

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

На правах рукопису

ГОРІШНЯ ЮЛІЯ ВІКТОРІВНА

УДК 537.87+550.388.2

ДІАГНОСТИКА НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТВІК-АТМОСФЕРИКІВ

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків – 2016

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України

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

Офіційні опоненти доктор фізико-математичних наук, професор
Чорногор Леонід Феоктистович,
професор кафедри космічної радіофізики
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 “ 3 ” листопада 2016 року о 16 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 “ 29 ” вересня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Порожнина між поверхнею Землі та нижньою іоносферою утворює своєрідний резонатор для електромагнітних коливань. При цьому атмосфера є електрично активним середовищем, в якому за рахунок нагріву земної поверхні Сонцем та конвекції повітряних мас відбувається розділення зарядів, що продукує розряди блискавок. Світова грозова активність являє собою індикатор глобальних змін оточуючого середовища. Резонансні частоти цього глобального резонатора визначаються поздовжнім (довжина екватора) та поперечним (висота проміжку Земля-іоносфера) масштабами порожнини та потрапляють до діапазонів наднизьких частот (ННЧ, 3 – 3000 Гц) та дуже низьких частот (ДНЧ, 3 – 30 кГц) радіохвиль. Добротності резонатора у діапазоні ННЧ складають 4 – 8 для різних типів коливань (мод), а для діапазону ДНЧ у нічних умовах сягають кількох десятків. Така природна система є об'єктом радіофізичних досліджень і дозволяє використовувати моніторинг резонансних параметрів порожнини як засіб для виявлення локальних і глобальних збурень нижньої іоносфери, що спричинені явищами космічної погоди, впливом процесів у земній корі й атмосфері, а також антропогенним впливом на оточуюче середовище. У зв'язку з цим виникла необхідність розробки нових радіофізичних методів ННЧ – ДНЧ зондування нижньої іоносфери, а також удосконалення методів визначення просторового розподілу світової грозової активності за допомогою використання природних ННЧ та ДНЧ електромагнітних полів всередині резонатора Земля-іоносфера.

Традиційним методом для дослідження нижньої іоносфери є використання сигналів ДНЧ радіостанцій, які віддзеркалюються від нижніх шарів іоносфери з низькою концентрацією заряджених частинок ($10^6 - 10^8 \text{ м}^{-3}$), прозорих для коротких хвиль. Такі спостереження застосовуються для досліджень впливу сонячних спалахів на іоносферу, висипань заряджених частинок, що зумовлені резонансною взаємодією електронів і хвиль усередині магнітосфери. Внаслідок розвитку глобальних супутникових навігаційних мереж в даний час відбувається скорочення кількості навігаційних ДНЧ радіостанцій. Тому великого значення набуває розробка методів моніторингу нижньої іоносфери із використанням природних джерел ННЧ – ДНЧ випромінювання – розрядів блискавок.

Під час проходження вузькосмугових сигналів радіостанцій усередині хвилеводу Земля-іоносфера у нічний час внаслідок зменшення загасання поле випромінювання формується декількома типами нормальних хвиль, що суттєво ускладнює розв'язок зворотної задачі визначення параметрів віддзеркалюючого прошарку в нижній іоносфері.

У випадку використання твік-атмосфериків (твіків) – широкосмугових сигналів, що породжуються розрядами блискавок і спостерігаються в нічний час, за частотно-часовим поданням у вигляді динамічного спектру виникає можливість виокремлення й аналізу окремих хвилеводних мод, що може слугувати значною перевагою при дослідженнях віддзеркалюючого прошарку нижньої іоносфери.

Однак у наявних методах аналізу дотепер використовується тільки фундаментальна (перша) гармоніка в сигналах твіків, що істотно обмежує можливості для діагностики.

Тому представлені в дисертації нові методи розв'язку зворотних задач радіофізики для оцінки концентрації електронів у нижній іоносфері та локації розрядів блискавок за результатами вимірювань твік-атмосфериків, а також результати аналізу на основі запропонованих методів варіацій ефективної висоти навколоземного хвилеводу та поляризаційних властивостей ННЧ – ДНЧ радіохвиль видаються актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дану роботу виконано у відділі дистанційного зондування Землі ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках досліджень по держбюджетним науково-дослідним темам “Радіофізичні методи та засоби в задачах моніторингу зовнішнього середовища і в біомедичних застосуваннях” (шифр «Іридій», номер державної реєстрації 0106U011979), “Дослідження та розробка моделей впливу природного оточення на випромінювання, поширення і розсіювання електромагнітних хвиль з метою розвитку методів дистанційного зондування” (шифр «Радикал», номер державної реєстрації 0103U002264); «Дослідження взаємодії радіохвиль з природними об'єктами та розробка методів дистанційної діагностики оточуючого середовища» (шифр «Равелін», номер державної реєстрації 0100U006443); «Дослідження електромагнітних полів у середовищах з поглинанням та частотною дисперсією з неявно вираженими границями» (шифр «Ікар», номер державної реєстрації 0102U003138). Автор є одним з виконавців даних тем, і її науковий внесок у них відображено у матеріалах дисертації.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є розробка та реалізація нових методів радіозондування нижньої іоносфери та моніторингу грозової активності, що засновані на вимірюванні ННЧ – ДНЧ полів природного походження в резонансній порожнині Земля – іоносфера.

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

- Створення нових методів розв'язку зворотних задач радіофізики для оцінки параметрів нижньої іоносфери та локації грозових розрядів за результатами вимірювань широкосмугових імпульсних сигналів – твік-атмосфериків.
- Дослідження варіацій ефективних висот навколоземного хвилеводу, модового складу та поляризаційних властивостей твіків на добовому та сезонному масштабах часу, їх зв'язку з географічним проляганням траси поширення й орієнтацією геомагнітного поля.
- Створення масивів даних поляризаційних параметрів ННЧ – ДНЧ радіохвиль на основі аналізу експериментальних записів твік-атмосфериків.

Об'єктом досліджень є процеси в природному електромагнітному резонаторі Земля – іоносфера, що викликані грозовою активністю, земним і космічним впливом.

Предметом досліджень є електромагнітні поля ННЧ – ДНЧ діапазонів природного походження в резонансній порожнині Земля – іоносфера.

Методи досліджень базуються на вимірюваннях електричної та двох магнітних компонент електромагнітного поля в ННЧ – ДНЧ діапазонах, теорії поширення ННЧ – ДНЧ електромагнітних хвиль в порожнині Земля – іоносфера, плазмі та в провідних середовищах, теорії оптимізації при розв'язанні зворотних задач, теорії цифрової фільтрації сигналів, теорії математичної статистики, структурному програмуванні, математичних методах обробки результатів експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Запропоновано метод оцінки ефективної висоти хвилеводу Земля-іоносфера, що заснований на компенсації частотної дисперсії, виміряної за окремими гармоніками твіка, який дозволяє підвищити ефективність обчислювань за рахунок скорочення кількості параметрів при розв'язанні зворотної задачі визначення параметрів траси поширення.

2. Запропоновано модифікацію «харківського» методу, засновану на використанні властивостей інтерференції мод нульового та першого порядків в спектрі твіка, що дозволяє виключити вплив похибки визначення моменту приходу сигналу на точність оцінки параметрів траси поширення.

3. Вперше проаналізовані залежності кількості гармонік, що спостерігаються, в сигналах твіків від дальності до джерела, ефективної висоти хвилеводу й азимуту приходу, внаслідок чого показано, що за ефективної висоти відбиття 87...89 км спостерігається зростання частоти появи твіків з великою кількістю гармонік (до 6 – 8) в діапазоні відстаней до джерела до 3000 км. Це доводить, що в цьому вузькому діапазоні висот реалізуються фізичні умови для формування підвищеної крутизни наростання в вертикальному профілі електронної концентрації, що забезпечує мінімальне загасання під час поширення мод вищих порядків.

4. Продемонстровано можливість побудови «миттєвих карт» розподілу висоти хвилеводу в області, що перекривається трасами поширення ДНЧ випромінювання від блискавок до спостерігача, на основі аналізу твік-атмосфериків з метою моніторингу змін стану нижньої іоносфери та виявлення її неоднорідностей.

5. Вперше на основі статистичного аналізу сигналів твіків з урахуванням гармонік, утворених нормальними хвилями вищих типів у хвилеводі Земля-іоносфера, показано, що в переважній кількості випадків (75 %) ефективна висота хвилеводу для 1-ої моди виявляється вище за ефективну висоту для 2-ої моди більш ніж на 0,7 км. Цей висновок дозволив розробити й апробувати метод

визначення концентрації електронів на нижній межі іоносфери за вимірами критичних частот.

6. Вперше експериментально досліджені залежності поляризаційних параметрів ННЧ – ДНЧ радіохвиль від кута падіння на іоносферу на основі аналізу твік-атмосфериків навколо геомагнітного екватору.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані розв'язки зворотних задач радіофізики для пасивної локації точкових джерел в хвилеводі Земля-іоносфера, метод для визначення електронної концентрації в нижній іоносфері, а також розроблені алгоритми та програмне забезпечення можуть бути використані для створення однопозиційних і багатопозиційних систем локації блискавок, автоматичних систем моніторингу нижньої іоносфери та грозової активності. За результатами статистичної обробки трикомпонентних записів твік-атмосфериків, виконаних в субекваторіальних районах Атлантичного й Індійського океанів, створено банк даних поляризаційних характеристик поля твіків, який може слугувати основою для подальшого вивчення властивостей поширення ННЧ – ДНЧ радіохвиль під анізотропною іоносферою й удосконалення існуючих теоретичних моделей роботи радіозв'язку на таких частотах. Отримані нові відомості щодо твік-атмосфериків з гармоніками вищого порядку можуть зробити внесок у забезпечення та завадозахищеність радіоприйому в ДНЧ діапазоні.

Особистий внесок здобувача. В дисертації викладено результати досліджень, виконаних здобувачем самостійно [4, 14] та в співавторстві [1 – 3, 5 – 13]. В опублікованих в співавторстві працях здобувач брала участь у розробці нових методів розв'язання зворотної задачі радіофізики з визначення відстані до блискавки й ефективної висоти іоносфери для вищих типів нормальних хвиль хвилеводу Земля – іоносфера за записами твіків, виконувала статистичні дослідження поляризаційних параметрів поля твіків та аналіз одержаних результатів. Здобувачем було виконано програмну реалізацію алгоритмів і методів, що використовувалися в дослідженнях, запропоновано й апробовано ідею тривимірного картування нижньої іоносфери за результатами оцінки концентрації електронів в прошарку нижньої іоносфери, що віддзеркалює.

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-2004, (Дніпропетровськ, Україна, 2004), ММЕТ-2006, (Харків, Україна, 2006), ММЕТ-2010, (Київ, Україна, 2010); 2nd International Radio Electronic Forum, (Харків, Україна, 2005); 6th и 2013 Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies, (Харків, Україна, 2007, 2013); V Международна науково-практична конференція «Безпека та

електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», (Дніпропетровськ, Україна, 2012); *Electromagnetic Methods of Environmental Studies* (Харків, Україна, 2012).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових робіт. З них 5 статей у фахових виданнях і 9 тез доповідей у збірниках праць наукових конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів і висновку. Повний обсяг дисертації становить 130 сторінок, з них 11 сторінок – перелік використаних джерел (90 найменувань), дисертація містить 36 рисунків і 6 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації та доцільність проведення досліджень, показано зв'язок з науковими темами, сформульовано мету та задачі досліджень, визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, відзначений особистий внесок автора у спільних публікаціях, наведено відомості щодо апробації наукових результатів, публікацій і структури дисертаційної роботи, викладено загальну характеристику роботи.

У **розділі 1** наведено огляд літератури, сформульований сучасний стан проблем діагностики нижньої іоносфери на основі дистанційного ННЧ – ДНЧ радіозондування порожнини Земля – іоносфера, та напрямки їх вирішення.

Наведено опис ізотропної моделі хвилеводу Земля-іоносфера з експоненціальним вертикальним профілем провідності іоносфери, основні співвідношення та формули для розрахунку широкосмугових ННЧ – ДНЧ сигналів, що збуджуються в навколосемному хвилеводі вертикальним розрядом блискавки.

У **розділі 2** наведено описи методів визначення дальності до блискавки й ефективної висоти відбиття ННЧ – ДНЧ радіохвиль від іоносфери на основі вимірювань твіків, запропонованих автором. Перший метод засновано на визначенні місцерозташувань екстремумів в амплітудному спектрі твіка, що виникають внаслідок інтерференції хвилеводних мод першого та другого порядків в діапазоні між частотами відсічки нормальних хвиль TM_1 та TM_2 . Другий метод є розвитком методу визначення дальності до блискавки за вимірюваннями затримки між прибуттям на пункт спостережень хвиль з різними частотами, що виникає внаслідок хвилеводної дисперсії швидкості поширення. Запропонована модифікація методу дозволила оцінювати не лише дальність до джерела твіка, але й ефективні висоти хвилеводу за основною гармонікою та гармоніками вищого порядку, які спостерігаються в сигналах твіків, що приходять з відстаней до 3000 – 4000 км. Для оцінки точності було здійснено числове моделювання цього

метода на основі моделі плаского нескінченного хвилеводу з ідеально провідною землею й ізотропною іоносферою з експоненціальним вертикальним профілем провідності. За розрахованими спектрами компонент поля з урахуванням нульової моди та мод вищого порядку (до 9-го) було отримано часові реалізації твіків, які застосовувалися для тестування методики в присутності білого шуму.

Було показано, що похибка оцінки ефективних висот для усіх мод твіка невисока, и для рівнів шуму $0 \dots 0,75$ від потужності сигналу не перевищує $0,3 \dots 0,7$ %. За ефективних висот відбиття в природних умовах близько 90 км це становить $0,3 \dots 0,5$ км. Середньоквадратичне відхилення одержаних оцінок в присутності шуму дорівнює тій ж величині, що і похибка, для усіх мод, окрім першої, а для першої моди сягає $1 \dots 3$ %. Продемонстровано, що оцінки дальності до джерела показують дещо меншу точність. На усіх модах помилка оцінки дальності становить від одиниць процентів до 5 %, окрім випадків на межі застосовності методу, біля 500 км, де на першій моді похибка оцінки дальності до джерела твіка дорівнює приблизно 10 %, що становить $40 \dots 50$ км. Середньоквадратичне відхилення оцінок дальностей становить $2 \dots 8$ % від величини дальності та зростає із зростанням рівня шуму. За умов відстаней до джерел понад 1000 км для усіх мод статистичний розподіл оцінок висот і дальностей є одностороннім.

Сформульовано вимоги до параметрів обробки, необхідні для коректної роботи методики та забезпечення максимальної точності оцінки дальності і висоти. Зокрема, показано, що для коректної роботи методики є припустимим застосовувати напівемпіричне правило, при котрому для обчислення дальностей і середніх ефективних висот відбиття по багатомодовому твіку здійснюється усереднення за усіма модами твіка для дальностей більш 1500 км, і за усіма модами, окрім першої, для дальностей менш ніж 1500 км.

У **розділі 3** наведено дані про комплекс вимірювальної апаратури та банк даних трикомпонентних записів твік-атмосфериків, що накопичено під час плавання дослідного судна «Академік Вернадський» в 1991 році в екваторіальних і середньовисотних водах Атлантичного й Індійського океанів.

В підрозділі 3.2 наведено результати застосування обох методик для обробки й аналізу ансамблю даних, накопичених в експерименті. Порівнювальний аналіз результатів оцінок дальностей і ефективних висот хвилеводу двома запропонованими методами показав їх високу кореляцію для оцінок дальностей, а також, що оцінки ефективних висот відбиття та висот відбиття для першої моди розрізняються у середньому на 0,5 км, незалежно від дальності до джерела.

Досліджені поляризаційні характеристики твік-атмосфериків на матеріалі експериментальних записів, а саме поляризаційне відношення R і різниця фаз Ψ поздовжньої та поперечної компонент поля протягом їх часової реалізації. Наведено співвідношення, за яких є застосовною теорія, що описує поширення твік-атмосферика під анізотропною замагніченою іоносферою. Описано програмний алгоритм, що застосовується для обчислень поляризаційних характеристик першої (фундаментальної) моди твік-атмосферика. Показано

загальну відповідність експериментальних характеристик і очікуваних на основі теорії, а саме ліва еліптична поляризація твіка в хвостовій частини сигналу твіка (що співвідноситься з ефективними кутами падіння $15...35^\circ$), а також нові ефекти, які виявляються головним чином при поширенні поблизу геомагнітного екватора.

На ансамблі експериментальних даних продемонстровано ефект невзаємності в поляризаційних характеристиках при поширенні схід – захід та захід – схід відносно геомагнітного меридіану для ефективних кутів падіння випромінювання $40...65^\circ$. Виявлено, що поляризаційні властивості твіків є різними в регіонах, що прилягають до геомагнітного екватора ($-15...15^\circ$ висоти) і в середніх геомагнітних висотах, на яких виконується умова квазіпоздовжнього поширення випромінювання твіків вздовж геомагнітного поля.

Продемонстрована наявність двох груп твіків з особливими ефектами поляризації. Одна група твіків поширюється у вузькому секторі геомагнітних азимутів, що охоплюють напрямки схід – захід, захід – схід, і є присутньою як поблизу екватора, так і в середніх висотах, маючи відношення $R \gg 1$ за ефективних кутів падіння $40...45^\circ$. Друга група присутня в середніх геомагнітних висотах з азимутами поширення приблизно $60...120^\circ$ і поляризаційним відношенням $R=0,3...0,7$ за кутів падіння $40...60^\circ$. Показано, що для другої із цих груп є характерною підвищена доля твіків з присутністю високочастотних гармонік.

У розділі 4 розглянуто методи аналізу та результати обробки експериментальних записів твіків з метою діагностики стану та виявлення неоднорідностей в нижній іоносфері.

Продемонстровано можливість тривимірного картування нижньої іоносфери за допомогою однопозиційної локації за результатами аналізу потоку твіків. Обговорюється можливість виявлення неоднорідностей в іоносфері при такому процесі за умов досягнутої точності методик обробки.

Підрозділ 4.2 присвячено результатам морфологічного аналізу та статистичної обробки банку експериментальних записів, що накопичені в приекваторіальних і середньовисотних районах Атлантичного й Індійського океанів, із застосуванням запропонованого метода аналізу гармонік у сигналах твіків.

Наведено результати аналізу кількості мод в спектральному складі широкосмугових твіків в залежності від дальності до джерела. Показано відмінність кількості гармонік, що спостерігаються, в сигналах твіків для різних інтервалів дальності до джерела. За дальностей менш 1500 км середня кількість гармонік становить $4,5 \pm 1,7$. Для твіків, що прийшли з великих відстаней, максимальна кількість гармонік не перевищувала 6, и в середньому становила $2,7 \pm 1,0$.

Показано, що найбільша доля твіків з 4-ма – 9-ма гармоніками спостерігається в період 20...24 годин локального часу. Ця риса спостерігається для усього інтервалу дальностей.

Виконано аналіз регулярних змін параметрів нижньої іоносфери за результатами обробки записів твіків, що охоплюють період з січня по квітень 1991 р. Вперше продемонстровано залежність висоти нижньої іоносфери не лише від зенітного кута Сонця, але і від локального часу ночі. На даних географічних висотах в іонізацію нижньої іоносфери роблять внесок два ефекти, а саме: розсіяне атмосферою сонячне випромінювання лінії Лайман- α та галактичні промені протонів, що є порівнюваними за величиною, із котрих лише один залежить від зенітного сонячного кута. Показано, що ефективна висота відбиття зростає протягом ночі. В період рівнодення було виявлено значне зростання приблизно на 4,5 км від 85 км до 89,5 км, за період від 18:00 до 2:00 локального часу. Протягом проміжку часу 0:30...2:00 локального часу ефективна висота відбиття змінюється незначно. Для літньої пори зростання ефективної висоти відбиття становить приблизно 3 км для проміжку 20:00...1:00 локального часу. Після півночі спостерігається великий розкид оцінок висоти та незначне зниження середньої висоти після 2:00 локального часу.

Як сезонні варіації спостерігалось, що у середньому висоти відбиття уночі, що відносяться до літньої пори, вище на 1,5...2 км висот відбиття, що відносяться до періоду рівнодення. Літньої пори дисперсія ефективних висот відбиття вище, ніж в сезон рівнодення. Одержані результати здебільшого узгоджуються з ефектами добових і сезонних змін, котрі передбачаються сучасними моделями нижньої іоносфери для субтропічних регіонів.

Показано, що існує виокремлений діапазон ефективних висот відбиття 87...89 км, для якого підвищена вірогідність виявлення твік-атмосферика з гармоніками вищого порядку. Цей факт доводить наявність на таких висотах прошарку з підвищеною крутизною наростання концентрації електронів, що обумовлює зменшення втрат при поширенні нормальних хвиль вищих типів. Для твіків з дальностями джерела більш 1000 км за висот відбиття 90 км і вище спостерігається 2 – 4 гармоніки.

На матеріалі як загального масиву даних, так і виділених груп твік-атмосфериків з близькими трасами поширення, досліджені статистично відмінності ефективних висот відбиття для першої моди, другої моди, та наступних високочастотних мод хвилеводу. Показано, що в переважній кількості випадків (більш ніж 75 %) ефективна висота хвилеводу для першої моди перевищує таку для другої моди більш ніж на 0,7 км.

Сформовано критерії розподілу твік-атмосфериків за ознакою переваги квазі-лівокругової поляризації в області середини часової реалізації сигналу. Згідно теоретичної моделі поширення ННЧ – ДНЧ атмосфериків в хвилеводі Земля-іоносфера в присутності геомагнітного поля поблизу частот відсічки система мод перелаштовується таким чином, що моди можуть бути описані як ліво- і право поляризовані, або квазі- L - і квазі- R -моди. Роль критичних частот для них відіграють величини, що залежать від номера моди різним чином:

$\omega_{kp} = (cp \pi/h) (1 - 1/p\pi n_p)$, для L - (лівополяризованої) моди;

$\omega_{kp} = (cp \pi/h) (1 - s/2p\pi n_p)$, для R - (правополяризованої) моди,

де c – швидкість світла у вакуумі, індекс p ($p = 1, 2, 3 \dots$) відповідає номеру моди, h – висота хвилеводу, $n_p = \omega_0 / \sqrt{\omega \omega_H}$ – коефіцієнт заломлення, котрий за нічних умов на висоті 85...90 км приблизно дорівнює 3...7; ω_H – гірочастота електронів; ω_0 – плазмова частота електронів; $s = \nu/\omega_H$ – відношення частоти зіткнень ν електронів з нейтральними молекулами до гірочастоти електронів. Квазі- L -моди мають меншу частоту відсічки внаслідок більшої глибини проникнення в іоносферу.

З урахуванням різниці глибин проникнення першої і другої квазі- L -мод твіка розроблено й опробовано на експериментальних даних новий метод для вимірювань концентрації електронів на висоті відбиття радіохвиль нічних ННЧ – ДНЧ атмосфериків. Показано, що точність визначення ефективних висот хвилеводу для дискретних мод твіка, що досягнута у методі багатомодового аналізу, забезпечує можливість вимірювань цієї різниці, яка в більшості випадків сягає 1...1,5 км. Достовірність оцінці концентрації була підвищена за рахунок усереднення по твікам з близькими трасами поширення, які в проаналізованому ансамблі даних склали понад 75 % в групах від 2 до 12 твіків, що прийшли з одного грозового осередку. Для обробки відбиралися групи твіків, в яких істотно переважала ліва кругова поляризація випромінювання. Одержані результати щодо концентрації електронів достатньо добре узгоджуються з даними про нічну іоносферу на висотах 85...90 км.

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено дослідженню широкосмугових нічних ННЧ – ДНЧ атмосфериків (твік-атмосфериків), для котрих основна частина потужності радіовипромінювання знаходиться у відрізку спектра 0,3...20 кГц і котрі поширюються в порожнині між Землею і нижнім шаром іоносфери. Розвинуті нові методи однопозиційної локації джерел таких атмосфериків – розрядів блискавок, і метод визначення на основі їх аналізу концентрації електронів у нижній іоносфері й ефективних висот хвилеводу для окремих мод навколосемного глобального хвилеводу, що є створеним такою системою.

Основні наукові результати дисертації полягають у наступному.

1. Запропоновано два нових методи розв'язку зворотних задач радіофізики для оцінки ефективної висоти хвилеводу Земля – іоносфера та дальності до блискавки, які засновані на компенсації частотної дисперсії у гармоніках твіка, та інтерференції мод нульового та першого порядків у спектрі, що дозволило

знизити кількість параметрів зворотної задачі та підвищити ефективність розрахунків.

2. Вперше виконано аналіз кількості гармонік, що спостерігаються, в твік-атмосферах у залежності від дальності до джерела та азимуту приходу за експериментальними записами, що дозволяє прогнозувати ефективне використання твіків для визначення параметрів нижньої іоносфери у залежності від просторового розподілу джерел відносно пункту спостережень.

2.1. Результати аналізу показали відсутність азимутальної залежності кількості гармонік, що спостерігаються.

2.2. Доля твіків з гармоніками вищих порядків максимальна в період 20...24 години локального часу.

2.3. Встановлено, що вірогідність спостереження твіків з 3 – 9 гармоніками практично однакова за дальностей до джерела у інтервалі 600 – 1500 км, в той час як для діапазона відстаней 1500 – 4000 км найбільш вірогідна кількість гармонік становить 2 – 4. Суттєву різницю в розподілі кількості гармонік в твіках для розглянутих діапазонів дальностей можна пояснити не лише більш значним загасанням вищих хвильоводних мод. Істотний внесок можуть давати горизонтальні (внутрішньохмарні) грозові розряди, які випромінюють електромагнітні хвилі з малими кутами падіння на іоносферу, та можуть більш ефективно збуджувати моди вищого порядку за відносно коротких відстаней.

3. Вперше експериментально досліджено залежності поляризаційних параметрів ННЧ – ДНЧ радіохвиль від кута падіння на іоносферу на основі аналізу твік-атмосфериків навколо геомагнітного екватора.

4. На основі аналізу твік-атмосфериків з використанням запропонованих методів продемонстровано можливість моніторинга регулярних (добових і сезонних) змін стану нижньої іоносфери, а також можливість побудови «миттєвих знімків» розподілу висоти хвильоводу в області, що перекривається трасами поширення від блискавок до спостерігача.

4.1. Показано, що протягом ночі ефективна висота віддзеркалюючого шару в нижній іоносфері поступово збільшується на 4...5 км на інтервалі 20:00 – 2:00 локального часу. Порівняння даних, одержаних влітку та в період, близький до осіннього рівнодення (сезонні варіації), показало підвищення нижньої межі іоносфери в літню пору в середньому на 2 км. Одержані результати здебільшого узгоджуються з ефектами добових та сезонних змін, що прогноуються сучасними моделями нижньої іоносфери, такими, як *FIRI*.

4.2. Показано, що за дальностей менш 1000 км кількість високочастотних гармонік в складі твіка не залежить від ефективної висоти відбиття від іоносфери. За дальностей понад 1000 км, за умови ефективної висоти хвильоводу Земля-іоносфера понад 90 км кількість гармонік, що спостерігаються, не перевищує 4. За ефективної висоти відбиття 87...89 км спостерігається зростання кількості твіків з великою кількістю гармонік (до 6 – 8) для усього діапазона дальностей до джерела. Це доводить, що в цьому вузькому діапазоні висот реалізуються фізичні умови для формування вертикального профілю електронної концентрації з

підвищеною крутизною наростання, що забезпечує мінімальне загасання при поширенні мод вищих порядків.

5. Статистичний аналіз гармонік вищого порядку в твіках, які створені нормальними хвилями вищих типів в хвилеводі Земля – іоносфера, показав, що в переважній більшості випадків (75 %) ефективна висота хвилеводу для 1-ої моди виявляється вище за ефективну висоту для 2-ої моди більш ніж на 0,7 км, що є обумовленим частотною залежністю глибини проникнення хвиль в іоносферу. Цей висновок підтвердив застосовність теорії Рябова – Сухорукова поширення ДНЧ радіохвиль в анізотропному хвилеводі Земля – іоносфера для оцінки параметрів іоносферної плазми в області відбиття ДНЧ радіохвиль і дозволив створити методику визначення концентрації електронів на нижній межі іоносфери за критичними частотами 1-ої та 2-ої мод. Одержані за експериментальними записами твік-атмосфериків з використанням даної методики оцінки концентрації електронів в плазмі *D*-прошарку іоносфери становлять від $1,2 \cdot 10^8$ до $1,8 \cdot 10^9$ частинок в 1 м^3 .

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шве́ц А. В. Метод локации молний и оценки параметров нижней ионосферы с помощью твик-атмосфериков / А. В. Шве́ц, Ю. В. Горишня // Радиофизика и электроника. – 2010. – Т. 1(15), № 2. – С. 63–70.

2. Шве́ц А. В. Локация молний и оценка высоты нижней ионосферы с использованием дисперсионных характеристик твик-атмосфериков / А. В. Шве́ц, Ю. В. Горишня // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т. 2(16), № 4. – С. 53–59.

3. Estimating the lower ionosphere height and lightning location using multimode “tweek” atmospherics / A. V. Shvets, T. M. Serdiuk, Y. V. Gorishnyaya, Y. Hobara, M. Hayakawa // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – Vol. 108. – P. 1–9.

4. Горишня Ю. В. Оценка концентрации электронов и высоты нижней границы ионосферы по данным анализа многомодовых твик-атмосфериков / Ю. В. Горишня // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т. 5(19), № 1. – С. 20–28.

5. Оценка параметров профиля проводимости нижней ионосферы / А. В. Шве́ц, Т. Н. Сердюк, А. П. Кривонос, Ю. В. Горишня // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6 (20), № 1. – С. 40–47.

6. Shvets A. V. Parameters of the lower ionosphere inferred from night-time VLF atmospherics / A. V. Shvets, Y. V. Gorishnya // Mathematical Methods in Electromagnetic Theory “ММЕТ-04” : the 10th Int. Conference : Sept. 14-17, 2004 : Conference Proceedings. – Dnepropetrovsk, 2004. – P.165–167.

7. Shvets A. V. Variations of the lower ionosphere height inferred from “tweek” records / A. V. Shvets, Y. V. Gorishnya // 2nd International Radio Electronic Forum (IREF’2005) : Sept. 19-23, 2005 : Proceedings. – Kharkov, 2005. – Vol. II. – P. 457–459.

8. Shvets A. V. Modal study of “tweek”-atmospherics / A. V. Shvets, Y. V. Gorishnya // Mathematical Methods in Electromagnetic Theory “MMET-06” : the 11th Int. Conference : June 26-29, 2006 : Conference Proceedings. – Kharkiv, 2006. – P.372–374.

9. Shvets A. V. Polarization of atmospherics propagating under night-time ionosphere / A. V. Shvets, Y. V. Gorishnya // The 6th Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies : June 25-30, 2007 : Symposium Proceedings. – Kharkov, 2007. – Vol. 2. – P. 763–765.

10. Gorishnya Y. V. Statistical study of multimodal tweek-atmospherics / Y. V. Gorishnya, A. V. Shvets // Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2010) : the 13th Int. Conference : Sept. 6-8, 2010 : Conference Proceedings. – Kyiv, 2010. – P. 98–101.

11. Шве́ц А. В. Использование дисперсионных свойств сигналов твик-атмосфериков для локации молний и оценки высоты нижней ионосферы / Ю. В. Горишня, А. В. Шве́ц // Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте : V Международная научно-практич. конф.: 14-17 февраля 2012 : тезисы. – Днепропетровск, 2012. – С. 77–78.

12. Горишня Ю. В. Метод оценки параметров нижней ионосферы с помощью широкополосных сигналов твик-атмосфериков / Ю. В. Горишня, А. В. Шве́ц // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства (EMES’2012) : 1я украинская конференция : 25–27 сентября 2012 г. : сб. тезисов докладов. – Харьков, 2012. – С. 289–291.

13. The using of multi-mode “tweek”-atmospherics for the diagnostics of lower ionosphere parameters and lightning location / A. V. Shvets, T. M. Serdiuk, Y. Nobara, M. Hayakawa, Y. V. Gorishnya // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства (EMES’2012) : 1я украинская конференция : 25–27 сентября 2012 г. : сб. тезисов докладов. – Харьков, 2012. – С. 138–140.

14. Gorishnya Y. V. Variations of the lower ionosphere height deduced from measurements of tweek-atmospherics / Y. V. Gorishnya // The Eighth Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) : June 23–28, 2013 : Symposium Proceedings. – Kharkiv, 2013. – P. 331–333.

АНОТАЦІЯ

Горишня Ю. В. Діагностика нижньої іоносфери на основі аналізу твік-атмосфериків. – 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, 2016.

Дисертаційну роботу присвячено розробці нових радіофізичних методів діагностики нижньої іоносфери на основі аналізу імпульсних сигналів природного походження в діапазоні наднизьких (ННЧ) і дуже низьких частот (ДНЧ), які поширюються у хвилеводі Земля – іоносфера, – твік-атмосфериків (твіків).

В роботі запропоновані нові ефективні методи аналізу твіків, що дозволяють оцінити як дальність до блискавки, так і ефективні висоти хвилеводу нормальних хвиль основного та вищих типів. Засобами числового моделювання визначено точність запропонованого методу, що заснований на дисперсійних властивостях твіків.

Ансамбль трикомпонентних записів твіків (вертикальна електрична та дві ортогональні горизонтальні магнітні компоненти) було використано для аналізу методів, а також для статистичних досліджень середніх ефективних висот хвилеводу Земля – іоносфера, залежностей кількості гармонік в твіках (відповідних до хвилеводних мод) від локального часу ночі, дальності до джерела й ефективної висоти хвилеводу. В роботі було показано, що існує виокремлений діапазон ефективних висот хвилеводу, приблизно від 87 до 89 км, для якого зростає вірогідність спостереження високочастотних гармонік в складі твіку.

В дисертаційній роботі проаналізовано поляризаційні характеристики електромагнітних хвиль в залежності від кута падіння для першої (основної) моди хвилеводу за аналізом твіків. Було виявлено особливості поляризаційних властивостей твіків за умов пролягання траси поширення навколо геомагнітного екватору.

Показано, що ефективна висота хвилеводу для першої моди твіка перевищує ефективну висоту для другої моди, що дозволило розробити новий метод оцінки концентрації електронів в *D*-прошарку іоносфери, який використовує різницю глибин проникнення для першої та другої мод твіка. Ця різниця складає 1,5...4 км, що відповідає концентрації електронів $1,2 \cdot 10^8 - 1,8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$.

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

АННОТАЦІЯ

Горишня Ю. В. Диагностика нижней ионосферы на основе анализа твик-атмосфериков. – 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, 2016.

Диссертационная работа посвящена разработке новых радиофизических методов диагностики нижней ионосферы на основе анализа импульсных сигналов

естественного происхождения в диапазоне сверхнизких (СНЧ) и очень низких частот (ОНЧ) – твик-атмосфериков (твиков).

Твики наблюдаются в ночное время и представляют собой отклик волновода Земля-ионосфера, возбуждаемого разрядами молний. Формирование твика можно объяснить приходом в точку наблюдения серии импульсов, последовательно отраженных от границ волновода под различными углами падения, в зависимости от расстояния между источником и наблюдателем и эффективной высоты ионосферы вдоль трассы распространения.

В работе предложены методы анализа твиков, позволяющие оценить как дальность до молнии, так и эффективные высоты волновода для нормальных волн основного и высших типов. В рамках модели волновода Земля-ионосфера с экспоненциальным профилем проводимости в нижней ионосфере были синтезированы временные формы твиков. На основе численного моделирования исследована точность метода, основанного на свойствах волноводной дисперсии в сигнале твика, и получены следующие оценки: 0,3...0,7 % для эффективных высот и 3...5 % для дистанций при уровнях шума 0...0,75 от мощности сигнала. На нижней границе применимости метода, 500 км, точность определения дальности ухудшается до 10 %.

Ансамбль трехкомпонентных записей (вертикальная электрическая и две ортогональные горизонтальные магнитные), полученных на борту исследовательского судна в различных точках Атлантического и Индийского океанов и в различное время локальной ночи, был использован для анализа методов, а также для статистического исследования азимутальных, сезонных и суточных зависимостей средней эффективной высоты волновода. Показано, что в среднем эффективные высоты волновода выше на 1,5...2 км в летнее время по сравнению с периодом равноденствия. Продемонстрировано возрастание эффективной высоты волновода на 5 км в интервале от 18:00 до 2:00 локального времени в период равноденствия и на 3 км в интервале от 20:00 до 1:00 в летний период. Исследованы зависимости количества гармоник в твиках (соответствующих различным волноводным модам) от локального времени ночи, дальности до источника и эффективной высоты волновода. Показано, что для дальностей более 1500 км наблюдаются 2 – 4 гармоники, для дальностей менее 1500 км число гармоник равновероятно от 2 до 9 и в среднем составляет 4,5. Обнаружено, что наибольшая вероятность наблюдения твиков с высокочастотными гармониками (4 – 9) имеет место в период 20:00...24:00. Показано, что существует выделенный диапазон эффективных высот волновода, приблизительно от 87 до 89 км, для которого увеличивается вероятность наблюдения высокочастотных гармоник в твике.

В диссертационной работе проанализированы временные реализации твиков для исследования поляризационных характеристик электромагнитных волн в зависимости от угла падения для первой (основной) моды волновода. Показано различие поляризации в зависимости от ориентации трассы распространения относительно магнитного меридиана. Выявлены особенности

поляризационных свойств твиков при пролегании трассы распространения вблизи геомагнитного экватора.

Показано, что эффективная высота волновода для первой моды твика превышает эффективную высоту для второй моды более чем на 0,7 км в более чем 75 % случаев. Данный экспериментальный факт позволил разработать новый метод оценки концентрации электронов в D-слое ионосферы, использующий разность глубин проникновения для первой и второй мод твика. Эта разность составляет порядка 1,5...4 км, что соответствует концентрации электронов $1,2 \cdot 10^8 - 1,8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$.

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

ABSTRACT

Gorishnya Yu. V. Lower ionosphere diagnostics based on the analysis of tweek-atmospherics. – 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, 2016.

The thesis is devoted to the development of new radiophysical methods for diagnostics of the lower ionosphere by analyzing pulse signals of natural origin in the ELF – VLF frequency range propagating in the Earth – ionosphere waveguide – tweek-atmospherics (tweeks).

New effective methods of tweek analysis are proposed to assess a range to lightning and effective heights of the waveguide for basic and higher order normal waves. Estimation of the accuracy of the method has been got by numerical simulation.

Experimental ensemble of three-component recordings of tweeks (vertical electric and two orthogonal horizontal magnetic components) has been used for statistical analysis of variations in the average effective height of the waveguide on the daily and seasonal time scales. The dependence of the observed number of harmonics in tweeks (corresponding to different waveguide modes) has been studied in regard to the local nighttime, the source distance, and the effective height of the waveguide. It is shown that there is a dedicated range of effective waveguide heights, from about 87 to 89 km, which increases the likelihood for the observation of higher order harmonics in tweeks, indicating that the vertical electron density profile with high steep increase is formed in this height range.

The thesis has analyzed the polarization characteristics of tweeks depending on the incident angle of the waves. The features in the polarization properties of tweeks propagating near the geomagnetic equator has been established.

The effective height of the 1st waveguide mode has been statistically shown to be usually higher than the effective height of the 2nd waveguide mode. That fact has allowed to develop a new method for estimating the electron density in D-layer of lower

ionosphere by measuring cutoff frequencies in tweek signals which has been presented in the thesis.

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