

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

БАРАБАШ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 550.388

АПЕРІОДИЧНІ ТА ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ В ІОНОСФЕРІ:
РЕЗУЛЬТАТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ

Спеціальність 01.04.03 – Радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертація є рукопис

Роботу виконано в Інституті іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Чорногор Леонід Феоктистович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки
України,
професор кафедри космічної радіофізики

Офіційні опоненти – доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Колосков Олександр Валерійович,
Радіоастрономічний інститут НАН України
провідний науковий співробітник

кандидат фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Лізунов Георгій Вячеславович
Інститут космічних досліджень НАН України та
ДКА України
завідувач лабораторії супутникових досліджень
ближнього космосу

Захист відбудеться « » _____ 2019 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02, у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України (61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9).

З дисертацією можна ознайомитися у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університета імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України (61022, м. Харків, майдан Свободи, 4)

Автореферат розісланий « » _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор фізико-математичних наук, професор

Ю. В. Аркуша

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

У цей час у геокосмосі, 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, цунами, виверженнями вулканів, грозами, падіннями великих космічних тіл, спалахами на Сонці, викидами корональної маси, сонячним термінатором, сонячними затемненнями, стартами та польотами космічних апаратів, потужним радіовипромінюванням 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 раніше досліджували Є. Л. Афраймович, Б. М. Гершман, В. Г. Галушко, В. І. Дробжев, В. А. Місюра, В. М. Сорокін, Г. В. Федорович, В. І. Таран, Л. Ф. Черногор, Ю. М. Ямпольский, К. Davies, J. C. Foster, С. О. Hines, К. Nocke, S. H. Francis, K. Schlesel, P. J. S. Williams і багато інших.

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. Л. Ф. Черногором опублікована перша у світі монографія «Фізичні ефекти сонячних затемнень в атмосфері та геокосмосі». 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. Як правило, при цьому досліджуються збурення, що виникають у межах діаграми спрямованості антени, і тільки одна монографія присвячена вивченню великомасштабних (порядку 1000 км) збурень. Ефекти, вперше виявлені та описані в монографії, досліджуються й у даній роботі.

Унікальні ефекти в іоносфері, що супроводжували падіння Челябінського космічного тіла, мають особливу новизну. Раніше подібні дослідження не проводилися, оскільки такі події трапляються один раз приблизно за сотню років.

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, проведено 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 та 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 потужним 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, цифрова обробка рядів даних, системний спектральний аналіз, в основу якого покладені віконне перетворення Фур'є, адаптивне перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним.

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 проведене дослідження просторового розподілу в масштабах Європи збурень в іоносфері протягом сонячного затемнення 20 березня 2015 р. Установлена 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 змоделювати вплив збуреного затемнення 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.

Дисертаційна робота складається із Вступу, п'яти глав і висновку.

Особистий внесок здобувача

Розв'язання задач, поставлених у дисертації, виконано її автором особисто або за його безпосередньої участі. Автор брав участь у модернізації іонозонду Інституту іоносфери, в проведенні на ньому вимірювань, обробці та тлумаченні результатів вимірювань проведених на мережі іонозондів.

Результати дисертації опубліковані в 7 статтях [1–7] в фахових виданнях і додатково в 2 не фахових виданнях [18, 19]. Також матеріали було докладено на 10 конференціях [8–17]. 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" (Maly 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).

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 [1–5] (1 входить до бази Scopus [2]), 2 статті у зарубіжних виданнях [6, 7] (1 входить до бази Scopus [6], 1 до бази РІНЦ [7]), що є фаховими для спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Додатково опубліковано 2 статті в українських не фахових виданнях для спеціальності 01.04.03 – радіофізика [18, 19] і 10 тезах доповідей [8–17] 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, описано наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів.

У **Розділі 1** представлено аналітичний огляд літератури, присвячений опису метода експериментального спостереження за іоносферою, методикам дослідження отриманих даних, сучасному стану дослідження іоносферних ефектів, викликаних різними джерелами збурення, й у не збурених умовах. Також наведена класифікація основних джерел збурень в іоносфері. При цьому відмічається наступне.

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

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.

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 геокосмічних бур, сонячних затемнень, падінь великих космічних тіл, про вплив на іоносферу потужного радіовипромінювання та великих стартуючих ракет.

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

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

Для побудови динамічної моделі основних процесів в іоносфері потрібні безперервні виміри її параметрів у глобальних масштабах. Поки це неможливо, і тому 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.

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.

Розділ 2 присвячено дослідженню середньої іоносфери українського регіону в спокійних умовах.

Дослідження обмежувалися основними геофізичними періодами, до яких належать весінне та осіннє рівнодення, а також літнє та зимове сонцестояння.

Стан космічної погоди в періоди, під час яких проводилося дослідження, характеризувався як спокійний. Тому виявлені ефекти були викликані саме

добовими та сезонними процесами. Дослідження проводилося з використанням даних отриманих методом вертикального зондування

Дослідження показали, що в усі періоди проведення дослідження, регулярні добово-сезонні варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 повністю відповідають існуючим уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері й даним інших досліджень.

Системний спектральний аналіз отриманих експериментальних даних, проводився трьома методами: віконним, адаптивним перетворенням Фур'є та вейвлет-перетворенням (ВПФ, АПФ, ВП відповідно). Це дозволило виявити, що на регулярний хід концентрації електронів $N(t)$ накладалися квазіперіодичні варіації концентрації електронів, в усі сезони в шарі F2 іоносфери проявлялося переважно квазіперіодичне коливання N з періодом 140–200 хв, амплітудою $(0.2-2) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ і відносною амплітудою, рівною 0.1–0.2 (див. рис. 1).

В результаті дослідження були виявлені переважаючі коливання, тривалість яких становила 5–7 год, а в період літнього сонцестояння досягала 24 год.

Експериментально було встановлено епізодичну наявність у в спектрі варіацій N коливань з періодами від 60–100 до 300 хв. Їх амплітуда була в кілька раз менше амплітуди переважаючого коливання.

У **Розділі 3** викладено результати дослідження ефектів сонячного затемнення (СЗ), що мали місце 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. у середній іоносфері.

СЗ 4 січня 2011 р. передувало незначне магнітне збурення, на тлі якого чітко спостерігалися ефекти, викликані сонячним затемненням.

Спостереження ефектів, що були викликані СЗ 20 березня 2015 р. мало місце в період відновлення іоносфери після сильної геокозмичної бурі 17 березня 2015 р. В цей період не спостерігалось значних збурень параметрів, що характеризують космічну погоду, це дало змогу виокремити ефекти викликані СЗ.

Було встановлено, що 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.

Проведене дослідження дозволило виявити, що СЗ 4 січня 2011 р. супроводжувалося помітним зменшенням концентрації електронів на висотах середньої іоносфери. Так, у максимумі шару F2 відносне зменшення концентрації електронів дорівнювало приблизно 52 %. Час запізнювання варіацій N становив 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, а також викликало збільшення висоти h_p до 10 км.

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

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

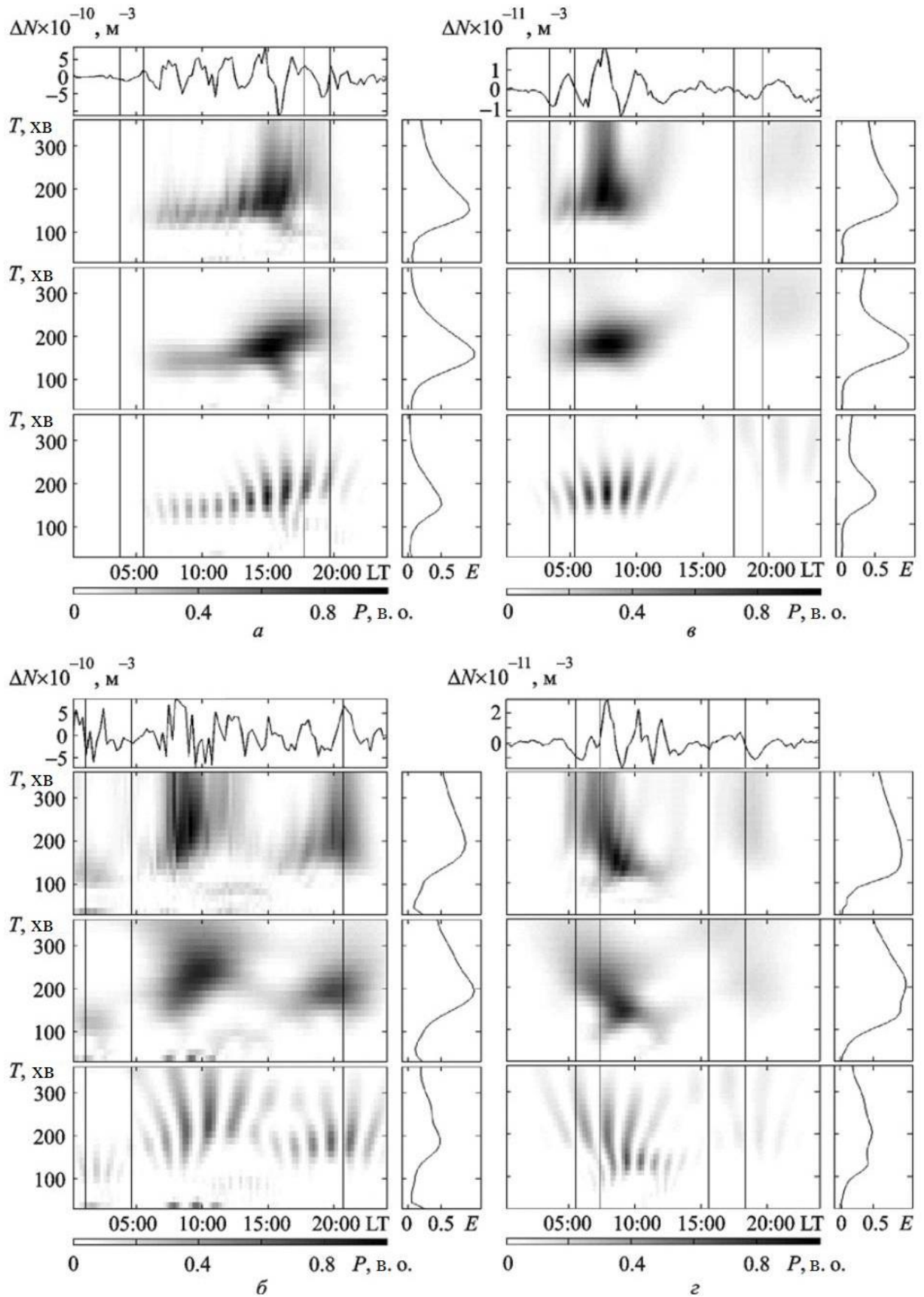


Рис. 1 Залежність $\Delta N(t)$ для 23 березня 2011 р. (а), 21 червня 2011 р. (б), 20 вересня 2011 р. (в) і 21 грудня 2011 р. (г). Результати спектрального аналізу за допомогою ВПФ, АПФ, і ВП (панелі зверху вниз). Праворуч показані відповідні енергограми

Системний спектральний аналіз даних, отриманих під час СЗ 4 січня 2011 р. встановив, що воно 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 внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГХ).

Широкомасштабне дослідження з залученням міжнародної мережі іонозондів дозволило встановити, що 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 20 березня 2015 р. 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.

Проведений системний спектральний аналіз даних виявив, що СЗ 20 березня 2015 р. 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.

У **Розділі 4** описано результати спостереження ефектів, викликаних прольотом та вибухом Челябінського метеороїда. Метеороїд ввійшов в атмосферу Землі 15 лютого 2013 р. в 03:20:26 UT. Напрямок його руху був приблизно зі сходу на захід (азимут близько 270°) під кутом до горизонту близько 20° . Початкова маса метеороїда була приблизно 11 кт, початкова швидкість ~ 18.5 км/с, а діаметр – 18 м.

Стан космічної погоди був спокійний, це полегшило пошук ефектів, що були викликані падінням космічного тіла.

Проведене дослідження показало, що падіння Челябінського космічного тіла супроводжувалося помітними змінами характеру часових варіацій частоти f_oF2 та їх спектрального складу (рис. 2).

Було встановлено, що від місця падіння метеороїда поширювалися хвильові збурення, які мали середню швидкість близько 600–700 м/с, амплітуду відносних збурень концентрації електронів – 10–20 % і період 70–135 хв (див., наприклад, рис. 2). Такі параметри властиві атмосферним гравітаційним хвилям та рухомим іоносферним збуренням, які вони викликають.

Проведений спектральний аналіз дозволив встановити, що 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 %. Викликані падінням і вибухом Челябінського метеороїда хвильові збурення поширювалися на відстані не менше 3 тис. км від місця його падіння.

У **Розділі 5** наведено результати спостережень аперіодичних великомасштабних збурень в іоносфері, що супроводжували нагрів іоносфери потужним радіовипроміненням за допомогою нагрівного стенду «Сура».

В період проведення експерименту, з 26 по 30 серпня 2012 р., стан космічної погоди був спокійним, лише 26 серпня 2012 р. геокосмічне середовище було слабо збурене, але це не завадило виявленню ефектів, викликаних дією потужного радіовипромінення на іоносферу.

Спостереження проводились на декількох іонозондах, віддалених від джерела впливу. Відстань від стенда «Сура» до іонозондів змінювалася від 0 до приблизно 2200 км.

Іонозонд Науково-дослідного радіофізичного інституту (НДРФІ) (р/п Васильсурськ, Росія) типу «CADI» розташований безпосередньо біля нагрівного стенда (далі по тексту станція або іонозонд «Васильсурськ»).

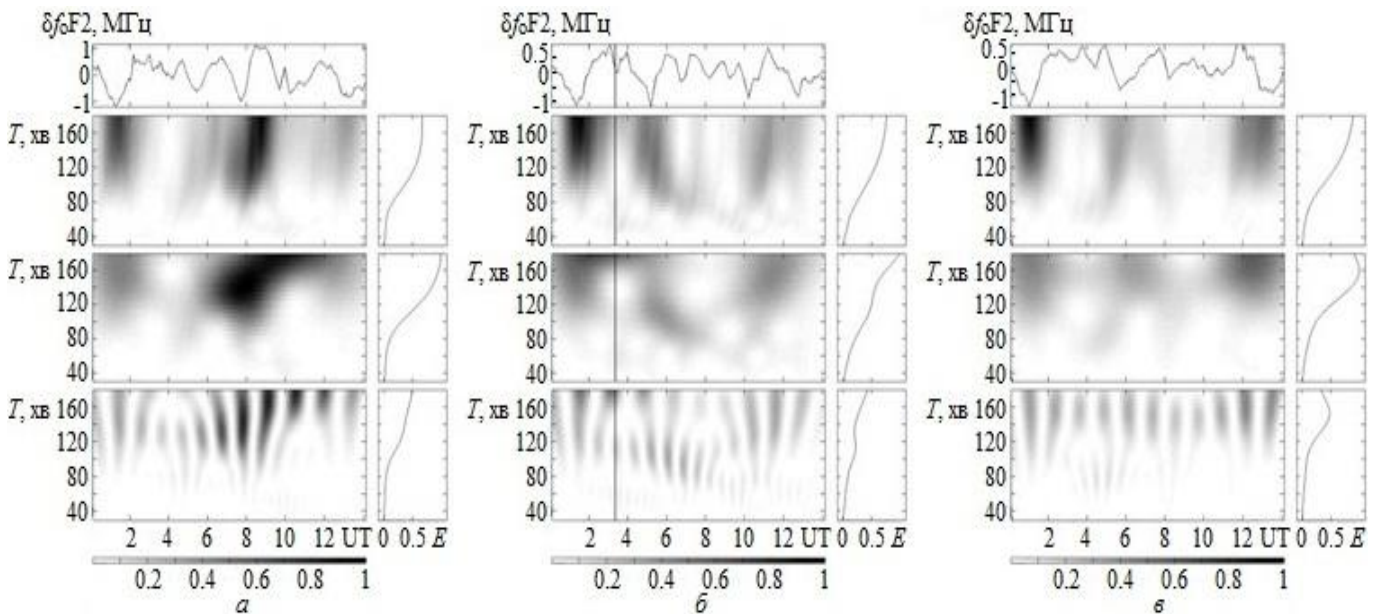


Рис. 2 Результати системного аналізу часової залежності рівня флуктуацій критичної частоти: *a* – 14 лютого 2013 р., *б* – 15 лютого 2013 р. і *в* – 16 лютого 2013 р. (станція «Алмати»): вихідний сигнал (верхня панель), спектрограми віконного та адаптивного перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення (панелі зверху вниз). Праворуч показані енергограми

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 стенда.

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 стенда «Сура» становить близько 960 км. Цей іонозонд перебуває приблизно на тій же довготі, що й іонозонд ІЗМПАН.

Іоносферна станція «Pruhonice» або «Прухониць» (поруч з 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.

Випромінювання нагрівного стенда в режимі [+30 хв ввімкнено; -30 хв вимкнено] 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} для ст. «Гайдари», «Прухониць» та «Васильсурськ» 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 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. Гайдарах, м. Прухониць та м. Васильсурську.

Під час експерименту 2013 р. аналізувалися часові варіації критичної частоти шару F2 протягом роботи нагрівного стенда й у контрольні інтервали часу. У якості можливої реакції на вмикання / вимикання стенда, розглядалися позитивні відхилення (сплески) частоти f_oF2 щодо їх основи, яка не завжди збігалася з положенням тренда.

Тренд обчислювався за допомогою полінома п'ятого ступеня. 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.

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 (рис. 3).

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

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.

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 низько літаючих штучних супутників Землі.

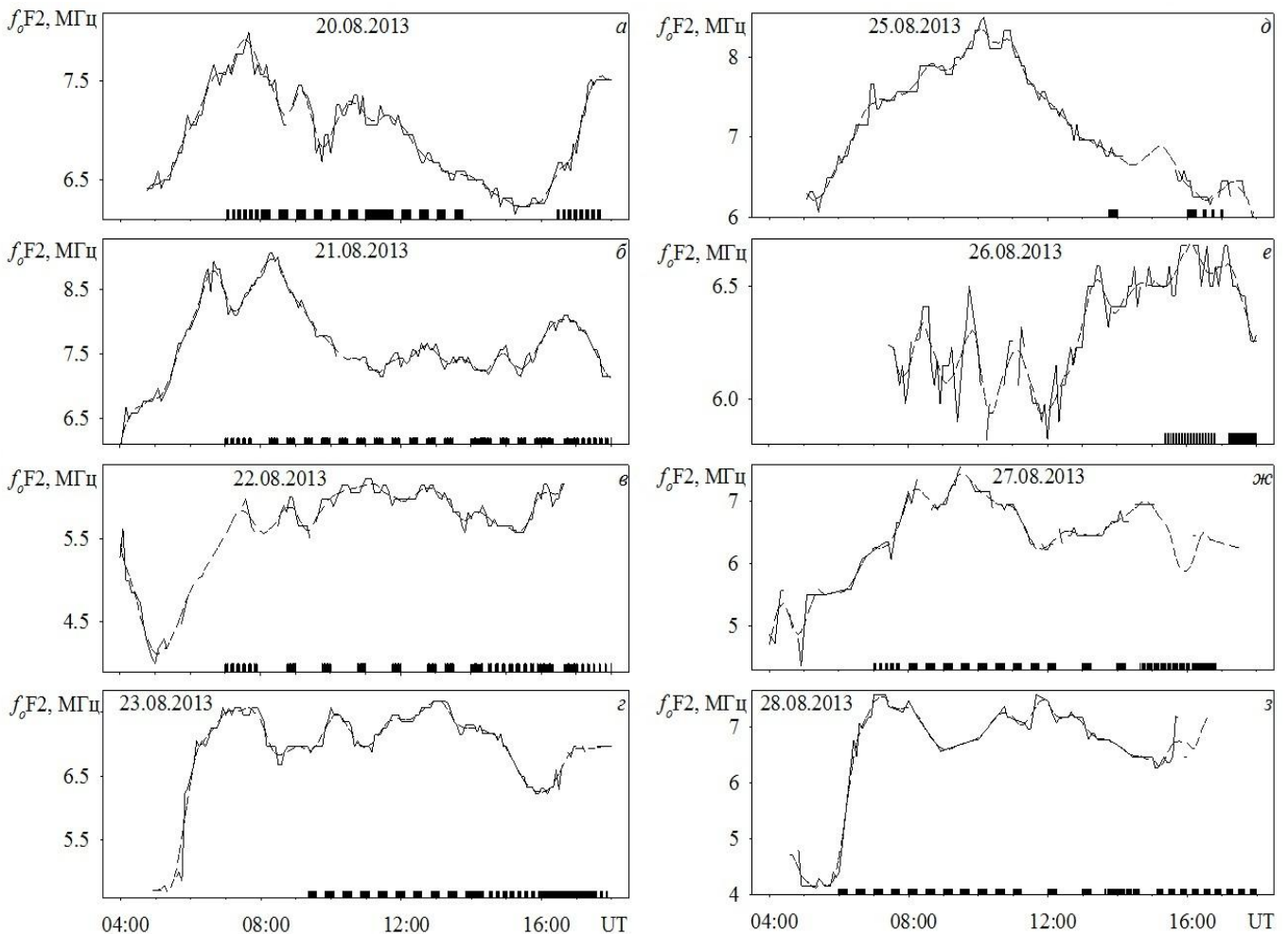


Рис. 3 Часові варіації критичної частоти шару F2 іоносфери поблизу м.Харків. Прямокутниками на часовій осі тут і далі показані режими випромінювання станда "Сура"

ВИСНОВКИ

В дисертації представлено 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'язанні 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 потужним 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 й 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 відносно зменшення концентрації електронів склало приблизно 52 %. Час запізнення варіацій N склав близько 16.0 ± 1.4 хв. В E-області N зменшилася приблизно на 30 %.

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

Затемнення викликало 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 контрольний день. Амплітуда хвильових збурень на більшості іоносферних станцій у день затемнення була приблизно в 2–3 рази більша, ніж у контрольний день.

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 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 с.м.т. Васильсурськ 29 серпня 2012 р. не перевищувало 0.4 і 0.3 МГц відповідно.

Збільшення f_{\min} свідчило про зростання концентрації електронів N і поглинання зондуючих 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».

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_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. 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 хвильові збурення 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 коливання 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 переважаючого 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 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., Varabash 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. Аперидические 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., Varabash 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 аперидических 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 аперидических крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере. *Международная научная конференция MicroCAD: Секция №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 "ХПІ". 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 "ХПІ". Серія: Радіофізика та іоносфера*. 2013. № 33 (1066). С. 56–61.

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 Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

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.

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.

Досліджена реакція концентрації електронів F-області іоносфери на сонячні затемнення 4 січня 2011 р. і 20 березня 2015 р. над м. Харків, а також над Європою. Досліджена реакція концентрації електронів F-області іоносфери на падіння Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 р. Досліджена реакція іоносфери на вплив на неї потужного радіовипромінюванням радіотехнічної системи, віддаленої від місця спостереження на відстань близько 1000 км. Досліджені добово-сезонні варіації концентрації електронів у максимумі шару F2 іоносфери в періоди росту та

спаду сонячної активності. Встановлено основні параметри збурень, викликаних сонячними затемненнями, падінням Челябінського метеороїда і потужним радіовипроміненням.

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

АННОТАЦІЯ

Барабаш В. В. Аперіодические и волновые возмущения в ионосфере: результаты вертикального зондирования. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук за специальностью 01.04.03 – радиопизика. – Институт ионосферы Национальной академии наук и Министерства образования и науки Украины, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины.

Данная диссертация посвящена изучению волновых вариаций концентрации электронов в F-области ионосферы в характерные геофизические периоды, а также аперіодических и квазіперіодических возмущений в ионосфере, вызванных солнечными затемнениями, полетом и взрывом Челябинского метеороида, влиянием мощного радиоизлучения, удаленной на тысячи километров мощной радиосистемы.

Для наблюдений за состоянием ионосферы в диссертации используется наиболее распространенный в мировой практике радиопизический метод вертикального зондирования ионосферы. Для анализа результатов наблюдений использовались методы математической статистики и статистической радиопизики, а также системный спектральный анализ, в основу которого положены оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье, а также вейвлет-преобразование.

Исследована реакция концентрации электронов F-области ионосферы на солнечные затемнения 4 января 2011 г. и 20 марта 2015 г. над г. Харьков, а также над Европой. Исследована реакция концентрации электронов F-области ионосферы на падение Челябинского метеороида 15 февраля 2013 г. Исследована реакция ионосферы при влиянии на нее мощным радиоизлучением радиотехнической системы, отдаленной от места наблюдения на расстояние около 1000 км. Исследованы суточно-сезонные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы в периоды роста и спада солнечной активности. Определены основные параметры возмущений, вызванных солнечными затемнениями, падением Челябинского метеороида и мощным радиоизлучением.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, аперіодические возмущения, волновые возмущения, солнечное затемнение, мощное радиоизлучение, крупномасштабные возмущения, Челябинский метеороид, суточно-сезонные вариации.

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. Krazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

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.

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.

Was 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 main parameters of disturbances caused by solar eclipses, the falling of the Chelyabinsk meteoroid and powerful radio transmission are determined.

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