

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

На правах рукопису

КРИВОНОС ОЛЕКСІЙ ПЕТРОВИЧ

УДК 537.87+550.388.2

**Радіозондування області D нічної іоносфери з використанням
випромінювання розрядів блискавок**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України, м. Харків

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Швець Олександр Вячеславович,
провідний науковий співробітник відділу
дистанційного зондування Землі Інституту
радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
НАН України (м. Харків)

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент
Лазоренко Олег Валерійович,
завідувач кафедри загальної фізики
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна МОН України

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Панасенко Сергій Валентинович,
завідувач відділу фізики іоносфери Інституту
Іоносфери НАН України і МОН України

Захист відбудеться 29 березня 2018 року о 15³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

Автореферат розісланий 27 лютого 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

В даний час з усіх областей іоносфери найменш вивченою є нижня іоносфера (область D). Висотний діапазон, низька концентрація заряджених частинок і великі втрати в іоносфері обмежують її дослідження із застосуванням радіозондів, аеростатів, ракет, супутників. Для досліджень іоносфери на висотах 60 – 100 км, де концентрація електронів є низькою ($10^6 - 10^9 \text{ м}^{-3}$) традиційно використовується метод радіозондування порожнини Земля – іоносфера електромагнітними хвилями в діапазонах наднизьких частот (ННЧ, 3 – 3000 Гц) і дуже низьких частот (ДНЧ, 3 – 30 кГц). У якості джерел зондуючого випромінювання в цьому випадку зазвичай використовуються радіопередавачі навігаційних і зв'язкових систем. У ДНЧ-діапазоні на трасах довжиною до 3000 – 4000 км за рахунок зменшення загасання в іоносфері в нічний час крім основної нормальної хвилі (моди) значний внесок до сумарного поля вносять хвилі вищих типів. Ця обставина істотно ускладнює розв'язання оберненої задачі визначення параметрів іоносферної границі за сигналами вузькосмугових радіостанцій.

Останнім часом відновився інтерес до використання «безкоштовних» джерел ННЧ-ДНЧ випромінювання — розрядів блискавок для дослідження нижньої іоносфери, про що свідчить зростання кількості публікацій, присвячених даній тематиці.

Як засіб діагностики нижньої іоносфери особливий інтерес представляють твік-атмосферики (твіки) — електромагнітні хвилі звукових частот, які є відгуком хвилеводу Земля – іоносфера на імпульсне збудження розрядами блискавок. Завдяки зменшенню загасання в іоносфері в нічний час у спектрі таких сигналів з'являються складові поблизу частот відсічення хвилеводу Земля – іоносфера. Твіки реєструються на відстанях, що сягають десяти тисяч кілометрів і несуть інформацію про середні властивості нижньої іоносфери вздовж шляху поширення між блискавкою та спостерігачем.

Викликає інтерес дослідження варіацій висоти нижньої границі іоносфери, які обумовлені динамікою параметрів плазми, пов'язаної з впливом різних регулярних і катастрофічних явищ атмосферного, космічного та земного походження.

Спектральний склад поля твіків та їх хвильова форма визначаються не тільки властивостями іоносферної границі хвилеводу, але також і відстанню до джерела. Тому для розв'язання оберненої задачі визначення параметрів іоносферної границі необхідне знання координат джерела зондуючого випромінювання — блискавки. Використання національних або глобальних мереж локації блискавок розв'язує дану задачу, проте, в даний час національні мережі охоплюють обмежені області окремих держав, а інформація надається, як правило, на комерційній основі або за умови партнерської участі в роботі мережі.

На сьогодні відомі однопозиційні методи аналізу, що дозволяють визначати одночасно відстань до блискавки й ефективну висоту хвилеводу вздовж траси

поширення твіка. Вони використовують властивості хвильоводної дисперсії. Це фазовий, або «Харківський», метод, де використовується фазовий спектр нормальної хвилі першого порядку, та частотний метод, де використовується залежність миттєвої частоти сигналу твіка від часу. Однак в обох методах використовується лише діапазон в околі частоти відсічення основної моди сигналу твіка, що обмежує обсяг одержуваної інформації про іоносферу.

Процеси в нижній іоносфері відбуваються в широкому діапазоні часових масштабів. Тому для їх детального вивчення з використанням радіозондування випромінювання розрядів блискавок актуальною є розробка методу визначення ефективних висот хвильоводу Земля – іоносфера уздовж траси поширення для основної моди та мод вищих порядків, що дозволить реалізувати автоматичну ідентифікацію твіків та їх аналіз для моніторингу стану нижньої іоносфери в режимі реального часу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Робота виконувалася в рамках досліджень, проведених відділом дистанційного зондування Землі ІРЕ ім. О. Я. Усиков НАН України за темами: «Розробка і удосконалення радіофізичних методів зондування поверхні і атмосфери Землі та біологічних об'єктів» (шифр «Індекс») 2012 – 2016 рр. (номер держ. реєстрації 0111U010477); «Розробка та застосування нових радіофізичних методів дистанційного зондування довкілля та біологічних об'єктів» (шифр «Інверсія») з 2017 р. по теперішній час (номер держ. реєстрації 0117U004040). Автор є одним з виконавців даних тем, і його науковий внесок у них відображено у матеріалах дисертації.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є удосконалення й автоматизація методів оцінки параметрів нижньої іоносфери на основі аналізу твік-атмосфериків, дослідження ефективності методу визначення дистанції до блискавки та профілю провідності іоносфери за сигналами багатомодових твік-атмосфериків, конструювання та створення макета приймача для прийому трьох компонент поля природних імпульсних сигналів, оцінка параметрів траси поширення твіків.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні завдання.

- Розрахунок моделі хвильових форм твіків у моделях з ізотропною неоднорідною іоносферною границею хвильоводу Земля – іоносфера.
- Розробка методу аналізу твіків для визначення параметрів хвильоводу Земля – іоносфера для мод вищих порядків.
- Дослідження впливу стохастичних шумів на точність визначення параметрів траси поширення.
- Розрахунок конструктивних параметрів приймача та датчиків поля на основі необхідних порогових значень чутливості та створення програмно-апаратного комплексу для вимірювань.
- Проведення вимірювань і накопичення масиву даних атмосфериків і сигналів ДНЧ радіостанцій.

- Аналіз експериментальних результатів для виявлення зв'язків варіацій параметрів нижньої іоносфери з регулярними та випадковими процесами в навколоземному просторі.

Об'єктом досліджень є регулярні та спорадичні процеси в нижній іоносфері, що викликані земним і космічним впливом.

Предметом досліджень є електромагнітні поля ННЧ – ДНЧ діапазонів природного походження, які поширюються природним хвилеводом Земля – іоносфера.

Методи досліджень базуються на вимірюваннях електричної та двох магнітних компонент електромагнітного поля в ННЧ – ДНЧ діапазонах, теорії поширення ННЧ – ДНЧ електромагнітних хвиль у порожнині Земля – іоносфера, теорії оптимізації при розв'язанні обернених задач, методах математичної статистики щодо обробки результатів експерименту, структурному програмуванні, методах кластеризації.

Наукова новизна одержаних результатів

1) запропоновано й апробовано на основі числового моделювання новий однопозиційний метод визначення відстані до блискавки та висотного профілю нижньої іоносфери на основі аналізу багатомодових записів твіків;

2) вперше накопичено великий масив цілодобових одночасних записів трьох компонент поля атмосфериків у діапазоні частот 300 Гц – 24 кГц і ДНЧ радіостанцій в діапазоні 12 – 23 кГц з використанням створеного вимірювального комплексу;

3) вперше за результатами аналізу твік-атмосфериків на основі розробленого алгоритму автоматичного виявлення й аналізу твік-атмосфериків показано зв'язок ефективної висоти нижньої іоносфери з величиною сонячного зенітного кута в нічний час, що демонструє домінуючу роль випромінювання геокорони в формуванні нічної іоносфери;

4) вперше за результатами аналізу твік-атмосфериків виявлено ефект збільшення висоти нижньої іоносфери під час магнітної бурі помірної потужності.

Практичне значення одержаних результатів

Одержаний розв'язок оберненої задачі радіофізики для пасивної локації точкових імпульсних джерел у хвилеводі, принципи розробки приймача, датчиків магнітного й електричного полів, алгоритми та програми для автоматичного виявлення й аналізу твік-атмосфериків можуть бути використані для створення однопозиційних і багатопозиційних систем локації блискавок, автоматизованих систем моніторингу стану нижньої іоносфери в реальному часі.

Особистий внесок здобувача

У дисертації викладено результати досліджень, виконаних здобувачем самостійно [8] та в співаторстві [1 – 7, 8 – 14]. В опублікованих в співавторстві працях здобувач брав участь у розробці нових методів розв'язання оберненої задачі радіофізики з визначення відстані до блискавки й ефективної висоти іоносфери для

вищих типів нормальних хвиль хвилеводу Земля – іоносфера за записами твіків, виконував дослідження кореляційних зв'язків параметрів твіків із варіаціями геомагнітної активності та регулярних джерел іонізації нижньої іоносфери й аналіз одержаних результатів. Здобувачем було виконано програмну реалізацію суттєвої частини алгоритмів і методів, що використовувалися в дослідженнях.

Апробація результатів дисертації

Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на наступних семінарах, конференціях і симпозіумах: наукові семінари ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України; International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, ММЕТ-2016 (Львів, Україна, 2016); 9th Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies, (Харків, Україна, 2016); YSF – 2015, (Дніпропетровськ, Україна, 2015); YSF – 2016 (Харків, Україна, 2016); VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», (Воловець, 10 червня – 13 червня 2015 р.); VII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (S&EMC), (Розлуч, Україна, 2016 р.); VIII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті». – (Чернівці, Україна, 2017).

Публікації

За темою дисертації опубліковано 14 наукових робіт, з них 5 статей у фахових виданнях, 7 тез доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій та 2 статті, які додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків. Повний обсяг дисертації становить 134 сторінок, з них 14 сторінок – перелік використаних джерел (119 найменувань). Дисертація містить 43 рисунки, 4 таблиці і додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** показано сучасний стан проблеми діагностики нижньої іоносфери за допомогою низькочастотного радіовипромінювання штучного та природного походження, обґрунтовано актуальність теми роботи та доцільність розвитку методів аналізу сигналів твіків із урахуванням нормальних хвиль основного та вищих порядків у природному хвилеводі Земля – іоносфера. Сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про структуру дисертаційної роботи та дана їй загальна характеристика.

У **розділі 1** наведено огляд літератури, проаналізовані відомі радіофізичні методи діагностики нижньої іоносфери, методи використання атмосфериків для радіозондування порожнини Земля – іоносфера та локації блискавок, сформульовані актуальність і напрям досліджень у дисертації.

У розділі 2 на основі числового моделювання проведено порівняльний аналіз фазового та частотного методів визначення ефективних висот хвильоводу Земля – іоносфера для основного та вищих типів нормальних хвиль (мод) і дальності до джерела випромінювання – блискавки на основі аналізу імпульсних сигналів у діапазоні ННЧ і ДНЧ – твік-атмосфериків. У числовому експерименті хвильові форми твіків синтезовано в моделі хвильоводу Земля – іоносфера з експоненціальним профілем провідності нижньої іоносфери. Для виділення й аналізу окремих мод в сигналі використовувалися динамічні спектри твіків. Обчислення проводилися з додаванням шуму, відношення сигнал / шум складало $q = 5 - 40$ дБ.

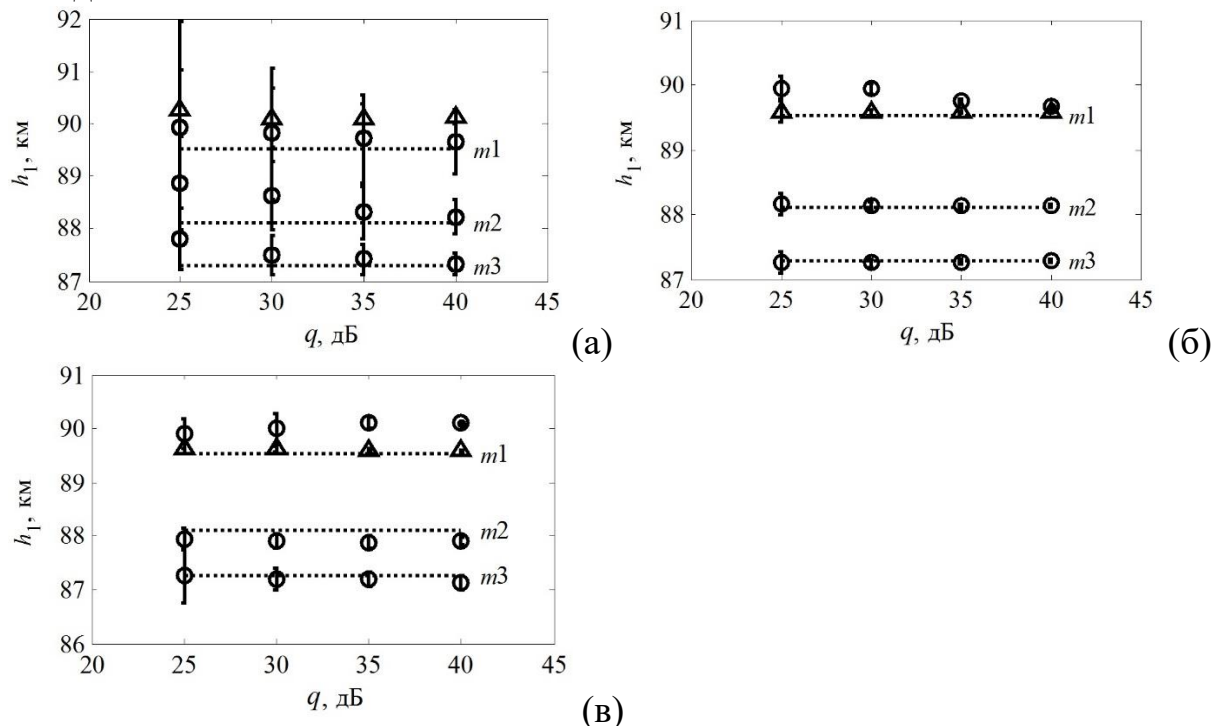


Рисунок 1 – Оцінки висот хвильоводу в залежності від відношення сигнал / шум фазовим (трикутники) і частотним (кружечки) методами (1-а – 3-тя моди) за відстані до блискавки 500 км (а), 1500 км (б), 3000 км (в)

Похибка частотного методу визначення ефективної висоти хвильоводу для різних хвильоводних мод склала 0,01 – 2,5%. Похибка фазового методу визначення ефективної висоти хвильоводу дорівнювала 0,15 – 3,5%. Систематичні похибки визначення відстані до блискавки склали 1 – 1,5% для фазового методу і 1 – 5% – для частотного методу в діапазоні відстаней 500 – 3000 км.

Для розв'язання оберненої задачі запропоновано методику визначення параметрів вертикального профілю провідності нижньої іоносфери та відстані до блискавки за сигналами твіків з урахуванням їх багатомодового складу.

У числовому експерименті на основі спрощеної моделі поширення ННЧ – ДНЧ-радіохвиль у хвильоводі Земля – іоносфера отримано часові форми твіків, які відображають основні особливості сигналів, що спостерігаються в експерименті.

На основі числового моделювання досліджено похибки оцінки параметрів задачі, пов'язані зі стохастичним шумом у сигналі та сферичністю хвилеводу. Показано, що запропонована методика визначення ефективних висот відбиття від іоносфери для різних мод дозволяє оцінити параметри експоненціального профілю провідності іоносфери (початкову висоту та висотний масштаб) в діапазоні значень цих параметрів, характерних для нічних умов.

У **розділі 3** описано програмно-апаратний комплекс для вимірювання та реєстрації трьох компонент ННЧ – ДНЧ електромагнітних полів. Запропоновано метод конструювання індукційних датчиків магнітного поля, що дозволяє узгодити їх за рівнем шуму з вхідними ланцюгами антенного підсилювача. Даний метод дозволяє спростити розрахунок параметрів датчика та знизити вимоги до шумових характеристик вхідних ланцюгів антенного підсилювача із збереженням необхідної чутливості. Розглянуто шумові параметри датчика вертикального електричного поля. На основі запропонованих методик розрахунку розроблено та створено вимірювальний комплекс. Програмна частина комплексу, яка реалізована на персональному комп'ютері, в режимі реального часу дозволяє оцінювати абсолютний рівень, спектральний склад широкосмугових, вузькосмугових і квазімонохроматичних полів і накопичувати отримані дані в цілодобовому режимі.

Передбачено можливість цілодобового запису до файлів даних і відображення параметрів вузькосмугових сигналів. Реєстрація трьох компонент поля дозволяє крім їх спектрального складу й абсолютного рівня досліджувати також поляризаційні характеристики, які містять інформацію про локальну структуру поля та його джерела.

Показано, що відношення сигнал/шум повітряної рамки визначається тільки двома її конструктивними параметрами: площею рамки та площею повного перерізу обмотки.

Таким чином, вибором кількості витків N за збереження площі повного перерізу дроту S можна збільшити відношення сигнал/шум на вході підсилювача до величини, близької до величини відношення сигнал/шум, що забезпечується рамкою.

У **розділі 4** наведено опис методу автоматичного аналізу твіків та експериментальних результатів досліджень варіацій параметрів нижньої іоносфери на основі розроблених методів.

Алгоритм реалізовано наступним чином.

1. За допомоги спектрограми твіка визначаються піки, які повинні бути досить гладкими, складатися з 5 точок і перевищувати рівень шуму на відповідній частоті. Величину шуму обчислюємо за спектром передісторії твіка, що аналізується. На рис. 2 показано розподіли спектральних піків без урахування (а) та з урахуванням (б) порогового рівня шуму.

2. Для поліпшення оцінок пікових частот використовується параболічна інтерполяція за трьома точками в спектрі.

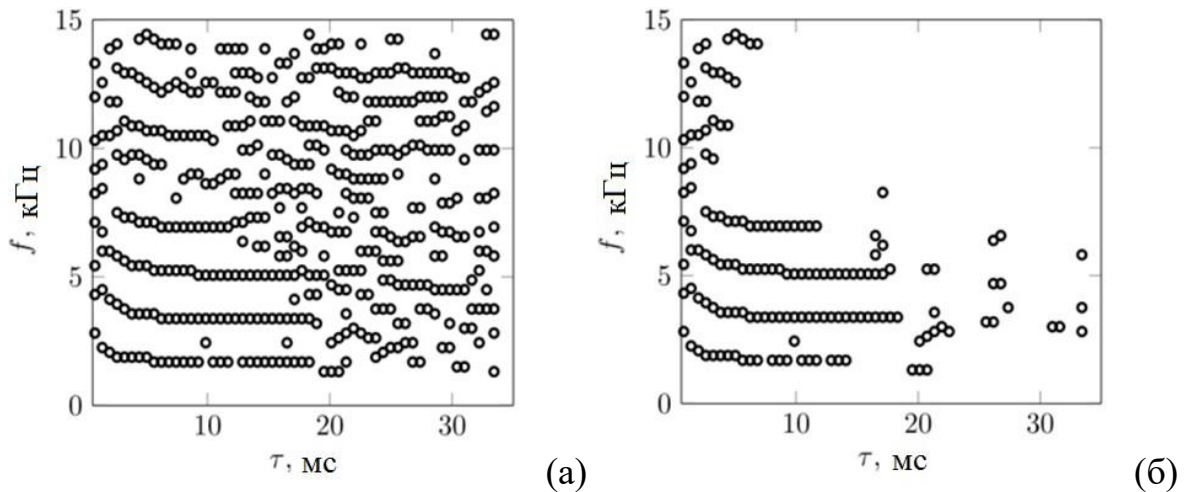


Рисунок 2 – Спектральні піки, визначені за спектрограмою без урахування (а) і з урахуванням (б) граничних значень шуму

3. Далі виконується початкова оцінка відстані до блискавки. З використанням набору координат спектральних піків обчислюються гістограми їх розподілу за частотою для заданого діапазону відстаней. Коли досягнуто істинне значення відстані, піки на гістограмі в околі частот відсічення максимально звужуються зі збільшенням висоти. Для пошуку такого значення виконується максимізація наступного функціоналу, що є сумою квадратів висот стовпчиків гістограми:

$$F = \sum_{i=1}^M n_i^2, \quad (1)$$

де M – кількість інтервалів у гістограмі, n_i – кількість елементів в i -ому інтервалі в гістограмі (висота стовбчика).

4. Виділення гармонік твіка. В околі піків на гістограмі будується коридор шириною 400 Гц і виключаються точки, розташовані поза цим коридором. Так само виключаються гармоніки довжиною, меншою ніж 5мс, і ділянки після розриву довжиною, більшою за 2 мс. Після виділення гармонік уточнюються оцінки відстані та частот відсічення.

Виділені гармоніки твіка та відповідні ефективні висоти хвильоводу для перших чотирьох мод показано на рис. 3.

Механізми формування нічної іоносфери є порівняно мало вивченими. Основними джерелами, що підтримують іонізацію на висотах, нижчих 100 км, вважаються розсіяне в геокороні випромінювання Сонця та галактичні космічні промені.

Для виявлення регулярної компоненти в варіаціях висоти нижньої границі іоносфери використано усереднення на добовому масштабі часу. Проаналізовано записи понад 300 тис. атмосфериків, накопичених протягом нічного часу за 16 діб: з 8-го по 26-е серпня 2014 р. Із цієї загальної кількості 38 тис. атмосфериків було ідентифіковано як твіки, і для кожного твіка визначено географічні координати блискавки та висоту хвильоводу.

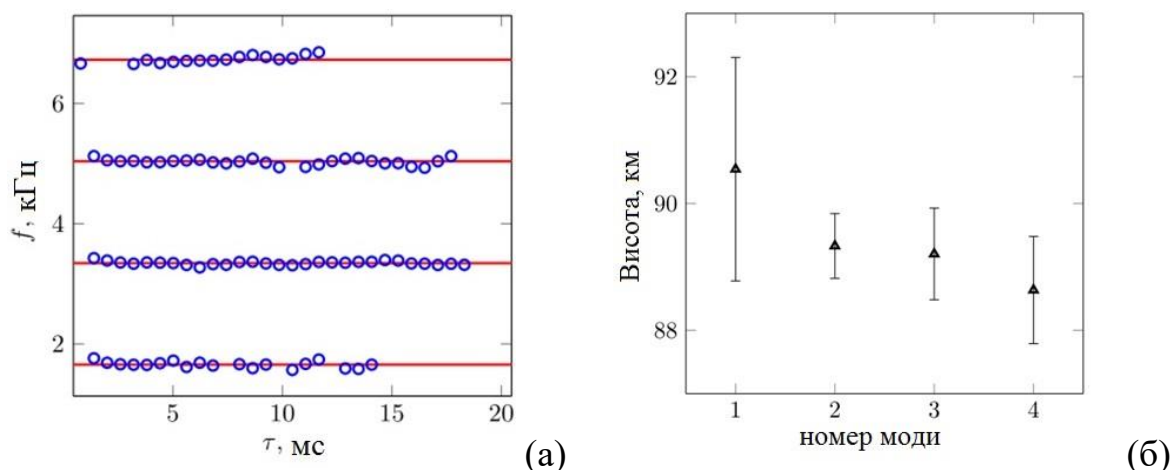


Рисунок 3 – Виділені гармоніки твіка (а) і відповідні ефективні висоти хвилеводу для перших чотирьох мод (б), визначені із застосуванням розробленої автоматичної процедури аналізу

На рис. 4, а представлено варіації висоти, які оцінені за допомоги твіків. Точки відповідають окремим твікам. Жирні кола з вертикальними планками похибок показують середні значення висоти та середньоквадратичні відхилення на півгодинних інтервалах.

Жирною штриховою лінією зображена залежність сонячного зенітного кута від часу, яка розрахована для пункту спостереження в Харкові для 17-го серпня 2014 р. — середини інтервалу вимірювань. Можна відзначити досить добру кореляцію середніх змін висоти з величиною сонячного зенітного кута, що, ймовірно, пов'язано з механізмом іонізації нічної іоносфери через випромінювання геокорони. Важливо, що пропорційність зберігається в період від заходу Сонця до локальної півночі. Після півночі неузгодженість поступово збільшується.

Досліджено середні варіації потоку твіків. На рис. 4, б пунктирною лінією показано залежність сонячного зенітного кута від часу. Як і в попередньому випадку, спостерігається його досить гарна узгодженість зі зміною потоку твіків. Даний факт, ймовірно, пов'язаний з тим, що зі збільшенням висоти відбивання ДНЧ радіохвиль знижуються втрати в іоносфері та формуються сприятливіші умови для формування твіків.

19 – 20 серпня 2014 р. спостерігалася геомагнітна буря, Кр-індекс геомагнітної активності для якої виявився більшим 4. Для аналізу можливого впливу даного збурення на нижню іоносферу проводимо порівнювання варіації висоти іоносфери і ар-індексу (рис. 5, а). Встановлено, що в ніч з 19 на 20 серпня відбувалося збільшення ефективної висоти хвилеводу в середньому на 2 – 2,5 км. Відповідні зміни ар-індексу представлено на рис. 5, б, де продемонстровано збіг моментів посилення планетарної геомагнітної активності й ефект збільшення висоти за результатом аналізу твіків.

У роботі [Yedemsky et al., 1992] показано, що пікова частота твіків збільшується із зростанням локального К-індексу, що пояснювалося збільшенням іонізації нижніх шарів іоносфери. У роботі [Ohya H. et al., 2006] спостерігалася як

зниження висоти майже на 10 км, так і підвищення на 2 – 3 км під час сильної магнітної бурі.

У порівнянні з першою роботою нами отримано протилежний результат — геомагнітне збурення призвело до збільшення висоти області відображення твіків.

Як пояснення спостережуваного ефекту можна було б залучити ефект Форбуш-зниження. Однак за даними вимірювань наземних нейтронних моніторів, в цей час Форбуш-зниження не спостерігалось. Таким чином, для пояснення виявленої позитивної кореляції змін висоти хвильоводу та геомагнітної активності є потреба у додатковому аналізі й уточненні механізмів сонячно-земних зв'язків, що планується зробити у майбутньому.

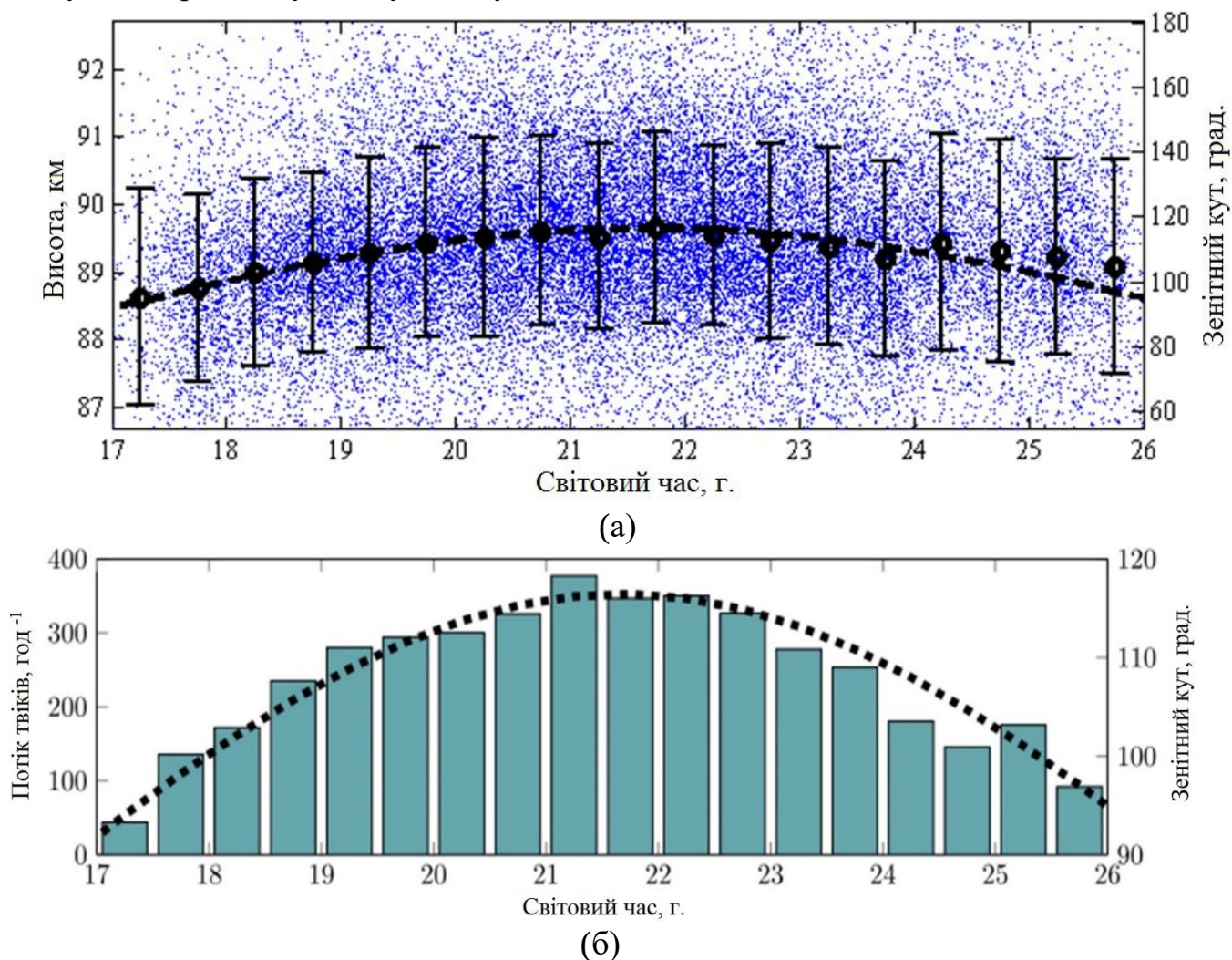
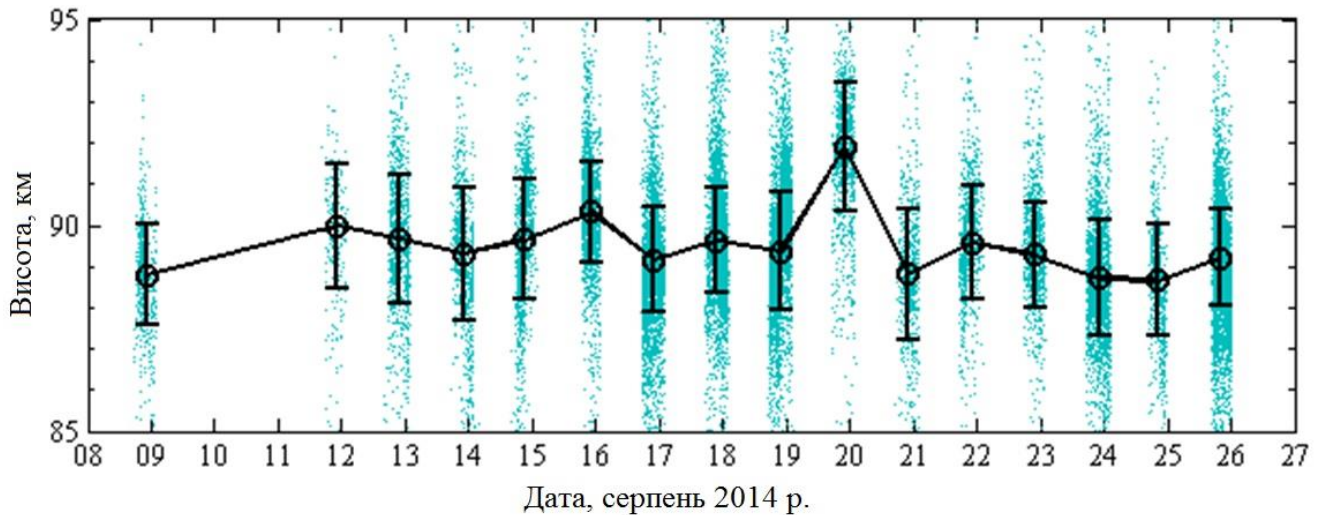
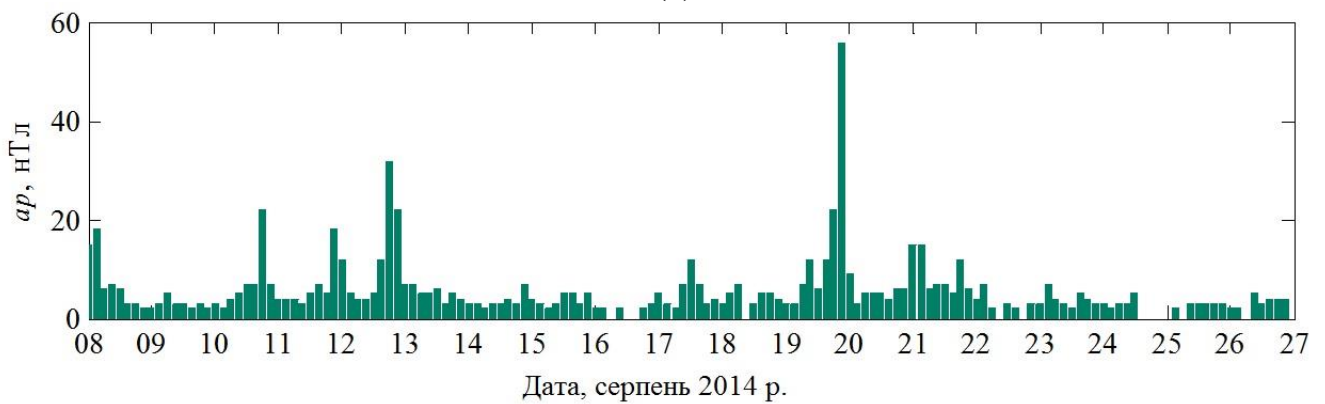


Рисунок 4 – Середні зміни висоти відбиття твіків від іоносфери протягом ночі показано медіанними півгодинними значеннями (жирні кола) і відповідними планками похибок, побудованими відносно лівої ординати (а). Висоти для кожного з 34600 твіків, зареєстрованих за 16 діб з 8-го по 26-е серпня 2014 р, показано точками. Середні зміни потоку твіків протягом ночі (б). Жирна штрихова лінія, що побудована відносно правої вертикальної осі на обох графіках, описує варіацію сонячного зенітного кута в пункті спостереження в Харкові і є розрахованою для середини інтервалу вимірювань 17 серпня 2014 р.



(а)



(б)

Рисунок 5 – Варіації висоти хвильоводу Земля – іоносфера за результатами аналізу твіків, зареєстрованих протягом 8 – 26 серпня 2014 року (а) і варіації планетарного ар-індексу (б) геомагнітної активності за той же період за даними *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto*, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>.

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено розробці методу визначення ефективних висот хвильоводу Земля – іоносфера уздовж траси поширення для основної моди і мод вищих порядків, що дозволяє реалізувати автоматичну ідентифікацію твіків та їх аналіз для моніторингу стану нижньої іоносфери в режимі реального часу.

Основні наукові результати дисертації полягають у наступному.

1. Проведено порівняльний аналіз фазового та частотного методів визначення ефективних висот хвильоводу Земля – іоносфера для основного та вищих типів нормальних хвиль (мод) і відстані до джерела випромінювання (блискавки) на основі аналізу імпульсних сигналів у діапазоні наднизьких і дуже низьких частот – твік-атмосфериків. У числовому експерименті хвильові форми твіків синтезовано в моделі хвильоводу Земля–іоносфера з експоненціальним профілем провідності нижньої іоносфери. Обчислення проводилися з додаванням шуму ($q = 5 - 40$ дБ). Похибка частотного методу визначення ефективної висоти хвильоводу для різних хвильоводних мод склала 0,01 – 2,5%. Похибка фазового

методу визначення ефективної висоти хвильоводу дорівнювала 0,15 – 3,5%. Систематичні похибки визначення дальності до блискавки склали 1 – 1,5% для фазового методу і 1 – 5% – для частотного методу в діапазоні відстаней 500 – 3000 км.

2. Запропоновано методику розв'язання оберненої задачі визначення ефективної висоти нижньої іоносфери та відстані до блискавки за сигналами твіків з урахуванням їх багатомодового складу. На основі числового моделювання досліджено похибки оцінки параметрів завдання, які пов'язані зі стохастичним адитивним шумом в сигналі і сферичністю хвильоводу. Показано, що запропонована методика визначення ефективних висот відбиття від іоносфери для різних мод дозволяє оцінити параметри експоненціального профілю провідності іоносфери (початкову висоту та висотний масштаб) в діапазоні значень, характерних для нічних умов.

3. На прикладі створення триканального програмно-апаратного комплексу для вимірювань атмосферних електромагнітних завад в діапазоні низьких частот, описано й обґрунтовано вибір конструктивних параметрів датчиків магнітного й електричного полів та трактів підсилення з метою отримання необхідної чутливості та частотного діапазону реєстрованих сигналів. Вимірювання параметрів приймальної частини комплексу показали досить гарне узгодження з розрахунком. Програмна частина комплексу, яка реалізована на персональному комп'ютері, в режимі реального часу дозволяє оцінювати абсолютний рівень, спектральний склад, а також поляризаційні характеристики реєстрованих імпульсних, вузькосмугових і квазімонохроматичних полів і накопичувати отримані дані в цілодобовому режимі.

4. Протягом 2014 – 2015 рр. проведено серії реєстрацій атмосфериків. В результаті роботи вимірювального комплексу в цілодобовому режимі накопичено записи часових форм трьох компонент поля атмосфериків, що охоплюють практично всі сезони (разом – близько 215 діб).

5. Запропоновано новий метод автоматичної ідентифікації твік-атмосфериків і визначення відстані до розряду блискавки й ефективних висот нижньої іоносфери вздовж трас поширення для нормальних хвиль основного та більш високого порядку в хвильоводі Земля – іоносфера. Точність визначення дальності методу, яка була оцінена шляхом порівняння з незалежними даними мережі локації блискавки *Blitzortung*, виявилася меншою за 100 км зі стандартним відхиленням, меншим 200 км, в діапазоні відстаней до блискавки від 500 до 1400 км. Застосування алгоритму кластеризації дозволило визначити зміни ефективної висоти нижньої іоносфери вздовж різних трас поширення, що є корисним для вивчення динаміки іоносферних неоднорідностей як в часі, так і в просторі.

6. Продемонстровано діагностичні можливості запропонованого методу, який дозволив провести локацію грозових осередків і виявити варіації висоти хвильоводу Земля – іоносфера уздовж трас поширення ДНЧ радіохвиль, збуджених розрядами блискавок з різних осередків. Досліджено зв'язок регулярних варіацій висоти іоносфери зі зміною сонячного зенітного кута, який визначає основне

джерело іонізації – випромінювання геокорони в нічний час. Показано, що під час збільшення висоти нижньої межі іоносфери зростає потік твіків, що пов'язано зі зменшенням втрат в іоносфері. Виявлено ефект підйому нижньої межі іоносфери під час геомагнітної бурі помірної інтенсивності 19 – 20 серпня 2014 р.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в міжнародних та українських наукових фахових журналах

1. Оценка параметров профиля проводимости нижней ионосферы на основе анализа твик-атмосфериков / А.В. Шве́ц, Т.Н. Сердюк, А. П. Кривонос, Ю.В. Горишня // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т.6 (20), №1. – С. 40–47.
2. Кривонос А. П. Сравнительный анализ методов оценки параметров нижней ионосферы с помощью твик-атмосфериков / А. П. Кривонос, А. В. Шве́ц // Радиофизика и радиоастрономия. – 2016. – Т. 21, № 4. – С. 270–278.
3. Шве́ц А.В. Комплекс для многокомпонентных измерений СНЧ–ОНЧ электромагнитных полей / А.В. Шве́ц, А.П. Кривонос, В.К. Иванов // Радиофизика и электроника. – 2016. – Т.7(21), №4. – С. 49–55.
4. A technique for automatic monitoring the lower ionosphere and lightning location by tweek-atmospherics / A.V. Shvets, A.P. Krivonos, T.N. Serdiuk, M. Hayakawa // International Journal of Electronics and Applied Research (IJEAR). –2017. – Vol.4, Issue 2. – P. 1 – 14.
5. Шве́ц А. В. Предварительные результаты мониторинга нижней ионосферы на основе анализа твик-атмосфериков / А. В. Шве́ц, А. П. Кривонос // Радиофизика и электроника. –2017. – Т.8 (22), № 3. – С.49–57.

Публікації в матеріалах конференцій

6. Сердюк Т.Н. Комплекс для измерения и регистрации низкочастотных электромагнитных полей / Т.Н. Сердюк, А.В. Шве́ц, А.П. Кривонос // Энергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Воловець, 10 червня – 13 червня 2015 р. – С. 106–107.
7. Krivonos A. P. Comparative analysis of methods for solving the inverse problem of recovering the parameters of the Earth-ionosphere waveguide excited by lightning / A. P. Krivonos, A. V. Shvets // International Young Scientists Forum on Applied Physics. – Dnipropetrovsk, 29 Sept. – 2 Oct. 2015. - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
8. Krivonos A. P. Comparative analysis of methods for estimation of parameters of the ionosphere by tweek atmospherics / A. P. Krivonos // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. – Kharkov, June 21–24, 2016. – DOI: 10.1109 / MSMW.2016.753802210.1109 / MSMW.2016.7538022.
9. Krivonos A. P. Comparison of single station methods for analysis of tweek atmospherics / A. P. Krivonos, V. A. Plakhtii // Proceedings of the 16th International

- Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). – Lviv, July 5–7, 2016. – P. 165–168.
10. Serdiuk T. N Multimode tweek-atmospherics in the earth-ionosphere waveguide / T. N. Serdiuk, A. V. Shvets, A. P. Krivonos // Тези VII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (S&EMC). – Розлуч, 06 лютого – 19 лютого 2016. – С. 71–72.
 11. Shvets A. V. Analysis of Tweek-atmospherics, Synthesized Under the Quasi-longitudinal Propagation Model in Sharply Bounded Magnetized Ionosphere / A. V. Shvets, A. P. Krivonos // II International Young Scientists Forum On Applied Physics And Engineering. – Kharkiv, 10–14 Oct. 2016. - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
 12. Метод расчета параметров индукционного датчика для согласования с входными шумами усилителя / Т. Н. Сердюк, А. В. Шве́ц, А. П. Кривонос, Ю. В. Горишня // Тези VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті». – Чернівці, 01 лютого – 03 лютого 2017. – С. 62–63.

Додаткові публікації

13. Обратная задача восстановления параметров волновода Земля-ионосфера, возбуждаемого разрядом молнии / А. В. Шве́ц, А. П. Кривонос, Т. Н. Сердюк, Ю. В. Горишня // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013. – Т. 3(36). – С. 84 – 90.
14. Комплекс для измерения и регистрации электромагнитных полей в диапазоне СНЧ – ОНЧ / А. В. Шве́ц, Т. Н. Сердюк, А. Ю. Щекотов, Г. Г. Беляев, А. П. Кривонос // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті. – 2014. – № 7. – С. 11–21.

АНОТАЦІЯ

Кривонос О. П. Радіозондування області D нічної іоносфери з використанням випромінювання розрядів блискавок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено розробці методу визначення ефективних висот хвильоводу Земля – іоносфера уздовж траси поширення для основної моди та мод вищого порядку, що дозволяє реалізувати автоматичну ідентифікацію твіків та їх аналіз для моніторингу стану нижньої іоносфери в режимі реального часу.

У роботі проведено порівняльний аналіз фазового та частотного методів визначення ефективних висот хвильоводу Земля – іоносфера та відстані до джерела випромінювання (блискавки) на основі аналізу імпульсних сигналів у діапазоні наднизьких і дуже низьких частот – твік-атмосфериків. Аналіз показав, що похибка частотного методу визначення ефективної висоти хвильоводу для різних

хвильоводних мод складала 0,01 – 2,5%. Похибка фазового методу визначення ефективної висоти хвильоводу дорівнювала 0,15 – 3,5%.

Створено програмно-апаратний комплекс для накопичення записів трьох компонент поля твіків. У роботі наведений детальний опис комплексу з обґрунтуванням вибору конструктивних параметрів датчиків магнітного й електричного полів і трактів підсилення з метою отримання необхідної чутливості та частотного діапазону сигналів, що реєструються.

Протягом 2014 – 2015 рр. проведено серії реєстрацій атмосфериків. В результаті роботи вимірювального комплексу в цілодобовому режимі накопичено записи часових форм трьох компонент поля атмосфериків, що охоплюють практично всі сезони (разом – близько 215 діб).

Запропоновано новий метод автоматичної ідентифікації твік-атмосфериків і визначення відстані до розряду блискавки й ефективних висот нижньої іоносфери вздовж траси поширення для нормальних хвиль основного та більш високих порядків в хвильоводі Земля – іоносфера. Точність визначення дальності методу оцінюється шляхом порівняння з незалежними даними мережі локації блискавки Blitzortung.

Продемонстровано діагностичні можливості запропонованого методу. Досліджено зв'язок регулярних варіацій висоти іоносфери зі зміною сонячного зенітного кута, який визначає основне джерело іонізації – випромінювання геокорони в нічний час. Показано, що під час збільшення висоти нижньої межі іоносфери зростає потік твіків, що пов'язано зі зменшенням втрат в іоносфері. Виявлено ефект підйому нижньої границі іоносфери під час геомагнітної бурі помірної інтенсивності 19 – 20 серпня 2014 р.

Ключові слова: хвильовід Земля – іоносфера, твік-атмосферики, ННЧ – ДНЧ радіохвилі, нижня іоносфера, локація блискавок

АННОТАЦИЯ

Кривонос А. П. Радиозондирование области D ночной ионосферы с использованием излучения разрядов молний. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке метода определения эффективных высот волновода Земля-ионосфера вдоль трассы распространения для основной моды и мод высших порядков, который позволяет реализовать автоматическую идентификацию твигов и их анализ для мониторинга состояния нижней ионосферы в режиме реального времени.

В работе проведен сравнительный анализ фазового и частотного методов определения эффективных высот волновода Земля-ионосфера и дальности до источника излучения (молнии) на основе анализа импульсных сигналов в диапазоне сверхнизких и очень низких частот – твик-атмосфериков, который

показал, что погрешность частотного метода определения эффективной высоты волновода для различных волноводных мод составила 0,01 – 2,5%. Погрешность фазового метода определения эффективной высоты волновода равна 0,15 – 3,5%.

Создан программно-аппаратный комплекс для накопления записей трех компонент поля твиков. В работе приведено детальное описание комплекса с обоснованием выбора конструктивных параметров датчиков магнитного и электрического полей и трактов усиления с целью получения необходимой чувствительности и частотного диапазона регистрируемых сигналов.

В течение 2014 – 2015 гг. проведены серии регистраций атмосфериков. В результате работы измерительного комплекса в круглосуточном режиме накоплены записи временных форм трех компонент поля атмосфериков, охватывающих практически все сезоны, всего — около 215 суток.

Предложен новый метод автоматической идентификации твик-атмосфериков и определения дальности до разряда молнии и эффективных высот нижней ионосферы вдоль трассы распространения для нормальных волн основного и более высокого порядков в волноводе Земля-ионосфера. Точность определения дальности оценивается путем сравнения с независимыми данными сети локации молнии Blitzortung.

Продемонстрированы диагностические возможности предложенного метода. Исследована связь регулярных вариаций высоты ионосферы с изменением солнечного зенитного угла, который определяет основной источник ионизации — излучения геокороны в ночное время. Показано, что при увеличении высоты нижней границы ионосферы увеличивается поток твиков, что связано с уменьшением потерь в ионосфере. Обнаружен эффект подъема нижней границы ионосферы во время геомагнитной бури умеренной интенсивности 19 – 20 августа 2014г.

Ключевые слова: волновод Земля — ионосфера, твик-атмосферики, СНЧ — ОНЧ радиоволны, нижняя ионосфера, локация молний

ABSTRACT

Krivosos A. P. Radio sounding of the D region of the nocturnal ionosphere using lightning discharge radiation. – On the manuscript.

Thesis for a degree of Candidate in Physics and Mathematics, speciality 01.04.03 – Radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the development of a method for determining the effective heights of the Earth-ionosphere waveguide along the propagation path for the main mode and higher-order modes, which allows automatic identification of tweeks and their analysis for monitoring the state of the lower ionosphere in real time.

The dissertation compares the phase and frequency methods for determining the effective heights of the Earth-ionosphere waveguide and the distance to the lightning source based on the analysis of pulsed signals in the ultra-low and very low frequency

range tweek-atmospherics. It is shown the error of the frequency method for determining the effective waveguide height for different waveguide modes was 0.01 – 2.5%. The error in the phase method for determining the effective waveguide height was 0.15 – 3.5%.

A software and hardware complex was created to accumulate records of three components of the tweek field. The paper gives a detailed description of the complex with the rationale for choosing the design parameters of magnetic and electric field sensors and gain paths in order to obtain the necessary sensitivity and frequency range of the detected signals.

During 2014 – 2015, a series of atmospheric recordings were conducted. As a result of the operation of the measuring system in a round-the-clock mode, records of time forms of three components of the atmospheric field covering almost all seasons were accumulated, only about 215 days.

A new method for the automatic identification of tweek-atmospherics and the determination of the distance to the lightning discharge and effective heights of the lower ionosphere along the propagation path for normal ground and higher-order waves in the Earth-ionosphere waveguide was proposed. The accuracy of determining the range of the method is estimated by comparison with the independent data of the network of the lightning location Blitzortung.

The diagnostic capabilities of the proposed method were demonstrated. The relationship between the regular variations in the height of the ionosphere with the change in the solar zenith angle, which determines the main source of ionization — the radiation of the geocorona at night. It is shown as the height of the lower boundary of the ionosphere increases, the flow of tweeks increases, which is associated with a decrease in losses in the ionosphere. The effect of rising the lower boundary of the ionosphere during a moderate-intensity geomagnetic storm on August 19 – 20, 2014 was obtained.

Keywords: Earth-ionosphere waveguide, tweek-atmospherics, ELF – VLF radio waves, lower ionosphere, lightning location