗ становило 1.9 МГц. Це значення збіглося із значенням $\delta f_{oa}F2$, наведеним вище.

Коротко опишемо варіації критичної частоти шару Es у день СЗ і в контрольний день (рис. 3.2). З рис. 3.2 видно, що 4 і 5 січня частота f_oEs сильно флуктувала. Її значення змінювалося приблизно від 2.5 до 8.5 МГц у день СЗ і від 2.3 до 8 МГц у контрольний день. У цілому значення f_oEs були більшими в день затемнення. Шар Es при цьому був потужнішим і суттєво екранував область E.

Часові варіації критичної частоти E наведені на рис. 3.3. В інтервалі часу 05:00–07:30 f_oE зростала приблизно від 1.8 до 2.3–2.6 МГц. У контрольний день f_oE продовжувала збільшуватися приблизно до 08:30.

Протягом найближчої півгодини вона зменшилася від 2.7 до 2.6 МГц. Протягом наступної години ця частота, флуктуючи, залишалася в межах 2.5–2.6 МГц.

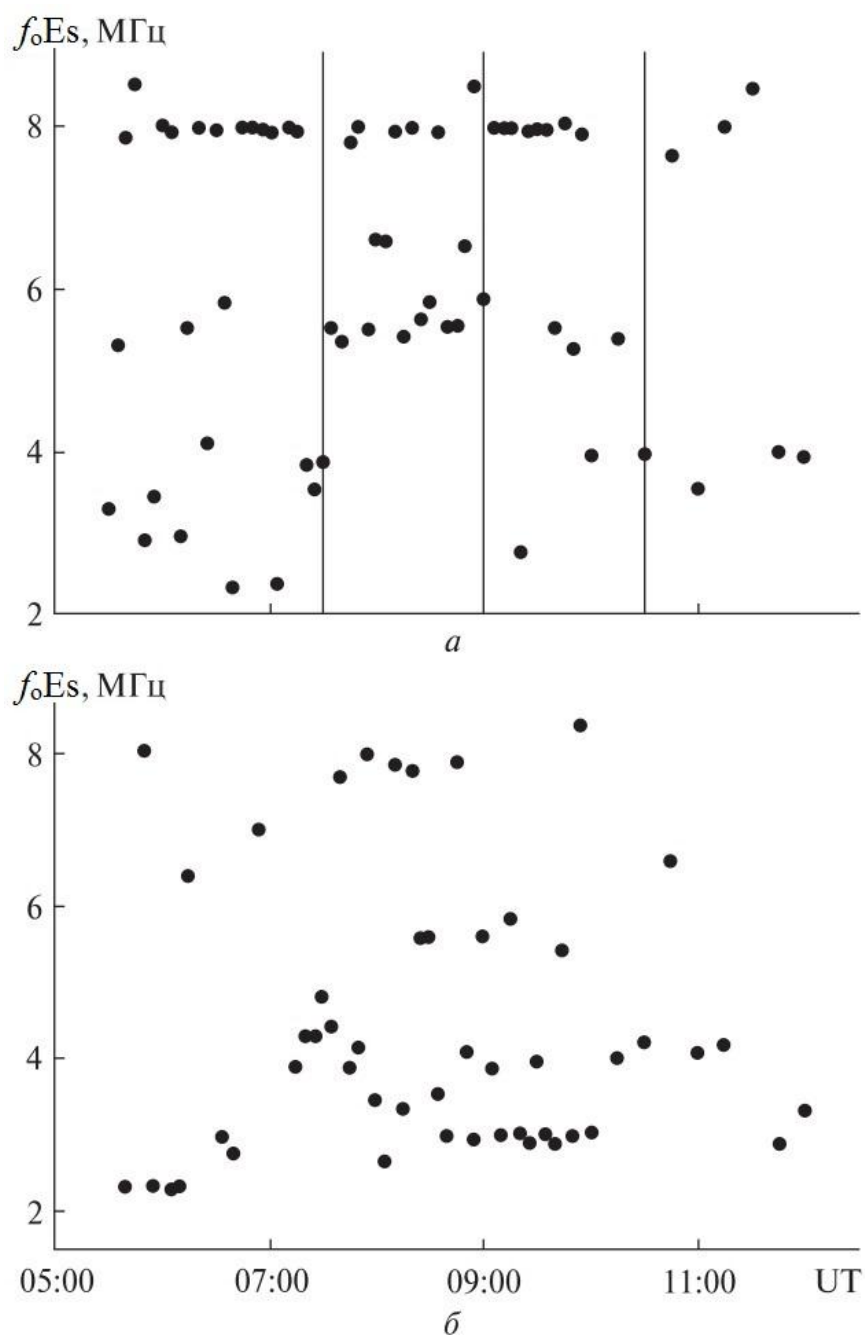


Рис. 3.2 Часові варіації критичної частоти f_oEs у день сонячного затемнення 4 січня 2011 р. (а) і в контрольний день 5 січня 2011 р. (б)

У день затемнення шар Е спостерігався епізодично. Поблизу головної фази СЗ f_oE приблизно рівнялася 2.2 МГц, тобто її значення зменшилося приблизно на 0.4 МГц (на 16 %) у порівнянні з тим значенням, яке було б під час відсутності затемнення. Після моменту настання головної фази f_oE поступово збільшувалася від 2.2 до 2.8 МГц.

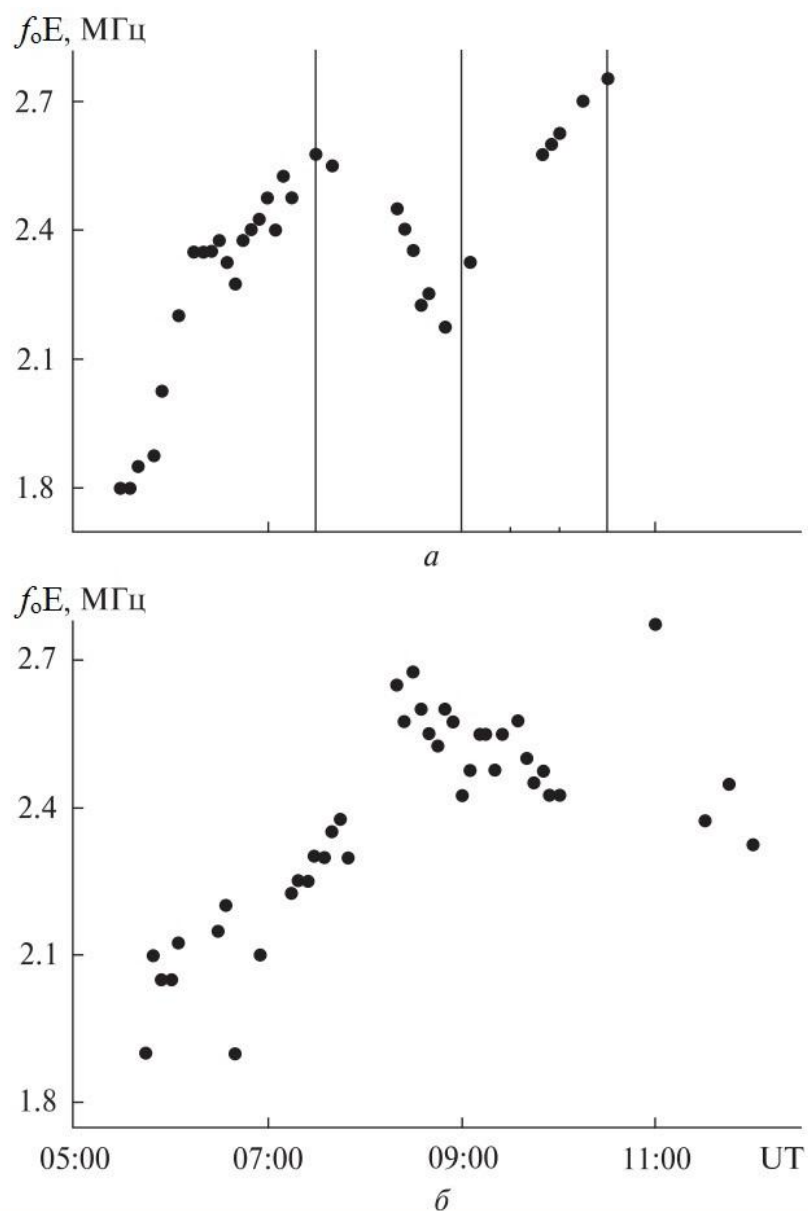


Рис. 3.3 Часові варіації критичної частоти f_oE у день сонячного затемнення 4 січня 2011 р. (а) і в контрольний день 5 січня 2011 р. (б)

3.2.2 Часові варіації діючих висот

На рис. 3.4а показані часові варіації діючих висот поблизу максимуму іонізації шару F2 у день СЗ 4 січня 2011 р. і контрольний день 5 січня 2011 р. – рис. 3.4б.

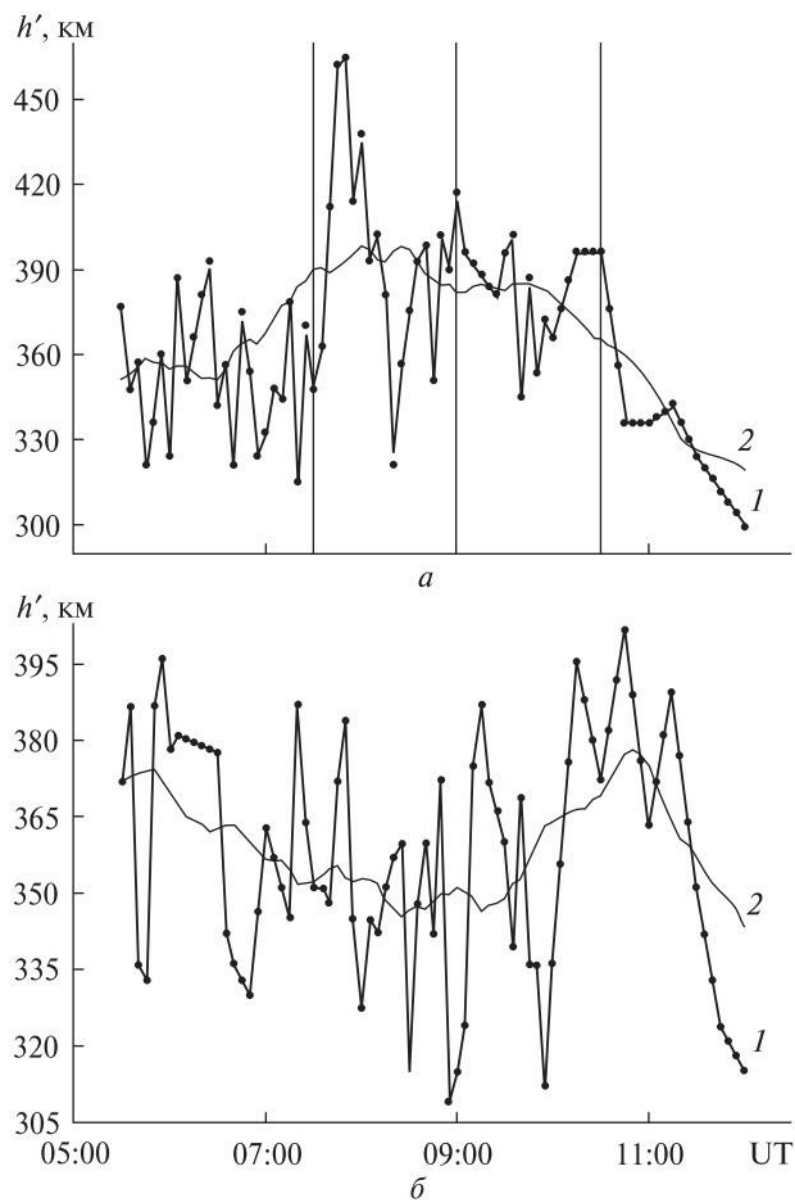


Рис. 3.4 Часові варіації діючої висоти h' відбиття поблизу максимуму іонізації шару F2: *а* – у день затемнення 4 січня 2011 р. (1 – вихідна залежність, 2 – згладжена методом ковзного середнього на інтервалі часу в 90 хв), *б* – те ж у контрольний день 5 січня 2011 р.

З малюнка видно, що по мірі покриття сонячного диска діюча висота $h'(f_oF2)$, значення якої до початку СЗ було приблизно рівним 350 км, збільшилася майже до 420 км у момент головної фази СЗ (08:59). Стрімке зростання $h'(f_oF2)$ відбувся з 07:35 до 07:50. У період з 07:50 до 08:05 значення мінімальної діючої висоти трохи зменшилося й у період головної фази СЗ було 382–387 км.

З 09:45 до 10:30 (тобто до закінчення СЗ) відбулося зниження значень $h'(f_oF2)$ до незбуреного затемнення рівня. Відзначимо, що в контрольний день 5 січня 2011 р. мінімальні діючі висоти зазнавали несуттєвих змін (у середньому $h'(f_oF2) \approx 365 \pm 15$ км).

3.2.3 Часові варіації висоти h_p

Часові варіації висоти $h_p(F2)$ представлені на мал. 3.5а. Оскільки шар F1 не реєструвався, шар F2 можна апроксимувати параболічним шаром. При цьому значення висоти $h_p(F2)$ приблизно дорівнюють дійсній висоті максимуму електронної концентрації шару. Нагадаємо, що висота $h_p(F2)$ знаходиться з умови $h_p = h'(f_p)$, де $f_p = 0.834 f_oF2$.

Розглянемо спочатку контрольний день 5 січня 2011. Висота h_p з 05:30 до 06:30 зменшувалася, а в інтервалі часу 06:30–07:45 вона збільшувалася. З 07:45 до 09:25 спостерігалось поступове зменшення $h_p(F2)$. Далі, приблизно до 11:45 мало місце збільшення h_p . Крім таких, регулярних, змін $h_p(t)$ мали місце неупорядковані зміни. Їхня відносна величина досягала 4 %.

4 січня 2011 р. до початку СЗ спостерігалось зниження $h_p(F2)$ і його значення до початку затемнення (07:30) було близько 230 км. У період з 07:30 до 08:30 відзначена тенденція до збільшення висоти h_p , що характерно для нічного часу. Починаючи з 08:30 і до закінчення СЗ (10:30), середнє значення $h_p(F2)$ становило близько 237 км, тобто, значення висоти збільшилося майже на 10 км. Після 11:20 значення h_p були ближче до значень цього параметра, що передують затемненню. Така поведінка h_p було лише в середньому. Головною відмінністю часових варіацій 4 і 5 січня було те, що в день СЗ мали місце сильні коливання h_p . Їх амплітуда досягала 21 км, або 9 %. Період коливань був близький до 60 хв.

В 13:15 висота $h_p(F2)$ була приблизно рівна 230 км, що відповідає незбуреному затемненням стану іоносфери.

Таким чином, збільшення h_p на 10 км свідчить про вплив СЗ на параметри середньої іоносфери. Похибка відліку висоти з іонограм складає 3 км.

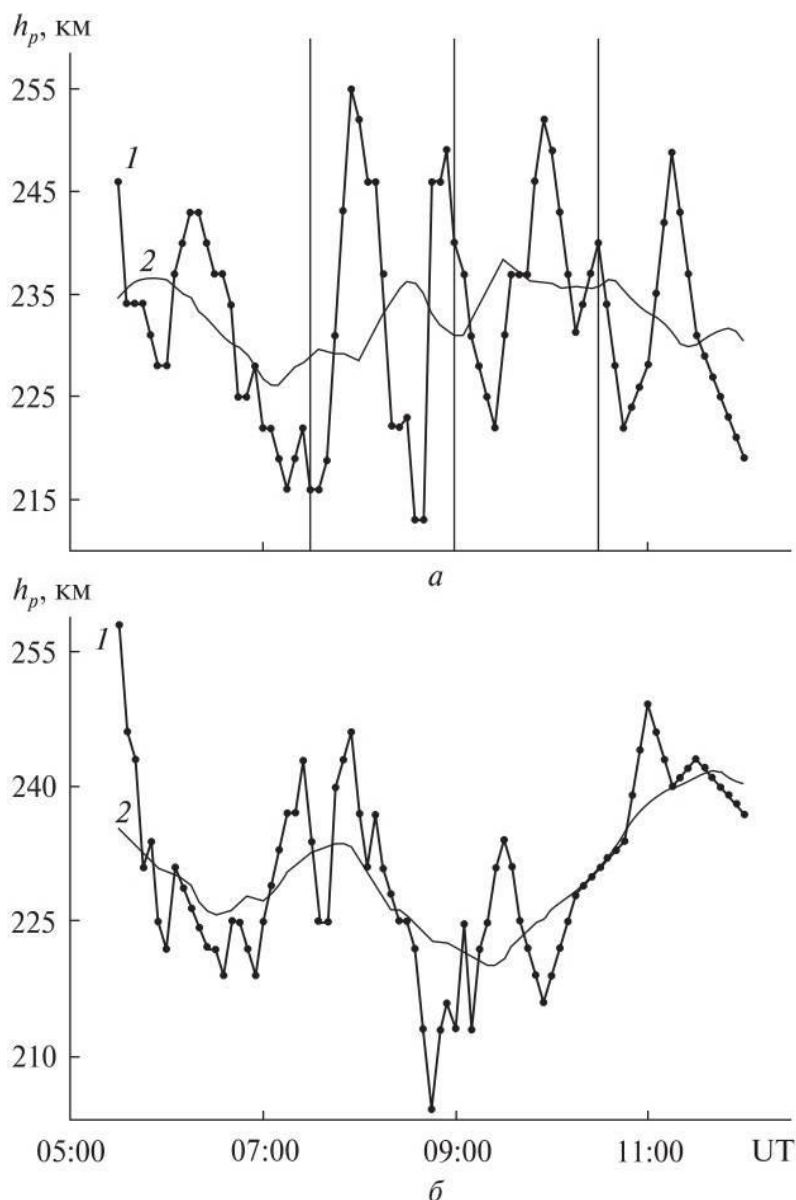


Рис. 3.5 Часові варіації висоти відбиття h_p поблизу максимуму іонізації шару F2: *a* – у день затемнення 4 січня 2011 р. (1 – вихідна залежність, 2 – згладжена методом ковзного середнього на інтервалі часу в 90 хв), *б* – те ж у контрольний день 5 січня 2011 р.

3.2.4 Часові варіації концентрації електронів у максимумі іонізації

Залежність електронної концентрації в максимумі іонізації шару $N(t)$ у день СЗ 4 січня 2011 р. і в контрольний день 5 січня 2011 р. показані на рис. 3.6.

Значення N отримані із значень критичних частот, поміряних за допомогою іонозонда. Відразу після початку СЗ відбувалося зменшення електронної концентрації від $4.0 \cdot 10^{11}$ до $2.1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Мінімальне значення $N_{\min}$ спостерігалось близько 09:15, тобто через 16 хв після моменту настання головної фази СЗ.

Максимальне зменшення N приблизно дорівнює $1.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Після головної фази затемнення електронна концентрація збільшувалася й до його кінця досягала значень близько $4 \cdot 10^{11}$ – $5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

У контрольний день, 5 січня 2011 р., з 05:30 до 08:10 концентрація електронів збільшувалася. В інтервалі часу 08:10–09:45 вона зменшувалася. З 09:45 спостерігалось поступове збільшення N .

Таким чином, часові варіації N у день СЗ і в контрольний день суттєво відрізнялися.

3.3 Хвильові збурення

Як показав спектральний аналіз, затемнення супроводжувалося збільшенням амплітуди квазіперіодичних коливань f_oF2 приблизно на 0.2 і 0.4 МГц із періодом 30 і 60 хв відповідно. При цьому відносна амплітуда коливань концентрації електронів δ_{Na} становила 8 і 16 %. Квазіперіодичні варіації посилювалися приблизно за 1 годину до початку СЗ. Тривалість варіацій з $T \approx 60$ хв була близько 5–6 год, з $T \approx 30$ хв – близько 3 год.

У контрольний день коливання f_oF2 були виражені слабо, принаймні, в інтервалі часу з 07:30 до 08:50. Середня амплітуда становила 0.1–0.2 МГц, тобто була менше приблизно в 2 рази. При цьому $\delta_{Na} \approx 3.5$ –7 %. Період переважаючих коливань змінювався в межах 50–90 хв.

Відмінність у періодах і амплітудах коливань у день СЗ і контрольний день дозволяє припустити, що саме СЗ викликало підсилення коливань параметрів іоносфери. Про підсилення хвильової активності в період СЗ також свідчать квазіперіодичні варіації висоти h_p з періодом близько 60 хв. Відносна амплітуда цих варіацій досягала 9 %.

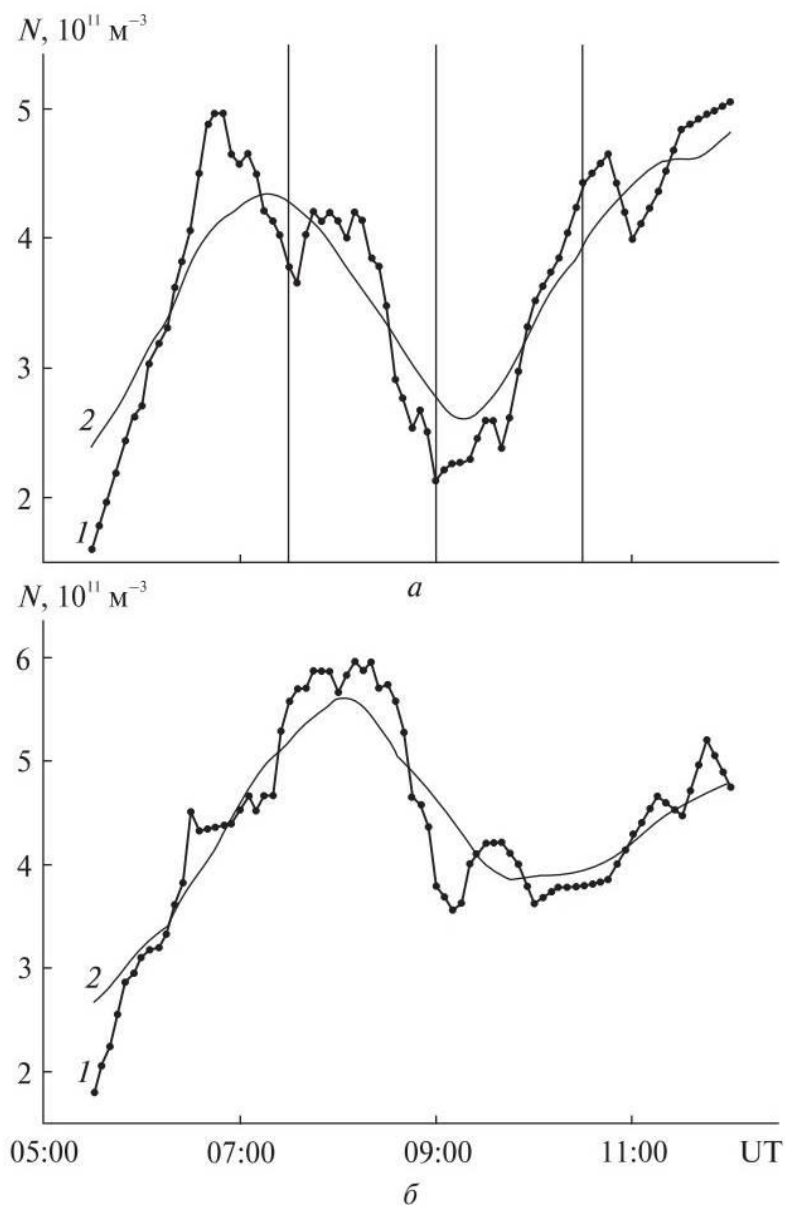


Рис. 3.6 Часові варіації електронної концентрації в максимумі іонізації шару F2: *a* – у день СЗ 4 січня 2011 р. (1 – вихідна залежність, 2 – згладжена методом ковзного середнього на інтервалі часу в 90 хв), *б* – те ж у контрольний день 5 січня 2011 р.

Природа виникнення коливань в іоносфері, швидше за все, пов'язана з генерацією хвиль у нейтральній атмосфері в результаті охолодження атмосферного газу та надзвукового руху області тіні. Хвилі в нейтральній атмосфері модулювали концентрацію електронів в іоносфері, що й спостерігалось методом ВЗ.

Значення періодів і амплітуд квазіперіодичних коливань свідчать про те, що СЗ супроводжувалося генерацією внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГХ).

3.4 Обговорення результатів спостереження

3.4.1 Варіації параметрів іонограм

Аналіз іонограм, отриманих перед початком, протягом і після закінчення СЗ показав, що мали місце значні варіації всіх їхніх параметрів. Звичайно, наявність шару Es ускладнювала спостереження ефектів, викликаних затемненням. Проте, упевнено спостерігалось зменшення критичних частот шару F2, що досягало 1.9 МГц. Після закінчення затемнення критичні частоти практично повернулися до своїх значень, які передували СЗ.

Мінімальні значення f_oF2 реєструвалися із затримкою стосовно моменту настання головної фази затемнення, з точністю до σ близькою до 16 хв. Тут σ – помилка у відліку часу при значенні дискрети Δt . Відомо, що $\sigma = \Delta t / \sqrt{12}$. При $\Delta t = 5$ хв, маємо $\sigma \approx 1.4$ хв. Тоді затримка склала 16.0 ± 1.4 хв. Одночасно з варіаціями f_oF2 спостерігалось спочатку збільшення приблизне на 70 кілометрів діючої висоти $h'(f_oF2)$, а потім її зменшення на таке ж значення.

Як і слід було сподіватися, близьке до повного СЗ викликало перебудову іоносфери спочатку від денних до нічних умов, а потім у зворотному напрямку.

Крім зазначених варіацій, мали місце квазіперіодичні зміни параметрів іонограм, що свідчать про те, що СЗ супроводжувалося підсиленням хвильової активності в іоносфері.

Така поведінка іонограм є досить типовою для періодів СЗ і в цілому відповідає результатам попередніх спостережень (див., наприклад [177]).

3.4.2 Дифузійні відбиття

Протягом затемнення з 7:30 до 11:30 висотно-частотні характеристики

носили дифузійний характер. У всіх діапазоні частот і висот мали місце сильні порушення шаруватої структури іоносфери. Швидше за все, увесь простір між максимумами шарів E і F2 було заповнено інтенсивними іоносферними неоднорідностями. Причиною їх підсилення, очевидно, послужили гідродинамічні нестійкості в термосфері [178].

3.4.3 Варіації концентрації електронів

Розглянемо докладніше висотно-часові варіації N , що супроводжують СЗ.

З урахуванням процесів утворення електронів і іонів, їх рекомбінації та руху плазми у вертикальному напрямку зі швидкістю V_z для середньоширотної іоносфери рівняння безперервності для N має вигляд [179]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(NV_z) = q(t) - L, \quad (3.2)$$

де q – швидкість іонізації, L – швидкість втрат електронів.

При досить низькій сонячній активності висота максимуму шару F2 у спокійних умовах не перевищує 230–250 км. Якщо висотними варіаціями NV_z у шарі іоносфери можна знехтувати, співвідношення (3.2) зводиться до такого рівняння:

$$\frac{dN}{dt} = q(t) - L, \quad (3.3)$$

де $q(t) = q_0[1 - A(t)]$, $A(t) = S(t)/S_0$ – функція покриття диска Сонця, S – площа затіненої частини диска Сонця, S_0 – площа диску останнього.

Оскільки характерний час даного СЗ $t_e \approx 90$ хв набагато перевищує час рекомбінаційних процесів на висотах $z \leq 250$ км, співвідношення (3.3) приблизно можна замінити таким:

$$q \approx L. \quad (3.4)$$

У максимумі шару F2 швидкість втрат [179]

$$L = \beta N, \quad (3.5)$$

де β – коефіцієнт втрат. Вважаючи, що протягом СЗ коефіцієнт β змінюється несуттєво, з (3.4), (3.5) одержимо, що на заданій висоті

$$\frac{N}{N_0} = \frac{q}{q_0} = 1 - A \equiv B. \quad (3.6)$$

Тут $B(t) = 1 - A(t)$, N_0 – значення N у відсутності СЗ. Поблизу головної фази $A_{\max} \approx 0.71$, $B_{\min} \approx 0.29$. Тоді, виходячи з (3.6), розрахункове значення $N_{\min}/N_0 = 0.29$. При цьому $\Delta N/N_0 = 1 - N_{\min}/N_0 = 0.71$. Значення $N_{\min}/N_0 = 0.29$ помітно відрізняється від експериментально отриманого значення 0.48. Причин розбіжності три. По-перше, на висотах 230–250 км уже не можна вважати, що $V_z = 0$. По-друге, при тривалості СЗ близько 3 годин помітно змінювалися параметри нейтральної атмосфери, що спричинило зміну коефіцієнта β . У третій, зсув висоти шару F2 вгору під час СЗ призвів до зменшення β .

Розглянемо ці причини докладніше. Як показали синхронні спостереження на харківському радарі некогерентного розсіяння, у період головної фази затемнення в діапазоні висот 200–250 км $V_z(z) \approx -50$ м/с. Поблизу максимуму шару F2 $N(z) = \text{const}$, крім того, у широкому діапазоні висот $V_z(z) \approx \text{const}$. З цієї причини в рівнянні (3.2) $\partial(N V_z)/\partial z \approx 0$, тобто процес переносу не міг суттєво вплинути на варіації $N(t)$, пов'язані із затемненням.

Можна показати, що варіації концентрації нейтральних часток і β у перехідний час доби на висотах 200–300 км приблизно описуються лінійною залежністю. При цьому

$$\beta(\Delta t) \approx \beta_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{2\tau}\right),$$

де $\tau \approx 4.5$ година – характерний час перехідних процесів, Δt – інтервал часу після заходу (початку затемнення) Сонця. У період головної фази СЗ $\Delta t \approx 1.5$ год. Тоді $\beta(1.5) = 0.83 \beta_0$.

За рахунок зменшення N область відбиття радіохвилі зсувається вгору на $\Delta z \approx 10$ км. У результаті цього β зменшується за законом

$$\beta(z) = \beta_0 e^{-\Delta z/H},$$

де H – приведена висота нейтральної атмосфери. Відповідно відомим міжнародним моделям нейтральної атмосфери, поблизу 230–240 км (тобто поблизу висоти максимуму шару F2 4 січня 2011 р.) $H \approx 45$ км. Тоді сумарне зменшення β за рахунок останніх двох причин у момент часу $\Delta t \approx 1.5$ година з урахуванням того, що $\Delta z \ll H$ описується співвідношенням:

$\beta \approx \beta_0 (1 - \frac{\Delta t}{2\tau} - \frac{\Delta z}{H}) \approx 0.61\beta_0$. При цьому, згідно (3.5) і (3.6) розрахункове

значення $\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{q}{q_0} \frac{\beta_0}{\beta} = B_{\min} \frac{\beta_0}{\beta} \approx 0.49$, що дуже близько до експериментально отриманого значення (0.48).

Таким чином, СЗ привело не тільки до зменшення N , але й до зменшення приблизно на $\Delta t/2\tau \approx 17\%$ концентрації нейтральних частинок на висотах поблизу шару F2.

Обговоримо періоди становлення N . Виходячи з висотної залежності β , наведеної, наприклад, в [180, 181], можна показати, що в шарі F2 на висоті $z = 230$ км $\beta \approx 10^{-3} \text{с}^{-1}$. Тоді час становлення концентрації електронів $t_N = \beta^{-1} \approx 1000 \text{с} \approx 16.7$ хв. Значення t_N близько до того, що спостерігалось експериментально (16.0 ± 1.4 хв).

Для Е-області є справедливим квадратичний закон рекомбінації. Замість (3.4), (3.5) маємо наступні співвідношення:

$$q = \alpha N^2,$$

де α – коефіцієнт рекомбінації. Під час відсутності затемнення $q_0 = \alpha_0 N_0^2$. Тоді

$$\frac{N}{N_0} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha} \frac{q}{q_0}} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha} B(t)}.$$

При $B_{\min} = 0.29$ і $\alpha \approx \alpha_0$ маємо $N_{\min}/N_0 \approx 0.54$, а $fE_{\min}/fE \approx 0.73$. При цьому відносна зміна f_0E повинна бути 27 %. З іонограм отримано, що вона була близькою до 16 %, а $N_{\min}/N_0 \approx 0.70$. Таким чином, оцінене з експерименту $N_{\min}/N_0$ перевищувало розрахункове значення на 16%. Ця відмінність може бути

обумовлена середньоширотним висипанням електронів з магнітосфери, описаним у роботі [182].

Таким чином, висотно-часові варіації N протягом СЗ цілком відповідають існуючим уявленням про фізико-хімічні процеси в середній іоносфері (висоти 100–250 км).

3.5 Загальні відомості про сонячне затемнення 20 березня 2015 р.

16 і 17 березня 2015 р. спостерігалось збільшення більш ніж на порядок концентрації частинок n_{sw} сонячного вітру (рис. 3.7). 17–22 березня швидкість сонячного вітру V_{sw} зросла в 1.5 рази. 17 березня температура часток T_{sw} збільшилася на порядок. Ріст концентрації та температури призвів до зростання тиску газу p_{sw} у сонячному вітрі. 17 березня компонента B_z міжпланетного магнітного поля повернула до півдня, тобто виникла ситуація коли $B_z < 0$. Мінімальне значення B_z становило -15 нТл. Почалася магнітна буря, яка супроводжувалася збільшенням на 1–2 порядку енергії ϵ_A , що надходить у магнітосферу від сонячного вітру, а також значні зміни індексів AE , K_p і D_{st} . Значення останніх досягали 1600 нТл, 8 і -230 нТл відповідно.

Додамо, що ця буря, яка отримала назву бурі Святого Патрика, – найсильніша в поточному циклі сонячної активності. Буря, поступово загасаючи, тривала протягом тижня. Так, 20 і 21 березня сумарний індекс $\sum K_p$ становив 27 і 22 відповідно. Удень 20 березня мала місце релаксуюча іоносферна буря, точніше її негативна фаза. Значення критичної частоти f_oF2 були приблизно на 1–2 МГц нижче, ніж у контрольний день 21 березня.

Для вивчення ефектів СЗ 20 березня 2015 р. використовувалися дані 10 європейських іонозондів, що викладено у вільний доступ в мережі Internet [<http://umlcar.uml.edu/stationlist.html>], а також іонозонда поблизу м. Харків (с. Гайдари), перелік яких представлений у табл. 3.1 (надалі назви іонозондів відповідатимуть назвам населених пунктів поблизу яких вони розташовані).

З табл. 3.1 видно, що затемнення мало місце в ранковий і денний час, кутова висота Сонця над обрієм змінювалася від 17° до 51° . Максимальна фаза та площа покриття варіювалися в межах 0.43–0.95 і 0.32–0.95 відповідно.

Таблиця 3.1

Географічні координати (широта φ і довгота λ іонозондів, основні відомості про положення Сонця та СЗ. Перший, другий, і третій моменти часу відповідають початку, максимальній фазі та закінченню СЗ

Іонозонд	φ	λ	Час настання події	Фаза СЗ	Покриття диска	Кутова висота Сонця над обрієм	Азимут Сонця	Дискретність реєстрації іонограм 20/21 березня, хв
«Tromsö»	69.6°N	19.2°E	09:04:52 10:08:49 11:13:19	0.95	0.95	17.9° 19.8° 20.1°	152.1° 168.8° 186.0°	15/15
«Fairford»	51.7°N	1.5°W	08:24:10 09:29:54 10:39:40	0.88	0.86	19.3° 27.7° 34.5°	116.8° 132.3° 151.1°	15/15
«Dourbes»	50.1°N	4.6°E	08:26:25 09:33:42 10:44:48	0.82	0.78	23.8° 32.0° 37.9°	122.3° 138.9° 159.4°	0.5/0.5
«Juliusruh»	54.6°N	13.4°E	08:41:34 09:49:53 11:00:29	0.82	0.78	26.9° 32.5° 35.1°	136.2° 154.8° 175.8°	15/15
«Pruhonice»	50.0°N	14.6°E	08:36:41 09:45:36 10:57:10	0.74	0.68	30.1° 36.7° 39.7°	134.4° 153.5° 176.1°	3/15
«Rocuetes»	40.8°N	0.5°E	08:08:53 09:13:58 10:24:21	0.70	0.64	22.6° 33.5° 43.0°	111.5° 125.3° 144.2°	5/5
«El Arinosillo»	37.1°N	6.7°W	07:58:27 09:00:12 10:07:43	0.69	0.62	16.5° 28.1° 39.6°	103.2° 114.2° 129.2°	15/15
«Троїцьк» (Москва)	55.5°N	37.3°E	09:12:25 10:19:38 11:25:57	0.65	0.57	34.1° 33.7° 30.2°	172.2° 192.4° 211.6°	3/15
«San Vito»	40.6°N	17.8°E	08:30:25 09:37:23 10:47:23	0.54	0.45	37.4° 45.4° 49.1°	131.5° 151.2° 176.6°	15/15
«Гайдари» (Харків)	49.6°N	36.3°E	09:09:25 10:15:52 11:21:33	0.54	0.44	39.6° 39.6° 35.8°	169.3° 190.9° 211.2°	5/5
«Athens»	38.0°N	23.5°E	08:39:15 09:43:13 10:49:11	0.43	0.32	43.6° 50.1° 51.6°	138.6° 160.1° 186.3°	2/5

Примітка: перший, другий, і третій моменти часу відповідають початку, максимальній фазі та закінченню СЗ

Похибка виміру частоти та діючої висоти для стандартних іонозондів становить 25 або 50 кГц і 5 км відповідно.

3.6 Варіації параметрів іоносфери протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. над Європою

3.6.1 Часові варіації критичної частоти f_oF2

Часові залежності критичної частоти f_oF2 , а також її згладжені ковзним середнім на інтервалі 120 хв значення для 11 європейських іонозондів наведені на рис. 3.8 і рис. 3.9. Із цих рисунків видно, що 20 березня 2015 р. згладжені залежності критичної частоти $\overline{f_oF2}(t)$ мали провал поблизу максимальної фази СЗ.

Для іонозонда «Гайдари» провал замаскований позитивним збуренням, яке спостерігалось в інтервалі часу 10:00–10:50. Під час відсутності цього збурення значення $f_oF2_{\min}$ склало б 7.8 МГц, а без СЗ $f_oF2_0 \approx 8.3$ МГц. Саме ці значення далі використовувалися при оцінці співвідношення $N_{\min} / N_0$ (табл. 3.2). Мінімальні значення $\overline{f_oF2}(t)$ спостерігалися із часом запізнювання $\Delta t \approx 5\text{--}30$ хв після настання максимальної фази затемнення (див. табл. 3.2).

Відмітимо, що подібні провали в залежності $\overline{f_oF2}(t)$ в контрольний день 21 березня 2015 р. були відсутні.

Крім регулярної поведінки $f_oF2(t)$, мали місце квазіперіодичні варіації критичної частоти.

3.6.2 Часові варіації висоти h_p

Часові варіації висоти h_p для 20 і 21 березня 2015 р. наведені на рис. 3.10 і рис. 3.11 відповідно. Із цих рисунків видно, що для всіх іонозондів значення h_p протягом СЗ перевищувало на 40–70 км значення h_p у контрольний день, а також на 25–50 км значення h_p , яке було б при відсутності СЗ. Крім регулярного

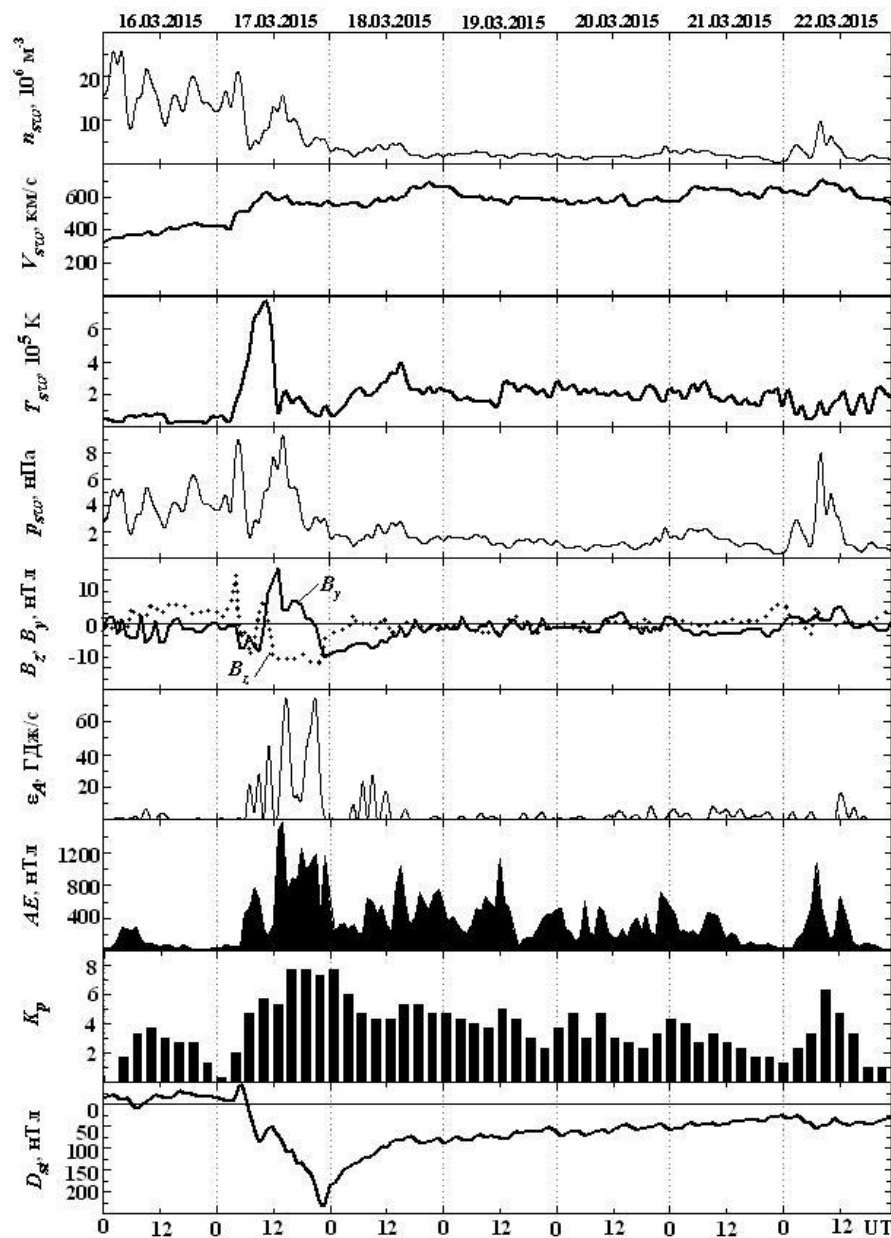


Рис. 3.7 Часові варіації параметрів сонячного вітру в період з 16 по 22 березня 2015 р.: концентрації часток n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} (ACE Satellite – Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), температури T_{sw} і динамічного тиску p_{sw} (розрахунки); компоненти B_z (суцільна лінія), B_y (пунктирна лінія) міжпланетного магнітного поля (ACE Satellite – Magnetometer); ϵ_A – функція Акасофу (розрахунки); AE -індексу авроральної активності (WDC Kyoto); K_p - індексу (Air Force Weather Agency); D_{st} -індексу (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University)

збільшення h_p , що спостерігався протягом затемнення, висота h_p відчувала квазіперіодичні варіації з амплітудою 15–30 км і квазіперіодом 45–90 хв. Значення амплітуд δh_{pa} і квазіперіодів T_h у день затемнення та у контрольний день помітно відрізнялися (табл. 3.3).

Таблиця 3.2

Варіації основних параметрів іонограм, що спостерігалися ($N_{\min}/N_0$) і обчислених $(N_{\min}/N_0)_{\text{cal}}$ відносних концентрацій електронів f_oF2_0 і $f_oF2_{\min}$ реальне та очікуване значення f_oF2 у контрольний день і день затемнення поблизу максимальної фази СЗ

Іонозонд	f_oF2_0 , МГц	$f_oF2_{\min}$, МГц	$\frac{N_{\min}}{N_0}$	$\left(\frac{N_{\min}}{N_0}\right)_{\text{cal}}$	$\Delta h_{p\text{max}}$, км	Δt , хв	β_0/β
«Tromsö»	8	7.0	0.77	0.05	40	30	15.4
«Fairford»	5.3	4.1	0.60	0.14	50	15	4.3
«Dourbes»	5.3	4.25	0.49	0.22	22	15	2.2
«Juliusruh»	6.8	5.9	0.75	0.22	25	30	3.4
«Pruhonicе»	6.7	5.8	0.75	0.32	25	30	2.3
«Rocuetes»	6.5	4.8	0.55	0.36	75	5–10	1.5
«El Arinosillo»	7.9	5.0	0.40	0.38	70	15	1.05
«Троїцьк» (Москва)	7.8	6.9	0.78	0.43	10	30	1.8
San Vito	8.2	6.2	0.57	0.55	50	5–10	1.04
«Гайдари» (Харків)	8.3	7.8	0.88	0.56	25	15	1.6
«Athens»	8.7	7.2	0.62	0.68	15	20	1

3.7 Хвильові збурення протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. над Європою

3.7.1 Часові варіації збільшень критичної частоти f_oF2

Часові варіації δf_oF2 збільшень критичної частоти δf_oF2 20 і 21 березня 2015 р. наведені на рис. 3.14. З рис. 3.14 можна бачити, що характер

квазіперіодичних варіацій у день затемнення й у контрольний день помітно відрізнялися. У день затемнення часові варіації були більш регулярними, більш чітко спостерігалися квазіперіодичні варіації, амплітуда δf_a цих варіацій була в 2–3 рази більше, чим у контрольний день (табл. 3.3). Крім того, помітно відрізнялися періоди T_f квазіперіодичних коливань у день затемнення та у контрольний день (див. також табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Основні параметри квазіперіодичних збурень в іоносфері

Іонозонд	20 березня 2015 р.				21 березня 2015 р.			
	T_f , хв	T_z , хв	δf_a , МГц	δh_{pa} , км	T_f , хв	T_z , хв	δf_a , МГц	δh_{pa} , км
«Tromsö»	30–40	45–60	0.2	10–15	60	60	0.15–0.2	10
«Fairford»	80–100	30–45	0.3	25–30	75	60	0.1	15–20
«Dourbes»	80–100	50–60	0.2–0.4	10–25	60	30–40	0.15–0.20	10–15
«Juliusruh»	50–70	45–60	0.15–0.20	10–15	60–80	30–60	0.10–0.20	10
«Pruhonice»	80–90	40–60	0.15	10–20	60–120	45–60	0.10–0.20	10
«Rocuetes»	60–90	30–60	0.25–0.35	10–15	60	45–60	0.2	10
«El Arinosillo»	60–90	30–45	0.3–0.4	5–10	90	30–45	0.15–0.20	5–7
«Троїцьк» (Москва)	50–60	45–60	0.4	20–25	50–60	45–60	0.2–0.3	15
«San Vito»	40–60	45–75	0.2	10–20	45–75	45–60	0.15–0.20	5–10
«Гайдари» (Москва)	80–100	60	0.4	20–25	60–70	30–60	0.2	10–15
«Athens»	60	45–60	0.4–0.6	10–15	60	40–60	0.15–0.20	5–10

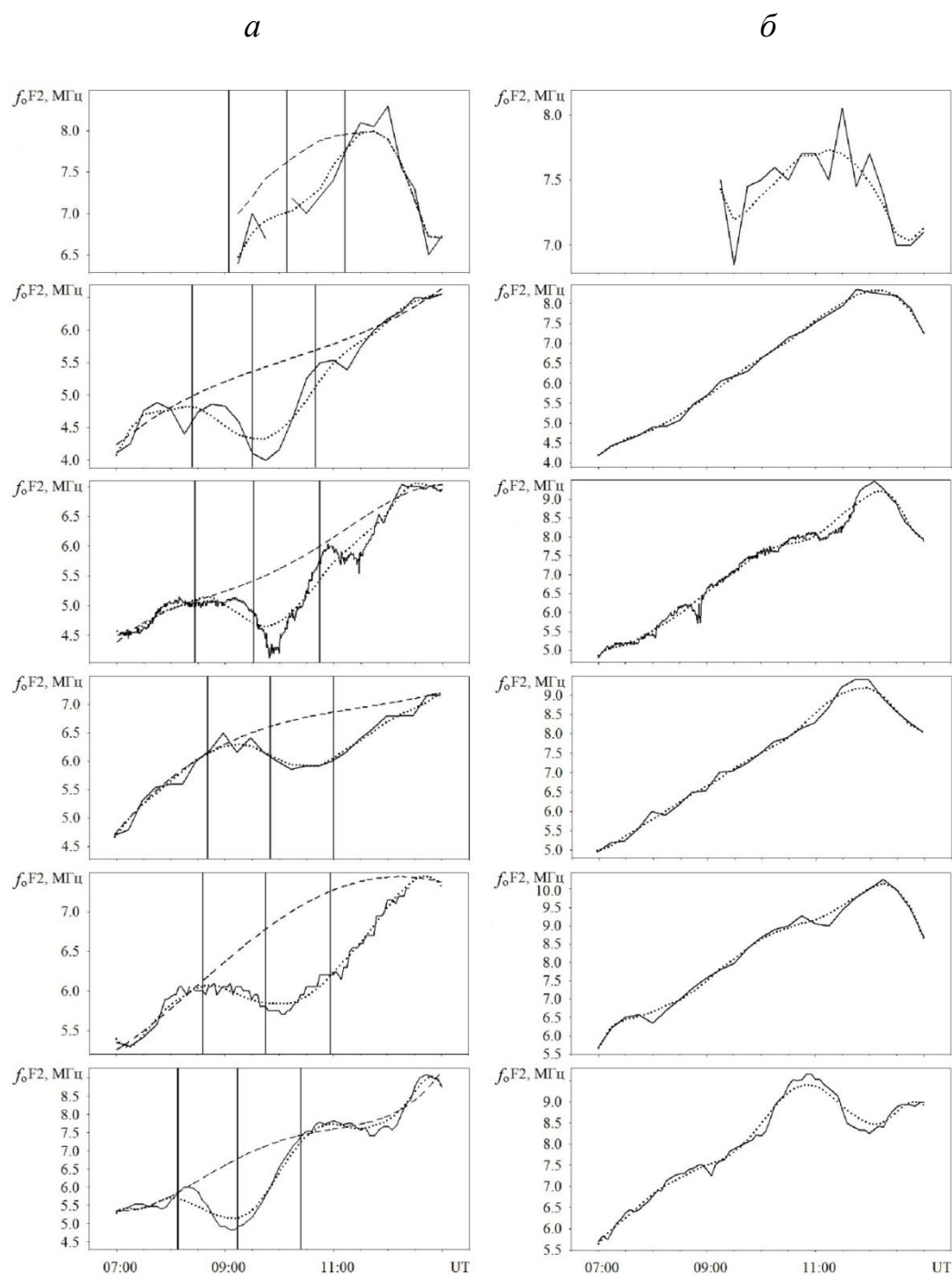


Рис. 3.8 Часові залежності критичної частоти (суцільна лінія) і згладженої ковзним середнім критичної частоти (крапкова лінія) для іонозондів (панелі зверху вниз) «Tromsö», «Fairford», «Dourbes», «Juliusruh», «Pruhonice», «Rocuetes»: *a* – 20 березня 2015 р.; *б* – 21 березня 2015 р. Штрихова лінія позначає очікувані варіації $f_oF2(t)$ під час відсутності C3. Вертикальними лініями тут і далі показані моменти часу початку, максимальної фази та закінчення C3

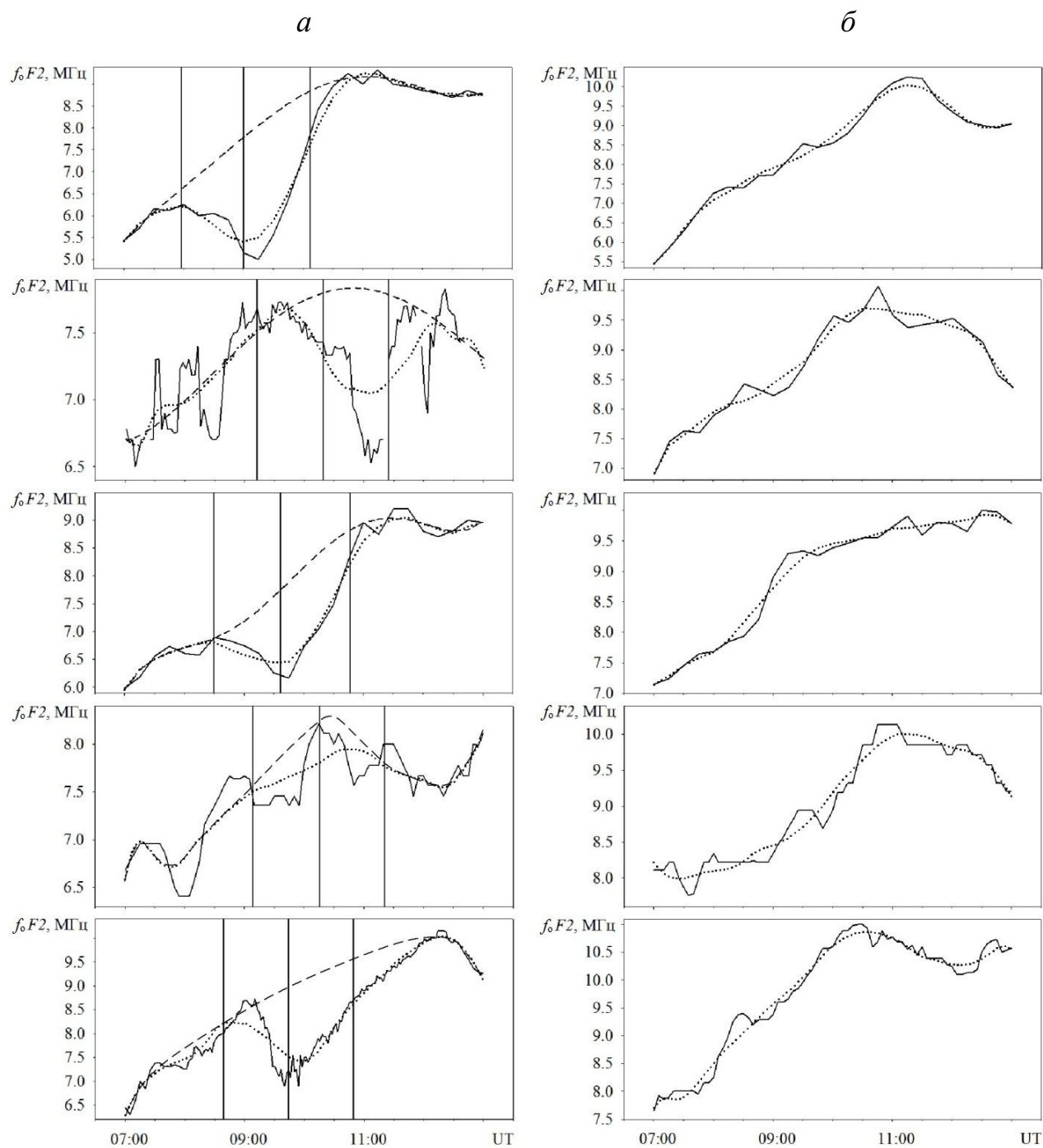


Рис. 3.9 Часові залежності критичної частоти (суцільна лінія) і згладженої ковзним середнім критичної частоти (крапкова лінія) для іонозондів (панелі зверху вниз), «El Arinosillo», «Москва», «San Vito», «Гайдари», «Athens»: *a* – 20 березня 2015 р.; *б* – 21 березня 2015 р. Штрихова лінія позначає очікувані варіації $f_oF2(t)$ під час відсутності C3

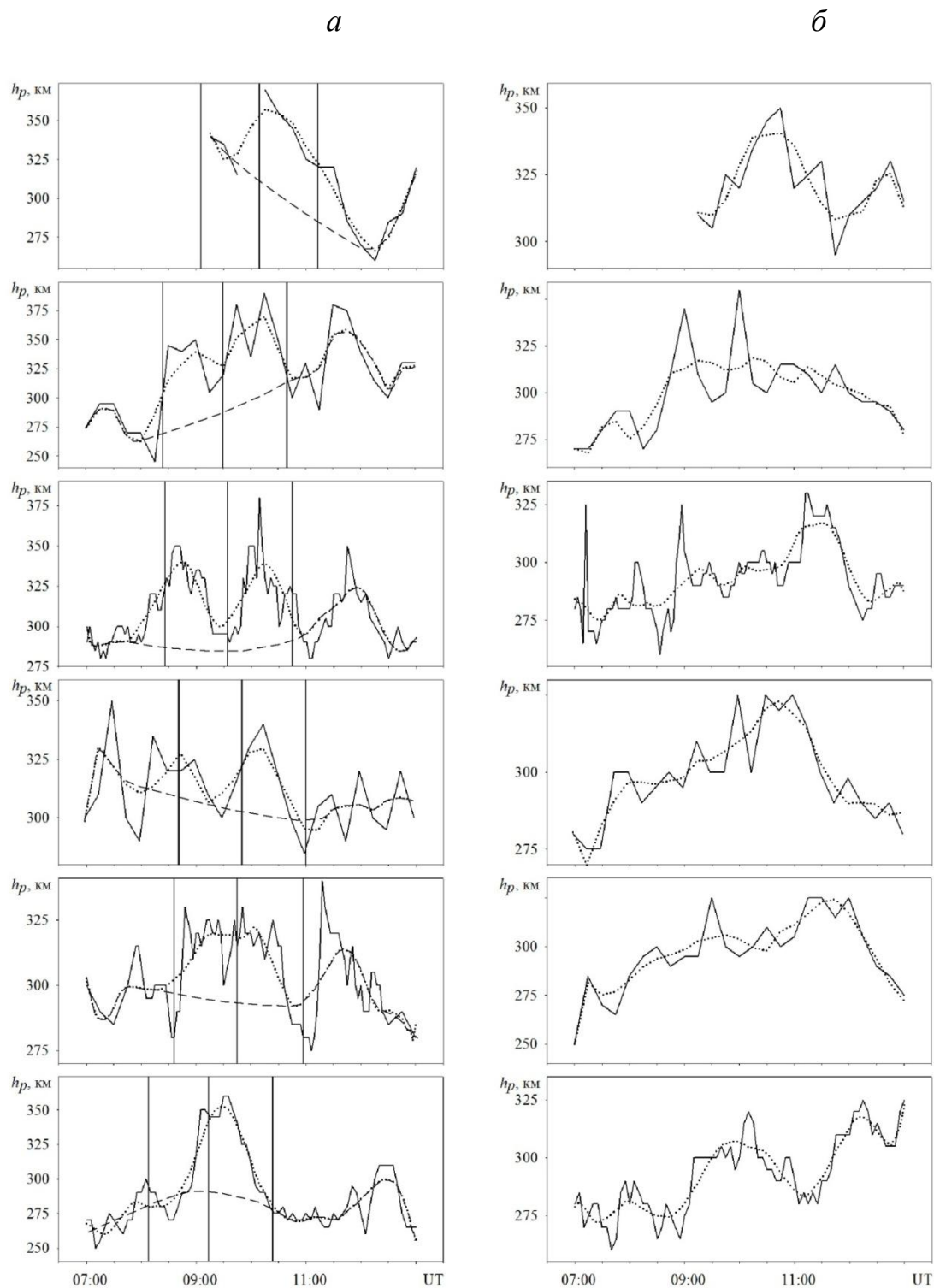


Рис. 3.10 Часові залежності висоти h_p (суцільна лінія) і згладженої ковзним середнім $\bar{h}_p$ (крапкова лінія) для іонозондів (панелі зверху вниз) «Tromsö», «Fairford», «Dourbes», «Juliusruh», «Pruhonice»: *a* – 20 березня 2015 р.; *б* – 21 березня 2015 р. Штрихова лінія позначає очікувані варіації $h_p(t)$ під час відсутності СЗ

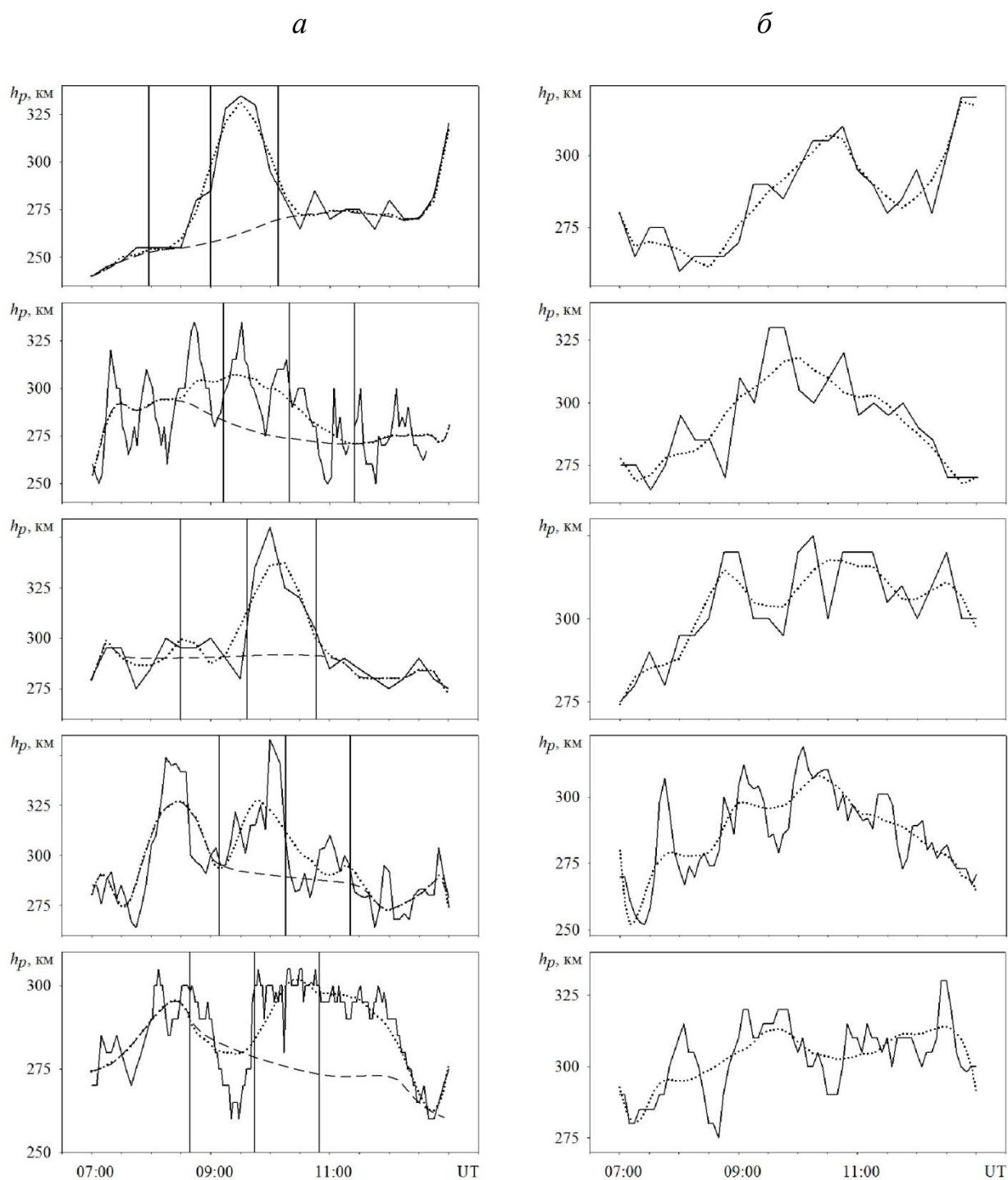


Рис. 3.11 Часові залежності висоти h_p (суцільна лінія) і згладженої ковзним середнім $\bar{h}_p$ (крапкова лінія) для іонозондів (панелі зверху вниз) «El Arinosillo», «Троїцьк», «San Vito», «Гайдари», «Athens»: *a* – 20 березня 2015 р.; *б* – 21 березня 2015 р. Штрихова лінія позначає очікувані варіації $h_p(t)$ під час відсутності СЗ

3.7.2 Часові варіації збільшень висоти h_p

Часові варіації збільшень висоти δh_p для 20 і 21 березня 2015 р. наведені на рис. 3.12. Із цього рисунка можна бачити, що амплітуда δh_{pa} у день затемнення й

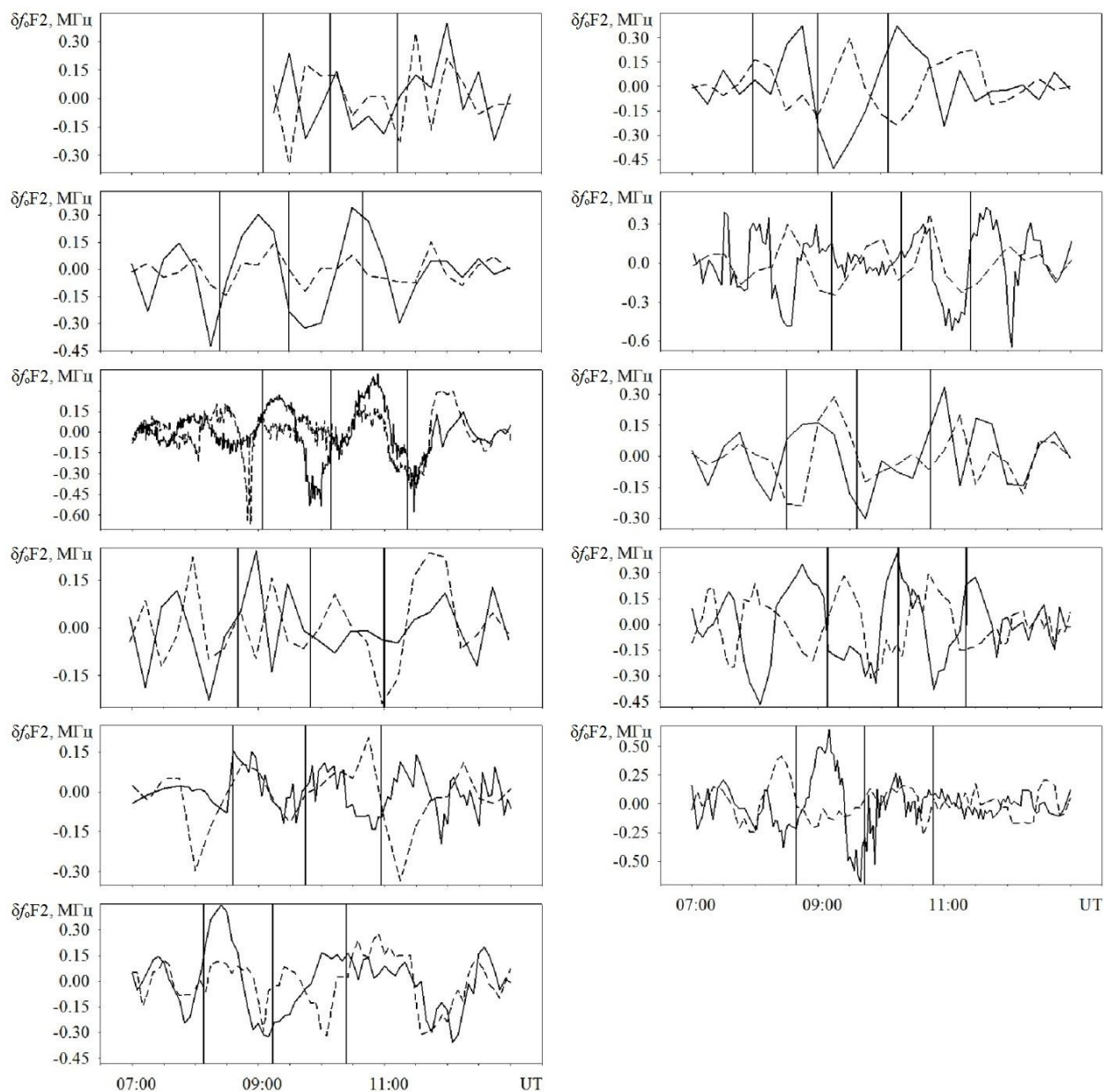


Рис. 3.12 Часові варіації збільшення критичної частоти 20 березня 2015 р. (суцільна лінія) і 21 березня 2015 р. (штрихова лінія) для іонозондів «Tromsö», «Fairford», «Dourbes», «Juliusruh», «Pruhonice» і «Rocuetes» (ліва панель), «El Arinosillo», «Троїцьк», «San Vito», «Гайдари» і «Athens» (права панель)

у контрольний день помітно відрізнялися. Амплітуда δh_p була в середньому в 1.5–2 рази більше в день затемнення, ніж в контрольний день (див. також табл. 3.2). Величини квазіперіода T_z у день СЗ і 21 березня 2015 р. відрізнялися незначно (див. також табл. 3.2). Значення квазіперіодів, обчислені по варіаціях δf_oF2 і δh_p , були близькими (див. табл. 3.2).

3.7.3 Результати системного спектрального аналізу

Спектральний аналіз залежностей $\delta f_oF2(t)$ Приклади результатів системного спектрального аналізу варіацій $\delta f_oF2(t)$ для іонозондів «San Vito» і «Pruhonice» наведені на рис. 3.13 і рис. 3.14 відповідно. З малюнків можна бачити, що протягом СЗ спектральний склад та амплітуди коливань суттєво змінювалися. Так, для іонозонда «San Vito» на зміну коливанню з $T_f \approx 50$ –60 хв прийшло коливання з $T_f \approx 75$ –120 хв (див. рис. 3.13). Мала частота реєстрації іонограм (1 іонограма за 15 хв), на жаль, не дозволила точніше оцінити період T_f . На іонозонді «Pruhonice» інтервал між реєстраціями іонограм становив 3 хв, що забезпечило більш якісні результати спектрального аналізу (див. рис. 3.14). З рис. 3.14 чітко видно, що протягом СЗ підсилюлося коливання з $T_f \approx 80$ –90 хв. Основні результати спектрального аналізу представлені в табл. 3.2 і табл. 3.3.

Порівняння амплітуд і періодів коливань для 20 і 21 березня 2015 р. показало, що в день СЗ вони помітно відрізнялися від тих, що були в контрольний день.

Спектральний аналіз залежностей $\delta h_p(t)$. Приклади результатів системного спектрального аналізу варіацій $\delta h_p(t)$ для іонозондів «San Vito» і «Троїцьк» наведені на рис. 3.15 і рис. 3.16 відповідно. З рис. 3.15 видно, що СЗ супроводжувалося помітними змінами спектрального складу та амплітуд коливань, протягом СЗ підсилюлося коливання з $T_z \approx 45$ –75 хв, його амплітуда збільшилася вдвічі.

З рис. 3.16 видно, що протягом СЗ потужне коливання з амплітудою близько 20–25 км і $T_z \approx 45$ –60 хв розпалося на два коливання з T_z близько 30 і 60

хв і амплітудами близько 10 і 15 км відповідно. Про це ж свідчить і порівняння спектрограм для 20 і 21 березня 2015 р. Дані про амплітуди та періоди, отримані за результатами системного спектрального аналізу, зведені в табл. 3.2 і табл. 3.3.

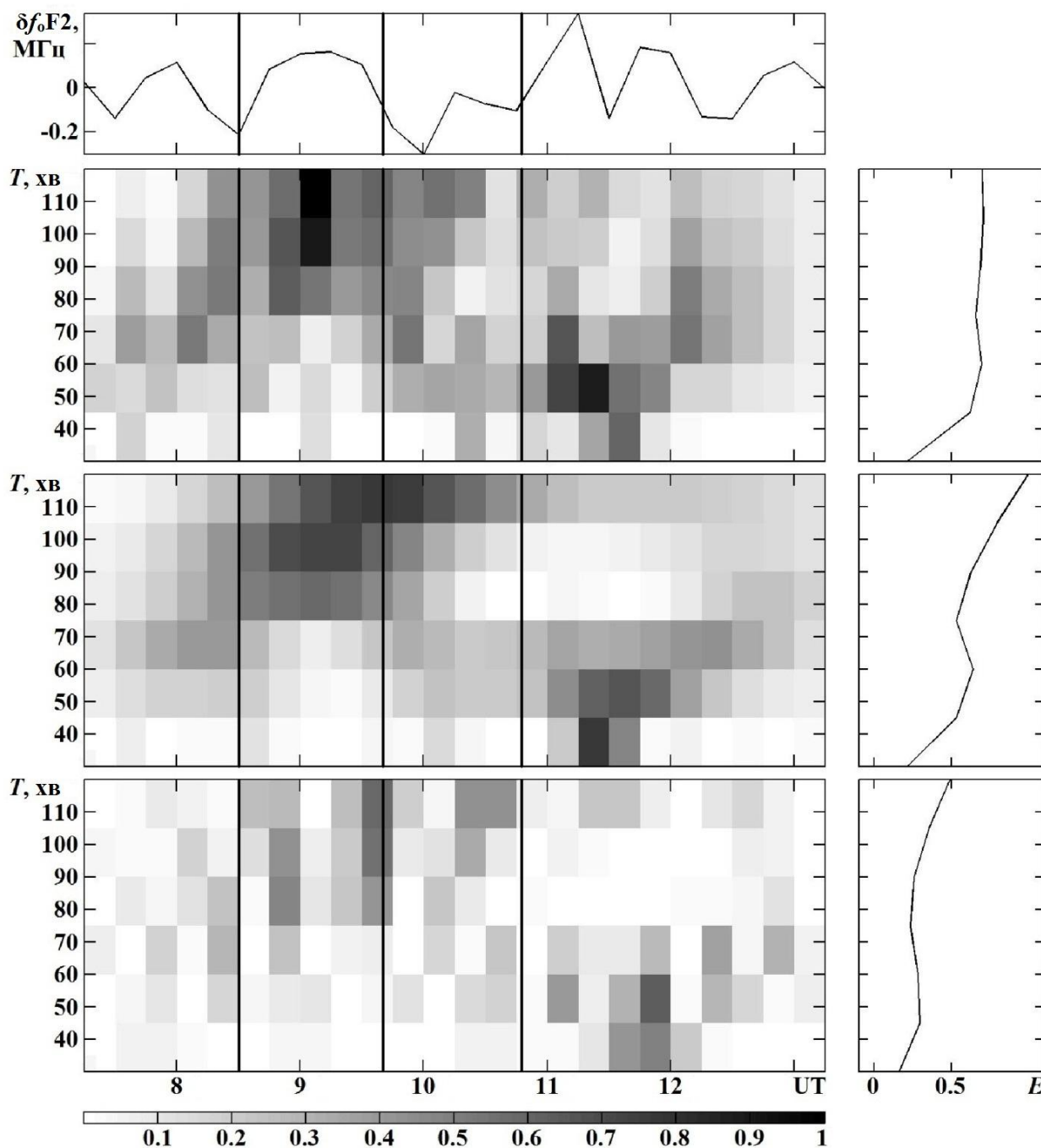


Рис. 3.13 Результати системного спектрального аналізу збільшень δf_oF2 для іонозонда «San Vito» 20 березня 2015 р. Панелі зверху вниз: часова залежність $\delta f_oF2(t)$; спектрограма ВПФ; спектрограма АПФ і спектрограма ВП. Праворуч показані енергограми відповідних спектрограм

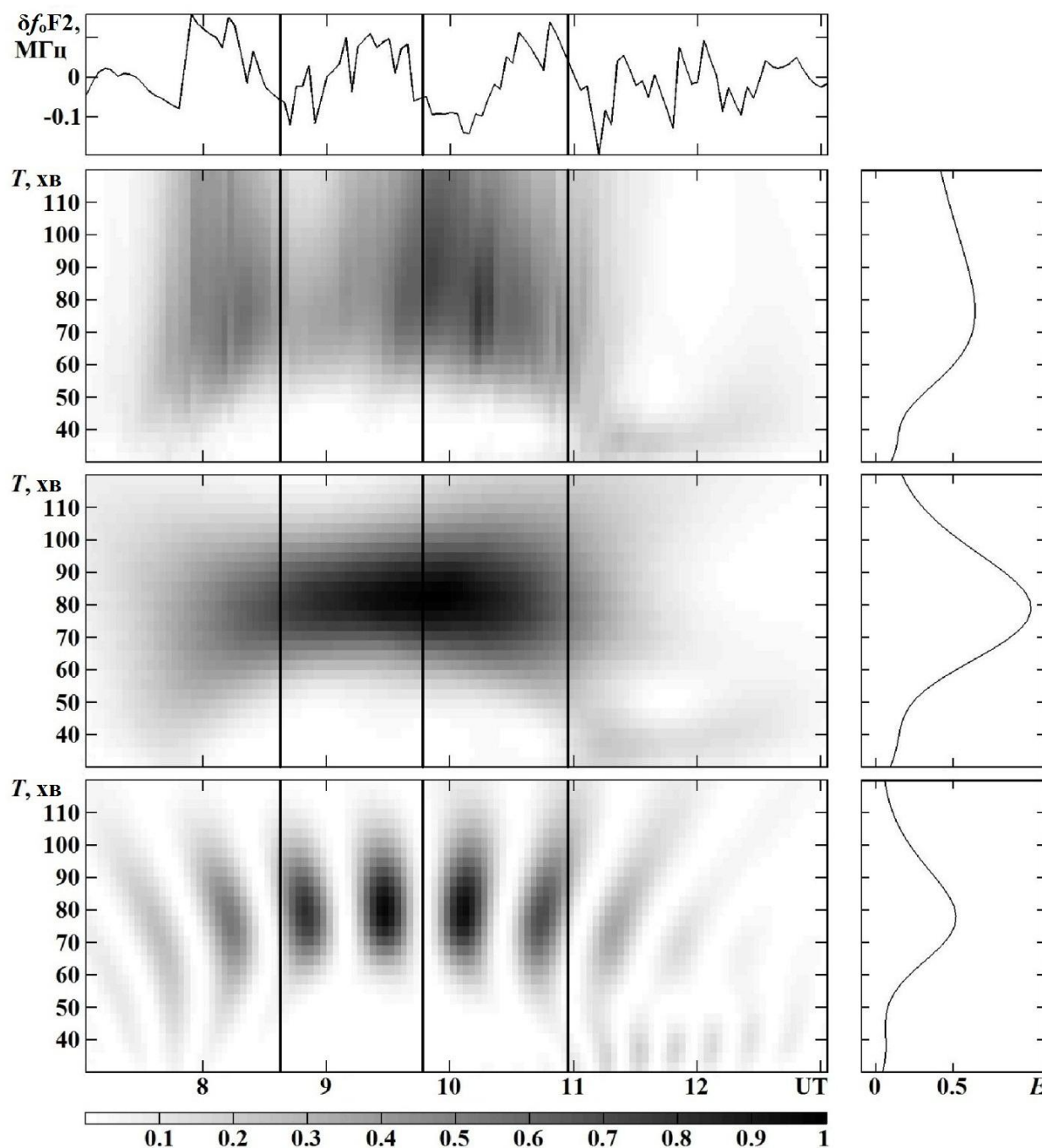


Рис. 3.14 Результати системного спектрального аналізу збільшень δf_oF2 для іонозонда «Pruhonice» 20 березня 2015 р. Панелі зверху вниз: часова залежність $\delta f_oF2(t)$; спектрограма ВПФ; спектрограма АПФ і спектрограма ВП. Праворуч показані енергограми відповідних спектрограм

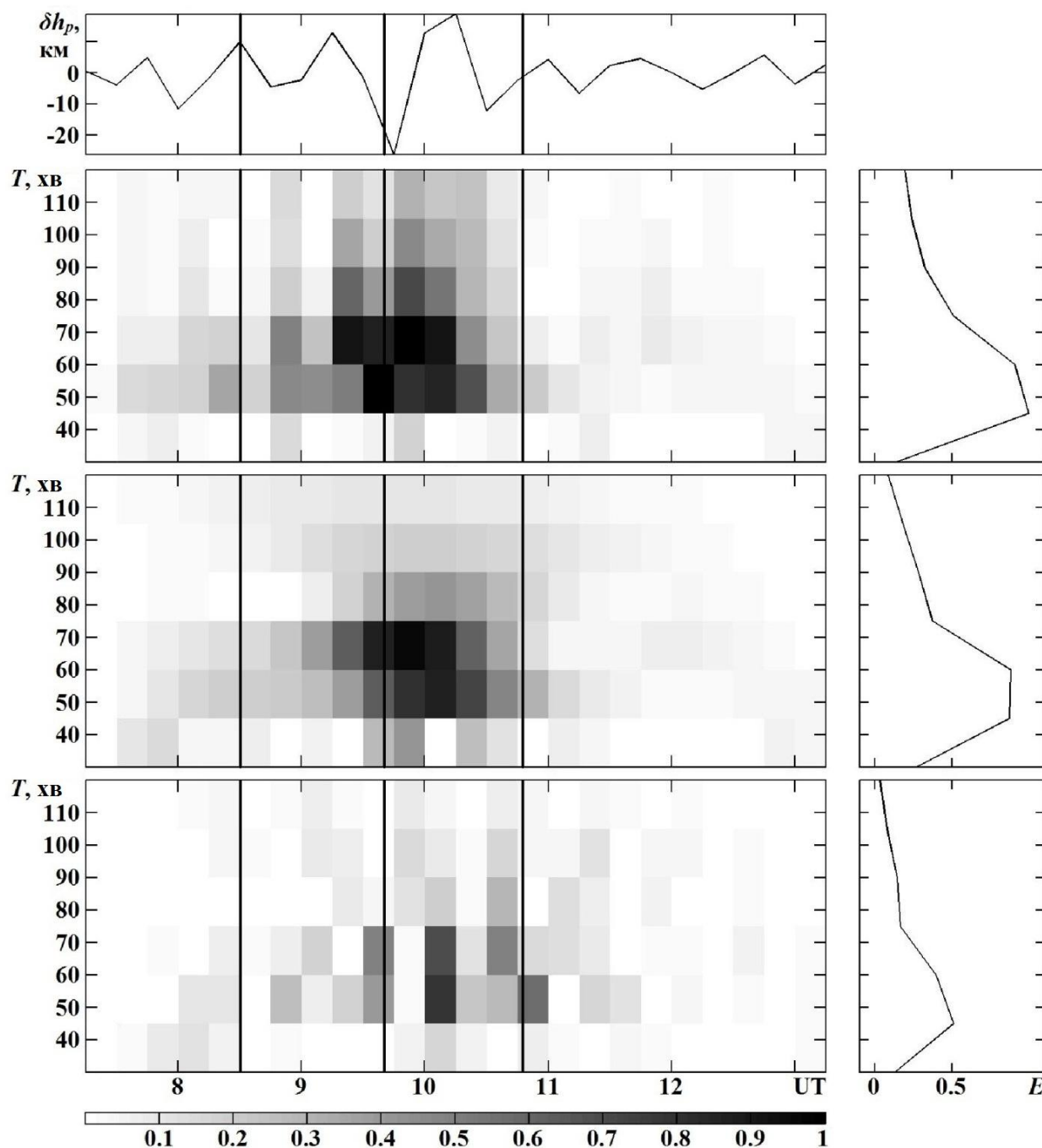


Рис. 3.15 Результати системного спектрального аналізу збільшень δh_p для іонозонда «San Vito» 20 березня 2015 р. Панелі зверху вниз: часова залежність δh_p ; спектрограма ВПФ; спектрограма АПФ і спектрограма ВП. Праворуч показані енергограми відповідних спектрограм

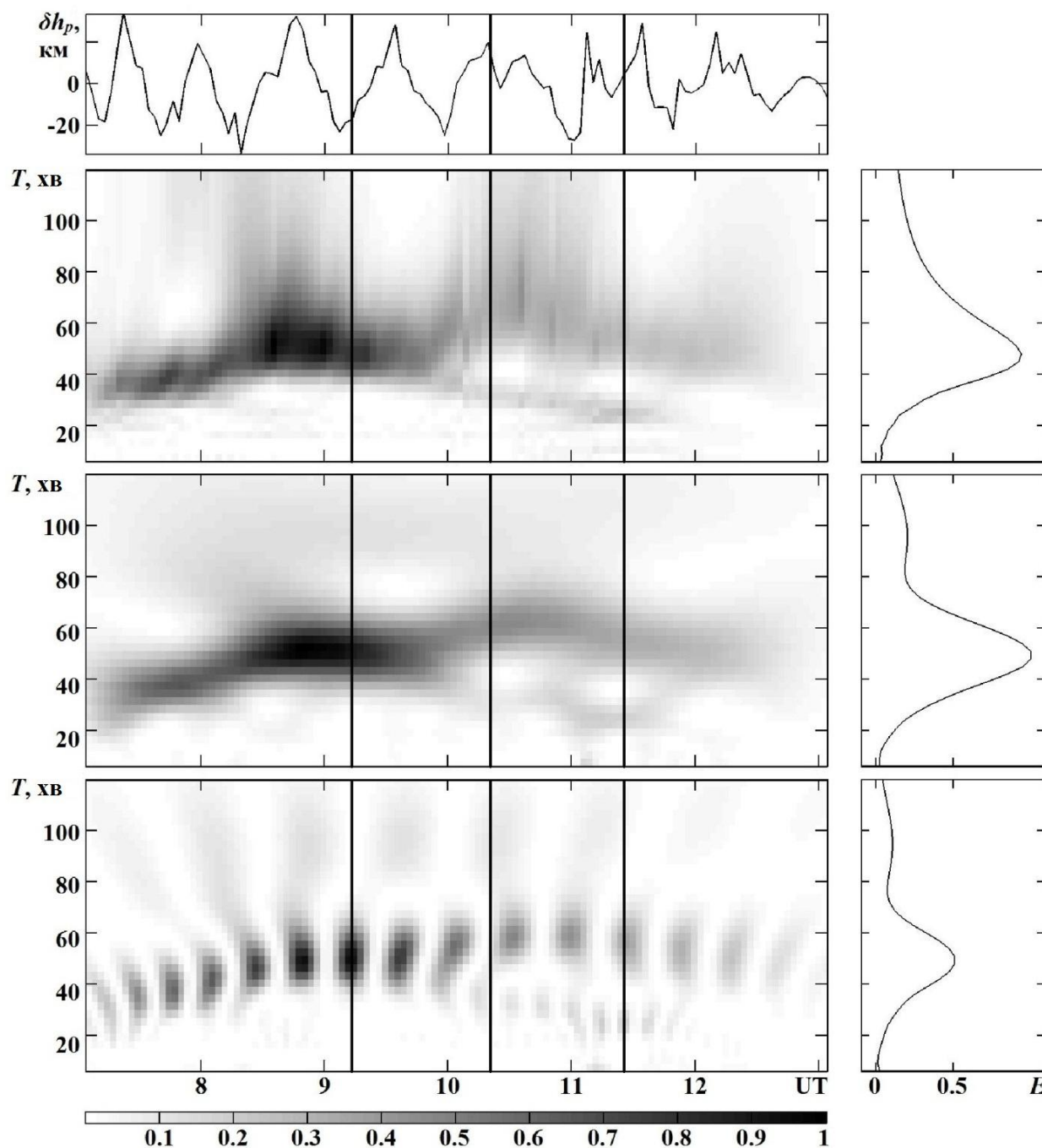


Рис. 3.16 Результати системного спектрального аналізу збільшень Δh_p для іонозонда «Троїцьк» 20 березня 2015 р. Панелі зверху вниз: часова залежність Δh_p ; спектрограма ВПФ; спектрограма АПФ і спектрограма ВП. Праворуч показані енергограми відповідних спектрограм

3.8 Обговорення

Проведений аналіз часових варіацій $\delta f_oF2(t)$ і $h_p(t)$ підтвердив, що СЗ привело до зменшення концентрації електронів на десятки відсотків, збільшення h_p на 40–70 км у порівнянні з контрольним днем, а також до генерації квазіперіодичних збурень f_oF2 , тобто концентрації електронів, і висоти h_p з періодами 30–60 хв. Більшим фазам затемнення не обов'язково відповідали більші збурення концентрації електронів. При однакових значеннях фази збурення N могли бути не однаковими.

Це стосується іонозондів «Dourbes» і «Juliusruh». Зменшення N на іонозонді Tromsø виявилося набагато меншим, ніж очікувалося при майже повному затемненні. Це пояснюється географічним місцем розташування іонозонда, який перебуває на широті 69°N. Відомо, що високоширотна іоносфера суттєво відрізняється від середньоширотної іоносфери, перша є менш стабільною, вона сильніше схильна до збурень природнього походження, особливо під час геокоsmічних бур, що й спостерігалось протягом даної вимірювальної кампанії. Зменшення концентрації електронів, викликане СЗ, значною мірою компенсувалося її збільшенням, швидше за все, у результаті руху плазми вниз, потоків плазми із плазмосфери та висипання енергійних електронів з магнітосфери. Останній процес у високих широтах, як правило, супроводжує геокоsmічні бурі (див., наприклад, [128, 127]).

Головна особливість СЗ 20 березня 2015 р. полягала в тому, що затемнення мало місце на тлі релаксуючої геокоsmічної бурі, що супроводжувалася негативною іоносферною бурею. Буря суттєво вплинула на повільні варіації параметрів іоносфери. У той самий час геокоsmічна буря, схоже, помітно не вплинула на квазіперіодичні збурення концентрації електронів.

Наступна особливість спостережень ефектів затемнення 20 березня 2015 р. пов'язана з порівняно більшими значеннями відносного зменшення концентрації електронів

$$\delta_{N_{\max}} = 1 - \frac{N_{\min}}{N_0}$$

для іонозонда San Vito. Так, при практично однакових значеннях функції покриття $A_{\max}$ у м. Харков та San Vito (0.44 і 0.45) значення $\delta_{N_{\max}}$ становили 0.12 і 0.43 відповідно. Така відмінність обумовлена помітною різницею в густині спрямованого до низу потоку плазми, точніше його висотного градієнта для середньоширотного та більш низькоширотного іонозондів, а також різної кутової висоти Сонця над горизонтом у момент максимальної фази, яка становила близько 45° і 50° для іонозондів «San Vito» і «Гайдари» відповідно.

Для всіх іонозондів значення $N_{\min} / N_0$ та $\delta_{N_{\max}}$ добре описувалися лінійним законом рекомбінації та наступними квазістаціонарними рівняннями неперервності, справедливими під час СЗ і в контрольний момент часу, тобто під час відсутності затемнення (індекс "0"):

$$q - \beta N + \Delta q = 0, \quad (3.7)$$

$$q_0 - \beta_0 N_0 + \Delta q_0 = 0, \quad (3.8)$$

де q і q_0 – швидкості іонізації, β і β_0 – коефіцієнти лінійної рекомбінації, Δq і Δq_0 – додаткові джерела плазми, викликані її низхідним рухом. Їхня величина залежала від географічного положення іонозонда. При цьому [179, 183]

$$\Delta q = -\operatorname{div} N \vec{v} \approx -\frac{d}{dz} N v_z.$$

За нашими оцінками для більшості іонозондів $\Delta q \approx 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, для високоширотного іонозонда «Tromsö» $\Delta q \approx 10 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, а для низькоширотних іонозондів «El Arinosillo», «San Vito» і «Athens» $\Delta q \approx \Delta q_0 \approx 0.5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Із співвідношень (3.7) і (3.8) випливає, що

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{\beta_0}{\beta} \frac{q_{\min} + \Delta q}{q_0 + \Delta q_0} = \frac{\beta_0}{\beta} \frac{q_0 (1 - A_{\max}) + \Delta q}{q_0 + \Delta q_0}. \quad (3.9)$$

Тут $q_0 = \beta_0 N_0 - \Delta q_0$. Поблизу максимуму іонізації, де $N_0 \approx (5-8) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $\beta_0 \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ маємо $\beta_0 N_0 \approx (5-8) \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

При слабких потоках зі співвідношення (3.9) одержимо, що:

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \frac{\beta_0}{\beta} (1 - A_{\max}). \quad (3.10)$$

У загальному випадку $\beta \neq \beta_0$, оскільки при зменшенні N у результаті СЗ область відбиття зондуєчої радіохвилі зсувається вгору, де роль рекомбінації менше. Саме ця обставина перешкоджає значному зменшенню N при повному або майже повному затемненні. Залежність β від висоти дається наступним співвідношенням (див., наприклад, [179, 183]):

$$\beta(z) = \beta_0 \exp\left(-\int_{z_0}^z \frac{dz}{H(z)}\right),$$

де z_0 – висота відбиття радіохвилі під час відсутності СЗ. H – наведена висота нейтральної атмосфери. У шарі F2 $H \approx 50$ км. На висоті 300 км $\beta_0 \approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [179, 183]. При зсуві області відбиття на 50 км β зменшується приблизно в 2.7 рази. При цьому, відповідно до виразу (3.10) у стільки ж раз збільшується співвідношення $N_{\min}/N_0$.

Результати розрахунків β_0/β по співвідношенню (3.10) наведені в табл. 3.2. Видно, що для самих низькоширотних іонозондів «El Arinosillo», «San Vito» і «Athens» відношення $\beta_0/\beta \approx 1$. Для більш високоширотних іонозондів $\beta_0/\beta > 1$. Для іонозонда «Tromsö» це відношення становить 15.4. Насправді, при цьому замість співвідношення (3.10) необхідно використовувати рівняння (3.9), яке враховує спрямований до низу потік плазми. При $q_0 + \Delta q_0 \approx 6 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\Delta q \approx 10 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ маємо $\beta_0/\beta \approx 9.2$, а величина зсуву області відбиття становить близько 100 км. Наведені оцінки представляються близькими до істини.

Величина часу запізнення моменту настання значення $N_{\min}$ стосовно моменту настання $A_{\max}$ дорівнює $\Delta t = \beta^{-1}$. Для типової моделі атмосфери на висотах 250, 290 і 330 км значення β становить близько $2.7 \cdot 10^{-3}$, $1.2 \cdot 10^{-3}$ і $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ відповідно. При цьому Δt дорівнює приблизно 6, 14 і 30 хв. Приблизно такі значення й мали місце в спостереженнях (див. табл. 3.2).

Результати обчислень ($N_{\min}/N_0$) за співвідношенням (3.9) також наведені в табл. 3.2.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили висновок роботи [1], що процеси при кожному СЗ, крім загальних закономірностей, мають свої індивідуальні особливості, що залежать від стану космічної погоди, сезону, часу доби, географічних координат і т.п.

Висновки до розділу 3

Основні висновки спостереження ефектів сонячного затемнення 4 січня 2011 р. такі.

1. СЗ викликало істотні варіації параметрів іонограм, що свідчить про значну перебудову іоносфери протягом затемнення. Зокрема, критичні частоти шарів F2 і E поблизу головної фази зменшилися на 1.9 МГц і 0.4 МГц, або на 31 % і 16 % відповідно.

2. СЗ супроводжувалося помітним зменшенням концентрації електронів на висотах середньої іоносфери. Так, у максимумі шару F2 відносне зменшення концентрації електронів рівнялося приблизно 52 %. Час запізнювання варіацій N становило близько 16.0 ± 1.4 хв. В E^- -області N зменшилося приблизно на 30 %.

3. СЗ привело до збільшення діючої висоти відбиття в максимумі шару F2 до 70 км.

4. Затемнення 4 січня 2011 р. викликало збільшення висоти h_p до 10 км.

5. Протягом затемнення 4 січня 2011 р. іонограми були дифузійними, що відображало факт сильної турбулізації іоносфери.

6. Підтверджено, що в максимумі шару F2 справедливий лінійний закон рекомбінації, в E^- -області – квадратичний закон. Фізико-хімічні процеси в цих шарах відповідали існуючим уявленням.

7. СЗ супроводжувалося підсиленням (у порівнянні з контрольним днем) відносної амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів приблизно в 2 рази (до 8 і 16% для періодів 30 і 60 хв). Різнилися й періоди коливань. Параметри квазіперіодичних збурень відповідали параметрам ВГХ.

Основні висновки спостереження ефектів сонячного затемнення 20 березня 2015 р. такі.

8. Часткове СЗ над Європою з фазою 0.55–0.95 призвело до значного збурення F-області іоносфери. Критична частота f_oF2 зменшувалася на 1–2 МГц або на 5–25%. Тривалість збурення досягала 2.5–3 год. Мінімальні значення f_oF2 запізнювалися стосовно моменту часу настання головної фази затемнення на 5–30 хв. Зменшення концентрації електронів досягало 23–51 %.

9. СЗ призвело до збільшення висоти h_p на 10–70 км або 3–20 %. Тривалість ефекту становила 1.5–2 год. Максимальні значення h_p спостерігалися приблизно через 20–30 хв після настання максимальної фази затемнення.

10. СЗ супроводжувалося хвильовими збуреннями з періодом 30–100 хв. Крім того, поблизу головної фази спостерігався збій фази коливання. У день затемнення період хвильових збурень трохи відрізнявся від періоду в контрольний день. Амплітуда хвильових збурень на більшості іоносферних станцій у день затемнення була приблизно у 2–3 рази більше, ніж у контрольний день.

Результати розділу опубліковані в роботах автора [8, 11, 16, 17]

РОЗДІЛ 4

ЕФЕКТИ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА В СЕРЕДНІЙ ІОНОСФЕРІ

4.1 Загальні відомості

Як уже відмічалось в аналітичному огляді метеороїд увійшов в атмосферу Землі 15 лютого 2012 р. в 03:20:26 UT. Космічне тіло рухалося приблизно зі сходу на захід (азимут становив близько 270°) під кутом до горизонту близько 20° . Початкова маса тіла $m_0 \approx 11$ кт, початкова швидкість $v_0 \approx 18.5$ км/с, а початковий діаметр тіла $d_0 \approx 18$ м (див., наприклад, [92]).

Становить безсумнівний інтерес пошук збурень в атмосфері та іоносфері на значних віддаленнях від місця падіння Челябінського метеорита. Оскільки його вторгнення в атмосферу Землі відбулося зненацька, цілеспрямовані виміри всього комплексу фізичних ефектів падіння космічного тіла у всіх середовищах (у всіх геосферах) виявилися неможливими. Частина ефектів зареєстрована «черговими» засобами. До них належить мережа іонозондів, яка дозволяє проводити практично безперервний моніторинг іоносфери майже в глобальних масштабах.

Стан сонячної активності оцінювався по числах Вольфа W і індексу $F10.7$, а геомагнітної активності – по індексах K_p , D_{st} , AE (табл. 4.1). З табл.4.1 видно, що стан космічної погоди характеризувався як спокійний. Ця обставина полегшила пошук ефектів, викликаних падінням космічного тіла.

Мережа іонозондів. Для оцінки стану іоносфери використовувалися іонограми іонозондів, розміщених на захід від місця вибуху метеороїда (станція «Троїцьк» (поряд з м. Москва), географічні координати: 55.5° N, 37.3° E), і на схід (станція «Алмати» (поряд з м. Алмати), географічні координати: 43.15° N, 76.54° E). Для оцінки можливості поширення іоносферних збурень на більші відстані ($R > 3000$ км) залучалися результати спостережень на станціях «Прухониць» (географічні координати: 50.0° N, 14.6° E) і «Юліусрух» (географічні координати: 54.6° N, 13.4° E). Іонограми розміщені на сайті [185].

Таблиця 4.1

Стан космічної погоди (за даними [184])

Дата	W	F 10.7	K_p		D_{st} , нТл		AE , нТл	
			max	min	max	min	max	min
14 лютого 2013 р.	38	100	4	1	-11	-36	944	23
15 лютого 2013 р.	48	100	1	1	1	-19	328	20
16 лютого 2013 р.	54	103	4	1	15	-20	1219	23

4.2 Засоби та методи дослідження

Відстань уздовж земної поверхні від місця вибуху космічного тіла до станцій «Троїцьк», «Алмати», «Прухониць» і «Юліусрух» становила близько 1510, 1730, 3145 і 3020 км відповідно. Іонограми на всіх станціях, що функціонують у черговому режимі, знімалися кожні 15 хвилин. Лише на станції «Алмати» інтервал часу δt між реєстрацією іонограм становив 5 хв. При цьому статистична похибка оцінки часу запізнювання збурень становить

$$\Delta = \frac{\delta t}{\sqrt{12}},$$

тобто 3.5 хв (для станції Алмати 1.4 хв).

Методика аналізу. Основним параметром, який описує стан іоносфери поблизу максимуму іонізації, є критична частота іоносферного шару F2

$$f_o F2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 N}{\epsilon_0 m}},$$

де e і m – заряд і маса електрона, ϵ_0 – електрична стала, N – концентрація електронів. Варіації N призводять до змін $\delta f_o F2$. При цьому

$$\delta_N = \frac{\Delta N}{N} \approx 2 \frac{\delta f_o F2}{f_o F2}. \quad (4.1)$$

Тут враховано, що $f_o F2 \sim \sqrt{N}$.

Співвідношення (4.1) має місце при $\delta_N \ll 1$. У загальному випадку

$$\delta_N = (f_o F2 - \overline{f_o F2})^2 - 1 \quad (4.2)$$

де $\overline{f_o F2}$ – згладжені або незбурені значення $f_o F2$.

Аналізу підлягали часові варіації $\delta f_o F2(t)$ 15 лютого 2013 р. і в контрольні дні 14 і 16 лютого 2013 р. Крім $\delta f_o F2(t)$, також аналізувалися часові варіації флуктуацій

$$\delta f_o F2(t) = f_o F2(t) - \overline{f_o F2(t)},$$

де $\overline{f_o F2(t)}$ – тренд, що обчислюється на інтервалі часу 180 хв із ковзанням на 15 хв (для станції «Алмати» на 5 хв).

Далі залежності $\delta f_o F2(t)$ підлягали системному спектральному аналізу з використанням взаємодоповнюючих віконного, адаптивного перетворень Фур'є та вейвлет–перетворення [173, 186]. В останньому випадку в якості базисної функції застосовувалася функція Морле. Як відомо (див., приклад, [173, 186]), вейвлет Морле має вигляд

$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cos \omega t,$$

де t і ω – безрозмірні час і частота. Такий вид вейвлета доцільно використовувати для виявлення цугів коливань [186].

Спектральний аналіз здійснювався в діапазоні періодів $T \approx 30\text{--}180$ хв. Вибір мінімального значення $T = 30$ хв обумовлене частотою одержання іонограм (одна іонограма в 15 хв). Вибір максимального значення $T = 180$ хв пояснюється тим, що такі періоди відносяться ще до атмосферних гравітаційних хвиль. При $T > 180$ хв суттєво позначаються добові варіації $\delta f_o F2$ і приливні коливання цього параметра, точніше їх вищі гармоніки (див., наприклад, [16]).

4.3 Часові варіації частоти f_oF2

Станція «Троїцьк». Схід Сонця на висоті $z \approx 300$ км мав місце в 03:00, а на рівні поверхні землі – в 04:45 (тут і далі всесвітній час UT). 14 – 16 лютого 2013 р. мінімальне значення f_oF2 спостерігалось в інтервалі часу 03:30–04:30 (рис. 4.1). Після цього відзначався ріст f_oF2 приблизно від 3 до 7–8 МГц. Після 10:00–11:00 у контрольні дні 14 і 16 лютого 2013 р., мало місце поступове зменшення f_oF2 . На регулярний хід $\overline{f_oF2}(t)$ накладалися флуктуації з відхиленням, як правило, у декілька десятків частот мегагерца. У день падіння метеорита рівень флуктуацій (амплітуда коливань f_oF2) збільшився. Помітні відхилення (збільшилася глибина провалу) від регулярного ходу $\overline{f_oF2}(t)$ почалися приблизно в 04:00. Їх рівень суттєво зріс в інтервалі часу з 07:00 до 14:00 (див. рис. 4.1, рис. 4.5б). Амплітуда викидів f_oF2 досягала 1 МГц. Спостерігалася квазіперіодична зміна f_oF2 з періодом $T \approx 135$ хв. У контрольні дні подібний квазіперіодичний процес не спостерігався (див. рис. 4.1). Крім того, зменшення f_oF2 після 10:00–11:00, що мало місце в контрольні дні, було відсутнє до 14:00.

Додамо що, в інтервалі часу 07:00–09:00 спостерігалось чітко виражене квазіперіодичне збурення критичної частоти. Швидше за все, воно викликано Челябінським метеороїдом.

Станція «Алмати». Схід Сонця на висоті 300 км спостерігався в 00:20, а на висоті $z \approx 0$ – в 02:00. Нічні значення f_oF2 не перевищували 4 МГц (рис. 4.2). Приблизно після 01:00 значення f_oF2 почали збільшуватися від нічних значень до 8–10 МГц. На регулярний хід $\overline{f_oF2}(t)$ накладалися флуктуаційні зміни з відхиленням до 1 МГц.

У день падіння метеорита помітна зміна f_oF2 почалася приблизно в 04:00–04:15. Можливо, вона полягала в пригніченні існуючого до цього квазіперіодичного процесу. Швидше за все, прийшла негативна півхвиля нового квазіперіодичного процесу з періодом 80–100 хв і амплітудою $\delta f_oF2 \approx 0.5$ МГц

($\overline{f_oF2} \approx 8\text{--}9$ МГц). Цей процес спостерігався протягом 4–5 год (див. рис. 4.2, середня панель).

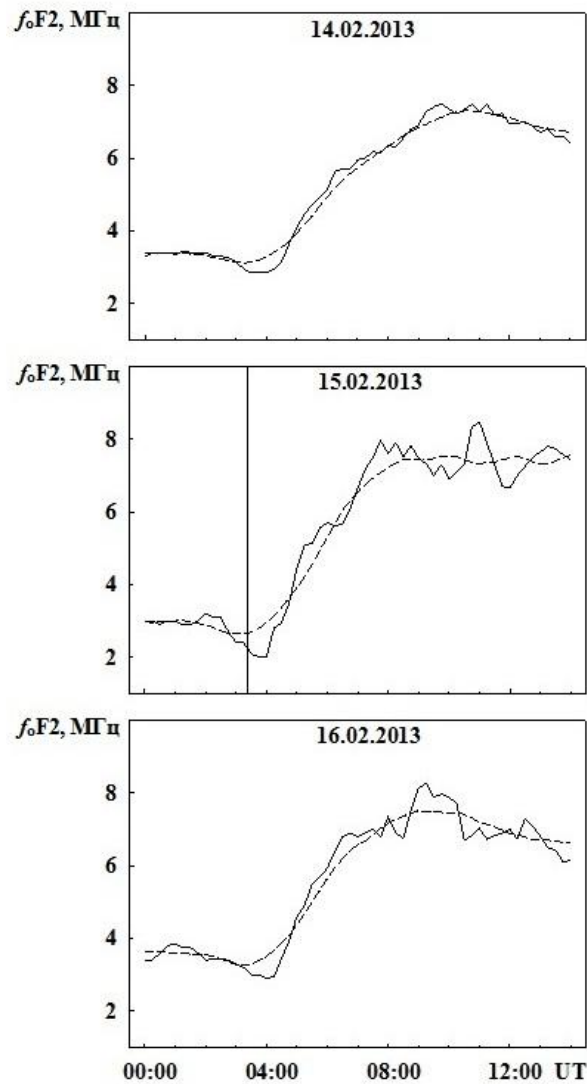


Рис. 4.1 Часові варіації f_oF2 для станції «Троїцьк». Тут і далі вертикальною лінією показаний момент падіння метеорита «Челябінськ», а переривчастою лінією – $\overline{f_oF2}(t)$, обчислене методом ковзного середнього

У контрольні дні також мали місце істотні флуктуації f_oF2 , однак квазіперіодичні процеси були виражені менш чітко.

Станція «Прухониць». Схід Сонця на висотах близько 300 і 0 км мав місце близько 03:50 і 05:35 відповідно. Нічні значення f_oF2 були близькими до 3.5–4 МГц (рис. 4.3) приблизно після 05:00 почалося стрімке зростання f_oF2 від

нічних значень до 7–8 МГц. Крім регулярного ходу, спостерігалися флуктуації f_oF2 , що досягали 0.5–1 МГц.

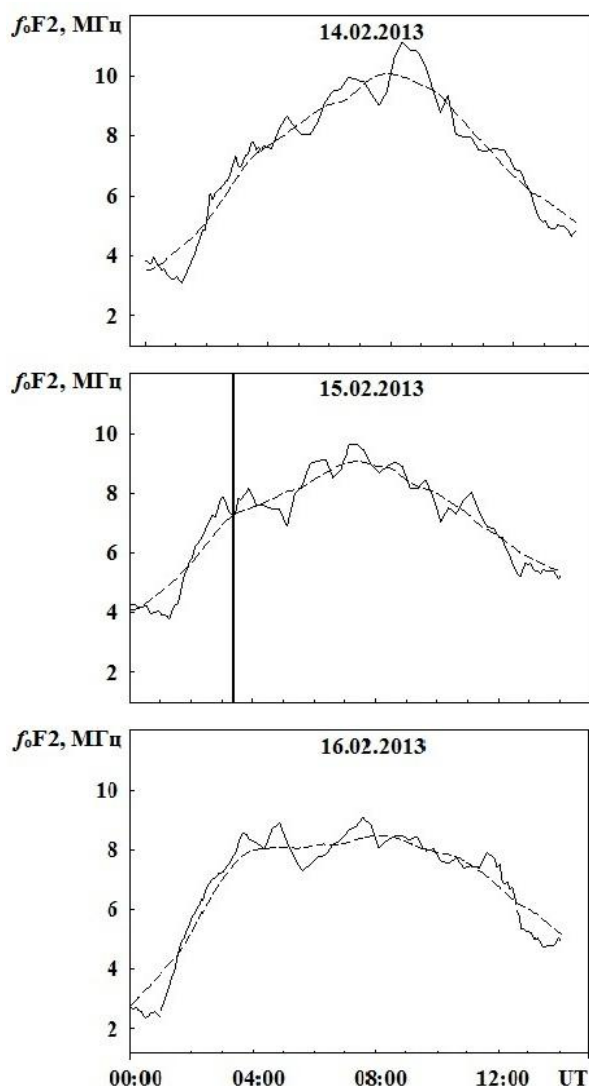


Рис. 4.2 Часові варіації f_oF2 для станції «Алмати»

У день падіння космічного тіла флуктуації критичної частоти, що почалися приблизно в 04:30–04:45, стали квазіперіодичними з періодом $T = 135$ хв і амплітудою 0.4–0.6 МГц. При цьому $\overline{f_oF2} \approx 4\text{--}6$ МГц. Особливо сильний сплеск f_oF2 до 1.7 МГц відзначався близько 11:00, тобто практично тоді, коли подібний сплеск зафіксований і на станції «Троїцьк» (див. рис. 4.1). Відмітимо, що в контрольні дні подібний цуг коливань не спостерігався.

Станція «Юліусрух». Схід Сонця на станціях «Прухониць» і «Юліусрух» мав місце приблизно в той же самий час. Нічні значення f_oF2 були близькі до 3.5 МГц, мінімальне значення цього параметра відзначалося приблизно о 05:00, після чого почався його швидкий ріст до 7–8 МГц (рис. 4.4). Як і на інших станціях, на регулярний хід $\overline{f_oF2(t)}$ накладалися флуктуації f_oF2 з відхиленням 0.3–0.5 МГц.

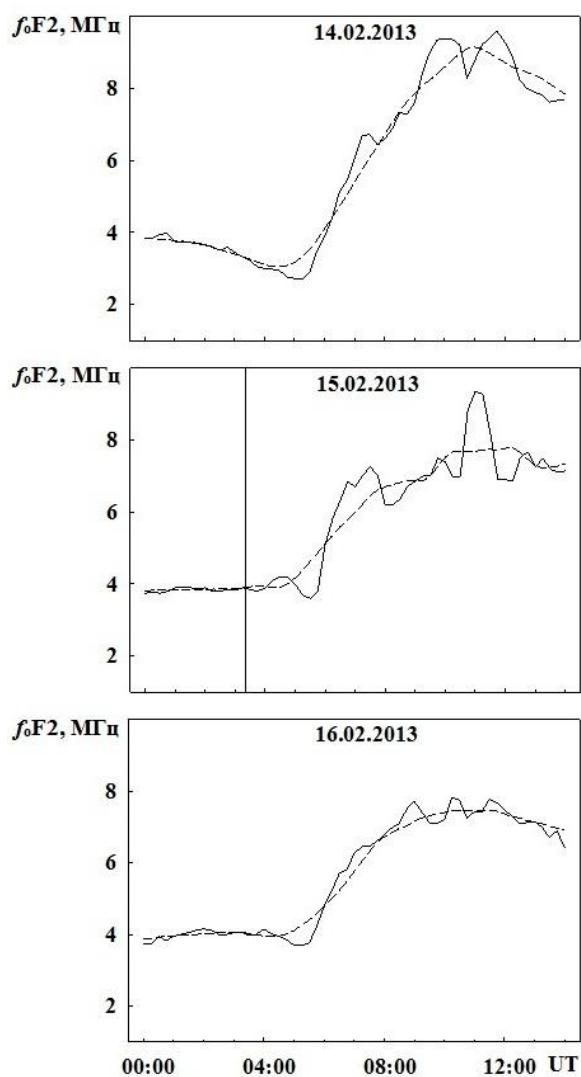


Рис. 4.3 Часові варіації f_oF2 для станції «Прухониць»

У день падіння метеорита «Челябінськ» близько 04:30 – 04:35 почалося незначне (на 0.2 МГц) збільшення f_oF2 , яке тривало приблизно до 09:00. З 09:00 до 16:00 відзначалося сильне коливання f_oF2 з періодом близько 70 хв,

тривалістю $\Delta T \approx 5$ год і амплітудою 0.5–1.0 МГц, при цьому $\overline{f_oF2} \approx 7$ МГц. У контрольні дні також спостерігалися сильні (до 0.5–1 МГц) сплески f_oF2 , вони, однак, не були квазіперіодичними.

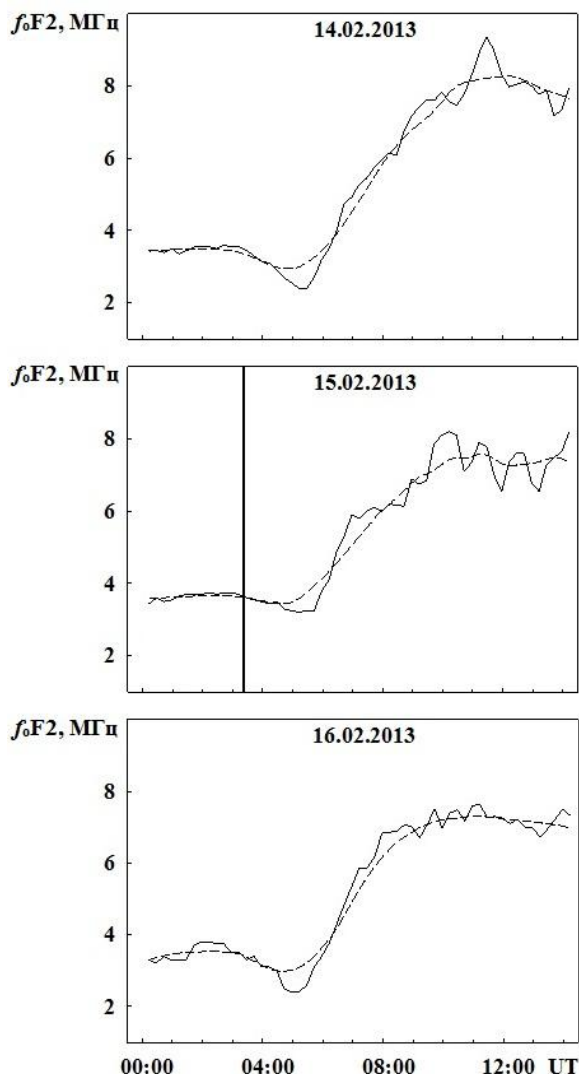


Рис. 4.4 Часові варіації f_oF2 для станції «Юліусрух»

4.4 Результати спектрального аналізу

Результати системного спектрального аналізу залежності $\delta f_oF2(t)$ для станції «Троїцьк» наведені на мал. 4.5. З рисунка видно, що спектральний склад варіацій $\delta f_oF2(t)$ у день падіння метеорита та у контрольні дні суттєво різнився. Відмінності почалися приблизно в 04:00 і тривали до 14:00. 15 лютого 2013 р.

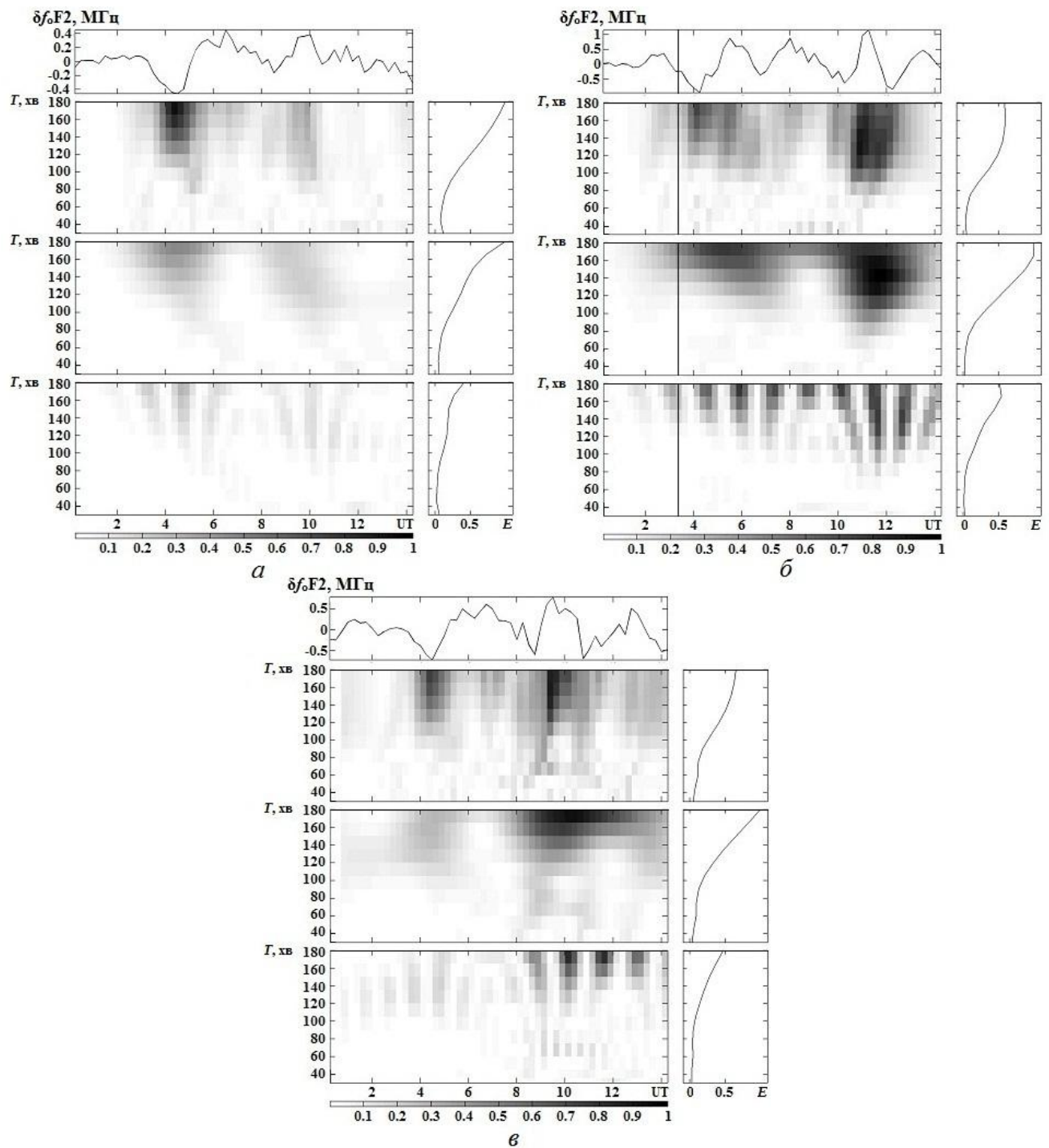


Рис. 4.5 Результати системного аналізу часової залежності рівня флуктуацій критичної частоти : *а* – 14 лютого 2013 р., *б* – 15 лютого 2013 р. і *в* – 16 лютого 2013 р., (станція «Троїцьк»): вихідний сигнал (верхня панель), спектрограми віконного та адаптивного перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення (панелі зверху вниз). Праворуч показані енергограми

спектр флуктуацій був більш вузьким, у ньому переважала складова з періодом близько 160 хв. Амплітуда цієї складової була в 2–3 рази більше, чим у контрольні дні.

На рис. 4.6 наведені результати системного спектрального аналізу часових варіацій $\delta f_o F2(t)$ для станції «Алмати». З рис. 4.6б видно, що спектральний склад флуктуацій критичної частоти суттєво різнився, починаючи з інтервалу часу 04:00–05:00, у спектрі флуктуацій $\delta f_o F2(t)$ підсилилася складова з періодом близько 70–80 хв. Крім цієї складової, підсилилася також компонента із $T \approx 100$ –120 хв. У контрольні дні переважали складові з періодом 140–160 хв.

Результати системного спектрального аналізу рівня флуктуацій критичної частоти для станції Прухониць наведені на рис. 4.7.

Видно істотні відмінності в спектральних характеристиках у день прольоту космічного тіла та у контрольні дні 14 і 16 лютого 2013 р. У спектрах переважали складові з $T \approx 140$ –180 хв, а 15 лютого 2013 р. – з $T \approx 100$ –140 хв. У день падіння метеорита амплітуда основного коливання була в 1.5–2 рази більше, ніж у контрольні дні.

На рис. 4.8 наведені результати системного спектрального аналізу часової залежності $\delta f_o F2(t)$ для станції «Юліусрух».

Спектрограми та енергограми для 14, 15 і 16 лютого 2013 р. помітно різнилися. У день падіння Челябінського тіла підсилилися складові з періодами спочатку 130–160, а потім і 60–80 хв. Їхня амплітуда була помітно більшою (1.5–2 рази) амплітуди в контрольні дні. 14 і 16 лютого 2013 р. превалювали коливання з $T \approx 160$ –180 хв, їхня амплітуда не перевищувала 0.5 МГц.

4.5 Обговорення результатів спостережень

Часові варіації критичної частоти. На станціях «Троїцьк», «Прухониць» і «Юліусрух» момент настання реакції на вибух космічного тіла та схід Сонця практично збіглися. Це серйозно ускладнило виділення збурень, пов'язаних з рухом метеороїда.

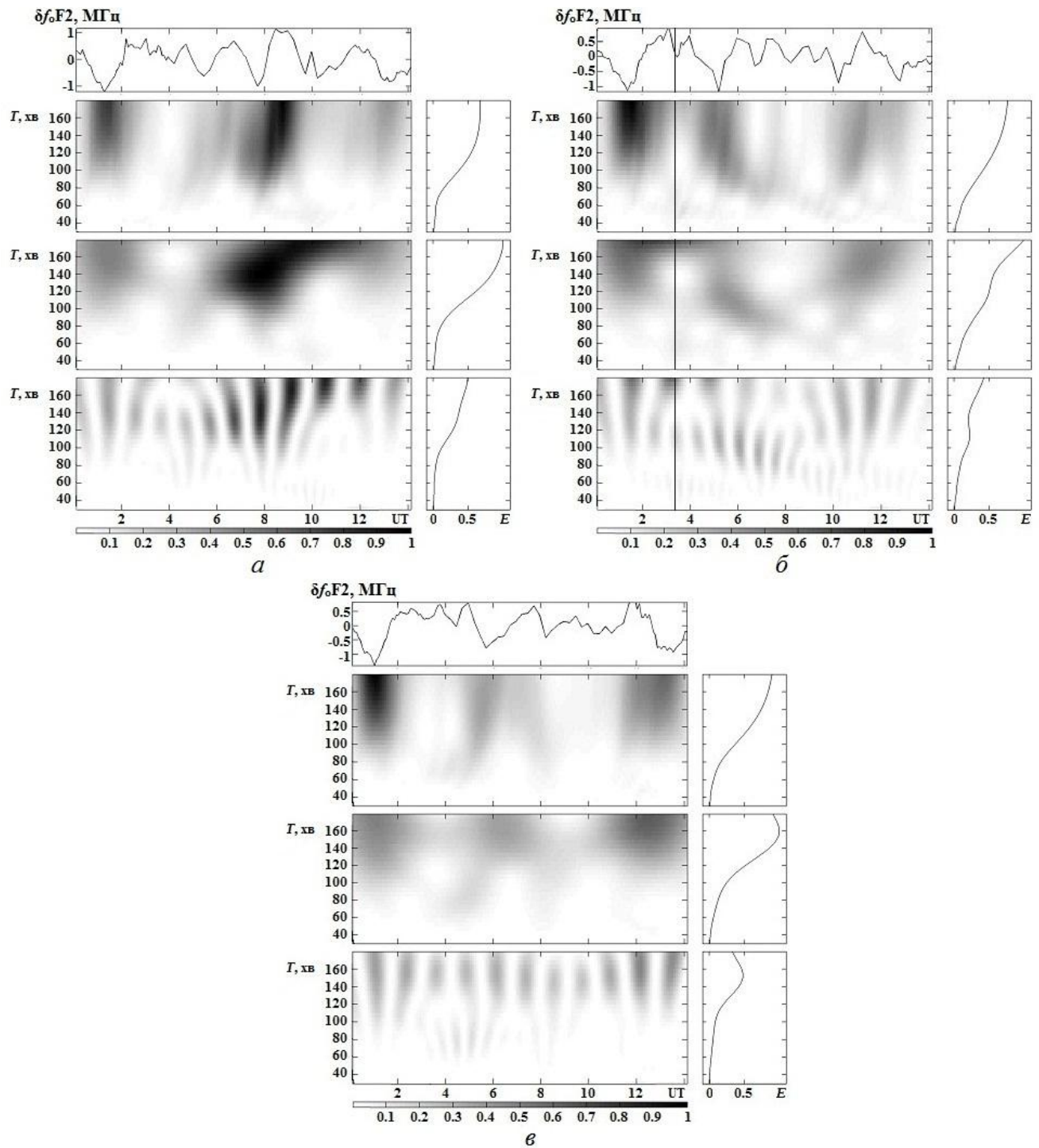


Рис. 4.6 Результати системного аналізу часової залежності рівня флуктуацій критичної частоти: *а* – 14 лютого 2013 р., *б* – 15 лютого 2013 р. і *в* – 16 лютого 2013 р. (станція «Алмати»): вихідний сигнал (верхня панель), спектрограми віконного та адаптивного перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення (панелі зверху вниз). Праворуч показані енергограми

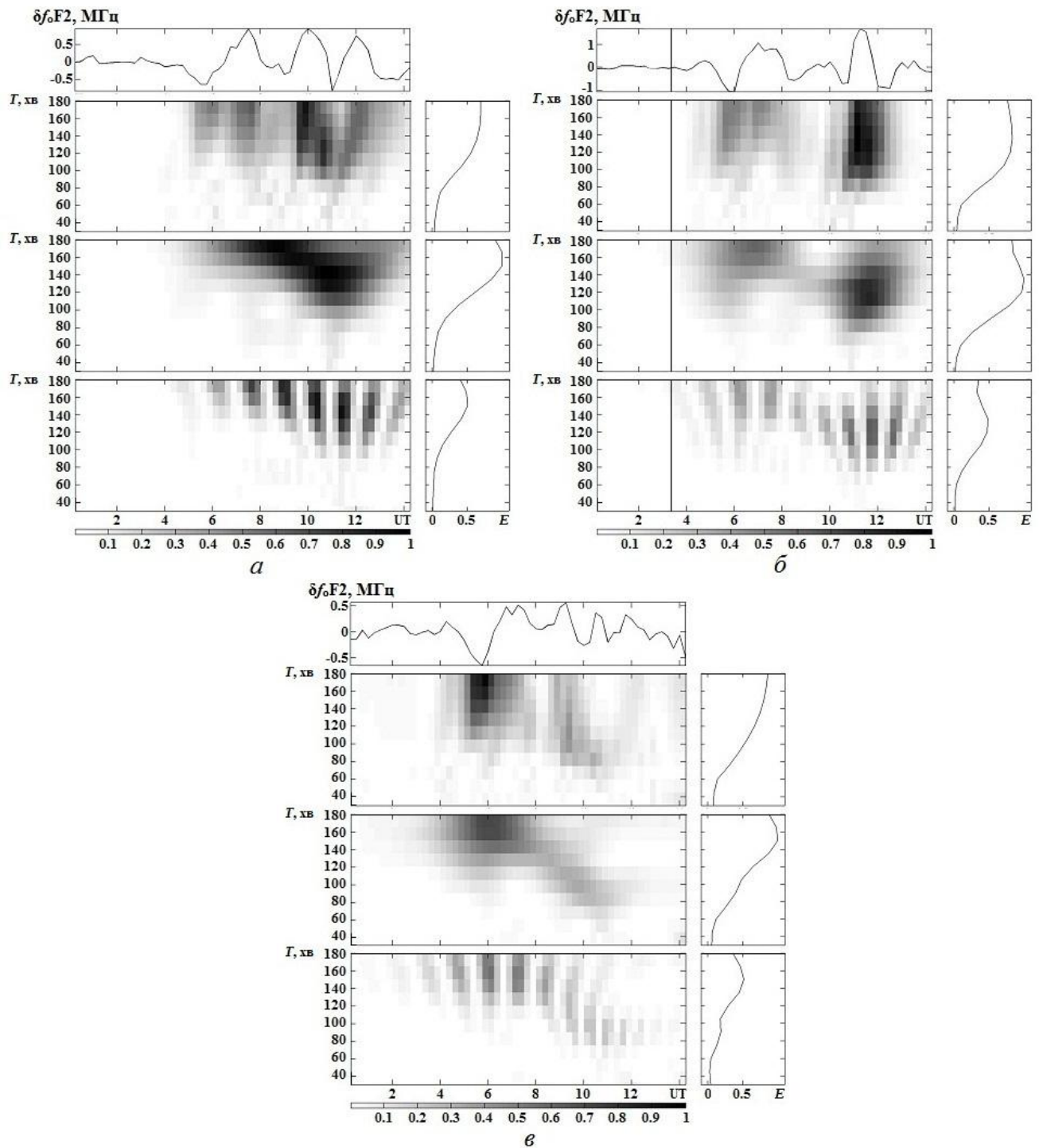


Рис. 4.7 Результати системного аналізу часової залежності рівня флуктуацій критичної частоти: *а* – 14 лютого 2013 р., *б* – 15 лютого 2013 р. і *в* – 16 лютого 2013 р. (станція «Прухониць»): вихідний сигнал (верхня панель), спектрограми віконного та адаптивного перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення (панелі зверху вниз). Праворуч показані енергограми

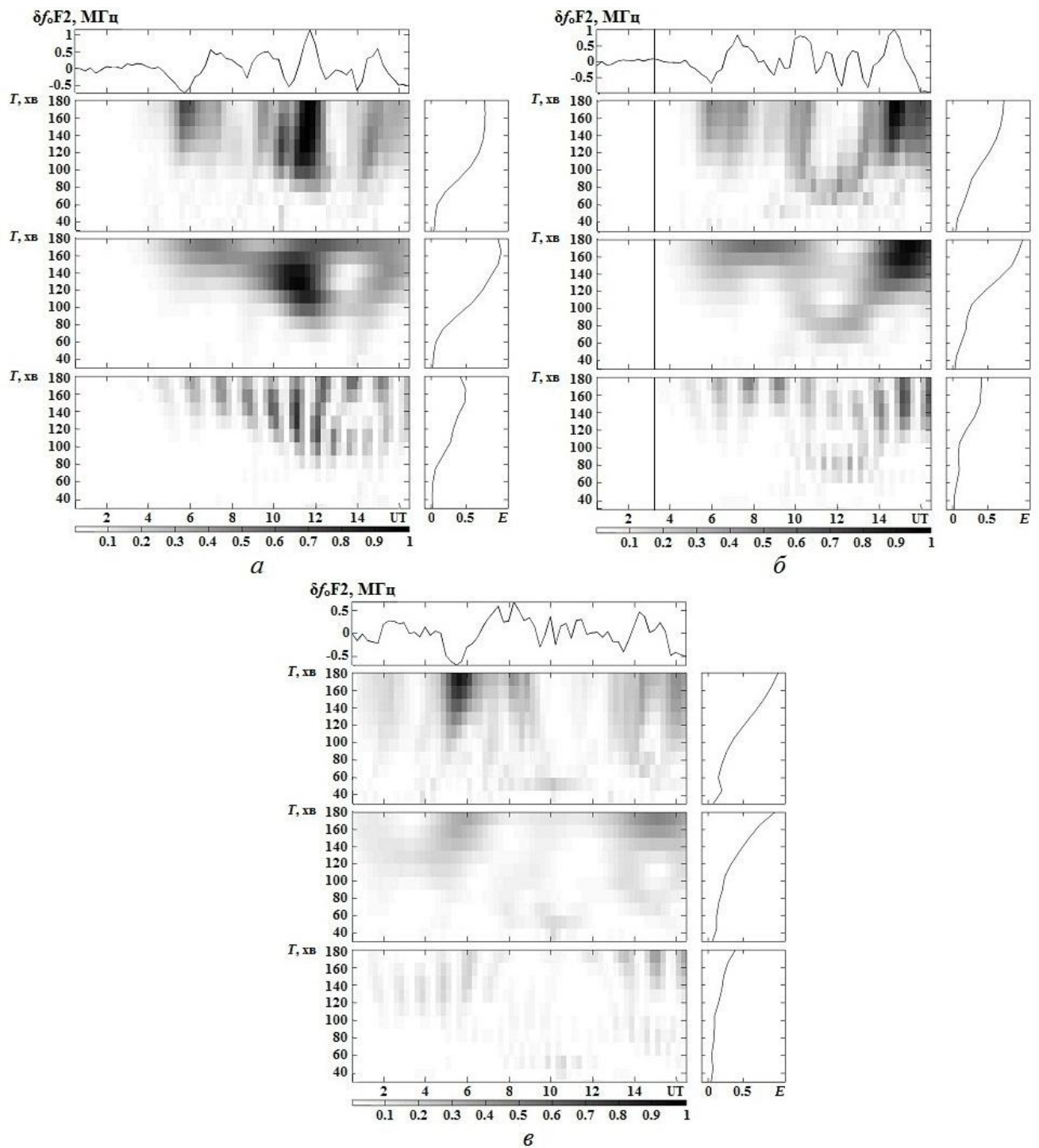


Рис. 4.8 Результати системного аналізу часової залежності рівня флуктуацій критичної частоти (станція «Юліурух»): *а* – 14 лютого 2013 р., *б* – 15 лютого 2013 р. і *в* – 16 лютого 2013 р.: вихідний сигнал (верхня панель), спектрограми віконного та адаптивного перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення (панелі зверху вниз). Праворуч показані енергограми

На станції «Алмати» процеси, викликані безпосередньо сходом Сонця, до моменту падіння космічного тіла, закінчилися. Тривати, однак, могли хвильові процеси, згенеровані рухом ранкового термінатора.

На станції «Троїцьк» перше помітне відхилення f_oF2 від регулярного ходу відзначалися близько 04:00. Якщо воно обумовлене вибухом метеороїда, час запізнення збурення $\Delta t \approx 40$ хв. Знаючи Δt і довжину траєкторії хвилі, принципово можна обчислити середню швидкість поширення хвильових збурень (ХЗ). На жаль траєкторія хвилі точно невідома. При більших (більш 1000 км) віддаленнях іонозонда від місця вибуху можна вважати, що хвиля поширюється до іоносфери практично вертикально, потім вона захоплюється в атмосферні хвилеводи й далі поширюється майже горизонтально. При цьому середню швидкість можна оцінити по очевидній формулі

$$v = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}, \quad (4.3)$$

де R – відстань уздовж поверхні Землі між місцем вибуху тіла та іонозондом, Δt_0 – час поширення ХЗ до атмосферного хвилеводу (області F іоносфери). Час Δt_0 легко оцінити, знаючи висотний профіль швидкості звуку v_s у верхній атмосфері:

$$\Delta t_0 = \int_{z_e}^{z_m} \frac{dz}{v_s}, \quad (4.4)$$

де z_e – висота вибуху космічного тіла, z_m – висота максимуму шару F2, якому відповідає частота f_oF2 . Для типової моделі $v_s(z)$ інтегрування в (4.4) дає, що $\Delta t_0 \approx 9$ хв. Це ж значення можна одержати шляхом оцінки інтеграла (4.4). Швидкість $v_s \approx 300\text{--}700$ м/с на висотах 25–300 км. Тоді при середньому значенні $\bar{v}_s \approx 500$ м/с і $\Delta z = 275$ км одержуємо $\Delta t_0 \approx 550$ с ≈ 9.2 хв. При $\Delta t_0 \approx 9$ хв і $R \approx 1510$ км із (4.3) маємо $v \approx 810$ м/с. Для станції «Троїцьк» при $\delta f_oF2 \approx 0.3\text{--}0.5$ МГц і $\bar{f_oF2} \approx 3\text{--}6$ МГц одержуємо $\delta_N \approx 17\text{--}20$ %. Поблизу 11:00 $\bar{f_oF2} \approx 7$ МГц, а $\delta f_oF2_{\max} \approx 8.5$ МГц. При цьому $\delta_N = (f_oF2 / \bar{f_oF2})^2 - 1 \approx 47\%$ (див. вираз (4.2)).

На станції «Прухониць» і «Юліусрух» помітне відхилення f_oF2 від регулярного ходу почалося в інтервалі часу 04:30–04:45, при цьому $\Delta t \approx 70\text{--}85$ хв. Тоді при $R \approx 3100$ км маємо $v \approx 690\text{--}860$ м/с (середнє значення швидкості близько 780 м/с). Близько 11:00 на станції Прухониць $f_oF2 \approx 9.4$ МГц, а $\overline{f_oF2} \approx 7$ МГц, при цьому згідно з формулою (4.2) $\delta_N \approx 80\%$. У це й же час на станції «Юліусрух» $f_oF2 \approx 8$ МГц, а $\overline{f_oF2}(t) \approx 7$ МГц, тоді $\delta_N \approx 31\%$.

На станції «Алмати» помітне відхилення f_oF2 почалося близько 04:00–04:45. Якщо воно обумовлене падінням метеороїда, $\Delta t \approx 40\text{--}55$ хв. При $\Delta t_0 \approx 9$ хв і $R \approx 1760$ км одержуємо $v \approx 650\text{--}980$ м/с (середнє значення швидкості близько $v \approx 810\text{--}820$ м/с). При $\delta f_oF2 \approx 0.5$ МГц і $\overline{f_oF2}(t) \approx 7.5\text{--}8.5$ МГц маємо $\delta_N \approx 12\text{--}13\%$.

Якщо ж при поширенні хвилі не розділяти горизонтальний і вертикальний рух, то для оцінки середньої швидкості досить скористатися формулою (4.3), де $\Delta t_0 = 0$. При цьому для станцій «Троїцьк», «Алмати», «Прухониць» і «Юліусрух» мали наступні значення для середньої швидкості: 630, 520–720, 610–740 і 610–740 м/с відповідно.

Таким чином, на всіх чотирьох іонозондах збурення поширювалися в горизонтальному напрямку із середньою швидкістю близько 600–700 м/с. Значення періоду ХЗ склало 70–135 хв. Такі параметри мають гравітаційні хвилі в атмосфері на висотах $z \approx 300$ км (див., наприклад, [16, 29]).

Обговоримо природу сильних сплесків f_oF2 у денний час і, зокрема, близько 11:00. На сильно рознесених в просторі іонозондах вони спостерігалися майже одночасно. Це означає, що вони носили великомасштабний характер (близько 4–5 тис. км) і могли бути викликані зовнішнім джерелом, наприклад, нестационарним процесом на Сонці. Аналіз стану космічної погоди не дозволив зв'язати цю зміну f_oF2 (а значить і N) із процесами на Сонці. Невідоме й великомасштабне джерело в тектоносфері, літосфері або в приземній атмосфері, яке могло викликати настільки великомасштабне збурення на висотах близько 300 км.

Можна припустити, що згадані величини f_oF2 у денний час пов'язані з довгоживучими збуреннями у верхній атмосфері. Подібні збурення спостерігалися авторами [187, 188] при досить слабких наземних вибухах з енерговиділенням усього в ~ 1 т ТНТ (тринітротолуол).

Можливість існування довгоживучих вихрів, уперше описаних автором [189] і згаданих у роботі [190], вимагає, однак додаткових досліджень. Не можна виключати й той факт, що довгоживучі збурення можуть бути пов'язані з порушенням взаємодії підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, що склалися до прольоту метеороїда [99, 174, 175].

Результати спектрального аналізу. Виконаний у роботі системний аналіз підтвердив, що спектральний склад δf_oF2 у контрольні дні та день прольоту Челябінського метеороїда суттєво відрізнявся. Ці відмінності спостерігалися як незабаром (через 40–70 хв) після вибухоподібного виділення енергії, так і протягом 9–10 годин після цього.

Як впливає з енергограм (найкраще це видно для адаптивного перетворення Фур'є), середнє значення періодів збурень 15 лютого становили 170, 110, 130 і 170 хв для станцій «Троїцьк», «Алмати», «Прухониць» і «Юліусрух» відповідно. У контрольні дні вони, загалом кажучи, помітно відрізнялися. Більше того, у контрольні дні в ряді випадків взагалі не спостерігався максимум у розподілі енергії по періодах.

Оцінені значення періодів і амплітуд ХЗ підтвердили, що падіння космічного тіла супроводжувалося генерацією та поширенням гравітаційних хвиль у верхній атмосфері, а також, можливо, виникненням довгоживучих збурень.

Підкреслимо, що параметри ХЗ, описаних вище, добре узгоджуються з результатами теоретичних досліджень, описаних у роботах [95, 100–104]. Сам факт генерації гравітаційних хвиль в атмосфері теоретично передбачений ще авторами [176].

Висновки до розділу 4

Аналіз часових варіацій критичних частот шару F2 іоносфери, виміряних за допомогою мережі іонозондів, дозволяє зробити наступні висновки.

1. Падіння Челябінського космічного тіла супроводжувалося помітними змінами характеру часових варіацій частоти f_oF2 і їх спектрального складу.

2. Від місця падіння метеорита поширювалися хвильові збурення, що мали середню швидкість близько 600–700 м/с, амплітуду відносних збурень концентрації електронів – 10–20 % і період 70–135 хв. Такі параметри властиві атмосферним гравітаційним хвилям та іоносферним збуренням, що переміщуються, які вони викликають.

3. Хвильові збурення поширювалися на відстані не менше 3 тис. км від місця падіння метеорита.

4. У світлий час доби в іоносфері спостерігалися збурення концентрації електронів тривалістю близько 6–7 годин, які могли бути викликані довгоживучими вихрами у верхній атмосфері. Відносна амплітуда при цьому становила 10–20 %.

Основні результати розділу опубліковані в роботах автора [10, 18].

РОЗДІЛ 5

АПЕРІОДИЧНІ ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ЗБУРЕННЯ В ІОНОСФЕРІ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ НАГРІВ ІОНОСФЕРИ ПОТУЖНИМ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯМ

5.1 Загальні відомості

Якісно новий рівень розуміння фізико-хімічних процесів у навколоземному космічному середовищі пов'язаний зі зміною системної парадигми [99, 174, 175, 191–194]. Було обґрунтовано, що опис ні однієї із земних оболонок не є самодостатнім. Між оболонками має місце взаємодія. Виявлені прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки. Тому необхідним є цілісний розгляд системи Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (її внутрішні оболонки) (СМСМІАЗ). При вивченні ролі потоків «знизу» часто достатньо розгляду системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) (див., наприклад, [174, 194]). Важливо, що утворення ЗАІМ (як і СМСМІАЗ) відноситься до відкритої динамічної нелінійної фізичної системи. Такі системи мають ряд нетривіальних властивостей. Наприклад, у цих системах можливе спрацювання тригерних механізмів вивільнення енергії [99, 174, 194].

Для дослідження взаємодії підсистем у системі ЗАІМ зручними та ефективними виявляються активні експерименти. У цьому випадку енергія джерела, місце та час енерговиділення апіорі відомі.

Серед активних експериментів особливе місце займає модифікація навколоземної плазми потужним радіовипромінюванням. Такі експерименти відносяться до екологічно чистих, вони можуть багаторазово повторюватися. Із цієї причини взаємодії потужного радіовипромінювання з іоносферно-магнітосферною плазмою останні сорок років приділяється значна увага (див., наприклад, [2–4]). При цьому, як правило, досліджується процеси, що виникають у межах діаграми спрямованості антени нагрівного стенда. Такі процеси були

названі локалізованими [139]. Їхній горизонтальний розмір звичайно не перевищував 10–100 км.

За результатами досліджень локалізованих збурень у іоносфері, які викликаються потужним радіовипромінюванням, опубліковано декількасот робіт вчених України, Росії, США, Норвегії, тощо. Огляд таких робіт зроблено у найповнішій монографії В. Л. Фролова [6].

У той самий час існує інший науковий напрямок, метою якого є вивчення можливості виникнення збурень в іоносфері далеко за межами діаграми спрямованості антени нагрівного стенда. Такі збурення вперше були виявлені близько 45 років тому (див., наприклад, [138–145, 158, 159]). Вони були названі великомасштабними [139]. Їхній горизонтальний розмір становить порядку декількох тисяч кілометрів.

Існує дві причини виникнення великомасштабних збурень. Перша з них – генерація та поширення акустико-гравітаційних хвиль на висотах F-області іоносфери. Результати сучасних досліджень цих хвиль представлені в роботах [137, 146–150].

На висотах D- і E-областей причина виникнення великомасштабних збурень інша [144, 145]. Швидше за все, вона викликана із взаємодією підсистем іоносфера – магнітосфера – енергійні електрони – атмосфера, точніше – вона пов'язана з висипанням високоенергійних електронів з магнітосфери в атмосферу. При цьому великомасштабні збурення є аперіодичними. Результати останніх досліджень таких збурень описані в роботах [151, 152].

Метою цього розділу є розгляд результатів спостереження просторового розподілу аперіодичних великомасштабних збурень у нижній іоносфері, які супроводжували вплив на плазму потужного радіовипромінювання стенда «Сура» 28–30 серпня 2012 р.

5.2 Стан космічної погоди

Стан космічної погоди контролювався за допомогою параметрів сонячного

вітру (концентрації частинок n_{sw} , швидкості V_{sw} , температури T_{sw} і тиску p_{sw}), компонент B_y і B_z міжпланетного магнітного поля, енергетичної функції Акасофу ϵ_A , а також індексів геомагнітної активності (a_p , A_p , K_p і D_{st}) (значення деяких з цих параметрів вказані в табл. 5.1).

26 серпня 2012 р. геокосмічне середовище було слабо збурене, спостерігалось незначне збурення міжпланетного поля (до $- (5-6)$ нТл) і геомагнітного поля ($K_{pmax} < 4$).

З 27 серпня по 30 серпня 2012 р. стан космічної погоди характеризувався як спокійний: параметри сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля слабо флюктували навколо своїх незбурених значень (див. табл. 5.1). Спокійний стан космічної погоди сприяв виділенню ефектів, викликаних впливом потужного радіовипромінювання на іоносферу.

Таблиця 5.1

Параметри, що описують стан космічної погоди

Доба	AE_{max} , нТл	K_{pmax}	ΣK_p	a_{pmax} , нТл	A_p , нТл	D_{st} , нТл
26 серпня 2012 р.	527	3.7	18.7	22	11	$-6 - +4$
27 серпня 2012 р.	297	3	10.7	15	6	$-8 - +1$
28 серпня 2012 р.	100	1.3	5.3	5	3	$-8 - 0$
29 серпня 2012 р.	110	1.3	6	5	3	$-4 - +3$
30 серпня 2012 р.	88	1	5	4	3	$-1 - +10$

5.3 Засоби та методи досліджень

5.3.1 Нагрівний стенд «Сура»

Збурення іоносферної плазми радіовипромінюванням стенда «Сура» здійснювалося з 27 по 30 серпня 2012 р. Стенд розташований поблизу

м. Н. Новгород (Росія); його географічні координати: 56.15° N, 46.1° E. Режим роботи станда і його параметри описані далі по тексту. Несуча частота станда в різних експериментах змінювалася від 4785 до 6720 кГц, поляризація радіохвиль завжди була звичайною, ефективна потужність випромінювання станда була приблизно рівна 150 МВт. Тривалість імпульсів впливу варіювалася від 5 до 30 хв, у ряді випадків використовувався й більш тривалий режим випромінювання потужної радіохвилі. Для виконання умов «ефекту магнітного зеніту» діаграма спрямованості антени всіх експериментах була нахилена до півдня на 12° .

5.3.2 Засоби спостереження

Для спостереження за збуреннями в іоносфері, що були викликані впливом потужного радіовипромінювання, використовувалися чотири цифрові іонозонди (див. табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Відомості про іонозонди

Назва станції (місце розташування іонозонда)	Тип	Широта	Довгота	Відстань до нагрівного станда, км
«Васильсурск» (поблизу м. Н. Новгород)	Автоматизований цифровий іонозонд «БАЗИС»	$56^{\circ}09' \text{ N}$	$46^{\circ}06' \text{ E}$	~0
«Троїцьк» (поблизу м. Москва)	Цифровий іонозонд «ВІТРИЛО»	$55^{\circ}28' \text{ N}$	$37^{\circ}18' \text{ E}$	560
«Гайдари» (поблизу м. Харків)	Несерійний цифровий іонозонд	$49^{\circ}38' \text{ N}$	$36^{\circ}20' \text{ E}$	960
«Прухониць» (поблизу м. Прухониць)	Цифровий іонозонд DPS-4	$50^{\circ}00' \text{ N}$	$14^{\circ}36' \text{ E}$	2200

Частота знімання іонограм – 1 іонограма кожні 15 хв («Гайдари» – 1 іонограма кожні 5 хв).

Аналізувалися всі основні параметри іонограм. Виявилося, що вплив потужного радіовипромінювання на іоносферну плазму супроводжувався помітними збуреннями мінімальної спостережуваної частоти. Інші параметри іонограм змінювалися незначно, у межах природних флуктуацій. Тому далі приводяться результати аналізу часових варіацій мінімальної спостережуваної частоти. Її сплески свідчили про збільшення поглинання радіосигналів на висотах нижньої іоносфери, яке, швидше за все, було обумовлено появою додаткового шару іонізації.

Відстань R від станда «Сура» до іонозондів змінювалося від 0 до приблизно 2200 км.

Іонозонд Науково-дослідного радіофізичного інституту (НДРФІ) (р/п Васильсурськ) типу «CADI» розташований безпосередньо біля нагрівного станда.

Іонозонд Інституту земного магнетизма, іоносфери та поширення радіохвиль ім. Н. В. Пушкова Російської академії наук (ІЗМПАН) (станція Москва, Росія), розміщений у м. Троїцьку, перебуває приблизно на одній широті з іонозондом НДРФІ на віддаленні близько 560 км від нагрівного станда.

Іонозонд Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (станція «Гайдари», Україна) розташований у Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (с. Гайдари поблизу м. Харків). Його віддалення від станда «Сура» становить близько 960 км. Цей іонозонд перебуває приблизно на тій же довготі, що й іонозонд ІЗМПАН.

Іоносферна станція «Прухониць» (Pruhonice) (м. Прухониць, Чехія) розташована на широті іонозонда Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Така дислокація іонозондів дозволила вивчити залежність великомасштабних збурень від широти, довготи та відстані від нагрівного стенда до засобу спостереження.

Додамо, що іонограми станцій «Тоїцьк» (Moscou) та «Прухониць» (Pruhonice) представлені на сайті <http://ulcar.uml.edu/Didbase/>. Похибка оцифровки частоти та діючої висоти на іонограмах становила близько 50 кГц і 5 км відповідно.

5.4 Результати спостережень

Опишемо результати експериментів, проведених з 27 по 30 серпня 2012 р. У якості контрольного дня обраний день 27 серпня. У цей день стенд «Сура» включався лише у вечірній час (з 17:00 по 18:30 UT) у режиму 5 хв – випромінювання, 5 хв – пауза ([+5 хв; –5 хв]). Як виявилось, такий режим роботи стенда у вечірній час не супроводжувався помітними збуреннями іоносфери на відстанях 560–2200 км від стенда. Для інших днів проводився пошук ефектів, пов'язаних з роботою нагрівного стенда.

5.4.1 Приклади іонограм

Приклад іонограми, зареєстрованої у с.м.т. Васильсурськ 29 серпня 2012 р. в 09:45 UT, наведений на рис. 5.1. Видно, що в нижній іоносфері з'явився іонізований шар (шар Es типу C) із критичними частотами $f_oEs = 2.6$ і $f_xEs = 3.5$ МГц. Діючі висоти змінювалися в межах 120–160 км, а дійсні – приблизно від 110 до 130 км. Ця іонограма отримана незабаром після закінчення нагрівання іоносфери в режимі [+30 хв; –30 хв]. На попередній та наступній іонограмах подібний шар не спостерігався.

У цей же день на іонограмах, знятих у м. Троїцьк в інтервалі часу 14:31–15:31 UT, крім шару E, також спостерігався шар Es типу C з 3.1–3.2 МГц у

діапазоні діючих висот 120–160 км (рис. 5.2). У цьому інтервалі часу нагрівний стенд випромінював у режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$.

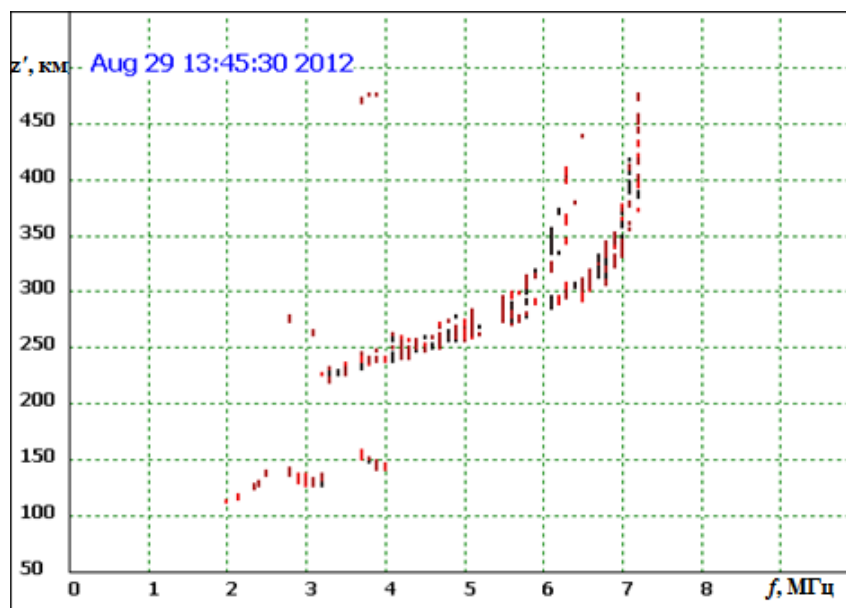


Рис. 5.1 Приклад іонограми з спорадичним шаром типу С, отриманої 29 серпня 2012 року в 09:45:30 UT у с.м.т. Васильсурськ

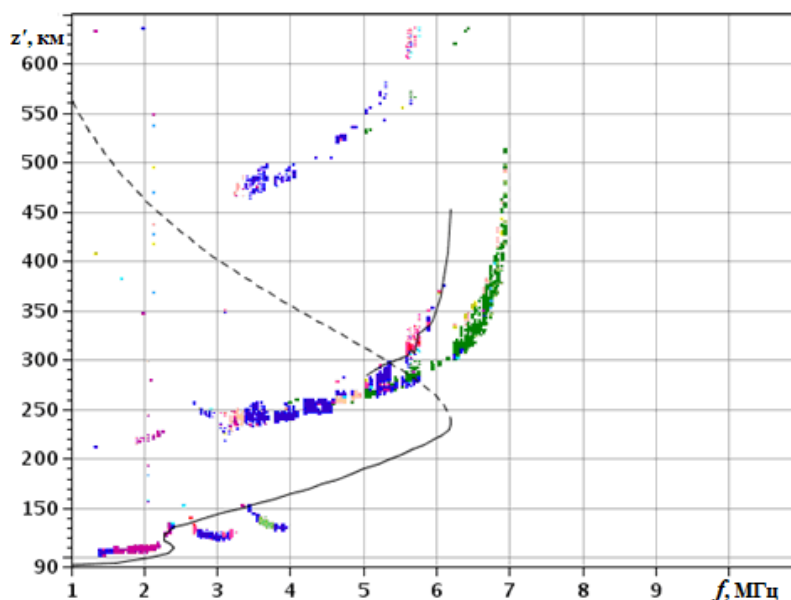


Рис. 5.2 Приклад іонограми із спорадичним шаром типу С, отриманої 29 серпня 2012 р. в 14:31 UT у м. Троїцьк

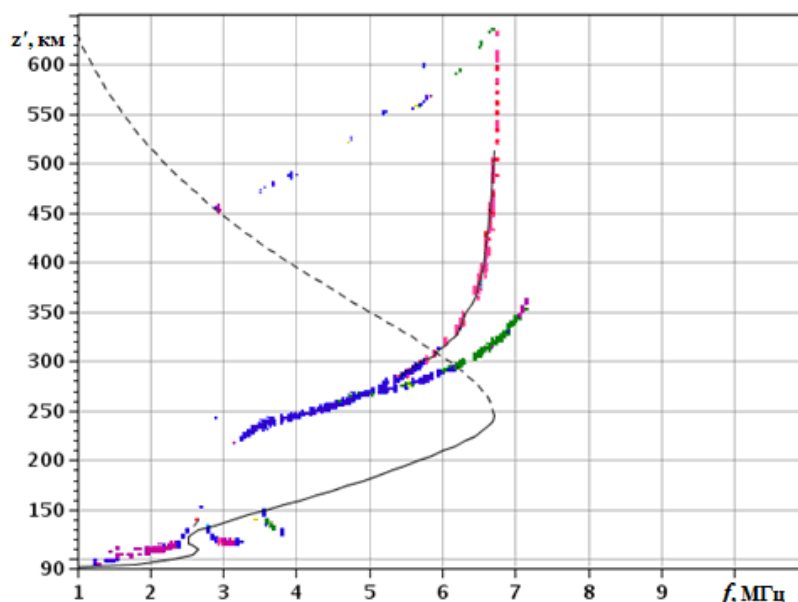


Рис. 5.3 Приклад іонограми із спорадичним шаром типу С, отриманої 30 серпня 2012 р. в 14:16 UT у м. Троїцьк

Крім шару Е, шар Es типу С на іонограмах, отриманих у м. Троїцьк, відзначався 30 серпня 2012 р. в 14:16 UT (рис. 5.3), а також в 15:16–15:31 UT. Їм відповідали критичні частоти близько 3.4 і 3.5 МГц. Шари спостерігалися приблизно в тому ж діапазоні висот (близько 110–130 км). Відомо, що шар Es типу С утворюється, як правило, за рахунок додаткової іонізації, яка викликала електронами, що висипаються [5].

Пошук шарів додаткової іонізації на висотах $z \leq 110$ км доцільно вести по величинах мінімальної спостережуваної частоти на іонограмах ($f_{\min}$). Цьому присвячені наступні підрозділи роботи.

5.4.2 Варіації $f_{\min}$ 27 серпня 2012 р.

Часові варіації мінімальної спостережуваної частоти $f_{\min}$ для чотирьох наведених вище іонозондів показані на рис. 5.4. Для іонозонда «Васильсурськ» в денний час (06:00–10:00 UT) $f_{\min} \approx 1.8$ –2 МГц. З 10:00 до 14:00 UT мало місце збільшення $f_{\min}$ до 2.3 МГц. В інтервалі часу 14:00–22:00 UT значення $f_{\min}$ були

близькі до 1.6 МГц. Після 22:00 UT мало місце поступове збільшення $f_{\min}$ приблизно до 2 МГц.

Для іонозонта «Троїцьк» в денний час $f_{\min}$ змінювалася в межах 1.4–1.8 МГц, перед заходом Сонця $f_{\min}$ протягом приблизно 1.5 годин зменшувалася до 1.3 МГц. Після цього протягом тривалого часу (з 15:00 до 24:00 UT) $f_{\min} \approx 1.6$ МГц.

Аналіз іонограм з іонозонта в с. Гайдари показав, що з 06:00 до 08:00 UT $f_{\min}$, флуктуація, поступово збільшувалася від 1.9 до 2.1 МГц. Приблизно з 08:00 до 10:00 UT частота $f_{\min} \approx 2.2$ МГц. Після 10:00 UT $f_{\min}$ зменшувалася до нічних значень, приблизно рівних 1.4–1.6 МГц.

Для іонозонта «Прухониць» $f_{\min}$ зростала від 1.4 до 2 МГц в інтервалі часу 06:00–10:00 UT. Потім протягом найближчих 3–4 годин вона залишалася приблизно постійною. З 14:00 до 15:00 UT вона убувала від 1.8 до 1.3 МГц. Далі мав місце ріст $f_{\min}$ від 1.3 до 1.6 МГц і її наступна стабілізація в інтервалі часу 18:30–24:00 UT.

5.4.3 Варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р.

Часові варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р. показані на рис. 5.5.

На іонограмах, отриманих у с.м.т. Васильсурськ, $f_{\min} \approx 2$ МГц в інтервалі часу 06:00–09:45 UT. Приблизно з 10:00 до 12:00 UT $f_{\min} \approx 2.4$ МГц. З 12:00 до 15:00 UT $f_{\min}$ змінювалася в межах 1.6–2.0 МГц. В інтервалі часу 15:15–18:00 $f_{\min}$ набувала мінімальних значень (близько 1.6 МГц). Далі $f_{\min}$ флуктували в межах 1.7–1.9 МГц.

Поведінка $f_{\min}$ для іонозонта в м. Троїцьк була наступною. В інтервалі часу 06:00–07:45 UT $f_{\min} \approx 1.8$ МГц. Приблизно з 08:00 до 10:00 UT спостерігалися сплески $f_{\min}$ до 2.7 МГц. Далі протягом 2 годин $f_{\min} \approx 1.8$ МГц. З 12:00 до 13:00 UT мало місце падіння $f_{\min}$ від 1.8 до 1.6 МГц, а потім протягом найближчої години відзначався її ріст до 2.0 МГц. З 14:00 до 14:30 UT $f_{\min}$ зменшувалася від 2.0 до 1.6 МГц. Далі протягом 9 годин вона залишалася на рівні 1.6 МГц.

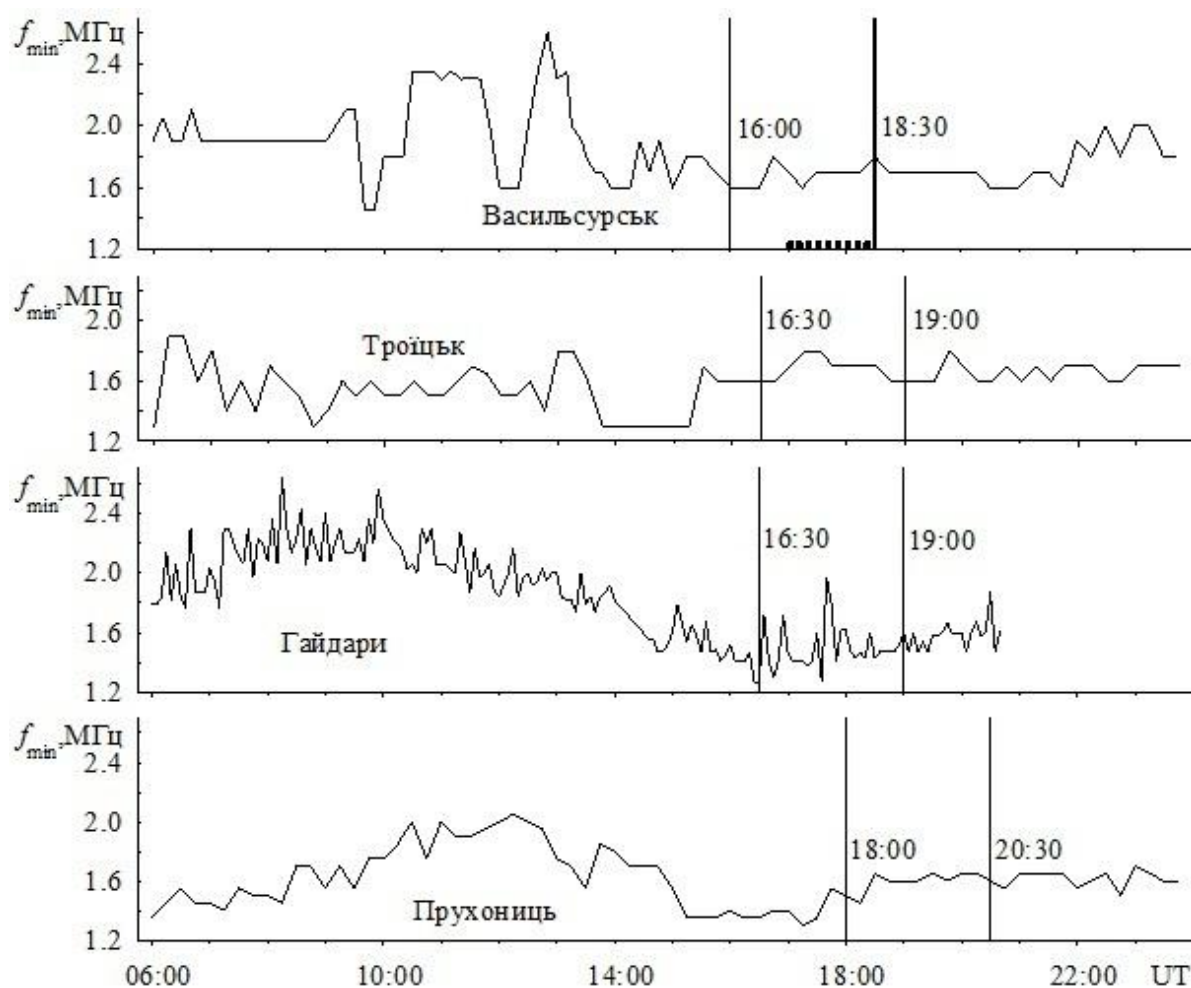


Рис. 5.4 Часові варіації $f_{\min}$ 27 серпня 2012 р. для чотирьох іонозондів. Вертикальні лінії показують моменти заходу Сонця на рівні землі та на висоті 400 км

Для іонозонда «Гайдари» $f_{\min}$ збільшувалася від нічних значень (1.6 МГц) до денних значень (близько 2.2 МГц). Приблизно з 06:30 до 10:30 UT $f_{\min}$ флуктуючи, змінювалася від 2.0 до 2.4 МГц. В інтервалі часу 10:30–14:30 UT спостерігалось зменшення $f_{\min}$ від 2.2 до 1.6 МГц. Після цього, частота $f_{\min}$ флуктувала в межах 1.5–1.7 МГц.

Варіації $f_{\min}(t)$ у м. Прухониць були наступними. З 06:00 до 09:00 UT $f_{\min}$ збільшувалася від 1.4 до 1.8 МГц. В інтервалі часу 09:00–14:00 UT вона флуктувала в межах 1.7–2.0 МГц. Приблизно з 14:00 до 15:30 UT мало місце падіння $f_{\min}$ від 1.8 до 1.3–1.4 МГц. Далі значення $f_{\min}$ флуктували в межах 1.5–1.6 МГц.

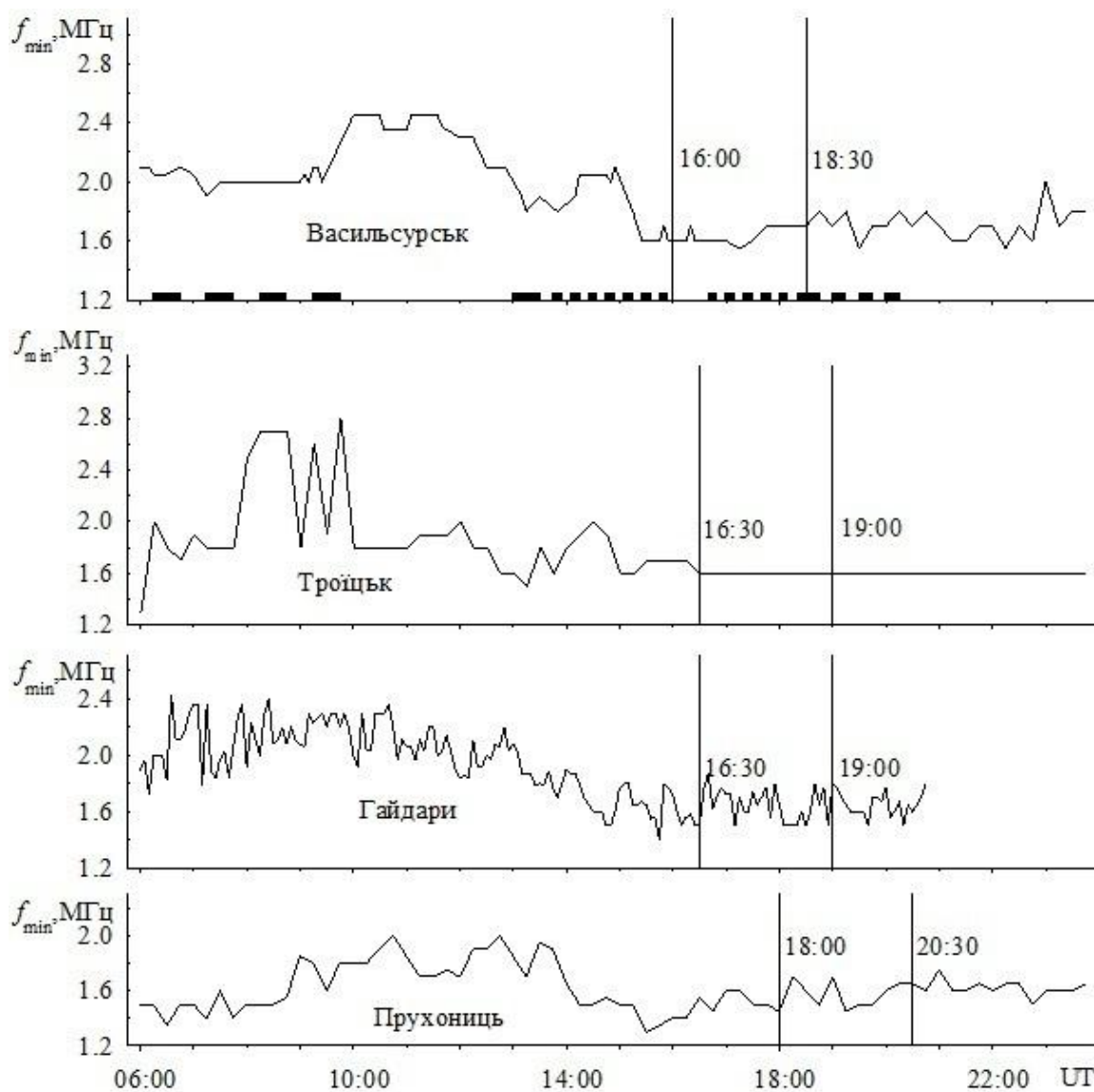


Рис. 5.5 Часові варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р. для чотирьох іонозондів. Вертикальні лінії показують моменти заходу Сонця на рівні землі та на висоті 400 км

5.4.4 Варіації $f_{\min}$ 29 серпня 2012 р.

На іонозонді «Васильсурськ» з 06:00 до 13:00 UT спостерігалися квазіперіодичні варіації $f_{\min}$ із квазіперіодом $T \approx 1$ год (рис. 5.6). Значення $f_{\min}$ при цьому змінювалися від 2 до 2.4 МГц. Після 13:00 UT мало місце зменшення $f_{\min}$ до 1.6–2.0 МГц. З 15:00 і до 22:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ МГц.

Для іонозонда в с. Гайдари значення $f_{\min}$, флуктуючи, спочатку збільшувалися від 1.9 до 2.5 МГц. Після 09:00 UT $f_{\min}$ у середньому зменшувалася від 2.5 до 1.4 МГц. Окремі сплески $f_{\min}$ мали амплітуду 0.2–0.3 МГц.

Спостереження на іонозонді в м.Троїцьк показали, що в інтервалі часу 07:00–11:00 UT значення $f_{\min}$ змінювалися по квазіперіодичному закону з $T \approx 1$ год від 1.8 до 2.8–3.2 МГц. З 11:00 до 15:00 UT $f_{\min}$, флуктуючи, зменшувалася від 1.8 до 1.4 МГц. Приблизно з 16:00 до 24:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ МГц.

На іонограмах, отриманих у с. Гайдари, з 06:00 до 08:00 UT середнє значення $f_{\min}$ збільшувалося від 1,9 до 2.2 МГц. В інтервалі часу з 06:30 до 10:30 UT спостерігалися сплески $f_{\min}$ від 2.0 до 2.2–2.4 МГц. У середньому $f_{\min} \approx 2.0$ –2.1 МГц.

Для іонозонда «Прухониць» з 06:00 до 09:00 UT $f_{\min}$ збільшувалася від 1.4 до 1.8–2.0 МГц. З 09:00 до 15:00 UT значення $f_{\min}$ поступово убували від 2.0 до 1.6 МГц. В інтервалі 13:00–14:00 UT $f_{\min}$ приймала мінімальне значення, рівне 1.3–1.4 МГц. З 15:00 до 22:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ МГц.

5.4.5 Варіації $f_{\min}$ 30 серпня 2012 р.

Спостереження на іонозонді у с.м.т. Васильсурськ показали, що з 06:00 до 10:00 UT $f_{\min} \approx 2.4$ МГц (рис. 5.7). В інтервалі часу 10:00–16:00 UT виникав спорадичний шар Es. Його існування супроводжувалося сплесками $f_{\min}$ від 2.4 до 2.8 і від 1.6 до 2.4 МГц.

З 16:00 до 22:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ МГц. В інтервалі часу 22:00 – 24:00 UT мали місце сплески $f_{\min}$ до 2.4 МГц.

Значення $f_{\min}$ на іонозонді в м. Троїцьк в інтервалі часу 06:00–07:00 UT у середньому збільшувалися від 1.6 до 2.0 МГц. З 07:30 до 10:00 UT спостерігалися сплески $f_{\min}$ від 1.8 до 2.8–3.0 МГц. З 10:00 до 13:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ –2.2 МГц. Близько 14:00 UT відзначалися мінімальні значення $f_{\min} \approx 1.3$ МГц. З 15:00 до 24:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ МГц.

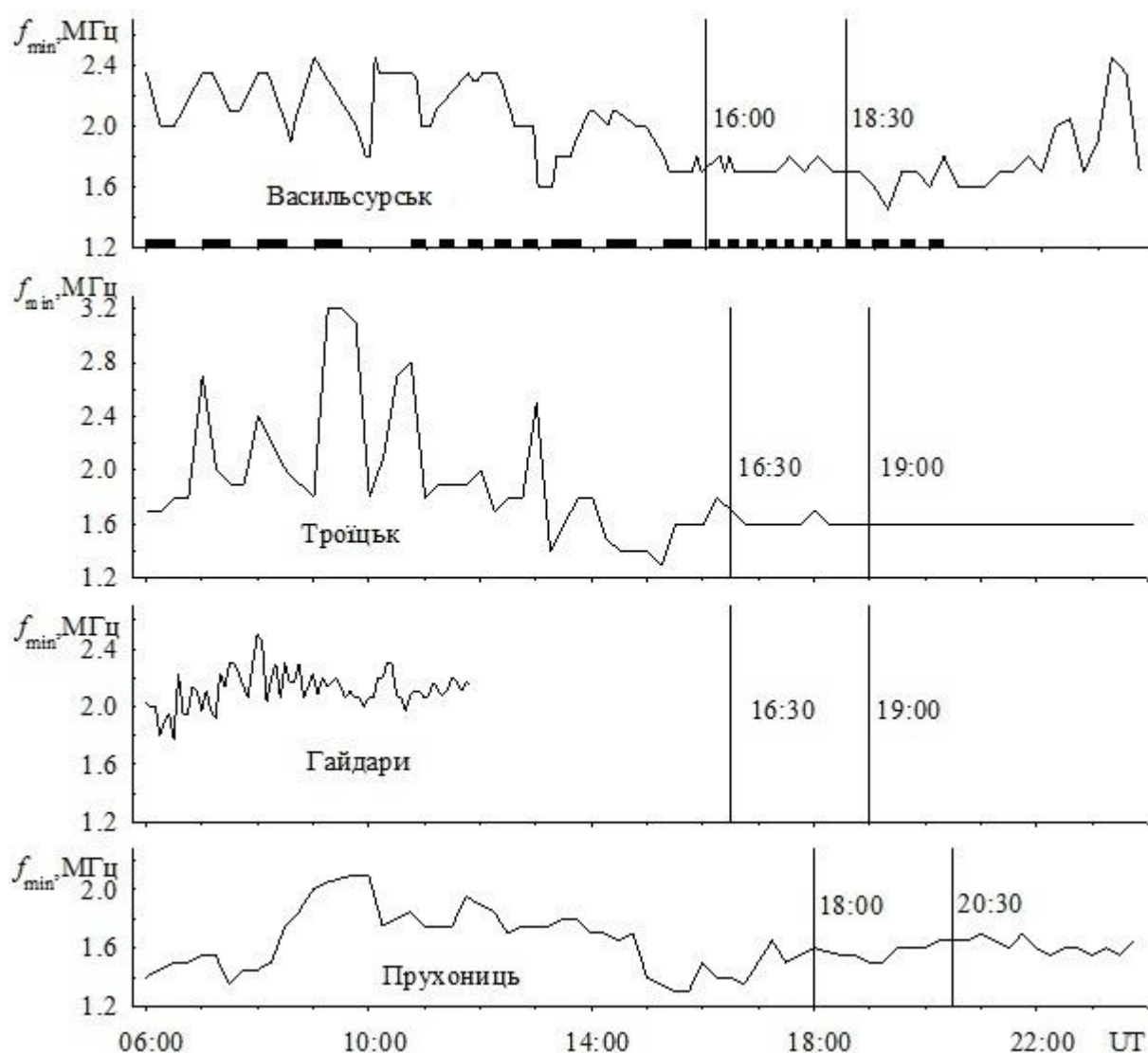


Рис. 5.6 Часові варіації $f_{\min}$ 29 серпня 2012 р. для чотирьох іонозондів. Вертикальні лінії показують моменти заходу Сонця на рівні землі та на висоті 400 км

На іонограмах, зареєстрованих у м. Прухониць, з 06:00 до 09:00 UT $f_{\min}$ збільшувалася від 1.4 до 2.4 МГц. В інтервалі часу 09:00–10:00 UT спостерігався сплеск $f_{\min}$ від 1.8 до 2.4 МГц. З 10:00 до 15:00 UT $f_{\min} \approx 1.8$ МГц. З 17:00 до 18:00 UT відзначалося мінімальне значення $f_{\min} \approx 1.4$ МГц. В інтервалі часу 18:30–24:00 UT $f_{\min} \approx 1.6$ МГц.

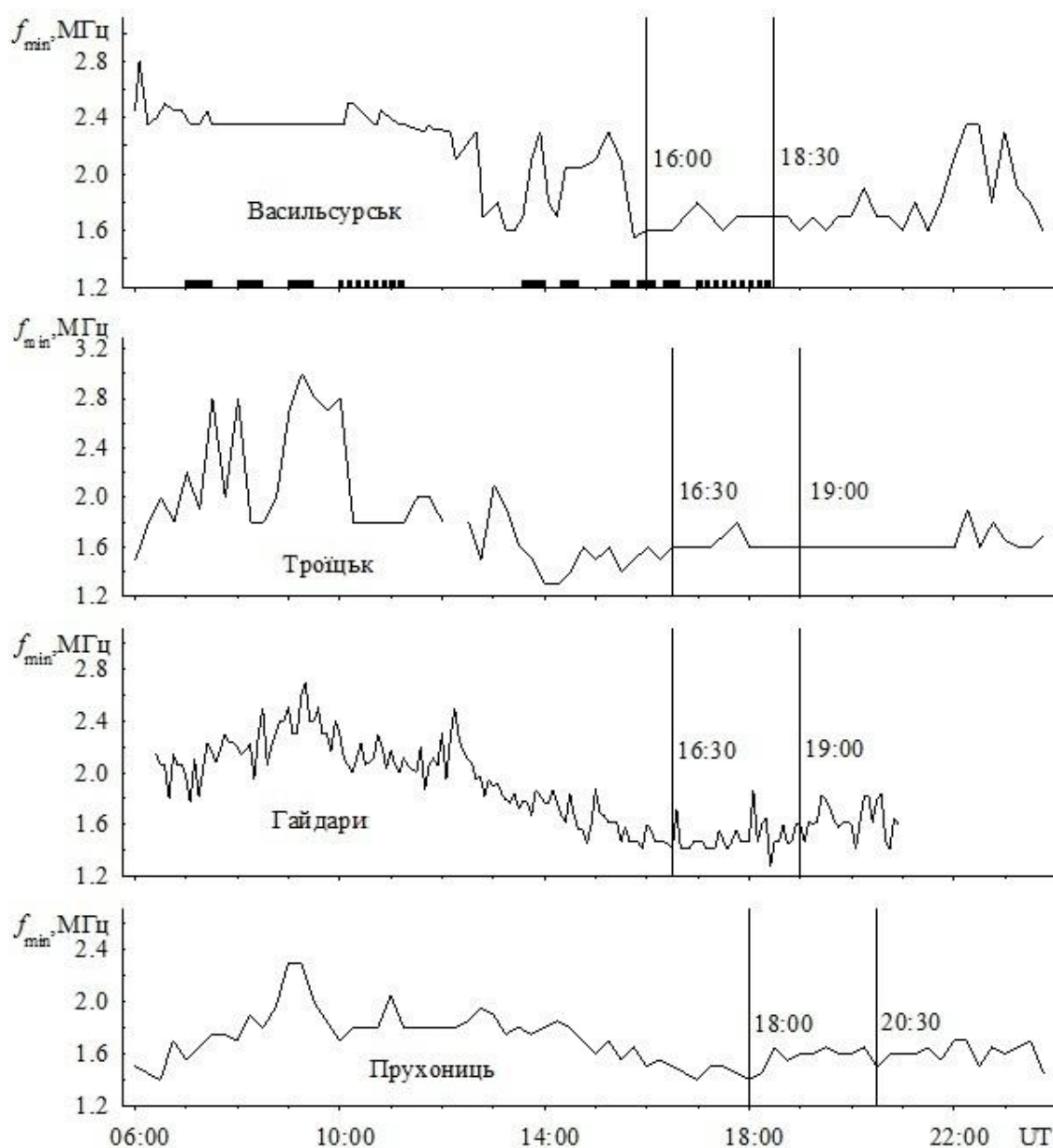


Рис. 5.7 Часові варіації $f_{\min}$ 30 серпня 2012 р. для чотирьох іонозондів. Вертикальні лінії показують моменти заходу Сонця на рівні землі та на висоті 400 км

5.5 Обговорення результатів спостереження

5.5.1 Варіації $f_{\min}$ у с.м.т. Васильсурськ

Найбільші варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р. спостерігалися в інтервалі часу 10:00–12:00 UT (див. рис. 5.5). Збільшення $f_{\min}$ досягало 0.4 МГц. У контрольний

день приблизно в цей же час збільшення $f_{\min}$ також було близько 0.4 МГц. Росту $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р. передував нагрів іоносферної плазми потужним радіовипромінюванням стенда «Сура» у режимі [+30 хв; -30 хв]. Порівняння варіацій $f_{\min}$ 27 і 28 серпня показує, що нагрів іоносфери суттєво не вплинув на їхню величину.

29 серпня 2012 р. з 07:00 до 11:00 UT відзначалися квазіперіодичні варіації $f_{\min}$ із квазіперіодом $T \approx 1$ год (див. рис. 5.6). Величина сплесків $f_{\min}$ досягала 0.4 МГц, а значення $f_{\min}$ піднімалося до 2.4 МГц. Така поведінка $f_{\min}$ почалося приблизно через 1 год після включення періодичного нагрівання іоносфери в режимі [+30 хв; -30 хв]. У контрольний день у тому ж інтервалі часу $f_{\min}$ залишалося на рівні близько 2.0 МГц. Періодичність сплесків і їх час запізнення стосовно моменту включення випромінювання стенда свідчить на користь того, що сплески викликані роботою стенда.

30 серпня в денний час (з 13:30 до 15:30 UT) сплески $f_{\min}$ величиною до 0.6–0.8 МГц супроводжувалися появою шару Es. З 06:00 до 10:00 спостерігався шар Es, це не дозволило виявити зростання $f_{\min}$ до 2.4 МГц (див. рис. 5.7). У контрольний день 27 серпня (а також 31 серпня) у цьому інтервалі часу $f_{\min} \approx 2.0$ МГц. Збільшення $f_{\min}$ від 2.0 до 2.4 МГц мало місце протягом роботи нагрівного стенда в режимі [+30 хв; -30 хв].

Варіації $f_{\min}$ при роботі стенда «Сура» в інших режимах і на більш високих частотах не перевищували природніх флуктуацій.

5.5.2 Варіації $f_{\min}$ у м. Троїцьк

Розглянемо варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р. В інтервалі часу 08:00–10:00 UT спостерігалися сплески значень $f_{\min}$ від 1.8 до 2.6 МГц (див. рис. 5.5). Вони слідували за включенням нагрівного стенда в режимі [+30 хв; -30 хв]. Сплески повторювалися із квазіперіодом $T = 30$ хв (перші два з них злилися).

Помітний ріст $f_{\min}$ від 1.6 до 2.0 МГц також мав місце в інтервалі часу 14:00–15:00 UT. У цей час стенд випромінював у режимі [+10 хв; -10 хв].

Збільшення $f_{\min}$ закінчилося приблизно за одну годину до припинення випромінювання стенда.

29 серпня 2012 р. чотири включення нагрівного стенда в режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$ супроводжувалися чотирма сильними сплесками $f_{\min}$ від 1.8 до 2.4–3.2 МГц (див. рис. 5.6). Час запізнення цих сплесків стосовно моментів включення нагрівного стенда було близько до 1 год.

Наступні включення стенда в інших режимах привели лише до незначних (0.2–0.4 МГц) сплесків $f_{\min}$. У цих сплесках також виявлявся квазіперіод $T \approx 1 \text{ год}$.

30 серпня 2012 р. слідом за включенням нагрівного стенда в режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$ виникали сильні сплески $f_{\min}$ від 1.8 до 2.8 МГц із квазіперіодом $T \approx 30 \text{ хв}$ (див. рис. 5.7). В інтервалі часу 08:30–10:00 UT спостерігалось загальне підвищення $f_{\min}$ з $\Delta f_{\min} \approx 1 \text{ МГц}$.

Наступні включення потужного радіовипромінювання в інших режимах приводили до незначних варіацій $f_{\min}$.

5.5.3 Варіації $f_{\min}$ у с. Гайдари

Після включення нагрівного стенда 28 серпня 2012 р. у режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$ спостерігалися квазіперіодичні ($T \approx 1 \text{ год}$) сплески $f_{\min}$ від 1.8–2.0 МГц до 2.4 МГц (див. рис. 5.5). Інші включення стенда в інших режимах приводили лише до незначних варіацій $f_{\min}$, які були порівнянні із природніми флуктуаціями. Помітне збільшення $f_{\min}$ від 1.8 до 2.2 МГц мало місце з 14:00 до 17:00 UT. При цьому величина квазіперіода T становила $\sim 1 \text{ год}$. Час запізнення збурень був близько до 1 год (стенд випромінював з 13:00 до 16:00 UT). Після 17:00 UT почали позначатися ефекти, що були викликані рухом вечірнього термінатора.

Включення нагрівного стенда 29 серпня 2012 р. у режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$ супроводжувалося сплесками $f_{\min}$ від 2.0 до 2.3–2.4 МГц (див. рис. 5.6). Час запізнення збурень, які спостерігалися в інтервалі часу 07:00–10:30 UT, стосовно

моментів включення нагрівного стенда (з 06:00 до 09:30 UT) було близько до 1 год. Квазіперіоди сплесків становили 0.5 і 1 год.

30 серпня нагрівний стенд включався в 07:00, 08:00 і 09:00 на 30 хв. Помітні сплески $f_{\min}$ тривалістю близько 15 хв виникали приблизно в 08:00, 09:00 і 10:00 UT (див. рис. 5.7). Їхня амплітуда становила 0.2–0.4 МГц. З 10:00 до 11:15 UT стенд працював у режимі [+5 хв; –5 хв]. Приблизно через 10 хв після включення стенда виникли слабкі сплески $f_{\min}$ (з амплітудою близько 0.2 МГц) і періодом $T \approx 15$ хв. В інтервалі часу 12:00–12:00 UT $f_{\min}$ збільшувалася від 1.9 до 2.4 МГц.

Інші включення нагрівного стенда з іншими режимами випромінювання супроводжувалися незначними варіаціями $f_{\min}$, які могли бути викликані природніми джерелами.

5.5.4 Варіації $f_{\min}$ у м. Прухониць

Варіації $f_{\min}$ 28 серпня 2012 р. у цілому мало чим відрізнялися від варіацій у контрольний день 27 серпня 2012 р. (порівняй рис. 5.4 і рис. 5.5). Відзначимо, що 28 серпня 2012 р. у варіаціях $f_{\min}$ в інтервалі часу 08:45–14:00 UT спостерігалися квазіперіодичні сплески $f_{\min}$. Їх амплітуда досягала 0.3–0.4 МГц, а квазіперіод був близький до 1 год. Час запізнення збурень становив близько 2.5 год, а їх тривалість – близько 5 год.

29 серпня 2012 року спостерігалися сплески $f_{\min}$ приблизно в ті ж моменти часу, що й на іонозонді в м. Троїцьк (див. рис. 5.6). Величина сплесків становила 0.2–0.4 МГц. Значення $f_{\min}$ в інтервалі часу 09:00–10:00 і 11:30–10:30 UT на 0.3–0.4 МГц перевищували значення $f_{\min}$ у тому ж інтервалі часу в контрольний день.

Поведінка $f_{\min}(t)$ 30 серпня 2012 р. у цілому була подібною поведінці цієї ж залежності в контрольний день (порівняй рис. 5.4 і мал. 5.7), однак, були й відмінності. Так, в інтервалі часу з 08:30 до 09:30 UT спостерігався сплеск $f_{\min}$ від 1.8 до 2.4 МГц (див. рис. 5.7). Приблизно в цей же час відзначалися сплески $f_{\min}$ на іонозондах «Троїцьк» та «Гайдари».

Два інших сплески $f_{\min}$ з амплітудою близько 0.3 і 0.2 МГц реєструвалися близько 11:00 і 13:00 UT.

Якщо перший і другий сплески викликані впливом потужного радіовипромінювання, то вони запізнявалися відносно моментів його включення (в 08:00 і 10:00 UT) приблизно на 1 год. Третій сплеск, швидше за все, мав природне походження.

Таким чином, включення потужного стенда «Сура» практично не вплинули на характер варіації $f_{\min}$ зареєстрованих у с.м.т. Васильсурськ. Для іонозонда в м. Троїцьк ці варіації були найбільшими, значення $\Delta f_{\min}$ досягали приблизно 1 МГц. У той же час для іонозондів «Гайдари» і «Прухониць» вони не перевищували 0.4–0.5 і 0.3–0.4 МГц відповідно. У с.м.т. Васильсурськ 29 серпня 2012 року також амплітуда квазіперіодичних сплесків становила близько 0.4 МГц.

Виявлені значні варіації $f_{\min}$, як видно, викликані збільшенням поглинання зондуючої радіохвилі в результаті росту концентрації електронів N . Оцінимо далі величину збурення N у нижній іоносфері.

5.5.5 Результати розрахунків

При незмінних параметрах іонозонда варіації $f_{\min}$ можуть бути викликані варіаціями концентрації електронів N і частоти зіткнень ν у нижній іоносфері. Збурення ν істотні в межах діаграми спрямованості антени нагрівного стенда, де є значним нагрів електронів. Висипання електронів з магнітосфери також супроводжується деяким збільшенням ν , цим, однак, при оцінці збільшення N будемо нехтувати.

Широко смугове аномальне ослаблення радіохвиль було суттєвим лише поблизу резонансних частот, але не поблизу $f_{\min}$. Тому таке ослаблення в роботі також не враховувалося.

Окремо необхідно вказати на той факт, що чутливість різних іонозондів різна. Ця обставина пом'якшувалася тим, що в якості інформаційного параметра

використовувалося фактично відношення $f_{\min}/f_{\min 0}$, яке практично не залежить від чутливості прийомної апаратури.

При ряді припущень, що спрощують, отримано зв'язок середнього по висотах нижньої іоносфери відносного збільшення концентрації електронів $n = \langle N/N_0 \rangle$ з $f_{\min}$ [9]:

$$n = n_{\infty} \left(1 + \frac{\ln B}{2K_0} \right), \quad (5.1)$$

де

$$n_{\infty} = \left(\frac{f_{\min} + f_B}{f_{\min 0} + f_B} \right)^2, \quad (5.2)$$

$$B = \frac{z_{r0}}{z_r} \left(\frac{f_{\min}}{f_{\min 0}} \right)^{1+0,5\beta}, \quad (5.3)$$

$n_{\infty} = n|_{2K_0 \rightarrow \infty}$, $f_B \approx 1.4$ МГц – гірочастота електронів, z_{r0} і z_r – висоти відбиття зондуєної радіохвилі із частотами $f_{\min 0}$ і $f_{\min}$, $\beta \approx 2.5$ – показник ступеня в залежності потужності радіошуму P_n від частоти (вважалося, що $P_n \sim f^{\beta}$). (інтегральний коефіцієнт поглинання K_0 оцінювалося, виходячи з моделей іоносфери).

Збільшення мінімальної спостережуваної частоти від $f_{\min 0}$ до $f_{\min}$ викликається збільшенням n . Результати розрахунків n з використанням співвідношень (5.1), (5.2) і (5.3) для чотирьох іонозондів наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Відомості про середнє збільшення концентрації електронів у нижній іоносфері

Іонозонд	$f_{\min 0}$, МГц	$f_{\min}$, МГц	$n =$ $\langle N/N_0 \rangle$	Примітки
«Васильсурськ»	2.0	2.4	1.4	На рівні природніх флуктуацій
«Троїцьк»	1.8	3.2	3	Найбільші варіації
«Гайдари»	2.0	2.4	1.4	Помірні варіації
«Прухониць»	1.6	1.9	1.3	Помірні варіації

Вважалося, що $z_r \approx z_{r0}$. Для ранкового та денного часу приймалося, що K_0 рівнялося 0.5 і 0.75 відповідно. З табл. 5.3 видно, що найбільші зміни N у нижній іоносфері мали місце для іонозонда «Троїцьк». Над цим іонозондом N збільшувалася в середньому по висоті до 3 раз. Цей же параметр над іонозондами «Гайдари» і «Прухониць» збільшувався в 1.4 і 1.3 рази відповідно. Незначним було збільшення N над іонозондом «Васильсурськ» 28 і 30 серпня 2012 р. У той же час 29 серпня 2012 р. N зростала в 1.3–1.4 рази.

Виникає питання, збільшення n , а значить і N , викликане добовим ходом $N(t)$ або модифікацією іоносфери потужним радіовипромінюванням? Справа в тому, що вплив потужного радіовипромінювання на іоносферу в режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$ відбувалося в інтервалі часу з 06:00 до 09:30 UT, тобто при переході від ранкового до денного (місцевого) часу. Схоже, що обидва фактора сприяли збільшенню N . Про це свідчать наступні аргументи.

1. При впливі на іоносферу потужного радіовипромінювання на досить низькій частоті ($f = 4785 \text{ кГц}$) у режимі $[+30 \text{ хв}; -30 \text{ хв}]$ з ефективною потужністю $PG \approx 75\text{--}80 \text{ МВт}$ температура T_e та концентрація N електронів на висотах динамо-області іоносфери ($z \approx 100\text{--}150 \text{ км}$) збільшуються практично стрибком (T_e за час $\sim 10^{-3}\text{--}10^{-2} \text{ с}$, N за час $\sim 10\text{--}10^2 \text{ с}$) в 2–3 і 1.4–1.7 рази відповідно.

Це призводить до різкої зміни провідності іоносферної плазми, а значить і до порушення взаємодії, що склалася між підсистемами в системі ЗАІМ. У результаті ударного впливу на одну з підсистем відбувається перерозподіл високоенергійних (з енергією $\epsilon_e \sim 10\text{--}100 \text{ кеВ}$) електронів по пітч-кутам. Певна частина електронів висипається з магнітосфери (точніше, із внутрішнього радіаційного пояса) в D- і E-області іоносфери. Це призводить до збільшення поглинання зондуєчих радіохвиль і збільшенню $f_{\min}$ на іонограмах.

Більш докладно можливий механізм взаємодії підсистем у системі ЗАІМ описано у роботах [5, 152]. Детальну теорію механізму ще належить побудувати.

2. При роботі нагрівного стенда в інших режимах (на більш високих частотах) ефективність збурення іоносферної плазми в динамо-області

зменшувалася, а значить і знижувався ступінь іоносферно-магнітосферної взаємодії, що, в остаточному підсумку, призвело до зменшення n .

З цих же причин ускладнене значне збільшення N у нічний час.

3. Сплески $f_{\min}$ частіше виникали з періодом 1 год, рідше з періодом 0.5 год (режим випромінювання нагрівного стенда був наступним: [+30 хв; –30 хв]).

4. Величина збурень N убувала при збільшенні відстані від нагрівного стенда.

Залишається незрозумілим, чому 28 і 30 серпня 2012 р. у с.м.т. Васильсурськ збурення N було малим або взагалі було викликано тільки природними причинами? Можливо, це пов'язано з розвитком збурень N у віддаленні від діаграми спрямованості іонозонда «Васильсурськ», із дрейфом магнітосферних електронів по геомагнітній оболонці та відсутністю (малою інтенсивністю) висипання електронів безпосередньо над нагрівним стендом. Другою причиною може бути збільшення N і ν , а значить і $f_{\min}$ у межах області, що опромінюється. На цьому тлі ефект висипання електронів маскується. Нарешті, не можна виключати особливості апаратури (чутливість іонозонда). У будь якому разі це питання вимагає подальших досліджень.

На закінчення додамо, що дані результати в цілому підтверджують результати більш ранніх робіт [138–145, 158, 159] і результати досліджень, виконаних на радарі некогерентного розсіяння в м. Харков [151]. У роботі [151] описані збурення N на висотах Е-області іоносфери, які імовірно також викликалися висипанням електронів із внутрішнього радіаційного пояса.

5.5.6 Оцінка потоків електронів

Ґрунтуючись на методиці, що описана в роботах [137, 151, 152], оцінимо густину потоку Π_e високоенергійних іонізуючих атмосфери електронів, що висипаються із магнітосфери (із внутрішнього радіаційного пояса). Зміна швидкості іонізації

$$\Delta q = \alpha N^2 - \alpha_0 N_0^2 \approx \alpha_0 N_0^2 (n^2 - 1), \quad (5.4)$$

де $\alpha \approx \alpha_0 \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – коефіцієнт рекомбінації електронів з молекулярними іонами, $n = \langle N/N_0 \rangle$, N і N_0 – концентрація електронів в збуреній і незбуреній нижній іоносфері. Тоді з урахуванням виразу (5.4)

$$P_e = 2 \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e} \Delta z \Delta q = 2 \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e} \Delta z \alpha_0 N_0^2 (n^2 - 1), \quad (5.5)$$

де $\varepsilon_i = 35 \text{ еВ}$ – енергія, що витрачається на один акт іонізації, Δz – товщина шару з додатковою іонізацією, ε_e – енергія електронів.

Прийmemo $z \approx 90 \text{ км}$, $N_0 \approx 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $n = 2$, $\Delta z \approx 10 \text{ км}$, $\varepsilon_e = 100 \text{ кеВ}$ і одержимо із співвідношення (5.5), що $P_e \approx 6.3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Така густина потоків не є занадто великою. Для порівняння вкажемо, що в середніх широтах фонове значення $P_e \sim 10^5 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [195]. Під час геокоsmічних бур, що супроводжуються висипанням електронів із внутрішнього радіаційного пояса, P_e збільшується на кілька порядків (до 10^8 – $10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) [195–197]. У цьому сенсі вплив потужного радіовипромінювання може стимулювати геофізичні ефекти подібні тим, що виникають під час геокоsmічних бур. При бурях густина потоку енергії, що надходить в іоносферу високих і середніх широт, порядку 10^{-4} – 10^{-3} і 10^{-5} – $10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ відповідно. Густина потоку потужного радіовипромінювання стенда «Сура» близька до 10^{-5} – $10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Видно, що ці потоки можуть бути сумірними, порівняними можуть бути ефекти, що ними викликаються.

Потоки високоенергійних часток з радіаційного пояса, загалом кажучи, повинні призводити до появи штучної аврори. Як показали оцінки, зміна інтенсивності світіння виявляється слабкою, на межі чутливості наявних фотометрів [5].

Про можливість стимульованих процесів у системі ЗАІМ також свідчать результати роботи [197].

5.6 Експеримент 2013 р.

5.6.1 Методика аналізу

Аналізувалися часові варіації критичної частоти шару F2 протягом роботи нагрівного стенда й у контрольні інтервали часу. У якості можливої реакції на вмикання / вимикання стенда, режими роботи якого наведено в таблиці 5.4, розглядалися позитивні відхилення (сплески) частоти f_oF2 відносно їх основи, яка не завжди збігалася з положенням тренда.

При часових інтервалах між включеннями, менше 15 хв, тренд згладжував сплески, що частково маскувало ефект позитивних сплесків. Аперіодичні позитивні відхилення f_oF2 означали б сплески N , що дозволило б підтвердити гіпотезу, яка висловлена вище. Тренд обчислювався за допомогою полінома п'ятого ступеня. Підвищення ступеня полінома не приводило до помітної зміни положення тренда. Амплітуда сплесків оцінювалася по максимальному відхиленню значень f_oF2 від основи сплеску. Час запізнення збурень відносно моменту включення стенда визначався по різниці між моментами початку сплеску та включення стенда. Тривалість збурень оцінювалася по кількості відліків частоти f_oF2 , помноженому на часовий інтервал зняття іонограм (5 або 15 хв).

5.6.2 Стан космічної погоди

20, 21 і 27 серпня 2013 р. мало місце різке збільшення приблизно на порядок концентрації частинок n_{sw} у сонячному вітрі тривалістю близько 10 годин (рис. 5.8). Варіації температури T_{sw} цих частинок досягали $3 \cdot 10^5$ К. Збільшення n_{sw} і T_{sw} привело до сплесків тиску часток у сонячному вітрі, енергії ϵ_A , що вводиться в магнітосферу Землі, а також до зміни значень індексів AE , K_p і D_{st} (див. рис. 5.8).

Таблиця 5.4

Режими випромінювання нагрівного стенда «Сура»

Дата	Інтервал часу	Частота, кГц	Ефективна потужність, МВт	Режим роботи
20 серпня 2013 р.	07:02 – 08:00	4785	55	[+5 хв; –5 хв]
	08:02 – 11:00	4785	55	[+15 хв; –15 хв]
	11:00 – 11:45	4785	55	Безупинно
	16:27 – 17:42	5828	120	[+5 хв; –5 хв]
21 серпня 2013 р.	07:00 – 07:50	4785	80	[+5 хв; –5 хв]
	08:15 – 13:30	4785	80	[+15 хв; –15 хв]
	14:00 – 14:20	5828	110	[+1 хв; –1 хв]
	14:20 – 15:50	5828	110	[+15 хв; –15 хв]
	15:55 – 16:08	5828	110	Несуча
	16:08 – 16:20	5828	110	[+1 хв; –1 хв]
	16:40 – 17:00	5828	110	[+1 хв; –1 хв]
	17:00 – 18:35	5828	110	[+5хв; –5 хв]
	18:40 – 19:00	5828	110	[+1 хв; –1 хв]
	19:10 – 01:55	4300	70	[+15 хв; –15 хв]
22 серпня 2013 р.	07:00 – 08:00	4785	100	[+5 хв; –5 хв]
	08:46 – 09:01	4785	100	Несуча
	09:46 – 10:01	4785	100	Несуча
	10:46 – 11:01	4785	100	Несуча
	11:46 – 12:01	4785	100	Несуча
	12:46 – 13:01	4785	100	Несуча
	13:16 – 13:30	4785	100	Несуча
	14:00 – 14:20	4785	100	[+1 хв; –1 хв]
	14:30 – 16:00	4785	100	[+6 хв; –6 хв]
	16:00 – 16:20	4785	45	[+1 хв; –1 хв]
	16:40 – 17:00	4785	45	[+1 хв; –1 хв]
	17:00 – 18:30	4785	45	[+3 хв; –7 хв]
	18:40 – 19:00	4785	45	[+1 хв; –1 хв]

Продовження таблиці 5.4

23 серпня 2013 р.	09:21 – 13:36	5828	40	[+15 хв; –15 хв]
	13:50 – 14:21	5828	40	[+1 хв; –1 хв]
	14:31 – 16:00	5828	100	[+6 хв; –6 хв]
	16:01 – 17:30	5828	100	[+1 хв; –1 хв]
	17:31 – 18:30	5828	100	[+3хв; –7 хв]
	18:40 – 19:00	5828	45	[+1 хв; –1 хв]
25 серпня 2013 р.	13:46 – 14:01	5828	100	Несуча
	16:01 – 16:16	4785	90	Несуча
	16:28 – 17:03	4785	90	[+5 хв; –10 хв]
	18:25 – 19:15	4785	90	[+10 хв; –10 хв]
26 серпня 2013 р.	14:22	5405	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:27	5415	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:32	5425	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:37	5435	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:42	5445	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:47	5455	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:52	5465	40	[+2 хв, –3 хв]
	14:57	5475	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:02	5485	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:07	5495	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:12	5495	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:17	5505	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:22	5405	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:27	5425	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:32	5445	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:37	5465	40	[+2 хв, –3 хв]
	15:42	5485	40	[+2 хв, –3 хв]

Продовження таблиці 5.4

	15:47	5505	40	[+2 хв, –3 хв]
	16:12	5395	120	[+10 з, –10 з]
	16:14	5375	120	[+10 з, –10 з]
	16:17	5395	120	[+10 з, –10 з]
	16:26 – 18:00	5435	120	[+10 з, –10 з]
27 серпня 2013 р.	07:00 – 07:46	4785	80	[+5 хв; –5 хв]
	08:01 – 11:46	4785	80	[+15 хв; –15 хв]
	12:00 – 12:15	4785	85	Несуча
	13:00 – 13:15	4785	85	Несуча
	14:00 – 14:15	4785	85	Несуча
	14:39	5395	110	[+2 хв; –2 хв]
	14:43	5415	110	[+2 хв; –2 хв]
	14:47	5435	110	[+2 хв; –2 хв]
	14:51	5455	110	[+2 хв; –2 хв]
	14:55	5475	110	[+2 хв; –2 хв]
	14:59	5495	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:03	5515	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:07	5535	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:11	5395	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:15	5415	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:19	5435	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:23	5455	110	[+2 хв; –2 хв]
27 серпня 2013 р.	15:27	5475	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:31	5495	110	[+2 хв; –2 хв]
	15:35 – 16:03	5515	110	[+2 хв; –2 хв]
	16:10 – 16:50	5455	110	[+10 з; –10 з]
28 серпня 2013 р.	06:00 – 11:15	4785	85	[+15 хв; –15 хв]

Продовження таблиці 5.4

	12:00 – 12:15	4785	85	Несуча
	13:00 – 13:15	4785	85	Несуча
	13:39	5365	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	13:43	5385	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	13:47	5405	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	13:51	5425	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	13:55	5445	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	13:59	5465	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:03	5465	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:07	5485	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:11	5505	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:15	5525	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:19	5545	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:23	5365	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:27	5405	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:31	5445	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:35	5485	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	14:39	5525	110	[+2 хВ; –2 хВ]
	15:09 – 19:19	4544	70	[+10 хВ; –10 хВ]

Перша магнітна буря почалася близько 12:00 UT 20 серпня 2013 р. (тут і далі використовується всесвітній час UT). Її раптовий початок тривав до 02:00 21 серпня 2013 р. В інтервалі часу 02:00–05:00 мала місце основна фаза бурі, для якої $B_{z\min} \approx -9$ нТл, $\varepsilon_{A\max} \approx 10$ ГДж/с, $AE_{\max} \approx 600$ нТл, $K_p \approx 4+$, $D_{st\min} = -45$ нТл. Далі реєструвалася фаза відновлення бурі.

Головна фаза наступної магнітної бурі спостерігалася в інтервалі з 18:00 22 серпня 2013 р. до 03:00 23 серпня 2013 р. При цьому $B_{z\min} \approx -5$ нТл,

$\varepsilon_{A\max} \approx 5$ ГДж/с, $AE_{\max} \approx 750$ нТл, $K_{p\max} \approx 4+$, $D_{st\min} = -70$ нТл. Фаза відновлення тривала до середини доби 26 серпня 2013 р.

Головна фаза третьої магнітної бурі почалася в 16:00 і закінчилася в 20:00 27 серпня 2013 р. Для цієї бурі $B_{z\min} \approx -10$ нТл, $\varepsilon_{A\max} \approx 10$ ГДж/с, $AE_{\max} \approx 920$ нТл, $K_{p\max} \approx 5$, $D_{st\min} = -110$ нТл. Фаза відновлення тривала до 09:00 29 серпня 2013 р.

Енергію магнітних бур доцільно оцінювати згідно з співвідношенням [198]:

$$E_{st} = \frac{3}{2} E_m \frac{|D_{st\min}^*|}{B_0},$$

де $E_m = 8 \cdot 10^{17}$ Дж – енергія дипольного магнітного поля Землі, $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Тл – значення індукції геомагнітного поля на екваторі. Скореговане значення

$$D_{st\min}^* = D_{st\min} - bp_{sw}^{1/2} + c.$$

Тут $b = 5 \cdot 10^5$ нТл/Па^{1/2}, $c = 20$ нТл, p_{sw} – тиск сонячного вітру в Па. При тривалості головної фази магнітної бурі ΔT її потужність дається очевидним співвідношенням: $P = E_{st}/\Delta T$.

Основні параметри, що описують енергетику магнітних бур, наведені в табл. 5.5, звідки видно, що енергія всіх бур була порядку 10^{15} Дж, а потужність – 10^{11} Вт. Такі бурі, згідно із класифікацією [174], відносяться до помірних. З одного боку, вони здатні привести підсистеми в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера в метастабільний стан, а з іншого боку – при цьому ще не сильно збурюється іоносфера. Все це створює сприятливі умови для вивчення особливостей взаємодії між підсистемами ЗАІМ при нагріванні іоносфери потужним радіовипромінюванням.

Найважливішим параметром, що характеризують геокосмічні бурі, є енергетична функція Акасофу ε_A . Вона описує величину енергії, що надходить від сонячного вітру в систему ЗАІМ. Під час аналізованих бур значення ε_A не перевищували 10 ГДж/с. Із цього випливає, що геокосмічні бурі були помірними [55, 174].

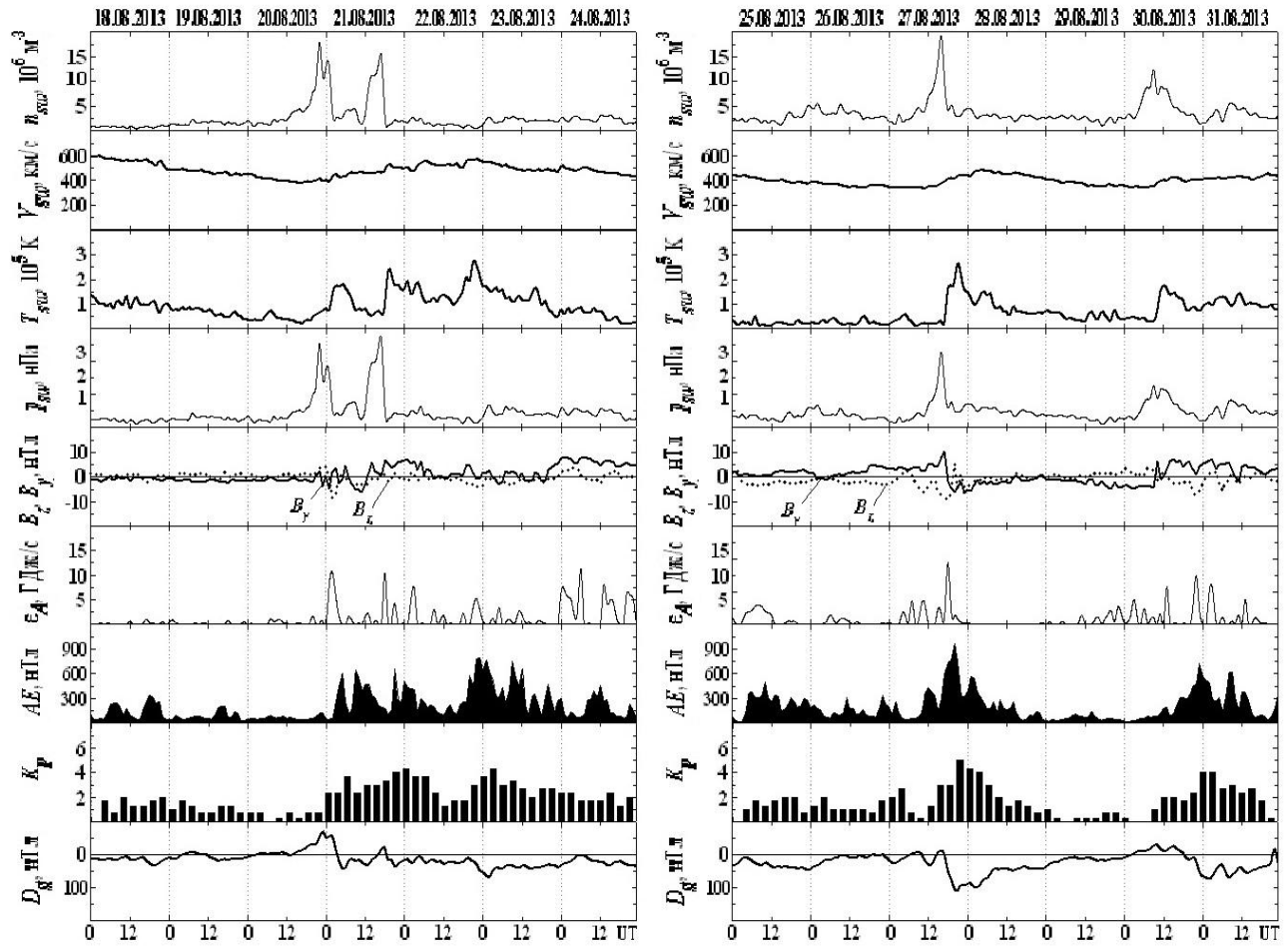


Рис. 5.8 Часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} , температури T_{sw} , розрахованих значень динамічного тиску p_{sw} , B_y - і B_z -компонент (лінія та крапки) міжпланетного магнітного поля, розрахованих значень енергії ϵ_A , що передана сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE-індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу 18–31 серпня 2013 р. (необхідні дані представлені на сайті: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)

Протягом вимірювальної кампанії мали місце як позитивні (ПІБ), так і негативні (НІБ) іоносферні бурі (табл. 5.6). Для перших значення критичної частоти f_oF2 і концентрація електронів N у максимумі шару F2 збільшувалися в порівнянні зі значеннями N_0 в контрольний день 25 серпня 2013 р., а для других – зменшувалися. Збільшення N не перевищувало 50%, а її зменшення – 40% (див.

табл. 5.6). Більшість бур по класифікації [55, 174] були слабкими (minor), а три з них – помірними (moderate) (див. табл. 5.6).

Таблиця 5.5

Параметри магнітних бур у серпні 2013 р.

Параметр	21 серпня	23 – 23 серпня	27 серпня
$D_{st\ min}$, нТл	– 45	– 70	– 110
p_{sw} , нПа	2.5	2.7	4.4
$D_{st\ min}^*$, нТл	– 53	– 76	– 123
E , Дж	$2 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$
Δt , година	3.5	6	4
P , Вт	$1.6 \cdot 10^{11}$	$1.4 \cdot 10^{11}$	$3.5 \cdot 10^{11}$

Таблиця 5.6

Основні параметри іоносферних бур у серпні 2013 р.

Дата	Інтервал часу	Тип бурі	$\Delta f_o F2_{max}$, МГц	N/N_0	Іоносферний індекс
21 серпня	09:00 – 10:00	ПІБ (Minor)	1.3	1.4	1.4
21 серпня	10:00 – 12:00	ПІБ (Minor)	1.6	1.5	1.7
21 серпня	12:00 – 15:00	НІБ (Minor)	– 1	0.8	1.1
22 серпня	08:00 – 20:00	НІБ (Moderate)	– 2.1	0.6	2.5
23 серпня	11:00 – 15:00	НІБ (Minor)	– 0.8	0.8	0.9
26 серпня	08:00 – 20:00	НІБ (Moderate)	– 2	0.6	2.4
27 серпня	08:00 – 18:00	НІБ (Minor)	– 0.8	0.8	0.9
28 серпня	10:00 – 15:00	НІБ (Moderate)	– 0.7	0.7	1.5

5.6.3 Часові варіації критичної частоти поблизу с. Гайдари

20 серпня 2013 р. спочатку спостерігалось збільшення критичної частоти від 6.3 до 8 МГц (рис. 5.8а). Після 07:30 відзначалося її зменшення приблизно на 1 МГц, яке змінилось зростанням в інтервалі часу 09:30–15:00. Після 16:00 спостерігався досить швидкий ріст f_oF2 приблизно на 1.5 МГц. Повільні варіації критичної частоти супроводжувалися її сплесками величиною 0.15–0.28 МГц і тривалістю 5–10 хв.

21 серпня 2013 р. в інтервалі часу 03:00–6:30 спостерігалось поступове зростання f_oF2 від 5.5 до 8.7 МГц, яке змінилось півгодинним зменшенням f_oF2 до 8.8 МГц (див. рис. 5.8б). Далі реєструвалось швидке падіння f_oF2 до 7.2–7.3 МГц. Таке значення мало місце з 10:00 до 15:00. З 15:00 до 18:00 спостерігалось збільшення значень f_oF2 більш, ніж на 1 МГц, а потім її зменшення до нічних значень. Як до, так і в період роботи нагрівного стенда відзначалися сплески f_oF2 від 0.10 до 0.30 МГц. Приблизно з 14:40 і до 16:10 реєструвалися квазіперіодичні варіації f_oF2 з періодом $T = 10$ хв і амплітудою 0.10–0.12 МГц.

22 серпня 2013 р. вранці спостерігався потужний шар Es, який майже увесь час екранував область F іоносфери (див. рис. 5.8в). В інтервалі часу 06:00–15:00 регулярні варіації f_oF2 не перевищували 0.6 МГц. На них накладалися сплески f_oF2 величиною 0.10–0.15 МГц і тривалістю 10–15 хв.

23 серпня 2013 р. з 08:00 до 12:00 спостерігалось зменшення f_oF2 на 0.8 МГц (див. рис. 5.8г). В інтервалі часу з 09:30 до 10:30 відзначався сплеск f_oF2 від 7.0 до 7.5 МГц. На повільні варіації f_oF2 накладалися сплески величиною 0.15–0.23 МГц і тривалістю 10–15 хв.

День 25 серпня 2013 р. був магнітоспокійним. Нагрівний стенд включався з 13:46 до 14:01 і з 16:01 до 16:16 у режимі випромінювання несучої із частотами 5828 і 4785 кГц і ефективною потужністю 100 і 90 МВт відповідно. Приблизно з 14:00 до 15:30 реєструвався шар Es. Поведінка $f_oF2(t)$ була типовою для незбуреного дня (див. рис. 5.8д): до 10:00 мало місце зростання значень f_oF2 до

8.3 МГц, а потім поступове їхнє зменшення. Величина сплесків f_oF2 змінювалася в межах 0.06–0.30 МГц, а їх тривалість становила 5–30 хв.

26 серпня 2013 р. з 05:00 до 17:00 значення f_oF2 флюктували поблизу 6 МГц (див. рис. 5.8е). Епізодично виникав шар Es, що екранував область F іоносфери.

День 27 серпня 2013 р. до 12:00–13:00 був магнітоспокійним, після чого в іоносфері почав позначатися вплив геокоосмічної бурі. Спостереження за областю F часом переривалися через наявність шару Es (див. рис. 5.8ж). На регулярні денні варіації f_oF2 накладалися сплески f_oF2 . У період роботи нагрівного стенда з 08:00 до 11:46 мали місце сплески f_oF2 величиною 0.15–0.38 МГц.

28 серпня 2013 р. в інтервалі часу 07:00–09:00 спостерігалось зменшення f_oF2 у порівнянні з контрольним днем приблизно на 0.7 МГц. На повільні варіації f_oF2 накладалися сплески величиною 0.15–0.30 МГц (див. рис. 5.8з). З 00:00 і до 05:00 існував потужний шар Es, що повністю екранував шари іоносфери, що розташовані вище, з 05:00 до 14:30 його гранична частота зменшилася приблизно до 3.5–4.0 МГц. Після 15:00 шар Es знову став екранувати F-область іоносфери.

29 і 30 серпня 2013 р. у денний час майже увесь час існував шар Es, що зробив неможливим вимір критичної частоти шару F2 іоносфери, а значить і використання цих днів у якості контрольних (нагрівний стенд у ці дні не працював).

5.6.4 Часові варіації критичної частоти поблизу м. Троїцьк

20 серпня 2013 р. з 04:00 до 08:00 спостерігалось зростання f_oF2 від 5.3 до 7.5 МГц, а потім її поступове зменшення до 6.2 МГц, яке мало місце близько 14:00 (рис. 5.9а). Після нетривалого зменшення f_oF2 приблизно на 0.5 МГц в інтервалі часу 14:00–16:00 знову спостерігалось незначне зростання f_oF2 , яке відзначалося до 18:00.

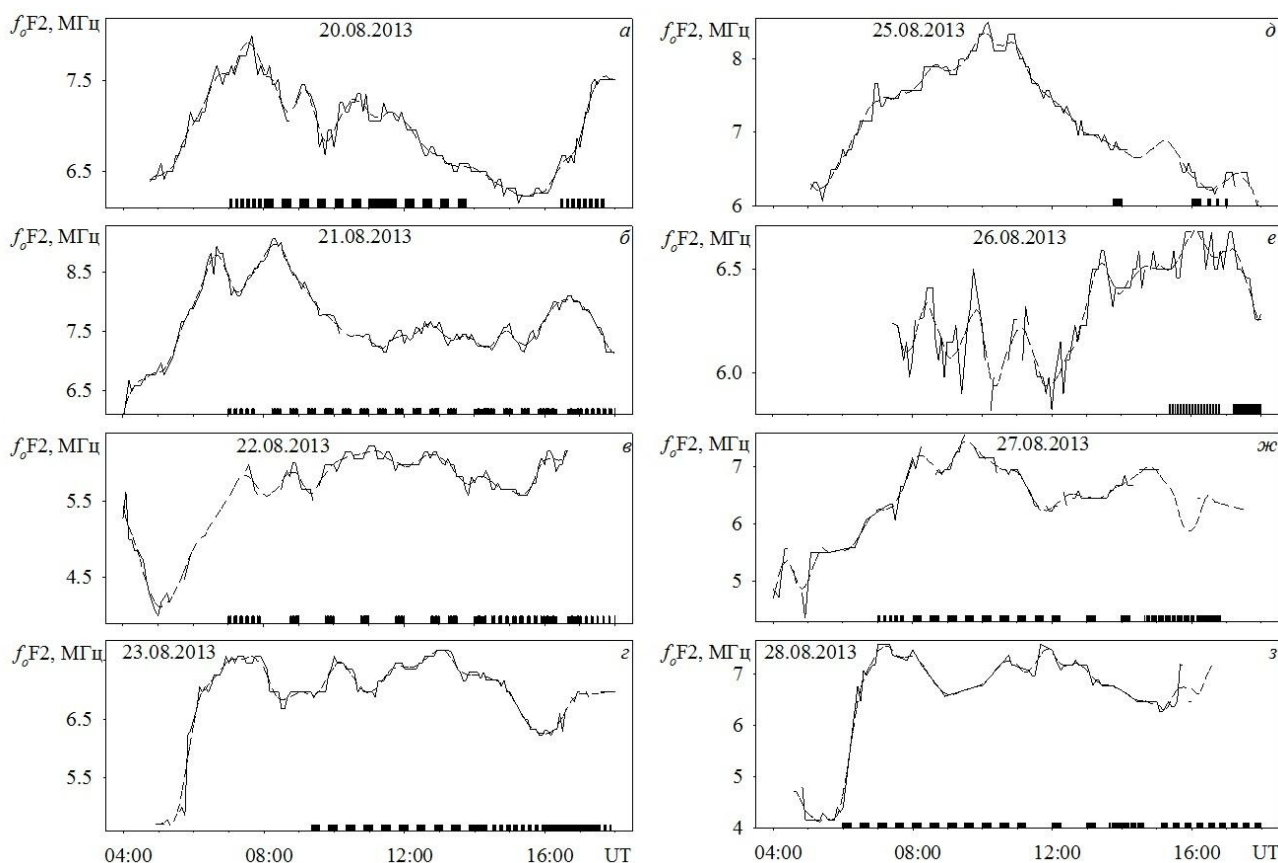


Рис. 5.8 Часові варіації критичної частоти шару F2 іоносфери поблизу с. Гайдари. Прямокутниками на часовій осі тут і далі показані режими випромінювання стенда "Сура"

Перший сплеск f_oF2 приблизно на 0.5 МГц мав місце в інтервалі часу 06:30–07:15 (див. рис. 5.9а). З 08:00 до 14:00 також реєструвалися сплески f_oF2 величиною 0.17–0.26 МГц і тривалістю 15–45 хв.

21 серпня 2013 р. в інтервалі часу 05:00–07:00 спостерігалось збільшення f_oF2 , яке досягало приблизно 1 МГц (див. рис. 5.9б). З 07:00 до 16:00 відзначалося в середньому плавне зменшення критичної частоти, на яке накладалися сплески тривалістю від 15 до 30 хв і величиною 0.17–0.26 МГц.

22 серпня 2013 р. з 06:00 до 07:30 спостерігався стрибок f_oF2 від 4.6 до 5.7 МГц (див. рис. 5.9в). В інтервалі 07:30–08:00 $f_oF2 \approx 5$ МГц. Потім настало різке збільшення критичної частоти від 5 до 5.9 МГц. З 09:00 до 18:00 згладжені значення f_oF2 змінювалися слабо. На монотонні зміни f_oF2 накладалися її сплески величиною 0.12–0.18 МГц і тривалістю близько 15 хв.

23 серпня 2013 р. з 04:00 до 08:00, незначно флюктуючи, частота f_oF2 збільшувалася від 4 до 7.2 МГц, потім протягом півгодини спостерігалось її зменшення приблизно на 0.5 МГц (див. рис. 5.9з). Далі середнє значення f_oF2 збільшувалося від 6.7 до 7.2 МГц. Після 12:45 спостерігалось переважне зменшення значень f_oF2 . На плавний хід f_oF2 накладалися її сплески, які були добре виражені в інтервалі часу 09:30–17:00. Величина сплесків становила 0.1–0.3 МГц, а їх тривалість – 15–60 хв.

25 серпня 2013 р. критична частота в середньому спочатку збільшувалася від 5.5 до 7 МГц, а після 09:30 поступово зменшувалася від 7 до 6.5 МГц (див. рис. 5.9д). На повільні варіації f_oF2 накладалися сплески величиною 0.08–0.16 МГц і тривалістю 15 хв і більше.

26 серпня 2013 р. з 04:00 до 09:00 спостерігалось плавне збільшення f_oF2 приблизно від 4.7 до 6.3 МГц (див. рис. 5.9е). Потім протягом 9 годин значення f_oF2 коливалися навколо 6 МГц. Повільні варіації f_oF2 супроводжувалися квазіперіодичними осциляціями з $T \sim 1$ год і амплітудою 0.1–0.15 МГц.

27 серпня 2013 р. з 04:00 до 09:00 критична частота в середньому зростала від 4.8 до 7.1 МГц, далі до 12:30 вона повільно убувала до 6 МГц, знову зростала до 14:00 приблизно на 0.7 МГц, а потім поступово зменшувалася (див. рис. 5.9ж). На повільні варіації f_oF2 накладалися сплески величиною 0.15–0.30 МГц і тривалістю близько 15–30 хв.

28 серпня 2013 р. з 04:00 до 08:00 спостерігалось зростання f_oF2 від 4.0 до 6.2 МГц, а потім критична частота аж до 17:30 змінювалася незначно (див. рис. 5.9з). На в середньому монотонний хід накладалися сплески f_oF2 величиною 0.33–0.41 МГц і тривалістю 15–30 хв. Сплески суттєво підсилювалися при випромінюванні станда в режимах [+15 хв; –15 хв] і [+10 хв; –10 хв] (див. рис. 5.9з). У той же час вони були виражені слабо при режимі [+2 хв; –2 хв] (див. рис. 5.9з).

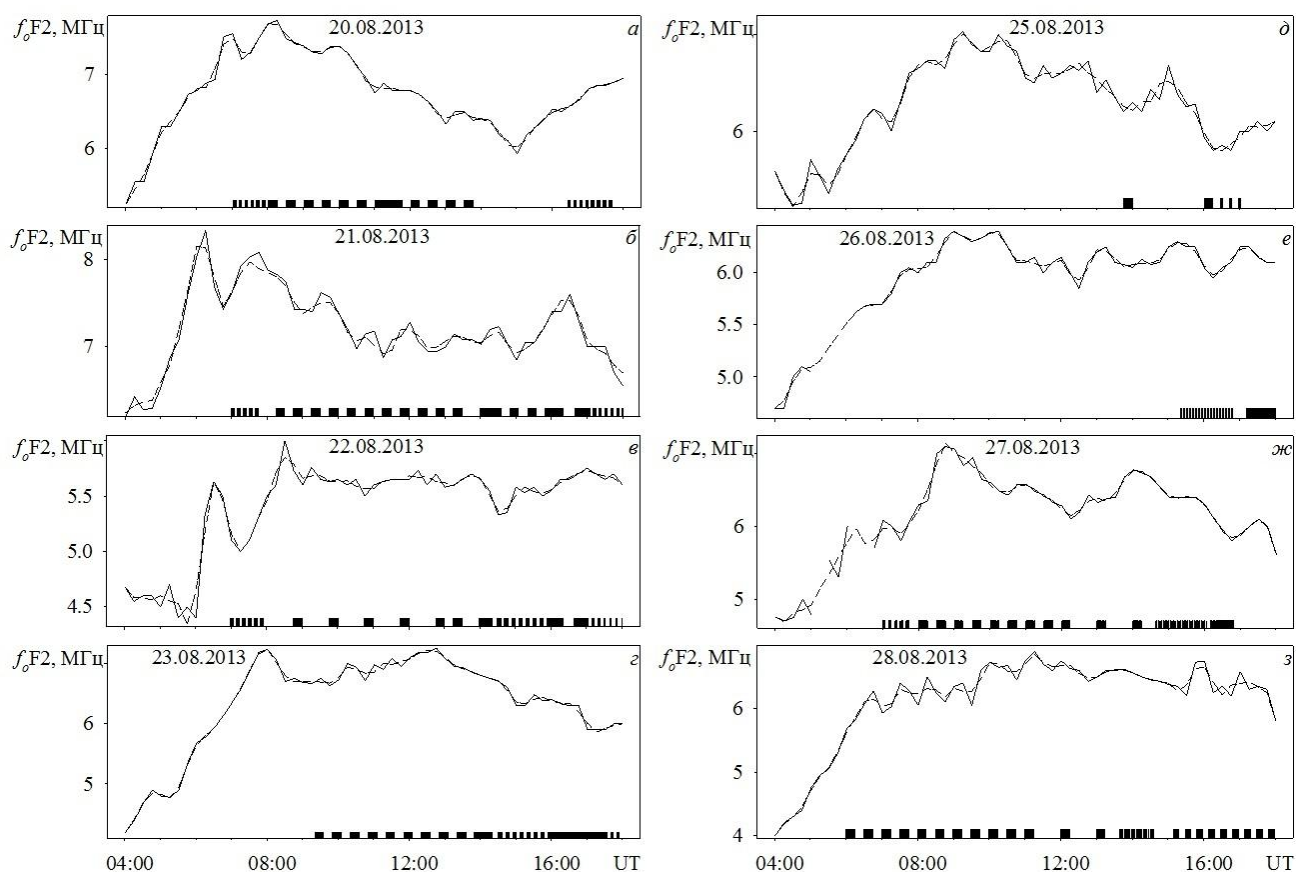


Рис. 5.9 Часові варіації критичної частоти шару F2 іоносфери поблизу м. Троїцьк

5.6.5 Часові варіації критичної частоти поблизу м. Прухониць

20 серпня 2013 р. з 04:00 до 10:30 спостерігалось збільшення згладжених значень критичної частоти від 4.5 до 7.1 МГц (рис. 5.10а). В інтервалах часу 09:30–12:00 і 12:30–15:00 мало місце збільшення f_oF2 приблизно на 0.5 МГц. З 16:00 відзначалося вечірнє збільшення f_oF2 . На повільні варіації критичної частоти накладалися її сплески величиною 0.09–0.14 МГц і тривалістю близько 15–30 хв.

21 серпня 2013 р. в інтервалах часу 05:30–06:45 і 07:00–08:30 значення f_oF2 збільшувалася на 0.7 і 1.5 МГц відповідно (див. рис. 5.10б). З 08:30 до 17:00 варіації згладжених значень f_oF2 були незначними. На регулярний хід критичної

частоти накладалися сплески величиною 0.11–0.22 МГц і тривалістю близько 15–30 хв.

22 серпня 2013 р. з 04:30 до 05:45, з 05:45 до 07:45 і з 08:00 до 09:30 спостерігалось зростання критичної частоти на 0.3, 0.5 і 0.3 МГц відповідно (див. рис. 5.10в). Приблизно з 09:30 до 18:00 згладжені значення f_oF2 практично не змінювалися й були близькі до 6.0 МГц. Повільні варіації f_oF2 супроводжувалися її сплесками величиною 0.12–0.18 МГц і тривалістю близько 15–30 хв.

23 серпня 2013 р. в інтервалі часу 05:20–12:15 критична частота спочатку збільшувалася від 4.3 до 7.3 МГц, потім з 12:15 до 16:00 вона зменшувалася до 6.7 МГц. В інтервалі часу 16:00–18:00 спостерігався сплеск частоти f_oF2 величиною близько 0.3 МГц (див. рис. 5.10г). У період роботи нагрівного стенда реєструвалися сплески f_oF2 величиною 0.22–0.33 МГц тривалістю 15–30 хв.

У контрольний день 25 серпня 2013 р. згладжені значення f_oF2 з 05:00 до 09:00 збільшувалися від 5.5 до 9.2 МГц (див. рис. 5.10д). В інтервалі часу 09:00–16:00 спостерігалось зменшення критичної частоти від 9.2 до 7 МГц. Повільні зміни f_oF2 супроводжувалися її сплесками величиною 0.1–0.6 МГц і тривалістю 30–60 хв.

26 серпня 2013 р. з 04:00 до 18:00 спостерігалось поступове збільшення регулярних значень f_oF2 від 4 до 7.5 МГц, на які накладалися квазіперіодичні варіації f_oF2 з періодом $T \sim 1$ год і амплітудою 0.2–0.3 МГц (див. рис. 5.10е).

27 серпня 2013 р. з 04:00 до 08:45 згладжені значення f_oF2 зростали від 3.5 до 6.2 МГц, з 09:00 до 11:00 убували приблизно на 0.5 МГц, з 11:00 до 13:00 знову збільшувалися на 1.2 МГц (див. рис. 5.10ж). В інтервалі часу 13:00–18:00 варіації критичної частоти були незначними. Як і в інші дні, повільні зміни f_oF2 супроводжувалися її сплесками величиною 0.15–0.25 МГц і тривалістю близько 15 хв.

28 серпня 2013 р. усереднена часова залежність f_oF2 була немонотонною (див. рис. 5.10з). На повільні варіації з характерним часом 1.5–2 години накладалися сплески f_oF2 величиною 0.15–0.25 МГц і тривалістю від 15 хв і більше.

5.6.6 Частота появи сплесків f_oF2

Як видно з рис. 5.8 – рис. 5.10, сплески f_oF2 завбільшки декілька десятих часток мегагерца спостерігалися як до, так і після включення нагрівного стенда, а також у контрольні інтервали часу. Їх тривалість зазвичай змінювалася від 10 до 60 хв. Вочевидь, що вони мали природне походження. В одних випадках, коли варіації f_oF2 були квазіперіодичні, має сенс зв'язати їх із проходженням внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГВ) в атмосфері, в інших випадках – з аперіодичними збільшеннями концентрації електронів в F-області іоносфери, що були викликані процесами, що супроводжують геокосмічні бурі.

Для доказу того, що протягом роботи нагрівного стенда виникали сплески f_oF2 , доцільно порівняти частоту появи сплесків в інтервали часу випромінювання стенда та у контрольний день. Для цього проміжки часу з 04:00 до початку роботи нагрівного стенда 25 і 26 серпня 2013 р., які розглядалися в якості контрольних днів, розбивалися на 30-ти хвилинні інтервали, що імітують режим роботи нагрівного стенда [+15 хв; –15 хв], і оцінювалася відносна частота появи аперіодичних сплесків f_oF2 і їх тривалість. Частота появи виявилася рівною 50, 58 і 58% для іонозондів «Гайдари», «Троїцьк» і «Прухониць» відповідно (табл. 5.7). Закон розподілу тривалостей сплесків в інтервалі [0; 30 хв] був близький до рівномірного. Ці числові значення свідчать про те, що події появи «сплесків» і провалів між ними, мають практично рівну вірогідність.

Для іонозонда «Гайдари» відносна частота появи сплесків, що слідували за включенням стенда в межах перших 15 хв, становила 76%, а для іонозондів «Троїцьк» і «Прухониць» – 68%. Більш низьке значення відносної частоти для двох останніх іонозондів пояснюється низькою частотою реєстрації іонограм (одна іонограма за 15 хв).

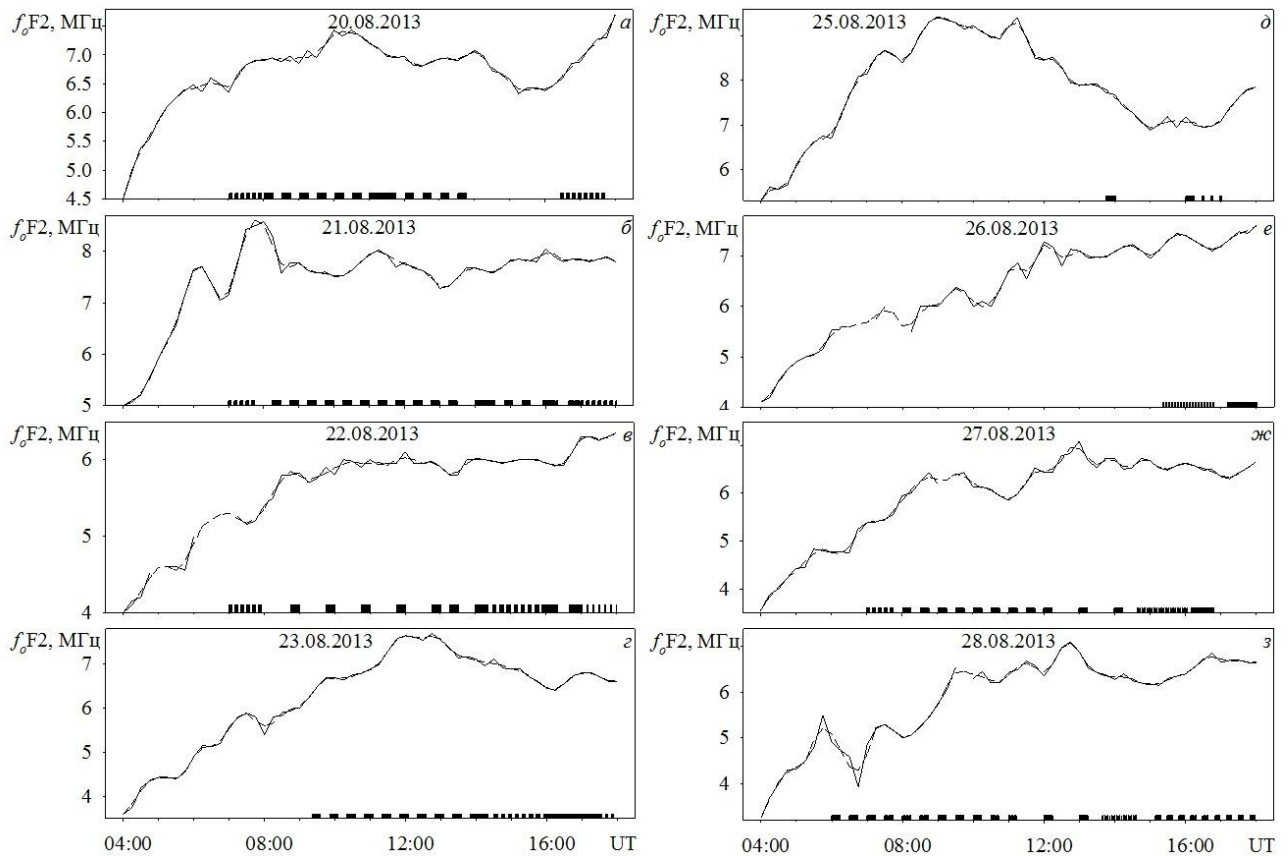


Рис. 5.10 Часові варіації критичної частоти шару F2 іоносфери поблизу м. Прухониць

Таблиця 5.7

Відносна частота появи сплесків f_oF2 (у дужках у контрольний день)

Іонозонд	Відносна частота, %
«Гайдари»	76 (50)
«Троїцьк»	68 (58)
«Прухониць»	68 (58)

5.6.7 Час запізнення та тривалість сплесків f_oF2

Наступними параметрами, які дозволяють розділити сплески f_oF2 природнього та штучного походження, є час запізнення та тривалість сплесків.

За даними іонозонда «Гайдари», де інтервал часу між двома сусідніми іонограмами становив 5 хв, після кожного включення стенда сплески реєструвалися, як правило, із часом запізнення щодо моменту включення стенда, близьким до 5 хв, рідше – до 10 хв, і тривали близько 10–15 хв.

У контрольний день тривалість сплесків змінювалася від 5 до 30 хв, а їх «час запізнення» – від 5 до 30 хв. Останнє означає, що «час запізнення» у часовому інтервалі, рівному 30 хв, розподілено за рівномірним законом. (Нагадаємо, що імітувався режим роботи стенда [+15 хв; –15 хв]).

За даними іонозондів «Троїцьк» і «Прухониць» час запізнення збурень, як правило, не перевищувало 15 хв. Точніше його визначити не вдається, тому що інтервал часу між іонограмами становив 15 хв. Тривалість сплесків була зазвичай близькою 15 хв.

5.6.8 Амплітуда сплесків критичної частоти та концентрації електронів

Межі зміни величини сплесків $f_o F2$ наведені в табл. 5.8 – табл. 5.10. Видно, що значення $\delta f_o F2$ зазвичай становили декілька десятих часток мегагерца. Практично такі ж значення були й у контрольний день, точніше, середньоквадратичне відхилення флуктуацій $f_o F2$ протягом роботи нагрівного стенда було $\sigma = 0.15\text{--}0.25$ МГц, а в контрольні інтервали часу $\sigma_n = 0.11\text{--}0.19$ МГц, тобто відношення сигнал / шум $q = (\sigma/\sigma_n)^2 \approx 1.86\text{--}1.73$. Знаючи $\delta f_o F2$, можна обчислити величину відносних збурень концентрації електронів $\delta_N \approx 2\delta f_o F2/f_o F2$.

Оцінки δ_N також наведені в табл. 5.8 – табл. 5.10. З таблиць видно, що значення δ_N у періоди роботи нагрівного стенда звичайно змінювалися від 3–4 до 10–13%. У контрольні дні ці значення були трохи менші: від 1.7 до 7.5%.

Найбільші (5.7–8.4%) (але не вище 10–13%) значення δ_N для штучних збурень зазвичай мали місце для іонозонда «Троїцьк», найменші (4.2–6.8%) – для іонозонда «Прухониць». Для іонозонда «Гайдари» значення δ_N були середніми та становили 3.8–7.5%.

5.6.9 Зв'язок з роботою нагрівного стенда

На користь того, що сплески критичної частоти викликані впливом потужного радіовипромінювання на іоносферу свідчать три факти. По-перше, відносна частота появи сплесків після включення нагрівного стенда була досить високою (76, 68 і 68%) для всіх трьох іонозондів. У контрольний день ця частота була 50, 58 і 58% відповідно (див. табл. 5.7). По-друге, час запізнення збурень для всіх включень стенда був приблизно тим самим. Звичайно, точність його оцінки залежала від частоти реєстрації іонограм. Також слабо змінювалася й тривалість сплесків. Сплески, не пов'язані з роботою стенда, слідували один за одним випадковим чином. По-третє, у паузах між включеннями стенда величина δf_oF2 зменшувалася, що свідчило про релаксацію концентрації електронів. По-четверте, значення σ трохи перевищували значення δ_N . При цьому $q = 1.73\text{--}1.86$.

Додамо, що параметри іоносферних збурень залежали від режиму роботи нагрівного стенда, стану космічної погоди, точніше, фази магнітної бурі, наявності природніх збурень і т.д.

Тому для підтвердження описаного ефекту потрібна постановка нових експериментів і залучення додаткових засобів діагностики.

5.7 Залежність від режиму роботи нагрівного стенда

Аперіодичні збурення мали час запізнення 5–10 хв і, швидше за все, воно не перевищувало 15 хв. Тому оптимальна тривалість нагрівання при створенні подібних збурень близька до 15 хв. Час релаксації концентрації електронів поблизу максимуму іонізації в денний час становить близько 10–20 хв [179]. Тому пауза в режимах нагрівання повинна бути близькою до цієї величини. Отже, зручними режимами для генерації сплесків f_oF2 були режими роботи стенда [+15 хв; –15 хв] і [+15 хв; –45 хв]. Останній режим мав місце 22 серпня 2013 р. Добра кореляція (коефіцієнт кореляції – 0.75) сплесків із включеннями

стенда в цей день спостерігалася найбільш чітко (див. рис. 5.8в). Добра кореляція (коефіцієнт кореляції – 0.83) мала місце також 28 серпня 2013 р. (див. рис. 5.9з).

Таблиця 5.8

Основні відомості про параметри збурень у серпні 2013 р. (іонозонд «Гайдари»)

Дата	Кількість включень (вимк.)	Кількість сплесків f_oF2	δf_oF2 , МГц	δ_N , %	Примітка
20 серпня	12	9	0.15–0.23	4.3–6.6	Режим [+5 хв; –5 хв]. $PG = 55$ МВт
21 серпня	15	11	0.10–0.30	2.5–7.5	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 80$ МВт
22 серпня	6 (6)	10	0.10–0.15	3.3–5.0	Режим несучої [+15 хв; –45 хв]. $PG = 100$ МВт
23 серпня	9	7	0.15–0.23	4.3–6.4	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 40$ МВт
25 серпня, 26 серпня	18	9	0.06–0.30	1.7–7.5	Контрольний день
27 серпня	7	4	0.15–0.38	4.3–10.8	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 85$ МВт
28 серпня	6	5	0.15–0.30	4.3–8.6	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 85$ МВт

Таблиця 5.9

Основні відомості про параметри збурень у серпні 2013 р. (іонозонд «Троїцьк»)

Дата	Кількість включень (вимк.)	Кількість сплесків f_oF2	δf_oF2 , МГц	δ_N , %	Примітка
20 серпня	12	6	0.17–0.26	4.9–7.3	Режим [+5 хв; –5 хв]. $PG = 55$ МВт
21 серпня	14	10	0.17–0.26	4.9–7.3	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 80$ МВт
22 серпня	6 (6)	7	0.12–0.18	4.2–6.3	Режим несучої [+15 хв; –45 хв]. $PG = 100$ МВт
23 серпня	9	7	0.17–0.26	4.9–7.3	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 40$ МВт
25 серпня, 26 серпня	12	7	0.08–0.16	2.5–5.0	Контрольний день
27 серпня	11	9	0.15–0.30	4.6–9.2	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 85$ МВт
28 серпня	11	8	0.33–0.41	10.5–13.0	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 85$ МВт

Таблиця 5.10

Основні відомості про параметри збурень у серпні 2013 р. (іонозонд «Прухониць»)

Дата	Кількість включень (вимк.)	Кількість сплесків f_oF2	δf_oF2 , МГц	δ_N , %	Примітка
20 серпня	12	8	0.07–0.12	2.4–4.9	Режим [+5 хв; –5 хв]. $PG = 55$ МВт
21 серпня	14	9	0.11–0.22	2.9–5.8	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 80$ МВт
22 серпня	6 (6)	7	0.12–0.18	4.0–6.0	Режим несучої [+15 хв; –45 хв]. $PG = 100$ МВт
23 серпня	9	5	0.22–0.33	6.3–9.4	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 40$ МВт
25 серпня, 26 серпня	12	7	0.11–0.22	2.4–4.9	Контрольний день
27 серпня	11	10	0.15–0.25	4.6–7.7	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 85$ МВт
28 серпня	11	8	0.15–0.25	5.0–7.1	Режим [+15 хв; –15 хв]. $PG = 85$ МВт

Сплески f_oF2 також виникали при роботі станда в режимі $[+5 \text{ хв}; -5 \text{ хв}]$. У цьому випадку збурення N не встигали релаксувати, і спостерігався «ефект нагромадження» збурень. Цей ефект спостерігався 20 серпня 2013 р. в інтервалах часу 07:30–07:45, 16:37–16:52 і 27 серпня 2013 р. в інтервалі часу 07:00–7:20 (див. рис. 5.8). «Ефект нагромадження» також, очевидно, мав місце 28 серпня 2013 р. при роботі станда в режимі $[+10 \text{ хв}; -10 \text{ хв}]$ (див. рис. 5.9з).

5.7.1 Характер збурень

Сплески критичної частоти в ряді випадків маскувалися квазіперіодичними (хвильовими) збуреннями, які також могли генеруватися потужним періодичним радіовипромінюванням. Прикладами таких хвильових збурень можуть бути збурення, що спостерігалися 20 серпня 2013 р. в інтервалах часу 07:50–08:30 і 16:45–17:40, а також 21 серпня 2013 р. з 17:30 до 19:00. Час запізнення квазіперіодичних збурень був близьким до 30 і 50 хв у нічний і денний час відповідно. При $R \approx 960$ км швидкість поширення збурень v була близька до 530 і 320 м/с, а їх амплітуда $\delta_{Na} \approx 3\text{--}5\%$, тобто приблизно така ж як δ_N . Перевищення нічного значення v над денним значенням пояснюється тим, що висота максимуму шару F2 у нічний час приблизно на 100 км більше, ніж у денний час. У той же час зі збільшенням висоти збільшується температура нейтралів T_n . Оскільки v пропорційно $T_n^{1/2}$, більшим висотам і T_n відповідають більші значення v .

Природа таких квазіперіодичних збурень зрозуміла: вони пов'язані з генерацією та поширенням ВГХ, що викликають іоносферні збурення, що переміщуються. Ці збурення детально досліджувалися в роботах [7, 137, 150, 199–204]. У цих роботах оцінена й швидкість переміщення квазіперіодичних збурень, залежно від часу доби й висоти вона дорівнювала 300–500 м/с. Близькість швидкостей поширення, оцінених у даній роботі, свідчить на користь того, що хвильові збурення в окремих випадках мають штучне походження.

5.7.2 Механізм аперіодичних збурень

Не викликає сумніву, що аперіодичні сплески критичної частоти, що корелюють із включеннями нагрівного стенда, викликані сплесками концентрації електронів. Єдиним розумним механізмом збільшення N на висотах F-області іоносфери може бути додаткова іонізація нейтралів потоками високоенергійних електронів, що висипають із радіаційного пояса Землі. Добре відомо, що в періоди геокоосмічних бур радіаційний пояс поповнюється високоенергійними частинками. Таким чином геокоосмічна буря виступає у ролі накопичувача частинок, які потім вивільняються під дією потужного радіовипромінювання. Цей механізм пропонується в роботах [137, 199]. Важливо відзначити, що висипання електронів з енергіями $\varepsilon_e = 102$ кеВ, стимульоване радіовипромінюванням стенда «Сура», реєструвалося на супутнику DEMETER [205, 206].

Рівняння балансу концентрації електронів в F-області іоносфери без врахування процесів переносу має вигляд (див., наприклад, [5]):

$$\frac{dN}{dt} = q - \beta N,$$

де q – швидкість утворення електронів, β – коефіцієнт лінійної рекомбінації. У квазістаціонарному випадку $q \approx \beta N$. Тоді при збільшенні q на Δq маємо:

$$\Delta q \approx \beta \Delta N = \beta N_0 \delta_N,$$

де N_0 – незбурене значення N . При цьому густина потоку енергії, затрачувана на іонізацію нейтралів (див., наприклад, [55]),

$$\Pi = 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q = 2\varepsilon_i \Delta z \beta N_0 \delta_N,$$

де Δz – товщина іонізуючого шару, $\varepsilon_i \approx 35$ еВ – енергія іонізації однієї молекули електронами, що висипають. Густина потоку електронів з енергією ε_e

$$\Pi_e = \frac{\Pi}{\varepsilon_e} = 2\Delta z \beta N_0 \delta_N \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e}.$$

При $\delta_N = 1-10\%$, $\Delta z = 50$ км, $N_0 = 5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $\beta = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [2], $\varepsilon_e = 10^2$ кеВ маємо $\Pi_e \approx 1.8 \cdot 10^8 - 1.8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, $\Pi \approx 2.8 \cdot 10^{-6} - 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Відмітимо, що у вимірах 2010–2012 рр. [200–202], проведених у спокійних геомагнітних умовах подібних сплесків f_oF2 , що слідували за включенням нагрівного стенда, не виявлено. Це свідчить на користь того, що для висипання високоенергійних електронів потрібно їх попереднє накопичення в радіаційному поясі, цьому сприяють геокоsmічні бурі.

Додамо, що приблизно такі ж густини потоку електронів під час помірних магнітних бур спостерігалися авторами [196].

При радіусі збуреної області $R \approx 2200$ км (відстань від нагрівного стенда до іонозонда «Прухониць») площа, охоплена висипанням електронів, $S \approx 1.5 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$. Така оцінка S являє собою оцінку "знизу". Реально характерний масштаб може бути більше 2200 км. Тоді повна потужність потоку електронів, затрачувана на іонізацію електронів, становить $P_e = \Pi S = 4.2 \cdot 10^7 - 4.2 \cdot 10^8$ Вт. При тривалості процесу висипання $\Delta T = 10^3$ с його енергія близька до $4.2 \cdot 10^{10} - 4.2 \cdot 10^{11}$ Дж. При потужності трьох радіопередавальних пристроїв $P \approx 5 \cdot 10^5$ Вт для коефіцієнта тригерності маємо: $K_{\text{т}} = P_e / P \approx 84 - 840$.

При більших значеннях площі S величина $K_{\text{т}}$ ще більше.

Важливо, що $K_{\text{т}} \gg 1$, тобто при стимульованому висипанні частинок має місце тригерний ефект. У цьому полягає одне із проявів взаємодії підсистем у системі ЗАІМ.

Відмітимо, що стимульоване потужним радіовипромінюванням висипання електронів може спостерігатися тільки тоді, коли магнітні пастки радіаційного пояса заповнені електронами відповідних енергій, тобто при певному стані космічної погоди, коли вся система перебуває в метастабільному стані.

Відомо, що магнітні пастки можуть залишатися заповненими протягом двох тижнів після настання головної фази магнітної бурі і їх заповнення. Для помірних магнітних бур, можливо, це триває протягом декількох діб.

Таким чином, стимульовані потужним радіовипромінюванням процеси в системі ЗАІМ, швидше за все, були підготовлені слабкими та помірними геокоsmічними бурями, що мали місце в останній декаді серпня 2013 р.

Додамо, що в роботі [205] висипання електронів спостерігалось на віддаленнях до 300 км від області іоносфери, що опромінюється потужним радіовипромінюванням. Питання переносу збурень на більші відстані (~2000–3000 км) вимагає спеціального розгляду. Імовірно, розширенню області висипань до зазначених розмірів сприяє генерація полів поляризації, які виникають при висипанні електронів спочатку тільки в межах магнітної силової трубки, що опирається на область іоносфери, що опромінюється потужним радіовипромінюванням. Характерний початковий поперечний розмір трубки близько 80 км [207]. Те, що розмір області висипань, описаний у роботі [206], досягав 300 км, свідчить на користь запропонованого механізму. Роль полів поляризації більш докладно розглянута в роботах [207–209].

Більш детальна взаємодія підсистем у системі ЗАІМ обговорюється в роботах [7, 152, 204]. Сплески частоти $f_{\min}$, які описані в роботах [7, 152, 204], і f_oF2 , що проаналізовані в даній роботі, мають єдину природу, пов'язану з додатковою іонізацією атмосфери. Відмінність може полягати в енергії потоків, електронів що висипаються. Додаткова іонізація в нижній іоносфері спостерігається при $\epsilon_e \sim 10^2$ кеВ, а в F-області вона може виникати вже при $\epsilon_e \sim 1\text{--}10$ кеВ.

Таким чином, є підстави вважати, що відносно слабкий потік потужного радіовипромінювання може виступати в якості тригера для ряду процесів у системі ЗАІМ, що перебуває в метастабільному стані. Природно, що це твердження потребує додаткової перевірки незалежними методами діагностики збурень.

Висновки до розділу 5

1. Випромінювання нагрівного стенда в режимі [+30 хв; –30 хв] супроводжувалося збільшенням мінімальної частоти $f_{\min}$, що спостерігалася на іонограмах, з періодами 0.5 і 1 год.

2. Найбільші сплески $f_{\min}$ мали місце для іонозонда в м. Троїцьк. При цьому $f_{\min}$ збільшувалася від 1.8 до 3.0–3.2 МГц. Збільшення $f_{\min}$ у с. Гайдари, м. Прухониць та у с.м.т. Васильсурську 29 серпня 2012 р. не перевищувало 0.4 і 0.3 МГц відповідно.

3. Збільшення $f_{\min}$ свідчило про зростання концентрації електронів N і поглинання зондуючих радіохвиль, і по своїх часових масштабах не могло бути пов'язане зі збільшенням температури електронів. Оцінки показали, що N збільшувалася в нижній іоносфері в середньому по висоті в 3, 1.4, 1.3 і 1.3–1.4 рази над іонозондами «Троїцьк», «Гайдари», «Прухониць» та «Васильсурськ».

4. Залишається незрозумілою причина незначних змін $f_{\min}$ на іонозонді «Васильсурськ» 28 і 30 серпня 2012 р.

5. У часових варіаціях критичної частоти шару F2 виявлені аперіодичні сплески величиною 0.1–0.4 МГц, що супроводжували вплив на іоносферу потужного радіовипромінювання тривалістю 15 хв. Час запізнення збурень відносно моменту включення нагрівного стенда становив 5–15 хв, а його тривалість 10–15 хв. Горизонтальний розмір збуреної області іоносфери був не менше 2200 км. Величина збурень зі збільшенням відстані від нагрівного стенда трохи зменшувалася.

6. У ряді випадків спостерігався «ефект накопичення» збурень, коли аперіодичні сплески виникали при роботі нагрівного стенда в режимі [+5 хв; –5 хв].

7. Виявлені сплески критичної частоти можуть маскуватися хвильовими збуреннями природного та штучного походження. В останньому випадку хвильові збурення генерувалися потужним радіовипромінюванням, про що свідчить їх оцінена швидкість поширення (близько 300–500 м/с) і її залежність від висоти. У природних умовах місце генерації хвильових збурень зазвичай невідоме, що не дозволяє оцінити швидкість їх поширення.

8. Аперіодичні сплески критичної частоти свідчать про збільшення на 1–10% концентрації електронів в області F іоносфери, що визначається, швидше за все, висипанням високоенергійних електронів з радіаційного пояса Землі, що

перебуває в метастабільному стані. Такий стан міг бути підготовлений слабкими та помірними геокосмічними бурями, що мали місце в період вимірювальної кампанії. Виявлені закономірності вимагають підтвердження та більш детального дослідження із залученням інших методів діагностики та вимірів потоків електронів на низькоорбітальних ШСЗ.

Основні результати розділу опубліковані в роботах автора [8, 12, 22, 23].

ВИСНОВКИ

В дисертації представлене нове розв'язання актуальної наукової задачі в галузі фізики іоносфери, яке полягає в дослідженні характеристик аперіодичних та квазіперіодичних збурень, які виникали під час дії унікальних або рідкісних джерел енерговиділення. З цією метою, за результатами обробки даних іонозондових спостережень, розв'язані наступні задачі:

1) Досліджена реакція концентрації електронів F-області іоносфери на сонячні затемнення 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. над м. Харків, а також в масштабах Європи.

2) Досліджена реакція концентрації електронів F-області іоносфери на падіння Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 р.

3) Досліджена реакція іоносфери при впливі на неї потужного радіовипромінюванням радіотехнічної системи, віддаленої від місця спостереження на відстань близько 1000 км.

4) Досліджені добово-сезонні варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери в періоди росту та спаду сонячної активності.

Отримані результати дозволяють доповнити відомості про квазіперіодичні і аперіодичні збурення, які, обмежують потенційні характеристики радіосистем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації та т.п.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Встановлено, що СЗ 4 січня 2011 р. викликало істотні варіації параметрів іонограм, що свідчать про значну перебудову іоносфери протягом затемнення. Зокрема, критичні частоти шарів F2 і E поблизу головної фази затемнення зменшилися на 1.9 МГц і 0.4 МГц, або на 31 % і 16 % відповідно.

СЗ супроводжувалося помітним зменшенням концентрації електронів на висотах середньої іоносфери. Так, у максимумі шару F2 відносне зменшення концентрації електронів склало приблизно 52 %. Час запізнення варіацій N складав близько 16.0 ± 1.4 хв. В E-області N зменшилося приблизно на 30 %.

СЗ призвело до збільшення діючої висоти відбиття в максимумі шару F2 до 70 км, та збільшення висоти модельного параболічного шару h_p до 10 км.

Протягом затемнення іонограми були дифузійними, що відображало факт сильної турбулізації іоносфери.

Підтверджено, що в максимумі шару F2 справедливий лінійний закон рекомбінації, в E-області – квадратичний закон. Фізико-хімічні процеси в цих шарах відповідали існуючим уявленням.

СЗ супроводжувалося підсиленням (у порівнянні з контрольним днем) відносної амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів приблизно в 2 рази (до 8 і 16% для періодів 30 і 60 хв). та зміною періодів коливань. Спектральні складові квазіперіодичних збурень відповідали діапазону внутрішніх гравітаційних хвиль.

2. Вперше проведено дослідження просторового розподілу в масштабах Європи збурень протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. При цьому встановлене наступне.

Часткове СЗ над Європою з фазою 0.55–0.95 призвело до значного збурення F-області іоносфери. Критична частота f_oF2 зменшувалася на 1–2 МГц або на 5–25%. Тривалість збурення досягала 2.5–3 год. Мінімальні значення f_oF2 запізнювалися відносно моменту часу настання головної фази затемнення на 5–30 хв. Зменшення концентрації електронів досягало 23–51%.

СЗ призвело до збільшення висоти h_p на 10–70 км або 3–20%. Тривалість ефекту становила 1.5–2 год. Максимальні значення h_p спостерігалися приблизно через 20–30 хв після настання максимальної фази затемнення.

СЗ супроводжувалося хвильовими збуреннями з періодом 30–100 хв. Крім того, поблизу головної фази спостерігався збій фази коливання. У день затемнення період хвильових збурень помітно відрізнявся від періоду в контрольні дні. Амплітуда хвильових збурень на більшості іоносферних станцій у день затемнення збільшилася приблизно в 2–3 рази.

Іоносферна буря суттєво вплинула на величину ефектів, викликаних СЗ.

3. Вперше за допомогою мережі іонозондів виконані спостереження за великомасштабними збуреннями в нижній іоносфері, що були викликані впливом потужного періодичного радіовипромінювання. При цьому встановлене наступне.

Випромінювання нагрівного стенда в режимі [нагрівання – 30 хв; пауза – 30 хв] супроводжувалося збільшенням мінімальної частоти $f_{\min}$, що спостерігалася на іонограмах, з періодами 0.5 і 1 год.

Найбільші сплески $f_{\min}$ мали місце для іонозонда «Троїцьк». При цьому $f_{\min}$ збільшувалася від 1.8 до 3.0–3.2 МГц. Збільшення $f_{\min}$ у с. Гайдари, м. Прухониць та с.м.т. Васильсурську 29 серпня 2012 р. не перевищувало 0.4 і 0.3 МГц відповідно.

Збільшення $f_{\min}$ свідчило про зростання концентрації електронів N і поглинання зондуєчих радіохвиль і за своїми часовими масштабами не могло бути пов'язане із збільшенням температури електронів. Оцінки показали, що N збільшувалася в нижній іоносфері в середньому по висоті в 3, 1.4, 1.3 і 1.3–1.4 рази над іонозондами «Троїцьк», «Гайдари», «Прухониць» та «Васильсурськ».

Залишається незрозумілою причина незначних змін $f_{\min}$ на іонозонді у с.м.т. Васильсурськ 28 і 30 серпня 2012 р.

4. Вперше за допомогою мережі іонозондів виконані спостереження за великомасштабними збуреннями в шарі F2, що були викликані впливом потужного періодичного радіовипромінювання. При цьому встановлено наступне.

У часових варіаціях критичної частоти шару F2 виявлені аперіодичні сплески величиною 0.1–0.4 МГц, що супроводжували вплив на іоносферу потужного радіовипромінювання тривалістю 15 хв. Час запізнення збурень стосовно моменту включення нагрівного стенда становив 5–15 хв, а його тривалість 10–15 хв. Горизонтальний розмір збуреної області іоносфери був не менше 2200 км. Величина збурень зі збільшенням відстані від нагрівного стенда трохи зменшувалася.

У ряді випадків спостерігався «ефект накопичення» збурень, коли аперіодичні сплески виникали при роботі нагрівного стенда в режимі [нагрівання – 5 хв; пауза – 5 хв].

Виявлені сплески критичної частоти можуть маскуватися хвильовими збуреннями природного та штучного походження. В останньому випадку хвильові збурення генерувалися потужним радіовипромінюванням, про що свідчить їх оцінена швидкість поширення (близько 300–500 м/с) і її залежність від висоти.

Аперіодичні сплески критичної частоти свідчать про збільшення на 1–10% концентрації електронів в області F іоносфери, що визначається, швидше за все, висипанням високоенергійних електронів з радіаційного пояса Землі, який перебуває в метастабільному стані.

5. За допомогою мережі іонозондів виконані унікальні спостереження за великомасштабними збуреннями в іоносфері, що були викликані прольотом і вибухом Челябінського космічного тіла. При цьому встановлено наступне.

Падіння Челябінського космічного тіла супроводжувалося помітними змінами характеру часових варіацій частоти f_oF_2 і їх спектрального складу.

Від місця падіння метеорита поширювалися хвильові збурення, що мали середню швидкість близько 600–700 м/с, амплітуду відносних збурень концентрації електронів – 10–20 % і період 70–135 хв. Такі параметри властиві атмосферним гравітаційним хвилям і рухомим іоносферним збуренням, що ними викликаються.

Хвильові збурення поширювалися на відстані не менш 3 тис. км від місця падіння метеорита.

У світлий час доби в іоносфері спостерігалися збурення концентрації електронів тривалістю близько 6–7 годин, які могли бути викликані довгоживучими вихрами у верхній атмосфері. Відносна амплітуда при цьому становила 10–20 %.

6. Вперше на фазі росту та спаду сонячної активності в її 24-ому циклі виконані систематичні дослідження аперіодичних і квазіперіодичних збурень у

шарі F2 іоносфери для чотирьох характерних геофізичних періодів і встановлено наступне.

Регулярні добово-сезонні варіації концентрації електронів і її ХЗ у максимумі шару F2 у періоди росту та спаду сонячної активності в цілому близькі й повністю відповідають існуючим уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері.

В усі сезони в періоди росту та спаду сонячної активності на регулярний хід концентрації електронів накладалися її квазіперіодичні варіації.

В усі сезони в шарі F2 іоносфери в період спаду сонячної активності проявлялося переважне ХЗ концентрації електронів із середнім періодом 140–260 хв, що має абсолютну амплітуду $(2–20) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ і відносну амплітуду, рівну 0.1–0.2.

Тривалість переважного коливання в різні сезони становила від 5–7 до 24 год.

Епізодично в спектрі варіацій N також виникали коливання з періодами близько 60, 90 і 120 хв. Їх амплітуда була в кілька разів менше амплітуди переважаючого коливання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 480 с.
2. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. Москва: Наука, 1973. 272 с.
3. Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. Springer – Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 1978. 372 p.
4. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. Итоги науки и техники. Сер. "Геомагнетизм и высокие слои атмосферы", Т. 9. Москва: ВИНТИ, 1989. 138 с.
5. Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. 448 с.
6. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2017. 468 с.
7. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 4. С. 41–52.
8. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 4. С. 353–361.
9. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Аперiodические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере. *Известия вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57, № 2. С. 110–128.
- Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Aperiodic large-scale disturbances in the lower ionosphere: ionosonde observation results. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2014. Vol. 57, № 2. P. 100–116, doi: 10.1007/s11141-014-9496-7.

10. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения сопровождавшие пролет челябинского тела. *Кинематика и физика небесных тел* : науч.- теорет. журн. 2014. Т. 30, № 3. С. 27–42.

Chernogor L. F., Barabash V. V. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2014. Vol. 30, №. 3. P. 126–136. DOI: 10.3103/0884591314030039

11. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20, № 4. С. 311–331.

12. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Эффекты воздействия мощными радиоизлучением на ионосферу на фоне умеренных геокосмических бурь: результаты наблюдений с помощью ионозондов. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2016. № 2 (30). С. 6–27.

13. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: суточно-сезонные вариации в период спада солнечной активности. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 3. С. 212–221.

14. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Радіофізика та іоносфера"*. 2011. № 44. С. 107–111.

15. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Изменения концентрации электронов в слое F2 вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствия. *Вісник національного технічного університету "ХПІ". Серія: Радіофізика та іоносфера*. 2013. № 33 (1066). С. 56–61.

16. Барабаш В. В., Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда. *Дистанционное радиозондирование ионосферы: сборник тезисов конференции молодых ученых*. (г. Харьков, 12 – 15 апреля 2011 г.). Харьков, 2011. С. 52.

17. Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождавших солнечное затмение 4 января 2011 г. *11-th Ukrainian conference on space research: abstracts*. (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, August 29 – September 2, 2011). Kyiv, 2011. P. 35.

18. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождавших падение Челябинского метеорита. *13-th Ukrainian conference on space research: abstracts*. (Yevpatoria, Crimea, Ukraine. 2 – 6 September, 2013). Kyiv, 2013. P. 48.

19. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Результаты ионозондовых наблюдений крупномасштабных апериодических возмущений в нижней ионосфере. *Remote Radio Sounding of the Ionosphere: Book of Abstracts International School-Conference*. (Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine September, 30 – October, 4, 2013.). Kharkiv, 2013. P. 42.

20. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Сезонно-добові варіації хвильових збурень концентрації електронів в іоносферному шарі F2. *XXI Міжнародна науково-практична конференція: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: збірник тез доповідей*. Ч. III. Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. (Харків, Україна, 29–31 травня 2013 р.). Харків, 2013. С. 207.

21. Barabash V., Chernogor L., Panasenko S., and Domnin I. Ionospheric manifestations of acoustic-gravity waves under quiet and disturbed conditions. *EGU General Assembly–2014: Geophysical Research Abstracts Vol. 16*, EGU2014-6162, 2014. P. 6162.

22. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения апериодических крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере. *Международная научная конференция MicroCAD: Секція №17–Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера: збірник тез*. (Харків, НТУ «ХПИ», 2014). Харків, 2014. Ч. III.– С. 246.

23. Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Large-scale aperiodic disturbances in the D- and E-regions of ionosphere due to the impact of HF high-power

radio transmission: data from a network of ionosondes. *10-th International Conference "Problems of Geocosmos": Book of Abstracts.* (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6 – 10, 2014). St. Petersburg, 2014. P. 140.

24. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения эффектов солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Европой. Взаимодействие *полей и излучения с веществом: XIV конференция молодых ученых: труды конференции.* (г. Иркутск, Россия, 14–18 сентября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 98–99.

25. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации вблизи максимума солнечной активности. *17-th Ukrainian conference on space research.* (Odesa, Ukraine, August, 21 – 25, 2017). Odesa, 2017. P. 154.

26. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. Москва: Наука, 1972. 564 с.

27. Кравцов Ю. А., Фейзулин З. И., Виноградов А. Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. Москва: Радио и связь, 1983. 224 с.

28. Davies K. Ionospheric radio. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990. 580 p.

29. Яковлев О. Н. Космическая радиофизика. Москва: Научная книга, 1998. 432 с.

30. Распространение радиоволн / О. Н. Яковлев и др Москва: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.

31. Дикий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 196 с.

32. Yen K. S., Liu C. H. Theory of ionospheric waves. London: Academic Press, 1972. 464 p.

33. Beer T. Atmospheric waves. N.Y., Toronto, 1974. 315 p.

34. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. Москва: Наука, 1974. 256 с.

35. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. Москва: Мир, 1978. 532 с.

36. Волны и излучение верхней атмосферы / С. В. Авакян и др. Алма-Ата: Наука, 1981. 167 с.
37. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. Москва: Энергоиздат, 1982. 136 с.
38. Волновые возмущения в ионосфере / Под ред. В. И. Дробжева.— Алма-Ата: Наука, 1987. 172 с.
39. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric hights. *Can. J. Phys.* 1960. Vol. 38, P. 1441–1481.
40. Tolstoy I. Long-Period Gravity Waves in the Atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, № 18. P. 4605–4622.
41. Chimonas G. Observations of Waves in the Ionosphere. *Planet and Space Sci.* 1970. Vol. 18, № 4. P. 591–605.
42. Yen K. C., Liu C. H. Acoustic gravity waves in the upper atmosphere. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1974. Vol. 12, P. 193–216.
43. Francis S. H. A Theory of medium-scale travelling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, № 34. P. 5245–5260.
44. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1975. Vol. 37. P. 1011–1054.
45. Григорьев Г. С., Чунчuzов Е. П. Акустико-гравитационные волны в атмосфере. В кн.: Полярные сияния и свечения ночного неба. Москва: Наука. 1975. № 23. С. 5–21.
46. Пономарев Е. А., Ерущенков А. И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (Обзор). *Изв. вузов. Радиофизика.* 1977. Т. 20, № 12. С. 1773–1789.
47. Williams P. J. S. Tides Atmospheric gravity waves and travelling disturbances in the ionosphere. *Modern ionospheric science. A collection of articles published on the occasion of the anniversary: “50 years of ionospheric research in Lindau”.* 1996. P. 136–180.
48. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли. *Изв. вузов. Радиофизика.* 1999. Т. 42, № 1. С. 3–25.

49. Литвиненко Л. Н., Ямпольский Ю. М. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде. Харьков: РИНАН, 2005. 331 с.
50. 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.
51. 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. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. Т. 46, № 2. С. 193–208.
52. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 2. Анализ результатов наблюдений и моделирование. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006. Т. 46, № 2. С. 209–218.
53. Руководство URSI поинтерпретации и обработке ионограмм. Москва: Наука, 1987. 342 с.
54. Грудинская Г. П. Распространение радиоволн / Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: "Высш. школа", 1975. 280 с.
55. Домнин И. Ф., Черногор Л. Ф. Физика геокосмических бурь: монография. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2014. 408 с.
56. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (Обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. Т. 25, № 5. С. 705–721
57. Eccles W. H. Effect of the eclipse on wireless telegraphic signals. *Electrician*. 1912. Vol. 69. P. 109–117.
58. Mimno H. R., Wang P. H. Continuous Kennelley – Heaviside layer records of a solar eclipse (with suggestions of a corpuscular effect on Appleton layer). *Proc. Inst. Radio Engrs*. 1933. Vol. 21. P. 529–545.

59. Васильев К. Н., Велешин А. С., Косенков А. Р. Ионосферный эффект солнечного затмения 15 февраля 1961 г. по наблюдениям в Москве. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. Т. 1, № 2. С. 277–278.
60. Данилкин Н. П., Коченова Н. А., Свечников А. М. Состояние ионосферы над Ростовом-на-Дону в период солнечного затмения 15 февраля 1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. Т. 1, № 4. С. 612–615.
61. Шапиро Б. С., Шашунькина В. М. Движения в области F ионосферы над Тбилиси в период затмения 15.02.1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. Т. 1, № 5. С. 760–765.
62. Шашунькина В. М., Турбин Р. И. Предварительные результаты наблюдений ионосферного эффекта солнечного затмения 15.II.1961 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. Т. 1, № 5. С. 835–838.
63. Суханова Р. Д. Ионосферный эффект солнечного затмения 15.02.1961 г. по наблюдениям в Солахарде. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. Т. 1, № 6. С. 1066–1067.
64. Гришкевич Л. В., Васин В. А. Об эффектах в ионосфере, наблюдавшихся в периоды солнечных затмений 02.12.1956 г. и 15.02.1961 г. в Горьком. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961. Т. 1, № 6. С. 949–954.
65. Klobuchar J. A., Whitney H. E. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70, № 5. P. 1254–1257.
66. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973 / A. N. Hunter et al. *Nature*. 1974. Vol. 250. P. 205–206.
67. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 1984. Vol. 19, № 3. P. 769–777.
68. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data / E. L. Afraimovich et al. *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, № 4. P. 465–468.

69. Ионосферные эффекты солнечного затмения 29 марта 2006 г. над Казахстаном / Э. Л. Афраймович и др. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47. № 4. С. 491–500.
70. Evans J. V. An F region eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70. P. 131–142.
71. Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill / J. E. Salah et al. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91 № A2. P. 1651–1660.
72. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года / Л. А. Акимов и др. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 2002. № 2. С. 25–63.
73. Особенности атмосферно-ионосферных эффектов солнечного затмения 31 мая 2003 года: результаты оптических и радиофизических наблюдений в Харькове / Л. А. Акимов и др. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 3. С. 55–70.
74. Atmospheric-ionospheric effects of the solar eclipse of May 31, 2003, in Kharkov / L. A. Akimov et al. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2005. Vol. 45, № 4. P. 494–518.
75. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений / В. П. Бурмака и др. *Космічна наука і технологія*. 2007. Т. 13, № 6. С. 74–86.
76. 21. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Effects of solar eclipse of March 29, 2006, in the ionosphere and atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. Vol. 48, № 3. P. 337–351.
77. Домнин И. Ф., Емельянов Л. Я., Черногор Л. Ф. Динамика ионосферной плазмы над Харьковом во время солнечного затмения 4 января 2011 г.. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 2. С. 132–145.
78. Bertin F., Hughes K. A., Kersley L. Atmospheric waves induced by the solar eclipse of 30 June 1973. *J. Atmos. Terr. Phys.* Vol. 39(4). P. 457–461. DOI:10.1016/0021-9169(77)90153-2.

79. Sen Gurta A., Goel G. K., Mathur B. S. Effect of the 16 February 1980 solar eclipse on VLF propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980. Vol. 42. № 11/12. P. 907–909.
80. Cheng K., Huang Y.-N., Chen S.-W. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, № A1. P. 103–111.
81. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse / C. R. Huang et al. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, № A1. P. 79–94.
82. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. / Б. Б. Борисов и др. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2000. Т. 40, № 3. С. 94–103.
83. Урядов В. П., Леонов А. М., Понятов А. А. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000. Т. 43, № 8. С. 682–686.
84. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5, № 4. С. 348–360.
85. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network / T. Farges et al. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2001. Vol. 63. P. 915–924.
86. Cheng K., Huang Y. N., Chen S.W. Ionospheric effects of the solar eclipse of September 23, 1987, around the equatorial anomaly crest region. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, № A1. P. 103–111. DOI:10.1029/91JA02409.
87. Atmos J. Special Eclipse Issue (The eclipse of 7 March 1970). *Terr. Phys.* 1972. Vol. 34, P. 559–739.
88. Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes / M. R. Deshpande et al. *Proc. Indian. Nat. Acad. Sci.* 1982. Vol. A48, № 3. P. 427–433.

89. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля – ионосфера / В. Г. Безродный и др. Москва: Наука, 1984. 144 с.
90. TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 February 1980 / P. V. S. Rama Rao et al. *Proc. Indian Nat. Acad. Sci.* 1982. Vol. 48, № 3. P. 434–438.
91. Roble R. G., Emery B. A., Ridley E. C. Ionospheric and thermospheric response over Millstone Hill to the May 30, 1984, annual solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, № A2. P. 1661–1670.
92. Падение метеорита Челябинск : [Электронный ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу : http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск
93. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. Монография. Москва: Наука, 1981. 416 с.
94. Кручиненко В. Г., Математико-фізичний аналіз метеорного явища: Монографія. Київ: Наукова думка, 2012. 294 с.
95. Кометно-астероидная опасность, истина и вымыслы / К. И. Чурюмов и др. Киев-Баку, 2012. 178 с.
96. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
97. Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В.В. Адушкина и И. В. Немчинова. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.
98. Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. Аэродинамика болидов. Москва: Наука. Физматлит, 1995. 240 с.
99. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. Монография. Харків: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
100. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела / Под ред. В. А. Алексеева, А. В. Орлова, С. Г. Захарова, Е. В. Сюткиной // Материалы конференции "Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль". Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21 – 22 июня

2013 г.). Администрация Чебаркульского городского округа; Институт астрономии РАН. Челябинск: "Край Ра". 2013. С. 148–152.

101. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита "Челябинск". *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23–40.

102. Черногор Л. Ф. Электрические, магнитные, электромагнитные и плазменные эффекты Челябинского метеорита. *Глобальная электрическая цепь*. Материалы Всероссийской конференции. Борок, 28 октября 1 ноября 2013 г. Ярославль, 2013. С. 112–113.

103. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97–104.

104. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2013. Vol. 86, № 4. P. 136–139.

105. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 4 (18), № 3. С. 47–54.

106. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита "Челябинск". *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 3. С. 231–243.

107. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / В. В. Алпатов, и др. Мосува: ФГБУ «ИПГ», 2013. 37 с.

108. Геохимия. 2013. Т. 51, № 7. (Тематический выпуск).

109. Астрономический вестник. 2013. Т. 47, № 4. (Тематический выпуск).

110. Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, Агентство СІР Челябинской ОУНБ. Челябинский государственный краеведческий музей. 2014. 694 с.

111. 500-kilotone airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors / P. G. Brown et al. *Nature*. 2013. Vol. 503. P. 238–241.

112. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization / O. P. Popova et. al. *Science*. 2013. Vol. 342. P. 1069–1073.
113. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization / O. P. Popova, et al. *Science*. 2013 Vol. 342. 146 p. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1.
114. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида. Динамические процессы в геосферах сб. научн. тр. ИДГ РАН. Вып. 5. Специальный выпуск. Москва: ГЕОС, 2014. 160 с.
115. Черногор Л. Ф. Челябинский метеорит: самый большой удар из космоса за последние 100 лет. *Universitates*. 2013. № 2. С. 59–63.
116. Черногор Л. Ф. Челябинский метеорит – предвестник космической кары. Часть 1. *Наука и техника*. 2013. № 6. С. 2–6.
117. Черногор Л. Ф. Челябинский метеорит – предвестник космической кары. Часть 2. *Наука и техника*. 2013. № 7. С. 5–11.
118. Черногор Л. Ф. Життя на крихтній і вразливій планеті: про що нагадав нам Челябінський метеорит. *Світогляд*. 2013. № 3. С. 66–69.
119. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита / Л. Ф. Черногор и др. *Космічна наука і технологія*. 2013. Т. 19, № 6. С. 38–46.
120. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54, № 5. С. 658–669.
121. Chernogor L. F. Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. Vol. 54, N. 5. P. 613–624.
122. Черногор Л. Ф. Радарное обнаружение миниастероидов. Известие вузов. *Радиоэлектроника*. 2013. Т. 56, № 11. С. 54–62.
123. Chernogor L. F. Radar detection of mini-asteroids. *Radioelectronics and communications systems*. 2013. Vol. 56, № 11. P. 544–551.
124. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Материалы*

Всероссийской научной конференции «Метеорит Челябинск – год на Земле». Челябинск. 2014. С. 229–265.

125. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2015. Т. 55, № 3. С. 370–385.

126. Chernogor L. F. Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55, №. 3. P. 353–368.

127. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых эффектов, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г.. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка*. 2016. Вип. 25. С. 70–73.

128. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Кинематика и физика небесных тел*. 2017. Т. 33, № 2. С. 60–72.

129. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. The parameters of infrasonic waves generated by Chelyabinsk meteoroid 15 February 2013. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2017. Vol. 33, № 4. P. 196–206.

130. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2017. Т. 60, № 8. С. 427–436.

131. Chernogor L. F., Lazorenko O. V. System Spectral Analysis of Infra-sound Signal Generated by Chelyabinsk Meteoroid. *Radioelectronics and communications systems*. 2017. Vol. 56, № 11. P. 544–551.

132. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 1. С. 53–66.

133. Черногор Л. Ф. Атмосферно-сейсмический эффект Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 2. С. 123–137.

134. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газо-пылевого следа Челябинского метеороида. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 3. С. 296–306.

135. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела. *Космические исследования*. 2017. Т. 55, № 5. С. 342–352.

136. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58, № 2. С. 267–280.

137. Черногор Л. Ф. Фазовые вариации километровых радиоволн, сопутствовавшие воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009. Т. 14, № 4. С. 377–389.

138. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения. *Вестник Харьковского университета. Сер. Радиофизика и электроника*. 1988. № 318. С. 29–30.

139. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного излучения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1989. Т. 29, № 3. С. 513–515.

140. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением. *Компьютерная оптика*. 1989. Вып. 6. С. 62–71.

141. Влияние искусственных возмущений в нижней ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением, на характеристики радиосигналов / К. П. Гармаш и др. Труды НИИР. Москва: Радио и связь. 1989. № 9. С. 57–60.

142. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование крупномасштабных волновых возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1990. Т. 30, № 1. С. 159–161.

143. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1996. Т. 36, № 2. С. 75–81.

144. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения. *ЗР. Успехи современной радиоэлектроники*. 1998. № 6. С. 17–40.

145. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения. *Электромагнитные явления*. 1998. Т. 1, № 1. С. 90 – 110.

146. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощного радиоизлучения / В. П. Бурмака и др. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 11. С. 859–880.

147. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением / Л. Ф. Черногор и др. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2011. Т. 54, № 2. С. 81–96.

148. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14–36.

149. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. Колебания инфразвукового диапазона в ионосфере при воздействии на неё мощным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 5. С. 327–340.

150. Черногор Л. Ф. Механизмы генерации колебаний инфразвукового диапазона в верхней атмосфере под действием мощного периодического радиоизлучения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 3. С. 240–253.

151. Аперiodические крупномасштабные возмущения в Е-области ионосферы, стимулированные мощным радиоизлучением / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин, С. В. Панасенко, В. П. Урядов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 3. С. 173–185.

152. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощного нестационарного радиоизлучения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 1. С. 49–64.

153. Mendillo M., Hawkins G. S., Klobuchar J. A. A sudden vanishing of the ionospheric F-region due to the launch of Skylab. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80, № 16. P. 2217–2228.

154. Наблюдение возмущений в нижней ионосфере во время экспериментов по программе Союз – Аполлон / Г. Ф. Засов и др. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1977. Т. 17, № 2. С. 346–348.

155. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем (Обзор). *Космич. исслед.* 1980. Т. 18, № 2. С. 266–277.

156. Об одном типе крупномасштабных возмущений в ионосфере / В. Д. Карлов и др. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1984. Т. 24, №2. С. 319–322.

157. О возможности исследования эпизодических кратковременных возмущений в нижней ионосфере при помощи метода вертикального зондирования / В. А. Мисюра и др. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1987. Т. 27, № 4. С. 677–679.

158. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Исследование глобальных и крупномасштабных возмущений в ионосфере с помощью сети ионозондов. *Космическая наука и техника*. Киев: Наукова думка. 1989. Вып. 4. С. 72–75.

159. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Кажущиеся скорости распространения возмущений в околоземном космосе. *Космическая наука и техника*. Киев: Наукова думка. 1990. Вып. 5. С. 71–74.

160. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.

161. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полета ракеты "Протон": результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 3. С. 25–31.

162. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты "Союз" в спокойных и магнитовозмущенных условиях. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 3. С. 32–41.

163. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури / К. П. Гармаш и др. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1999. Т. 39, № 1. С. 72–78.

164. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. Т. 8, №2. С. 143–162.

165. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождающих старты и полеты ракет. *Космічна наука і технологія*. ДОДАТОК. 2003. Т. 9, № 2. С. 57–61.

166. Бурмака В. П., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет “Союз” и “Протон”. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2005. Т. 10, № 3. С. 254–272.

167. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-earth environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2013. 542 p.

168. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / В. В. Адушкин и др. Анкил Москва, 2000. 640 с.

169. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / под общей редакцией В. В. Адушкина, С. И. Козлова, М. В. Сильникова. Москва: ГЕОС, 2016. 795 с.

170. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2005. Т. 10, № 10. С. 39–50.

171. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 7. С. 38–56.

172. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ нелинейных волновых процессов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 10. С. 3–21.
173. Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т.48, №5. С. 681–702.
174. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. Т.8, №1. С. 59–106.
175. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
176. Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В. П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1977. Т. 13, № 9. С. 926–935.
177. Емельянов Л. Я., Скляр И. Б., Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2009. 15, № 4. С. 12–21.
178. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 310 с.
179. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. Москва: Наука, 1988. 27 с.
180. Физика верхней атмосферы / Под ред. Дж. А. Ратклиффа. Москва: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. 504 с.
181. Черногор Л.Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2010. Т. 50, № 3. С. 361–376.
182. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5, № 4. С. 371–375.

183. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. Cambridge atmospheric and space science series, 2000. 555p.
184. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>
185. <http://umlcar.uml.edu/stationlist.html>
186. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. Монография. Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. 576 с.
187. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов / Е. С. Андреева и др. *Космич. исслед.* 2001. Т. 39, № 1. С. 13–17.
188. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. Москва: Физматлит, 2007. 336 с.
189. Обухов А. М. К вопросу о геострофическом ветре. *Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз.* 1949. Т. 13, № 4. С. 281–289
190. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. Москва: Наука, 2008. 295 с.
191. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1). *Нелинейный мир.* 2006. Т. 4, № 12. С. 655–697.
192. Черногор Л. Ф. «Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2). *Нелинейный мир.* 2007. Т. 5, № 4. С. 198–231.
193. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – atmosphere – geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 2008. Vol. 13, № 2. P. 120–137.
194. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *International Journal of Remote Sensing.* 2011. Vol. 32, № 11. P. 3199–3218.
195. Wratt D. S. Ionization enhancement in the middle latitude D-region due to precipitating high energy electrons. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1976. Vol. 38, №. 5. P. 511–516.

196. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms / H. Tadokoro et al. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25, №. 6. P. 1359–1364.
197. Соколов С. Н. Магнитные бури и их эффекты в нижней ионосфере. Различия бурь разных типов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. Т. 51, № 6. С. 757–768.
198. Buonsanto M. J. Ionospheric storms: A Review. *Space Sci. Rev.* 1999. Vol. 88. P. 563–601.
199. Variations in the parameters of scattered signals and the ionosphere connected with plasma modification by high-power radio waves / V. P. Burmaka et al. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2009. Vol. 52, № 11. P. 774–795.
200. Variations in the ionospheric wave perturbation spectrum during periodic heating of the plasma by high-power high-frequency radio waves / L. F. Chernogor et al. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011. Vol. 54, № 2. P. 75–88.
201. Chernogor L. F., Frolov V. L., Pushin V. F. Infrasound oscillations in the ionosphere affected by high-power radio waves. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012b. Vol. 55, № 5. P. 296–308.
202. Chernogor L. F., Frolov V. L. Traveling ionospheric disturbances generated due to periodic plasma heating by high-power high-frequency radiation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012c. Vol. 55, № 1, 2. P. 13–32.
203. Chernogor L. F., Frolov V. L. Features of propagation of the acoustic-gravity waves generated by high-power periodic radiation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013a. Vol. 56, №. 4. P. 197–215.
204. Chernogor L. F., Frolov V. L. Features of the wave disturbances in the ionosphere during periodic heating of the plasma by the "Sura" radiation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013b. Vol. 56, № 5. P. 276–289.
205. Excitation of guided ELF-VLF waves through modification of the F2 ionospheric layer by high-power radio waves / A. S. Belov et al. *Plasma Phys. Rep.* 2012. Vol. 38, №. 3. P. 219–224.

206. Excitation of a magnetospheric maser through modification of the Earth's ionosphere by high-power HF radio emission from a ground-based transmitter / G.A. Markov et al. *Zh. Eksper. Teoret. Fiz.* 2012. Vol. 111, №. 6. P. 916–920.

207. Cole K. D. Formation of field-aligned irregularities in the magnetosphere. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1971. Vol. 33. P. 741–750.

208. Park C. G., Helliwell R. A. The formation by electric fields of field-aligned irregularities in the magnetosphere. *Radio. Sci.* 1971. Vol. 6. P. 299–304.

209. Walker A. D. M. Formation of whistler ducts. *Planet. Space. Sci.* 1978. Vol. 26. P. 375–379.

ДОДАТОК

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в наукових фахових виданнях України:

1. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 4. С. 353–361.

(Особистий внесок здобувача: обробка та фізичне тлумачення експериментальних даних, а також написання окремих розділів.)

2. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения сопровождавшие пролет челябинского тела. *Кинематика и физика небесных тел : науч.- теорет. журн.* 2014. Т. 30, № 3. С. 27–42. (Scopus).

(Особистий внесок здобувача: первинна обробка та спектральний аналіз експериментальних даних, написання окремих розділів.)

Chernogor L. F., Barabash V. V. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2014. Vol. 30, № 3. P. 126–136. DOI: 10.3103/0884591314030039

3. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ионосфере над Европой: результаты ионозондовых наблюдений. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20, № 4. С. 311–331.

(Особистий внесок здобувача: обробка експериментальних даних, фізичне тлумачення отриманих результатів, а також написання окремих розділів.)

4. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: суточно-сезонные вариации в период спада солнечной активности. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 3. С. 212–221.

(Особистий внесок здобувача: обробка та спектральний аналіз експериментальних даних, фізичне тлумачення отриманих результатів, підготовка окремих розділів.)

5. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Отклик средней ионосферы на солнечное затмение 4 января 2011 г. в Харькове: Результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 4. С. 41–52.

(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експеримента. Обробка та фізичне тлумачення експериментальних даних, а також підготовка окремих розділів.)

Наукові праці в зарубіжних наукових фахових виданнях:

6. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Аперiodические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере. *Известия вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57, № 2. С. 110–128. (Scopus).

(Особистий внесок здобувача: проведення спектрального аналізу експериментальних даних, інтерпретація отриманих результатів, написання окремих розділів.)

Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Aperiodic large-scale disturbances in the lower ionosphere: ionosonde observation results. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2014. Vol. 57, № 2. P. 100–116. DOI: 10.1007/s11141-014-9496-7.

7. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Эффекты воздействия мощными радиоизлучением на ионосферу на фоне умеренных геокосмических бурь: результаты наблюдений с помощью ионозондов. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2016. № 2 (30). С. 6–27. (РИНЦ).

(Особистий внесок здобувача: проведення спектрального аналізу експериментальних даних, інтерпретація отриманих результатів, написання окремих розділів.)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Барабаш В. В., Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда. *Дистанционное радиозондирование ионосферы: сборник тезисов конференции молодых ученых.* (г. Харьков, 12 – 15 апреля 2011 г.). Харьков, 2011. С. 52.

9. Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождавших солнечное затмение 4 января 2011 г. *11-th Ukrainian conference on space research: abstracts.* (Yevpatoria, Crimea, Ukraine, August 29 – September 2, 2011). Kyiv, 2011. P. 35.

10. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения возмущений в ионосфере, сопровождавших падение Челябинского метеорита. *13-th Ukrainian conference on space research: abstracts.* (Yevpatoria, Crimea, Ukraine. 2 – 6 September, 2013). Kyiv, 2013. P. 48.

11. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Результаты ионозондовых наблюдений крупномасштабных апериодических возмущений в нижней ионосфере. *Remote Radio Sounding of the Ionosphere: Book of Abstracts International School-Conference.* (Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine September, 30 – October, 4, 2013.). Kharkiv, 2013. P. 42.

12. Черногор Л.Ф., Барабаш В.В. Сезонно-добові варіації хвильових збурень концентрації електронів в іоносферному шарі F2. *XXI Міжнародна науково-практична конференція: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: збірник тез доповідей.* Ч. III. Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. (Харків, Україна, 29–31 травня 2013 р.). Харків, 2013. С. 207.

13. Barabash V., Chernogor L., Panasenکو S., and Domnin I. Ionospheric manifestations of acoustic-gravity waves under quiet and disturbed conditions. *EGU General Assembly–2014: Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-6162,* 2014. P. 6162.

14. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения аperiодических крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере. *Международная научная конференция MicroCAD: Секція №17–Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера: збірник тез.* (Харків, НТУ «ХПИ», 2014). Харків, 2014. Ч. III.– С. 246.

15. Chernogor L. F., Frolov V. L., Barabash V. V. Large-scale aperiodic disturbances in the D- and E-regions of ionosphere due to the impact of HF high-power radio transmission: data from a network of ionosondes. *10-th International Conference "Problems of Geocosmos": Book of Abstracts.* (Russia, St. Petersburg, Petrodvorets, October 6 – 10, 2014). St. Petersburg, 2014. P. 140.

16. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионозондовые наблюдения эффектов солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Европой. Взаимодействие *полей и излучения с веществом: XIV конференция молодых ученых: труды конференции.* (г. Иркутск, Россия, 14–18 сентября 2015 г.). Иркутск, 2015. С. 98–99.

17. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации вблизи максимума солнечной активности. *17-th Ukrainian conference on space research.* (Odesa, Ukraine, August, 21 – 25, 2017). Odesa, 2017. P. 154.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г., наблюдаемые при помощи ионозонда. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Радіофізика та іоносфера".* 2011. № 44. С. 107–111.

19. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Изменения концентрации электронов в слое F2 вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствия. *Вісник національного технічного університету "ХПИ". Серія: Радіофізика та іоносфера.* 2013. № 33 (1066). С. 56–61.