

ISSN 2311-0872

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Серія “ РАДІОФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА ”

Випуск 32

Започаткована 1971 р.

Харків 2020

У збірнику представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень, що спрямовані на розв'язання актуальних задач сучасної радіофізики. До них відносяться: розповсюдження радіохвиль в навколосезному просторі, його діагностика з використанням радіофізичних методів, розповсюдження і дифракція електромагнітних хвиль у електродинамічних структурах, взаємодія лазерного випромінювання з речовиною та біологічними об'єктами, фізичні принципи у напівпровідникових приладах та ін.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів старших курсів радіофізичних спеціальностей. Наукове фахове видання України, **категорії «Б»**, галузь знань: 10 Природничі науки, спеціальність: **104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали**. Наказ МОН України №1188 від 24.09.2020 р.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (протокол № 15 від 26.10.2020 р.).

Редакційна колегія

Відповідальний редактор – д.ф.-м.н., проф. **Шульга С.М.**

д.ф.-м.н., проф. **Аркуша Ю.В.**, Україна
д.ф.-м.н., проф. **Горобець М.М.**, Україна
д.ф.-м.н., проф. **Катрич В.О.**, Україна
акад. НАНУ **Литвиненко Л.М.**, Україна
проф. **Фролов В.Л.**, Росія
акад. НАНУ **Шульга В.М.**, Україна

проф. **Блаунштейн Н.**, Ізраїль
д.ф.-м.н., проф. **Дюбко С.П.**, Україна
д.ф.-м.н., проф. **Колчигін М.М.**, Україна
д.ф.-м.н., проф. **Потапов О.О.**, Росія
д.ф.-м.н., проф. **Шматько О.О.**, Україна
д.ф.-м.н., проф. **Чорногор Л.Ф.**, Україна

акад. НАНУ **Яковенко В.М.**, Україна

Заступник відповідального редактора – к.ф.-м.н., доц. **Цимбал А.М.**

Адреса редакційної колегії: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, факультет радіофізики,
біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

тел. (057) – 707-51-23, e-mail: radiovisnic@karazin.ua
A.Tsymbal@karazin.ua

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №11825-696 ПР від 04.10.2006

ISSN 2311-0872

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Visnyk of
of V.N. Karazin Kharkiv
National University

series “Radio Physics and Electronics”

Issue 32

Founded in 1971.

Kharkiv 2020

The goal of the Journal is to publish articles, reports and reviews containing original results of theoretical and experimental research aimed at solving the current problems of modern Radio Physics. These include: the propagation of radio waves in the near-Earth space, its diagnosis using radio physical methods, the propagation and diffraction of electromagnetic waves in electrodynamic structures, the interaction of laser radiation with matter and biological objects, physical principles in semiconductor devices etc.

Journal Mission is to deliver recent advancements in Radio Physics and life sciences to peers and broad audience.

The journal publishes research articles, short communications and reviews regarding all problems of Radio Physics and related fields.

Scientific professional publication of Ukraine, **category "B"**, branch of knowledge: 10 Natural sciences, specialty: **104 Physics and astronomy, 105 Applied physics and nanomaterials**. The Decree N 1188 of the Ministry of Education and Science Ukraine of 24.09.2020.

Approved for publication by the decision of the Academic Council of V.N. Karazin Kharkiv National University (protocol № 15 dated 26.10.2020).

Editorial Team

The responsible editor – Dr.Sc., Prof. **Shulga S.N.**

Dr.Sc., Prof. **Arkusha Yu.V.**, Ukraine

Prof. **Blaunstein N.**, Israel

Dr.Sc., Prof. **Gorobets N.N.**, Ukraine

Dr.Sc., Prof. **Dubko S.P.**, Ukraine

Dr.Sc., Prof. **Katrich V.A.**, Ukraine

Dr.Sc., Prof. **Kolchigin N.N.**, Ukraine

Prof. acad. NASU **Litvinenko L.M.**,
Ukraine

Dr.Sc., Prof. **Potapov A.A.**, Russian
Federation

Dr.Sc., Prof. **Frolov V.L.**, Russian Federation

Dr.Sc., Prof. **Shmatko A.A.**, Ukraine

Dr.Sc., Prof. acad. NASU **Shulga V.M.**,
Ukraine

Dr.Sc., Prof. **Chernogor L.F.**, Ukraine

Dr.Sc., Prof. acad. NASU **Yakovenko V.M.**, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief – Ph.D., Assoc. **Tsybal A.M.**, A.Tsybal@karazin.ua

Adress: 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

V.N. Karazin Kharkiv National University, School of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Systems

Phone (057) 707-51-23, e-mail: radiovisnic@karazin.ua

A.Tsybal@karazin.ua

Articles have been reviewed internally and externally

Certificate of state registration of KB №11825-696 ПП dated 04.10.2006

ЗМІСТ

<i>Батраков Д. О., Антюфєєва М. С., Батракова А. Г.</i> Застосування георадарів для виявлення підповерхневих дефектів у шарах покриття нежорстких дорожніх одягів	8
<i>Думін О. М., Плахтій В. А., Фомін П. Г., Нестеренко М. В.</i> Надширокосмуговий комбінований вібраторно-щілинний випромінювач типу Клевіна	18
<i>Думін О. М., Прищенко О. А., Плахтій В. А., Широкопад Д. В., Почанін Г. П.</i> Порівняння результатів розпізнавання підповерхневого об'єкту штучними нейронними мережами та кореляційним методом	25
<i>Захаров І. Г., Черногор Л. Ф.</i> Прояв глобальної сейсмічної активності в атмосфері та іоносфері	37
<i>Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Голуб М. Ю., Леус С. Г., Шевелев М. Б., У. Люо.</i> Геомагнітний ефект албанського землетрусу 26 листопада 2019 р.	44
<i>Антоненко Є. О., Кожешкурт В. О., Штода Д. О., Катрич В. О., Божков А. І.</i> Електромагнітний сенсор для вимірювання діелектричної проникності матеріалів	53
<i>Овсяніков В. В., Горобець М. М., Безносова О. Р.</i> Контроль якості речовин електромагнітним зондуванням у хвилеводі	61
<i>Кокодій М. Г., Маслов В. О., Мунтян К. І.</i> Про аномальне поглинання електромагнітного випромінювання субхвильовим металевим дротом	71
<i>Титар В. П., Єльчищева Ю. В., Шпаченко О. В., Мельнікова А. В., Мізрахі В. М.</i> Шкірно-оптичне сприйняття електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль видимого діапазону шкірою долонь слабозорих людей	81

CONTENTS

<i>Batnikov D.O., Antyufeyeva M.S., Batnikova A.G.</i> Application of georadars for detecting subsurface defects in layers of non-rigid road pavements	8
<i>Dumin O.M., Plakhtiy V.A., Fomin P.G., Nesterenko M.V.</i> Ultrawideband combined vibrator-slot Clavin type radiator	18
<i>Dumin O.M., Pryshchenko O.A., Plakhtii V.A., Shyrokograd D.V. Pochanin G.P.</i> Comparison of subsurface object recognition by artificial neural networks and correlation method	25
<i>Zakharov I. G., Chernogor L. F.</i> Manifestation of global seismic activity in the atmosphere and ionosphere	37
<i>Chernogor L. F., Garmash K. P., Holub M. Yu., S. G. Leus S. G., Shevelev M. B., Y. Luo.</i> Geomagnetic effect of the Albanian earthquake on November 26, 2019	44
<i>Antonenko Ye.A, Kozheshkurt V.A, Shtoda D.A, Katrich V.A., Bozhkov A.I.</i> Electromagnetic sensor for measuring the dielectric permeability of materials	53
<i>Ovsyannikov V.V., Gorobets N.N., Beznosova E.R.</i> Quality control of substances by electromagnetic sensing in a waveguide	61
<i>Kokodii N.G., Maslov V.A., Muntean K.I.</i> On anomalous absorption of electromagnetic radiation by a subwave metal wire	71
<i>Titar V.P., Ielchishcheva Iu.V., Shpachenko O.V., Melnikova A.V., Mizrahi V.M.</i> Dermo-optical perception of the visible range different wavelengths electromagnetic radiation by the palms skin of visually impaired people	81

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Батраков Д. О., Антюфеева М. С., Батракова А. Г.</i> Применение георадаров для обнаружения подповерхностных дефектов в слоях покрытия нежестких дорожных одежд	8
<i>Думин О. Н., Плахтий В. А., Фомин Ф. Г., Нестеренко М. В.</i> Широкополосный комбинированный вибраторно-щелевой излучатель типа Клевина	18
<i>Думин А. Н., Прищенко А. А., Плахтий В. А., Широкопад Д. В., Почанин Г. П.</i> Сравнение результатов распознавания подповерхностного объекта искусственными нейронными сетями и корреляционным методом	25
<i>Захаров И. Г., Черногор Л. Ф.</i> Проявление глобальной сейсмической активности в атмосфере и ионосфере	37
<i>Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Голуб М. Ю., Леус С. Г., Шевелёв Н. Б., Luo Y.</i> Геомагнитный эффект албанского землетрясения 26 ноября 2019 г.	44
<i>Антоненко Е.А., Кожешкурт В.А., Штода Д.А., Катрич В.А., Божков А.И.</i> Электромагнитный сенсор для измерения диэлектрической проницаемости материалов	53
<i>Овсяников В.В., Горобец Н. Н., Безносова Е.Р.</i> Контроль качества веществ электромагнитным зондированием в волноводе	61
<i>Кокодий Н. Г., Маслов В. А., Мунтян К. И.</i> Об аномальном поглощении электромагнитного излучения субволновой металлической проволокой	71
<i>Титарь В. П., Ельчищева Ю. В., Шпаченко О. В., Мельникова А. В., Мизрахи В. М.</i> Кожно-оптическое восприятие электромагнитного излучения различных длин волн видимого диапазона кожей ладоней слабовидящих людей	81

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-01>

УДК 621.574.4

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОРАДАРІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ У ШАРАХ ПОКРИТТЯ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ

Д. О. Батраков¹, М. С. Антюфєєва¹, А. Г. Батракова²

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002, Україна

E-mail: batrakov@karazin.ua

Надійшла до редакції 15 жовтня 2020 р.

Актуальність даної проблеми є наслідком високої вартості класичних методів обстеження дорожніх одягів. У той же час застосування сучасних імпульсних георадарів забезпечує відносно низьку собівартість моніторингу поточного стану автомобільних доріг, оскільки дозволяє отримувати георадарні дані при русі автомобіля-лабораторії зі швидкістю транспортного потоку. Тим самим мінімізується роль таких коштовних і трудомістких операцій, як відбір кернів або вирубок.

Мета роботи – удосконалення методик отримання первинних георадарних даних, які були раніше запропоновані авторами для підвищення точності та надійності результатів обробки сигналів імпульсних георадарів.

Матеріали та методи. При обробці модельних і експериментальних даних використовувалися в першу чергу сучасні теоретичні методи обробки імпульсних сигналів георадарів, а також методи комп'ютерного моделювання.

Результати. На основі проведеного аналізу факторів, які визначають ключові особливості сигналів георадарів, запропонований метод калібрування сигналів, який дозволяє підвищити надійність виявлення таких дефектів шарів нежорсткого дорожнього одягу з монолітних матеріалів, як втрата міжшарового зчеплення, або наявність тонких з електрофізичної точки зору шарів у багатошарових середовищах.

Висновки. Об'єднання методу калібрування сигналів разом із запропонованим раніше підходом до виявлення порушення контакту між шарами і проведеним чисельним моделюванням дали можливість підвищити надійність процедури неруйнівного контролю дорожнього одягу та інших будівельних конструкцій. При виконанні роботи були проведені лабораторні експерименти на модельних конструкціях. Аналіз отриманих даних був проведений за допомогою розробленого програмного забезпечення GeoVizu.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпульсні георадари, втрата міжшарового зчеплення, нежорсткі дорожні одяги.

APPLICATION OF GEORADARS FOR DETECTING SUBSURFACE DEFECTS IN LAYERS OF NON-RIGID ROAD PAVEMENTS

D. O. Batrakov¹, M. S. Antyufeyeva¹, A.G. Batrakova²

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo st., Kharkiv, 61002, Ukraine

The relevance of the problem under consideration is a consequence of the high cost of classical methods of pavement inspection. At the same time, the use of modern pulse georadars allows to ensure a relatively low cost of monitoring the current state of highways, since it allows to obtain georadar data when a laboratory vehicle is moving at the speed of a traffic flow. This minimizes the role of costly and time-consuming operations such as coring or cutting.

The purpose of this work is to improve the methods for obtaining primary GPR data, which were previously proposed by the authors to improve the accuracy and reliability of the results of processing pulsed GPR signals.

Materials and methods. When processing model and experimental data, first of all, modern theoretical methods of processing pulse signals from ground penetrating radars, as well as methods of computer modeling, were used.

Results. Based on the analysis of the factors that determine the key features of GPR signals, a signal calibration method has been proposed, which makes it possible to increase the reliability of detecting such defects in layers of non-rigid road pavement made of monolithic materials, such as loss of interlayer adhesion, or identification of thin layers from an electrophysical point of view in multilayer media.

Conclusions. Combining the signal calibration method together with the previously proposed approach to detecting the loss of interlayer adhesion and the performed numerical simulation made it possible to increase the reliability of the procedure for non-destructive testing of road pavements and other building structures. During the work, laboratory experiments were performed on model structures. The analysis of the obtained data was performed using the developed software GeoVizu.

KEY WORDS: impulse georadars, loss of interlayer adhesion, non-rigid pavement.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В СЛОЯХ ПОКРЫТИЯ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Д. О. Батраков¹, М. С. Антюфеева¹, А.Г. Батракова²

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022, г. Харьков, Украина

²Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого 25, г. Харьков, 61002, Украина

Актуальность рассматриваемой проблемы является следствием высокой стоимости классических методов обследования дорожных одежд. В то же время применение современных импульсных георадаров позволяет обеспечить относительно низкую себестоимость мониторинга текущего состояния автомобильных дорог, поскольку позволяет получать георадарные данные при движении автомобиля-лаборатории со скоростью транспортного потока. Тем самым минимизируется роль таких дорогостоящих и трудоемких операций, как отбор кернов или проведение вырубок.

Цель работы – усовершенствование методик получения первичных георадарных данных, которые были ранее предложены авторами для повышения точности и надежности результатов обработки сигналов импульсных георадаров.

Материалы и методы. При обработке модельных и экспериментальных данных использовались в первую очередь современные теоретические методы обработки импульсных сигналов георадаров, а также методы компьютерного моделирования.

Результаты. На основе проведенного анализа факторов, которые определяют ключевые особенности сигналов георадаров, предложен метод калибровки сигналов, который позволяет повысить надежность обнаружения таких дефектов слоев жесткой дорожной одежды из монолитных материалов, как потеря межслоистого сцепления, либо наличие тонких с электрофизической точки зрения слоев в многослойных средах.

Выводы. Объединение метода калибровки сигналов вместе с предложенным ранее подходом к обнаружению потери межслоистого сцепления и проведенным численным моделированием дали возможность повысить надежность процедуры неразрушающего контроля дорожных одежд и других строительных конструкций. При выполнении работы были проведены лабораторные эксперименты на модельных конструкциях. Анализ полученных данных был проведен с помощью разработанного программного обеспечения GeoVizu.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импульсные георадары, потеря межслоистого сцепления, жесткие дорожные одежды.

ВСТУП

Раніше авторами було проведено дослідження спектральних характеристик та інших властивостей сигналів імпульсних георадарів з метою підвищення ефективності обробки таких сигналів і, як наслідок, підвищення надійності одержуваних результатів неруйнівного контролю [1]. Зокрема, було відзначено, що різні завдання, для вирішення яких застосовується георадар, мають, крім загальних особливостей, також і свою специфіку. Під час вирішення завдань дистанційного зондування за допомогою стандартних підходів досліджуваній об'єкт знаходиться у так званій далекій зоні. У такому випадку для опису поведінки поля і інтерпретації результатів може бути використано наближення плоскої хвилі. Проте при вирішенні завдань діагностики стану покриття автомобільних доріг із застосуванням методів дистанційного зондування зовнішня границя антенної системи знаходиться на відстані 25-30 см від поверхні покриття. Це, з точки зору електродинаміки, відноситься до так званої проміжної зони або навіть до близької зони відносно антен георадару. Як зазначено в [1], у цих випадках використовувати класичні моделі, що засновані на формулах Френеля [2-4], для обробки результатів зондування слід з великою обережністю. Цей факт пов'язаний не тільки з характером зміни поля поблизу антени, але і з наявністю повторних відбиттів (далі будемо використовувати термін – перевідбиття) між передавальною антеною і зовнішньою поверхнею досліджуваного середовища. Обидві проблеми не мають універсального алгоритму обробки. Це пов'язано, в першу чергу, з тим, що кожна конструкція антени, а також і всього антенного блоку, має свої специфічні особливості. Особливості генератора первинних сигналів і приймального тракту георадару разом з технічними засобами реєстрації та алгоритмами обробки даних також вимагають спеціального підходу в кожному конкретному випадку. Виходячи з цього, в [1] основна увага була приділена дослідженню впливу перевідбиттів на параметри імпульсних сигналів. Ще раз відзначимо, що в [1] перевідбиття – це вторинні відбиття сигналу, які виникають при реєстрації сигналів, коли антенний блок розташований в безпосередній близькості від зовнішньої границі середовища що зондується.

З іншого боку, в роботі [5] була розглянута задача виявлення такого небезпечного дефекту дорожніх покриттів, як втрата міжшарового зчеплення. Цей термін означає порушення або втрату зчеплення між шарами покриття з монолітних матеріалів. У [5] зазначено, що в англійській літературі існують декілька подібних термінів – delamination, raveling та segregation. Термін розшарування (delamination) позначає порушення зчеплення між шарами покриття, яке за умови проникнення вологи, особливо в осінньо – зимовий період, призводить до прискореного руйнування конструкції. Оскільки втрата зчеплення між

шарами конструкції нежорсткого дорожнього одягу призводить до втрати розподільчої здатності та його прискореного руйнування, розроблення методики та засобів виявлення таких дефектів є важливим практичним завданням. Актуальність цього завдання стосовно до дорожньої галузі пов'язана з необхідністю оперативного контролю поточного стану покриттів автомобільних доріг на ділянках значної протяжності та, відповідно, зі значними витратами на ремонт та утримання [5-11].

Тому мета даної роботи полягає у підвищенні надійності процедур діагностики поточного стану покриттів автомобільних доріг шляхом об'єднання раніше запропонованих методів калібрування сигналів [1] і розвитку на цій основі запропонованого авторами алгоритму обробки результатів зондування конструкції дорожнього одягу [5].

ПОСТАНОВКА ВИХІДНОГО ЗАВДАННЯ І ЗАПРОПОНОВАНИЙ ПІДХІД ДО ЙОГО ВИРІШЕННЯ

Відповідно до загальноприйнятої термінології [12, 13] будемо формулювати завдання виявлення ділянок покриття з втратою міжшарового зчеплення під час діагностики як завдання виявлення між основними шарами конструкції тонких додаткових шарів, які можуть бути заповнені водою або повітрям. Для вирішення поставленого завдання необхідно залучити сукупність відповідних моделей. Ці моделі повинні бути в достатній мірі адекватними до вихідної задачі, але при цьому не містити зайвих деталей і забезпечувати обробку даних за допомогою відносно простих і ефективних алгоритмів. Як вводить досвід застосування георадарів, за центральної частоти нижче 1,6 ГГц, шорсткістю зовнішньої границі і внутрішніх границь шарів конструкції, що досліджується, можна знехтувати. Тоді найпростішою моделлю конструкції дорожнього одягу (або шарів багатшарового дорожнього покриття) є плоскошарувате середовище, яке може містити неоднорідності – тріщини. У [4, 5] авторами був запропонований спосіб обробки даних, який передбачає такі етапи:

- реєстрація так званого сигналу прямого проходження, тобто сигналу, що безпосередньо передається з передавальної антени у приймач, минаючи досліджуване середовище;
- реєстрація сигналу, відбитого від листа металу, для подальшого його використання як моделі зондуючого імпульсу;
- зондування конструкції, що досліджується, і запис радарограми, яка є сукупністю розподілених у часі сигналів, відбитих від середовища, що зондується.

Такий підхід передбачає також проведення деяких підготовчих операцій. Для цього на початковому етапі обробки сигнал прямого проходження віднімається з усієї радарограми. Вид сигналів прямого проходження для георадарів Одяг-4.2 і TRF-1 наведено на Рис. 1. На цьому рисунку відображені 3 сигнали. Два перших сигнали є сигналами прямого проходження георадару Одяг-4.2 за різного часу реєстрації. Сигнал «1» відповідає часу реєстрації 20 нс, а сигнал «2» – часу 10 нс. Як можна бачити, два перших сигнали, які записані в різні моменти часу, практично ідентичні. Цей факт є підтвердженням стабільності роботи систем георадару і, відповідно, свідчить про надійність одержуваних даних. Нарешті, останній, третій сигнал, що зареєстрований від антенного блоку георадару TRF-1 18 квітня 2013 року. Цей антенний блок мав дві прийомні антени, що розташовані симетрично відносно передавальної антени для мінімізації сигналу прямого проходження. Детально принцип роботи такої системи з компенсацією описаний в [4], а загальний вигляд різних антенних блоків і самих георадарів наведені на Рис. 2, 3. Як впливає з графіків на Рис. 1, схема з двома прийомними антенами, що реалізована у георадарі TRF-1 для компенсації сигналу прямого проходження, не забезпечує повної компенсації, що призводить до необхідності виконання операції віднімання сигналу прямого проходження з усієї сукупності даних за допомогою спеціального програмного забезпечення. Також відзначимо, що центральна частота у георадарі TRF-1 дорівнює 900 МГц, в той час як у георадарі Одяг-4.2 центральна частота має значення близько 1.5 ГГц. Ці параметри, як відомо, не тільки визначають глибину проникнення сигналів у середовище, що досліджується, при наявності дисперсії і загасання (втрат), а й відіграють важливу з точки зору електродинаміки роль під час отримання вихідних даних у рамках запропонованого раніше алгоритму обробки результатів. Як зазначено в [1, 5, 14], запропонований підхід до інтерпретації даних передбачає виконання обробки первинних даних в декілька етапів. Перший етап полягає у виділенні із загального профілю власне зондуючого імпульсу. Для цього в [4, 14] запропоновано після реєстрації сигналу прямого проходження вимірювати відбиття від листа металу і далі здійснювати проїзд георадару над конструкцією, що досліджується. Ключовою особливістю вимірювання сигналу, який відбито від листа металу, є визначення точного часу «центру» такого сигналу. Це має принципове значення для вирішення завдання визначення товщини шарів за допомогою оцінки часу затримки сигналу. Визначення часу затримки сигналів є основою методу класичної радіолокації. Однак, у таких завданнях середовищем поширення сигналів є повітря із заздалегідь відомими електродинамічними характеристиками. При цьому до відносної точності визначення відстані не висуваються дуже високі вимоги. Але у завданні, що розглядається у даній роботі, ситуація принципово інша. Це пояснюється тим, що діелектрична проникність середовища не тільки невідома

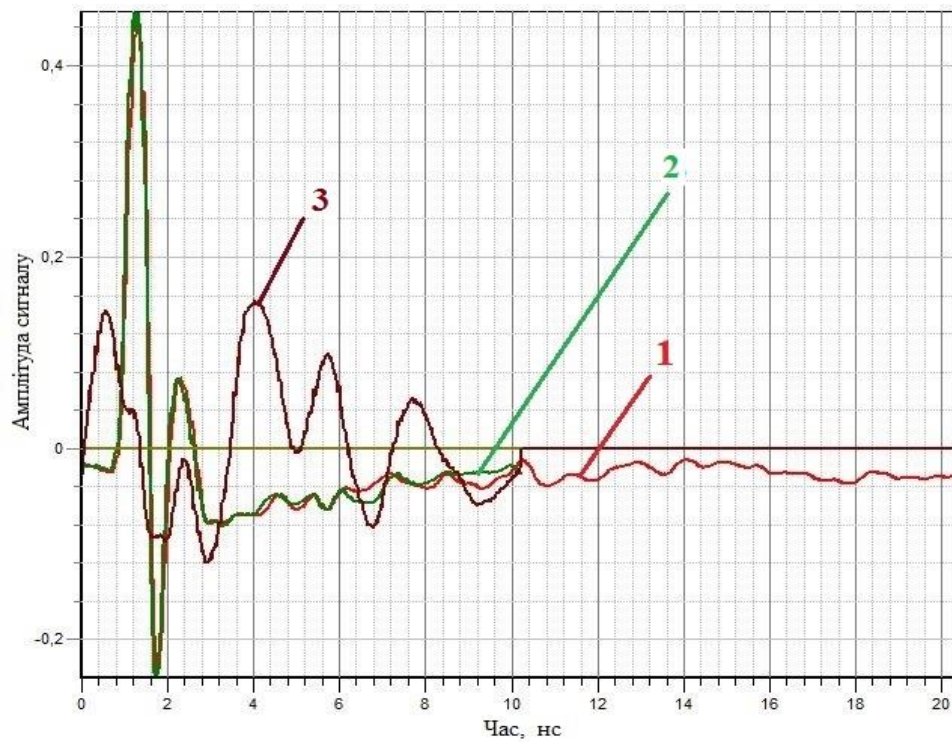


Рис. 1. Загальний вигляд сигналів прямого проходження для георадарів TRF-1 та Одяг-4.2
 1 – Одяг-4.2, розгортка 20 нс., 2 – Одяг-4.2, розгортка 10 нс., 3 – TRF-1, розгортка 10 нс.

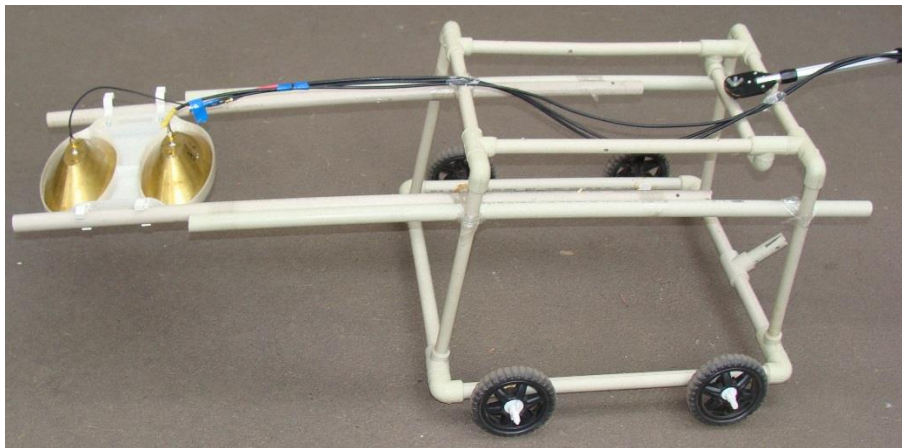


Рис. 2. Загальний вигляд антенного блоку Одяг-4.2.

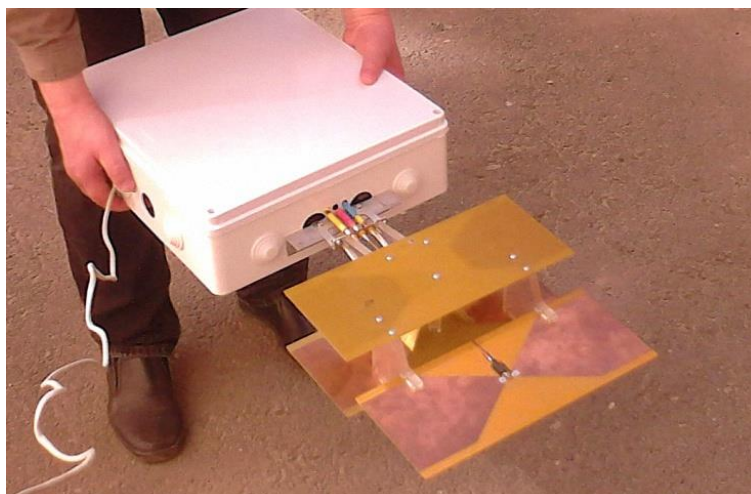


Рис. 3. Загальний вигляд георадару TRF – 1.

апріорі, але й змінюється від шару до шару. Тому раніше була запропонована схема пошарового визначення значень відносної діелектричної проникності з наступним визначенням товщини відповідного шару. Цей підхід базується на залученні формул Френеля [15]. У рамках такої методики спочатку вектор напруженості електричного поля падаючої хвилі представляється у вигляді розкладання на дві ортогональні складові. Тоді компонента, яка паралельна площині падіння, позначається індексом \parallel , а компонента, що перпендикулярна площині падіння, має індекс \perp . У такому випадку вектор напруженості магнітного поля визначається рівнянням [15]:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \mathbf{s} \times \mathbf{E}, \quad (1)$$

де: \mathbf{s} – одиничний вектор у напрямку поширення хвилі.

Для подальшого просування необхідно обрати модель. Більшість авторів [16-23] застосовують модель плоскої хвилі. У загальному випадку така модель передбачає так зване похиле падіння, яке описується формулами Френеля [15] для загального випадку. Виходячи з [15, 24], напишемо їх у вигляді:

$$T_{\parallel} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\frac{n_2}{n_1} \cdot \cos \theta_i + \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\parallel}. \quad (2)$$

$$T_{\perp} = \frac{2 \cdot \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\perp}. \quad (3)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\frac{n_2}{n_1} \cdot \cos \theta_i - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{\frac{n_2}{n_1} \cdot \cos \theta_i + n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\parallel}. \quad (4)$$

$$R_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{\cos \theta_i + \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} A_{\perp}. \quad (5)$$

Як зазначено в [24], у разі похилого падіння залежність коефіцієнтів відбиття / заломлення від кута падіння і від співвідношення між ортогональними компонентами є нелінійною.

Раніше також пропонувалося виконувати вимірювання з невеликим кутом нахилу антенної системи георадару TRF-1 [24]. Загальний вигляд приладу Одяг-4.2 під час проведення вимірювань-відбиття від листа металу наведений на Рис. 4.



Рис. 4. Проведення калібрування для георадару Одяг-4.2.

Також були проведені лабораторні експерименти з вимірюваннями в умовах нахилу антенного блоку георадару Одяг-4.2, (Рис. 5). Аналіз отриманих даних свідчить, що для георадару Одяг-4.2 нахил антен істотно менше впливає на точність результатів вимірювань, ніж для георадару TRF-1. У більшості випадків впливом нахилу антенної системи можна знехтувати без значного зменшення точності оцінок. Водночас, як свідчать проведені серії вимірювань, проблема наявності вторинних відбитків (перевідбиттів) вимагає більш детального аналізу.



Рис. 5. Проведення лабораторних досліджень при нахиленому розташуванні антенного блоку георадару Одяг-4.2.

Для досягнення більш ясного викладу матеріалу наведемо деякі результати з роботи [1]. Основна ідея даного підходу спирається на застосування до аналізу імпульсних сигналів двох інтегральних перетворень – перетворення Гілберта [25-28] і пов'язаного з ним поняття аналітичного сигналу, а також інтегрального перетворення, запропонованого в [20, 21].

Перетворення Гілберта спирається на поняття ортогонального доповнення сигналу $s(t)$. Ортогональним доповненням у такому випадку називають сигнал $s_{od}(t)$, що задовольняє співвідношенню:

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s_{od}(t) dt = 0. \quad (6)$$

Тоді робиться природне припущення, що $s_{od}(t)$ не дорівнює нулю тотожно. Перетворення Гілберта спирається на процедуру розрахунку так званого ортогонального доповнення сигналу $s(t)$:

$$s_{od}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{\pi \cdot (t - \tau)} d\tau. \quad (7)$$

З виразу (7) випливає, що перетворення Гілберта по суті є результатом операції згортки сигналу $s(t)$ і функції $h(t) = 1/\pi t$. Цю функцію називають ядром перетворення Гілберта. Фактично ядро перетворення Гілберта є імпульсною характеристикою лінійного фільтра, на виході якого формується ортогональне доповнення вхідного сигналу. Відповідно фільтр з імпульсною характеристикою $h(t) = 1/\pi t$ прийнято називати фільтром Гілберта. Перетворення Гілберта у частотній області можна записати у наступному вигляді:

$$s_{od}(\omega) = H(\omega) \cdot S(\omega). \quad (8)$$

З аналізу властивостей перетворення Гілберта випливає, що фільтр Гілберта – ідеальний фазообертач, і як будь-який ідеальний фільтр, фільтр Гілберта, на жаль, не може бути реалізований фізично. При цьому необхідно зазначити, що крім повороту фази, фільтр Гілберта усуває постійну складову сигналу.

Друге перетворення, запропоноване в [20, 21] і далі у декілька зміненому вигляді розглянуте в [29], передбачає виконання однократного інтегрування вихідного сигналу за часом із змінною верхньою межею для прийняття не максимумів обвідної, як у випадку перетворення Гілберта, а нулів. Основу

цього підходу становить припущення, що в ідеальному випадку вихідний сигнал являє собою функцію Гауса, яка описується відомим виразом:

$$S(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right). \quad (9)$$

Відповідно перша похідна такого сигналу представляється формулою:

$$S'(t) = -t \exp\left(\frac{t^2}{2}\right). \quad (10)$$

На Рис. 6 наведено графіки модельного (віртуально синтезованого) сигналу та його перетворень – Гілберта й інтегрального за [20, 21], що були отримані за формулою.

$$S(t) = A_1 \cdot \exp\left(-M \cdot \left(\frac{t^2}{2}\right)\right), \quad (11)$$

де: $A_1 = 1$, а параметр M забезпечує максимум у точці 1,7 нс на графіку.

Як видно на Рис. 6, сигнал, що штучно синтезований за допомогою комп'ютерної програми «GeoVizu», має форму, яка дуже нагадує перевернутий мексиканський капелюх – Сомбреро. Природно, що для такого, штучно згенерованого сигналу, перетворення Гілберта має чітко виражений максимум. Інтегральне ж перетворення має чітко виражене нульове значення у точці, де перетворення Гілберта має максимальне значення.

Таким чином, наочно продемонстрована можливість ефективної обробки сигналів імпульсних георадарів за допомогою розробленого раніше програмного забезпечення «GeoVizu». Очевидно, що це далеко не вичерпані можливості програмного забезпечення «GeoVizu», що стосуються обробки первинних даних дистанційного зондування і подальшої інтерпретації отриманих результатів. Деякі можливості розробленого програмного забезпечення наведено також у роботах [4, 5, 14, 17].

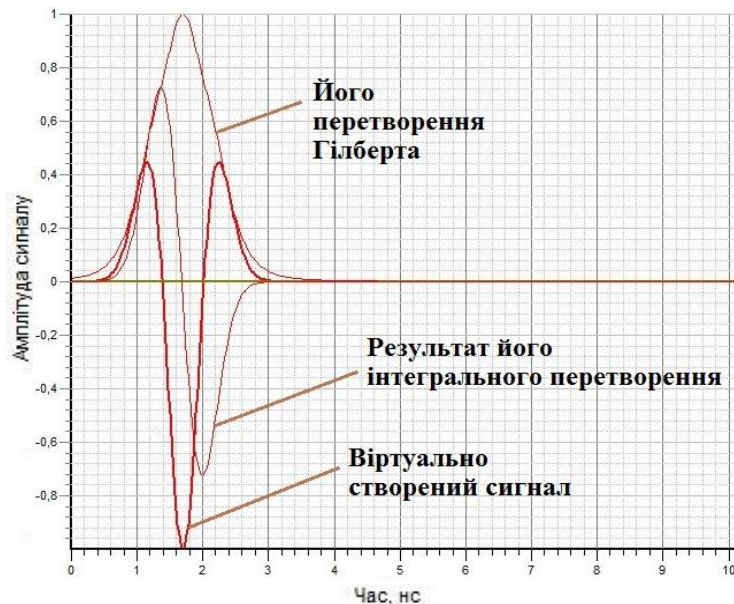


Рис. 6. Зображення віртуально змодельованого вихідного сигналу (що відбитий від листа металу), та результати його перетворення – Гілберта та інтегральне.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджені можливості застосування імпульсних георадарів для вирішення актуальних завдань неруйнівного контролю покриттів автомобільних доріг і дистанційного зондування. Виконано аналіз можливостей обробки первинних наборів даних, отриманих за допомогою двох георадарів TRF-1 і Одяг-4.2, що мають не тільки різні значення центральної частоти, але й принципові відмінності у конструкції антенних блоків. При виконанні роботи були проведені не тільки лабораторні експерименти на модельних конструкціях, але й аналіз отриманих даних за допомогою розробленого програмного забезпечення GeoVizu. Проведений теоретичний аналіз отриманих даних спирався на використання сучасних методів обробки цифрових сигналів – перетворення Гілберта і інтегральне перетворення, що ґрунтується на процедурі одноразового інтегрування із змінною верхньою границею. У результаті проаналізовані різні фактори, які визначають основні відмінності і характерні особливості імпульсних сигналів георадарів, і можуть бути застосовані для виявлення такого небезпечного дефекту як втрата

міжшарового зчеплення у шарах з монолітних матеріалів конструкції нежорсткого дорожнього одягу або для виявлення наявності тонких шарів у структурі багатошарового середовища. Отже, розглянутий підхід до постановки задачі та проведений теоретичний аналіз спільно з результатами чисельного моделювання дозволили у підсумку обґрунтувати можливість підвищення надійності результатів обробки результатів георадарної діагностики та виявлення дефектів у плоскошаруватих конструкціях за допомогою методів сучасної георадіолокації та обробки цифрових сигналів.

Зрозуміло, що з огляду на обмежений обсяг даної публікації, дати повний опис всіх особливостей отримання первинних даних, наступних алгоритмів їх обробки і залучених на кінцевому етапі методів інтерпретації отриманих результатів, не є можливим. Тому в даній роботі наведені лише нові дані, що стосуються в першу чергу етапів отримання первинних даних і підходу до їх обробки. Автори сподіваються опублікувати результати наступних етапів обробки в майбутніх публікаціях.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

Д.О. Батраков  <http://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

М.С. Антюфеева  <http://orcid.org/0000-0002-6654-4794>

А.Г. Батракова  <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Urdzik SN. The Effect of Secondary Reflections on the Quality of Layers Thickness Assessment Using UWB GPR Signals, 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020. p. 1132-1135, Available from: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252812>
2. Loizos A, Plati C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. NDT E Int. 2007;40:147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.09.001>
3. Tarefder RA, Ahmed MU. Ground penetrating radar for measuring thickness of an unbound layer of a pavement. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018;598:160-167. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16
4. Pochanin GP, Masalov SA, Ruban VP, Kholod PV, Batrakov DO, Batrakov AG, Urdzik SN, Pochanin OG. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying. In: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. London: CRC Press - Taylor & Francis Group; 2016. p. 20-65. DOI: [10.1201/9781315374130-3](https://doi.org/10.1201/9781315374130-3)
5. Батраков ДО, Иян Ло, Антюфеева МС, Шульга СН, Батракова АГ. Обнаружение нарушения контакта между плоскими слоями с помощью импульсных георадаров. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. (Серія: «Радіофізика та електроніка»). Харків: ХНУ; 2019;30:27-37.
6. Hanif S, Ahmed A, Saeed TU, Bai Q. Estimation of Pavement Damage Cost for Establishing Equitable Road Use Fee for Commercial Vehicles – An Exploratory Empirical Analysis. July 2016 DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. Conference: ICTIM 2016. Available from: <https://doi.org/10.12783/dtetr/ictim2016/5530>,
7. Saarenketo T. Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys [dissertation]. Oulu: University of Oulu; 2006, 125p. Available from: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
8. Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar J. of Appl. Geophys. 2000;43:119-138.
9. Alqadhi S, Ghahari S, Woldemariam W. Costs and Benefits of Highway Pavement Resurfacing: Interstate 465 Case Study. Infrastructure Asset Management. March 2018;5(2):1-40. Available from: <https://doi.org/10.1680/jinam.17.00036>
10. Oliveira DB, Vieira DAG, Lisboa AC, Goulart F. A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data. NDT E Int. 2014;65:22-27.
11. Dong Z, Ye S, Gao Y, Fang G, Zhang X, Xue Z, Zhang T. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. Sensors. 2016;16(12):2067. Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2067> doi: 10.3390/s16122067.
12. Відомчі будівельні норми України. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. ВБН В.2.3-218-186-2004. Київ : УКРАВТОДОР; 2004, с. 1-137.
13. A Guide to the Visual Assessment of Pavement Condition. Available from: <http://www.lgam.info/a-guide-to-the-visual-assessment-of-pavement-condition>
14. Батраков ДО. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и

- незрушающем контроле. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. (Серія: «Радіофізика та електроніка»). Харків : ХНУ; 2016. 25: с. 48-52.
15. Борн М, Вольф Э. Основы оптики Москва: Наука, 1973. 720 с.
 16. Sudyka J, Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2011;4(3):176-184. Available from: http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf
 17. Батраков Д.О. Інформаційні технології та обробка георадарних сигналів у системі моніторингу транспортних споруд. У кн.: Батракової А.Г., редактор. Інформаційні технології та інженерія транспортних і промислових споруд, Харків: ФОП Панов А. М.; 2019. с. 66-108.
 18. Krysiński L, Sudyka J. Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high-frequency ground-penetrating radar. *Nondestruct. Test. Eval.* 2012;27(3):219-227. Available from: www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012.
 19. Astanin LY. Ultra Wideband Signals—A New Step in Radar Development. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.* March, 1992, p. 12-15.
 20. Astanin LY, Kostylev AA. *Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing.* By: The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1997.
 21. Astanin LY, Kipke MV, Kostyleva VV. The structural features of ultrawideband signals. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2008, p. 180 – 182.
 22. Ivashchuk VE, Prokhorenko VP, Pitertsev AA, Yanovsky F J. Evaluation of Combined Ground Penetrating and Through-the-Wall Surveillance UWB Technology. *Proceedings of the 43rd European Microwave Conference.* 7-10 Oct 2013, Nuremberg, Germany, 978-2-87487-031-6 2013 EuMA, p. 384-387.
 23. Lahouar S. *Development of Data Analysis Algorithms for Interpretation of Ground Penetrating Radar Data.* [dissertation] Blacksburg, Virginia, October 3, 2003, 253 p.
 24. Батраков Д.О., Белошенко К.С., Батракова А.Г., Антюфеева М.С. Использование поляризационных параметров георадара для контроля плоскостойких сред. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. (Серія: «Радіофізика та електроніка»). Харків : ХНУ; 2017. 26. с. 10-16.
 25. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Москва : Мир; 1982, 592 с.
 26. Batrakov DO, Batrakov AG, Golovin DV, Simachev AA. Hilbert transform application to the impulse signal processing. *Proceedings of the 2010 5th International Conference on: International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2010),* 2010 September 6-10; Sevastopol, Ukraine. IEEE. p. 113–115. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5609110>
 27. Опенгейм А, Шаффер Р. Цифровая обработка сигналов. Москва : Техносфера; 2012. 1048 с. ISBN 978-5-94836-329-5
 28. Batrakov AG, Batrakov DO, Antyufeyeva MS. Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty.* mar. 2018;17(1):55-71, ISSN 2449-769X. Available from: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.004>.
 29. Batrakov DO, Batrakov AG, Antyufeyeva MS. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. *Diagnostyka.* 2018;19(3):11–20. Available from: <https://doi.org/10.29354/diag/91489>.

REFERENCES

1. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Urdzik SN. The Effect of Secondary Reflections on the Quality of Layers Thickness Assessment Using UWB GPR Signals, 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020. p. 1132-1135, Available from: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252812>
2. Loizos A, Plati C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT E Int.* 2007;40:147-157. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.09.001>
3. Tarefder RA, Ahmed MU. Ground penetrating radar for measuring thickness of an unbound layer of a pavement. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2018;598:160-167. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16
4. Pochanin GP, Masalov SA, Ruban VP, Kholod PV, Batrakov DO, Batrakov AG, Urdzik SN, Pochanin OG. *Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying.* In: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications.* London: CRC Press - Taylor & Francis Group; 2016. p. 20-65.
5. Batrakov DO, Iyan Lo, Antyufeyeva MS, Shulga SN, Batrakov AG. Detection of contact breakdown between flat layers using impulse GPR. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”.* Kharkiv: KhNU; 2019;30:27-37. (Russian).
6. Hanif S, Ahmed A, Saeed TU, Bai Q. Estimation of Pavement Damage Cost for Establishing Equitable Road Use Fee for Commercial Vehicles – An Exploratory Empirical Analysis. July 2016 DESTech

- Transactions on Engineering and Technology Research. Conference: ICTIM 2016. Available from: <https://doi.org/10.12783/dtetr/ictim2016/5530>.
7. Saarenketo T. Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys [dissertation]. Oulu: University of Oulu; 2006, 125p. Available from: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514282221.pdf>
 8. Saarenketo T, Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar J. of Appl. Geophys. 2000;43:119-138.
 9. Alqadhi S, Ghahari S, Woldemariam W. Costs and Benefits of Highway Pavement Resurfacing: Interstate 465 Case Study. Infrastructure Asset Management. March 2018;5(2):1-40. Available from: <https://doi.org/10.1680/jinam.17.00036>
 10. Oliveira DB, Vieira DAG, Lisboa AC, Goulart F. A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data. NDT E Int. 2014;65:22-27.
 11. Dong Z, Ye S, Gao Y, Fang G, Zhang X, Xue Z, Zhang T. Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System. Sensors. 2016;16(12):2067. Available from: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2067> doi: 10.3390/s16122067.
 12. Departmental building codes of Ukraine. Transport facilities. Non-rigid road clothes. VBN B.2.3-218-186-2004. Kyiv: UKRAVTODOR; 2004, c. 1-137. (Ukrainian).
 13. A Guide to the Visual Assessment of Pavement Condition. Available from: <http://www.lgam.info/a-guide-to-the-visual-assessment-of-pavement-condition>
 14. Batrakov DO. Processing of pulse signals for thickness measurement of biological tissues and non-destructive control. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". Kharkiv: KhNU. 2016;25:48-52. (Russian).
 15. Born M, Wolf E. Osnovy optiki Moscow: Nauka, 1973.720 p. (Russian).
 16. Sudyka J, Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. Int. J. Pavement Res. Technol. 2011;4(3):176-184. Available from: http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V4N3_176-184.pdf
 17. Batrakov DO. Information technologies and processing of georadar signals in the monitoring system of transport facilities. In the book: Batrakov AG, editor. Information technologies and engineering of transport and industrial constructions, Kharkiv: FOP Panov AM; 2019. p. 66-108. [In Ukrainian].
 18. Krysiński L, Sudyka J. Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high- frequency ground-penetrating radar. Nondestruct. Test. Eval. 2012;27(3):219-227. Available from: www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759.2012.
 19. Astanin LYu. Ultra Wideband Signals—A New Step in Radar Development. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. March, 1992, p. 12-15.
 20. Astanin LY, Kostylev AA. Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing. By: The Institution of Electrical Engineering, London, UK, 1997.
 21. Astanin LYu, Kipke MV, Kostyleva VV. The structural features of ultrawideband signals. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2008, p. 180 – 182.
 22. Ivashchuk VE, Prokhorenko VP, Pitertsev AA, Yanovsky F J. Evaluation of Combined Ground Penetrating and Through-the-Wall Surveillance UWB Technology. Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. 7-10 Oct 2013, Nuremberg, Germany, 978-2-87487-031-6 2013 EuMA, p. 384-387.
 23. Lahouar S. Development of Data Analysis Algorithms for Interpretation of Ground Penetrating Radar Data. [dissertation] Blacksburg, Virginia, October 3, 2003, 253 p.
 24. Batrakov DO, Beloshenko KS, Batrakov AG, Antyufeyeva MS. Use of polarization parameters of georadar for control of flat-layered media. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". Kharkiv: KhNU. 2017;26:10-16. (Russian).
 25. Lem G. Analog and digital filters. Moskov : Mir; 1982, 592 p. (Russian).
 26. Batrakov DO, Batrakov AG, Golovin DV, Simachev AA. Hilbert transform application to the impulse signal processing. Proceedings of the 2010 5th International Conference on: International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2010), 2010 September 6-10; Sevastopol, Ukraine. IEEE. p. 113–115. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5609110>
 27. Oppengeym A, Shaffer R. Digital signal processing. Moskov : Tehnosfera; 2012. 1048 s. ISBN 978-5-94836-329-5. (Russian).
 28. Batrakov AG, Batrakov DO, Antyufeyeva MS. Pavement deterioration model based on GPR datasets. Roads and Bridges - Drogi i Mosty. mar. 2018;17(1):55-71, ISSN 2449-769X. Available from: <http://dx.doi.org/10.7409/rabd.018.004>.
 29. Batrakov DO, Batrakov AG, Antyufeyeva MS. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. Diagnostyka. 2018;19(3):11–20. Available from: <https://doi.org/10.29354/diag/91489>.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-02>

УДК 537.86

НАДШИРОКОСМУГОВИЙ КОМБІНОВАНИЙ ВІБРАТОРНО-ЩІЛИННИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ТИПУ КЛЕВІНА

О. М. Думін, В. А. Плахтій, П. Г. Фомін, М. В. Нестеренко

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: dumin@karazin.ua

Надійшла до редакції 9 жовтня 2020 р.

Актуальність. Надширокосмуговий зв'язок є перспективним способом передавання інформації, який використовує короткі електромагнітні імпульси. Він має великий потенціал завдяки більшій, порівняно з іншими способами передавання інформації, пропускній здатності. Це дозволяє створювати надшвидкі бездротові комунікаційні мережі. Але реалізація надширокосмугового зв'язку потребує використання компактних та ефективних імпульсних випромінювачів.

Мета роботи. Створити компактну імпульсну комбіновану антену електричного та магнітного типу, надширокосмуговий аналог випромінювача Клевина, в якому необхідні характеристики забезпечуються сильною взаємодією його складових частин. Також необхідно проаналізувати напрямлені, частотні та часові характеристики такого випромінювача.

Методи. Використовується числовий метод кінцевих різниць у часовому просторі (FDTD) для остаточного розрахунку та оптимізації випромінювача. Початкова конструкція розрахована у вузькому діапазоні частот методом електро- та магніторушійних сил.

Результати. Проведена багатопараметрична оптимізація антени з метою знаходження оптимальної взаємодії між електричним та магнітним випромінювачем при одночасному забезпеченні потрібних напрямлених та частотних характеристик. Отримані діаграми напрямленості в H і E площинах для низки частот, побудовані часові залежності випроміненого поля в цих площинах.

Висновки. Аналог випромінювача Клевина може концентрувати енергію випромінювання в заданому напрямку та забезпечувати широкий діапазон робочих частот, що досягає в даній реалізації антени 1 ГГц. Треба відмітити компактність даної структури та наявність низки геометричних параметрів, зміна яких може дозволити покращити часові параметри випромінюваного поля. Надширокосмугова комбінована вібраторно-щілинна структура має декілька напрямків для подальшої оптимізації часових, частотних і напрямлених характеристик відповідно до вимог конкретних застосувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: випромінювач Клевина; надширокосмугова щілина; надширокосмугова комбінована вібраторно-щілинна структура; ідеально провідний конус.

ULTRAWIDEBAND COMBINED VIBRATOR-SLOT CLAVIN TYPE RADIATOR

O.M. Dumin, V.A. Plakhtiy, P.G. Fomin, M.V. Nesterenko

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. Ultrawideband communication is a promising way of transmitting information that uses short electromagnetic pulses. It has great potential due to higher bandwidth than other methods of information transfer. This allows you to create ultra-fast wireless communication networks. But the implementation of ultra-wideband communication requires the use of compact and efficient pulsed emitters.

Object. Create a compact pulsed combined antenna of electric and magnetic type, ultra-wideband analogue of the Clavin radiator, in which the necessary characteristics are provided by a strong interaction of its components. It is also necessary to analyze the directional, frequency and time characteristics of such a radiator.

Methods: The numerical method of finite differences in time domain (FDTD) is used for the final calculation and optimization of the radiator. The initial design is calculated in a narrow frequency range by the method of electric and magnetomotive forces.

Results. The multiparameter optimization of the antenna is carried out in order to find the optimal interaction between the electric and magnetic emitter while providing the required directional and frequency characteristics. The radiation patterns in the H and E planes for a number of frequencies are obtained, and the time dependences of the radiated field in these planes are constructed.

Conclusions. The analog of the Clavin radiator can concentrate the energy of the radiation in a given direction and provide a wide range of operating frequencies, which in this implementation of antenna reaches 1 GHz. It should be noted the compactness of this structure and the presence of a number of geometric parameters, the change of which can improve the time parameters of the radiated field. The ultra-wideband combined vibrator-slot structure has several directions for further optimization of time, frequency and directional characteristics in accordance with the requirements of specific applications.

KEY WORDS: Clavin radiator; ultrawideband slot; ultrawideband combined vibrator-slot structure; perfectly conducting cone.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ВИБРАТОРНО-ЩЕЛЕВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ТИПА КЛЕВИНА

О. Н. Думин, В. А. Плахтий, Ф. Г. Фомин, М. В. Нестеренко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Сверхширокополосная связь является перспективным способом передачи информации, который использует короткие электромагнитные импульсы. Она имеет большой потенциал благодаря большей по сравнению с другими способами передачи информации пропускной способности. Это позволяет создавать сверхбыстрые беспроводные коммуникационные сети. Но реализация сверхширокополосной связи требует использования компактных и эффективных импульсных излучателей.

Цель работы. Создать компактную импульсную комбинированную антенну электрического и магнитного типа, сверхширокополосный аналог излучателя Клевина, в котором необходимые характеристики обеспечиваются сильным взаимодействием его составных частей. Также необходимо проанализировать направленные, частотные и временные характеристики такого излучателя.

Методы. Используется численный метод конечных разностей во временной области (FDTD) для окончательного расчета и оптимизации излучателя. Начальная конструкция рассчитана в узком диапазоне частот методом электро- и магнитодвижущих сил.

Результаты. Проведена многопараметрическая оптимизация антенны с целью нахождения оптимального взаимодействия между электрическим и магнитным излучателем при одновременном обеспечении нужных направленных и частотных характеристик. Полученные диаграммы направленности в Н и Е плоскостях для ряда частот, построенные временные зависимости излученного поля в этих плоскостях.

Выводы. Аналог излучателя Клевина может концентрировать энергию излучения в заданном направлении и обеспечивать широкий диапазон рабочих частот, который достигает в данной реализации антенны 1 ГГц. Надо отметить компактность данной структуры и наличие ряда геометрических параметров, изменение которых может позволить улучшить временные параметры излучаемого поля. Сверхширокополосная комбинированная вибраторно-щелевая структура имеет несколько направлений для дальнейшей оптимизации временных, частотных и направленных характеристик в соответствии с требованиями конкретных приложений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: излучатель Клевина; сверхширокополосная щель; сверхширокополосная комбинированная вибраторно-щелевая структура; идеально проводной конус.

ВСТУП

Перехідні процеси в природі та техніці відіграють важливу роль як ключові особливості процесу передачі інформації. Поширення потужних перетворювачів на основі ширинно-імпульсної модуляції та випрямлячів на сонячних електростанціях та сучасних електромобілях вимагає вивчення його завад, що діють на інші пристрої [1]. Перехідні процеси можуть спричинити помилки в лініях передачі цифрових сигналів та переривати роботу пристроїв радіочастотної ідентифікації (RFID) через їх надширокопосмуговий характер [2]. Ймовірно, найпотужнішою завадою для сучасних електронних пристроїв, таких як бортові системи, є блискавка [3]. Швидке вмикання величезного струму може вплинути на екрановані кабелі літаків і пошкодити бортові системи [4], а також захищені кабелі, що закопані в землю [5] - [7].

Класичні вібратори та щілини є вузькопосмуговими випромінювачами внаслідок резонансних процесів, що супроводжують їхнє збудження, хоча існують широкопосмугові конструкції вібраторів [8] та щілин [9]. Взаємодія між ними вже використовувалась для підвищення загальної ефективності випромінювання комбінованих структур. Дослідження взаємного впливу вимагає знань про ближнє поле випромінювачів для перехідного збудження. Короткий електричний диполь може забезпечити досить гладку частотну характеристику випромінювання, як відомо з [8]. Крім того, це підтверджується загальновідомим фактом, що діаграма напрямленості (ДН) короткого диполя має форму, подібну до ДН напівхвильового диполя. Також існують різні конструкції широкопосмугових щілин.

Мета даної статті – побудувати надширокопосмуговий аналог випромінювача Клевина [10]. Для покращення характеристик комбінованого випромінювача будемо використовувати сильну взаємодію між щілиною і вібраторами. Треба забезпечити взаємодію в широкому діапазоні частот, застосовуючи оптимальне розміщення широкопосмугових диполів у ближній зоні щілини. Пропонується використати кінчну форму диполів для розширення діапазону робочих частот. Існуючі аналітичні розв'язки рівнянь Поклінгтона та Халлена [11] не можуть бути застосовані безпосередньо у випадку плавної зміни перерізу диполя для поліпшення його частотних параметрів. Отже, для зручності будемо використовувати числовий підхід до розв'язання задачі. Як приклад магнітного випромінювача, ми розглянемо

надширококуглову щілину спеціально оптимізованої форми, що вирізана у нескінченному ідеальнопровідному екрані [12]. Щоб зменшити затінення щілини диполями, кінцевий короткозамкнений вібратор приєднано основою до нескінченного ідеальнопровідного екрану. Отже, запропоновано тривимірний аналог діамантового диполя (diamond dipole) [9] для комбінованого вібраторно-щілинного випромінювача.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай надширококуглову щілину [12] вирізано у нескінченному ідеальнопровідному екрані кінцевої товщини, як показано на рис. 1. Щілина збуджується джерелом електричної напруги, прикладеної до обох сторін щілини в її центрі. Для поліпшення характеристик щілини додано два ідеальнопровідні конуси у вигляді надширококуглових короткозамкнених на екран диполів, як показано на рис. 2 та 3. Задача полягає у пошуку розмірів випромінюючої конструкції для оптимізації її характеристик.

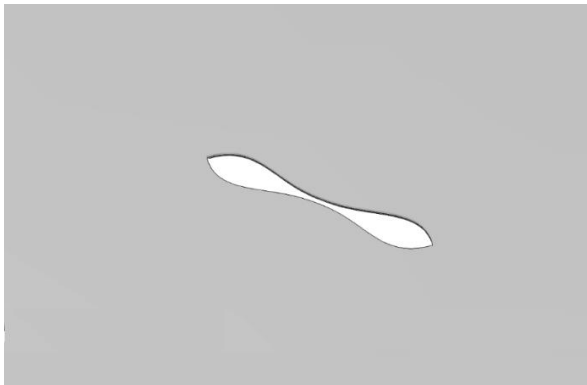


Рис. 1. Надширококуглова щілина в ідеальнопровідному екрані [12]

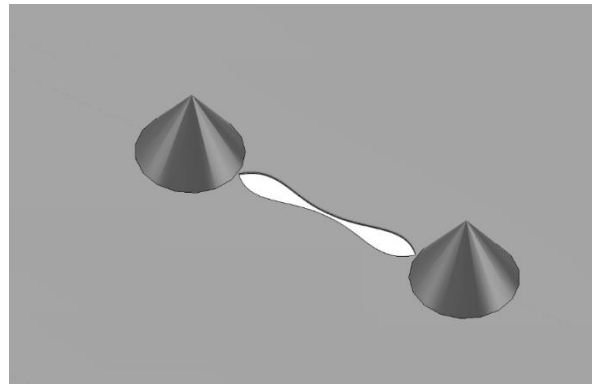


Рис. 2. Надширококугловий вібраторно-щілинний випромінювач

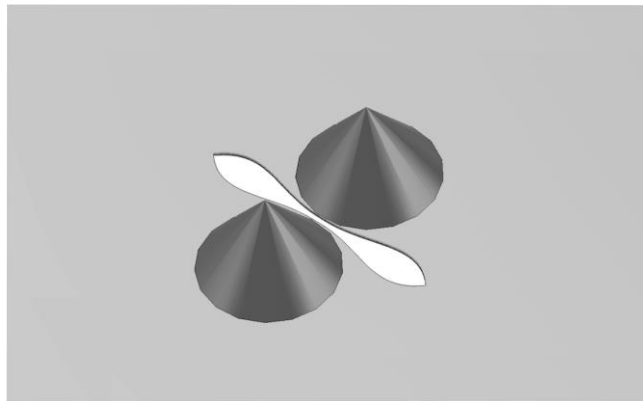


Рис. 3. Надширококугловий аналог випромінювача Клевїна

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Як зазначено вище, для криволінійних структур зручно використовувати прямий числовий розрахунок у часовій області. Нескінченний екран товщиною 1 мм моделюється пластиною із довжиною та шириною у п'ять довжин щілини. Всі границі простору обчислення є поглинаючими. Числове моделювання, що проведено методом скінченних різниць у часовому просторі, показало, що збільшення розмірів екрану від початкового майже не змінює результати обчислення. Коефіцієнт стоячої хвилі напруги як функція частоти для щілини та комбінованих структур представлений на Рис. 4. Відсутність строгої періодичності мінімумів можна пояснити криволінійною формою щілини та складними траєкторіями поверхневих струмів навколо щілини [12].

Для підвищення ефективності її випромінювання на низьких частотах два кінцеві диполі, прилеглі до криволінійної межі щілини, розташовувались симетрично відносно центру щілини як в конструкції надширококуглової структури (Рис. 2), так і аналога випромінювача Клевїна (Рис. 3). Було з'ясовано, що радіус основи конуса впливає на якість його резонансів. Наприклад, мінімум при $f = 1,3$ ГГц (крива 2 на Рис. 4) забезпечується класичним співвідношенням $L/\lambda = 0,25$. Ці вдосконалення помітно розширюють

діапазон частот випромінювача Клевіна (Рис. 3). Вплив конусів на частотні характеристики випромінювача (Рис. 2) менший через їх розташування у мінімумі ДН щілини.

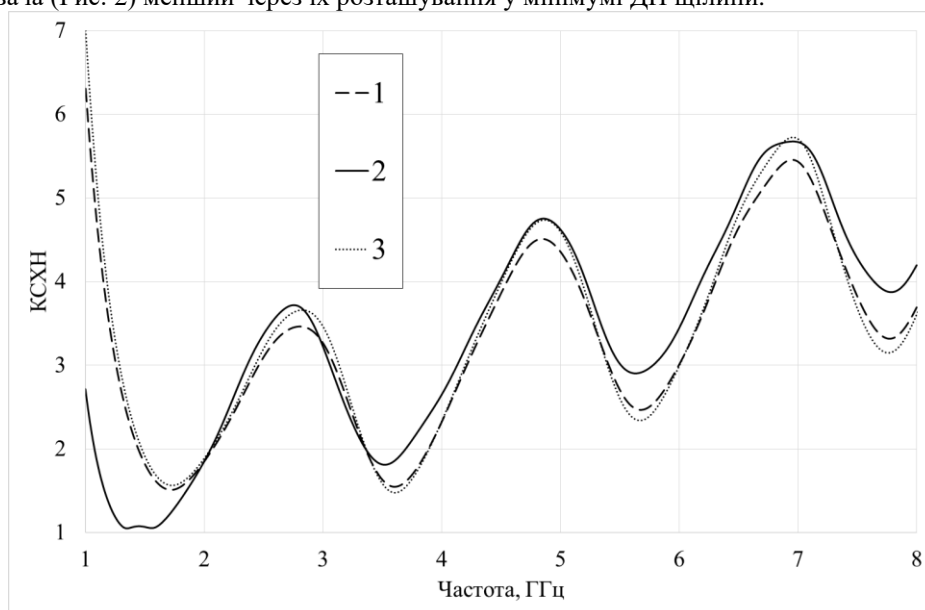


Рис. 4. КСХН в залежності від частоти збудження надширокосмугової щілини на Рис. 1 (крива 1), надширокосмугового аналога випромінювача Клевіна, показаного на Рис. 3 (крива 2) та вібраторно-щілинного випромінювача на Рис. 2 (крива 3).

Цікаво дослідити часові форми амплітуд випроміненої імпульсної електромагнітної хвилі у випадку збудження щілини гаусовим імпульсом. Електрична складова хвилі на відстані 0,3 м від центру випромінювачів представлена на Рис. 5 для кута $\Theta = 0^\circ$ в Н- та Е-площинах, коли випромінювачі збуджуються гаусовим імпульсом тривалістю 0,08 нс. Як видно з Рис. 5, пасивні конуси збільшують амплітуду випромінюваних хвиль уздовж нормалі до площини щілини і подовжують перехідний процес у структурі. Важливо пояснити незвичну затримку імпульсу у часі, спричинену наявністю конусів. Ці конуси служать неоднорідною лінією передачі, яка породжує відбиту імпульсну хвилю в початковий момент її збудження. Ця хвиля інтерферує з хвилею, яка вже існує, в центрі щілини породжуючи нуль електричного поля. Далі амплітуда відбитої хвилі неоднорідної лінії зменшується, змінює свій знак, отже загальне електричне поле, що розподілене по щілині, збільшується, і щілина починає випромінювати, отримуючи додаткову енергію від відбитої хвилі конусів.

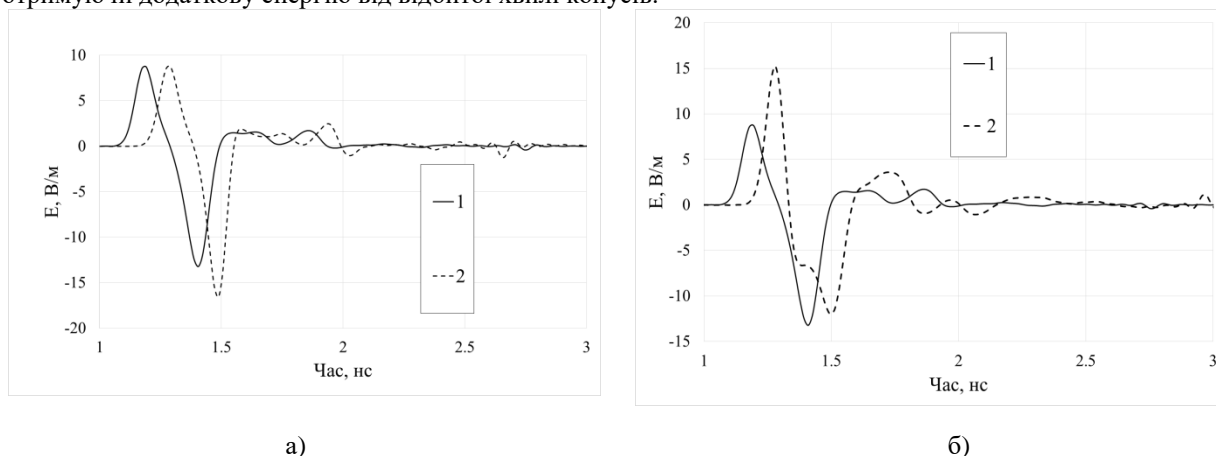


Рис. 5. Залежність амплітуди електричної складової поля випромінювання від часу на відстані спостереження $r = 0,3$ м, $\Theta = 0^\circ$ для випромінювачів: 1–щілина, 2–вібраторно-щілинний випромінювач (а) або випромінювач Клевіна (б).

Кутова залежність випромінювання в площині Н представлена на Рис. 6. Вона демонструє зменшення амплітуд для щілини (крива 1), а також для комбінованих випромінювачів (крива 3) відповідно для всіх кривих на Рис. 6. Можна помітити, що перший максимум кривої 1 на Рис. 6 (б) більший за максимум кривої 1 на Рис. 5, але треба зважити на високе значення наступного мінімуму

кривої 1 на Рис. 6 (б). Подібну поведінку ми можемо спостерігати в площині Е для випромінювача Клевїна (крива 4). У той же час, випромінювання щілини в площині Е (крива 2) є ізотропним згідно класичних параметрів щілини.

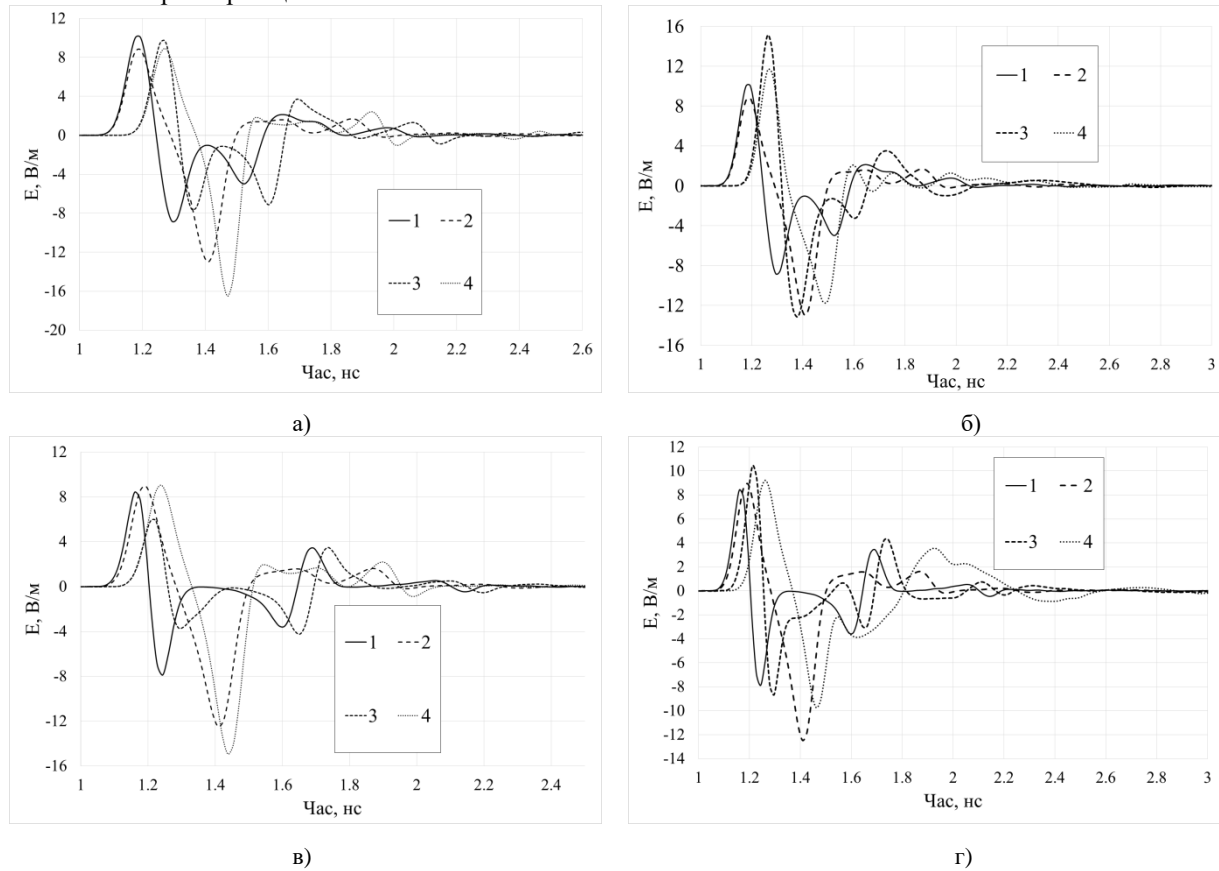


Рис. 6. Залежність амплітуди електричної складової поля випромінювання від відстані спостереження $r = 0,3$ м, $\Theta = 30^\circ$ (а, б) та $\Theta = 60^\circ$ (в, г), де криві позначають випромінювання: 1 – щілини у площині Н, 2 – щілини у площині Е, 3 – комбінованого випромінювача у площині Н, 4 – комбінованого випромінювача у площині Е

Видно, що комбінований випромінювач на Рис. 2 не дає поліпшення характеристик випромінювання у порівнянні з надширококугловим аналогом випромінювача Клевїна. Давайте розглянемо його напрямленість на різних частотах. Відомо, що випромінювання прямокутної щілини в площині Е близьке до ізотропного. Коефіцієнти підсилення надширококуглової щілини та випромінювача Клевїна в площині Е зображені на різних частотах на Рис. 7. Можна помітити, що діаграми напрямленості щілини є ізотропними з плавним збільшенням їхньої спрямованості на вищих частотах (Рис. 7 а, в). Випромінювач Клевїна демонструє більш спрямоване випромінювання (Рис. 7 г), але з небажаними максимумами при $\Theta = 90^\circ$ для частот нижче, ніж 1,8 ГГц (Рис. 7 б). Це можна пояснити ефективним збудженням конусів на низьких частотах завдяки їхній висоті та відстані між ними, що робить їхнє випромінювання подібним до випромінювання антени біжної хвилі.

ДН прямокутної щілини у Н-площині завжди має максимум по нормалі до її площини і нулі у її площині. Коефіцієнти підсилення надширококуглової щілини та випромінювача Клевїна мають схожий вигляд, що показано на Рис. 8. Складний розподіл амплітуди магнітного струму на щілині генерує більш рівномірний розподіл спрямованості на високих частотах, як показано на Рис. 8 (в). Слабкий вплив конусів (Рис. 8 б, г) можна пояснити взаємно протилежним знаком струмів збудження кожного конуса центром щілини. Це спричиняє взаємну компенсацію результуючого поля в Н-площині.

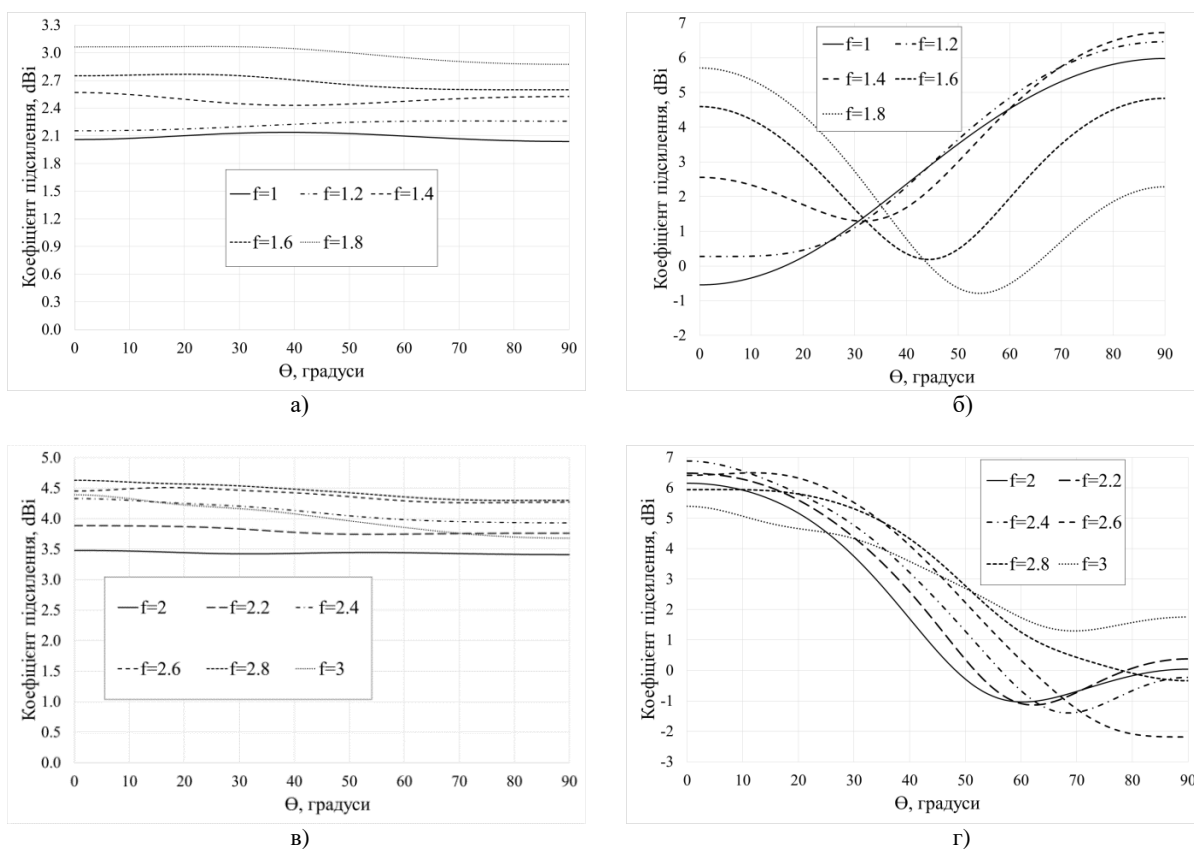


Рис. 7. Коефіцієнти підсилення у площині Е надширококумової щілини (а, в) та випромінювача Клевїна (б, г) на різних частотах (ГГц)

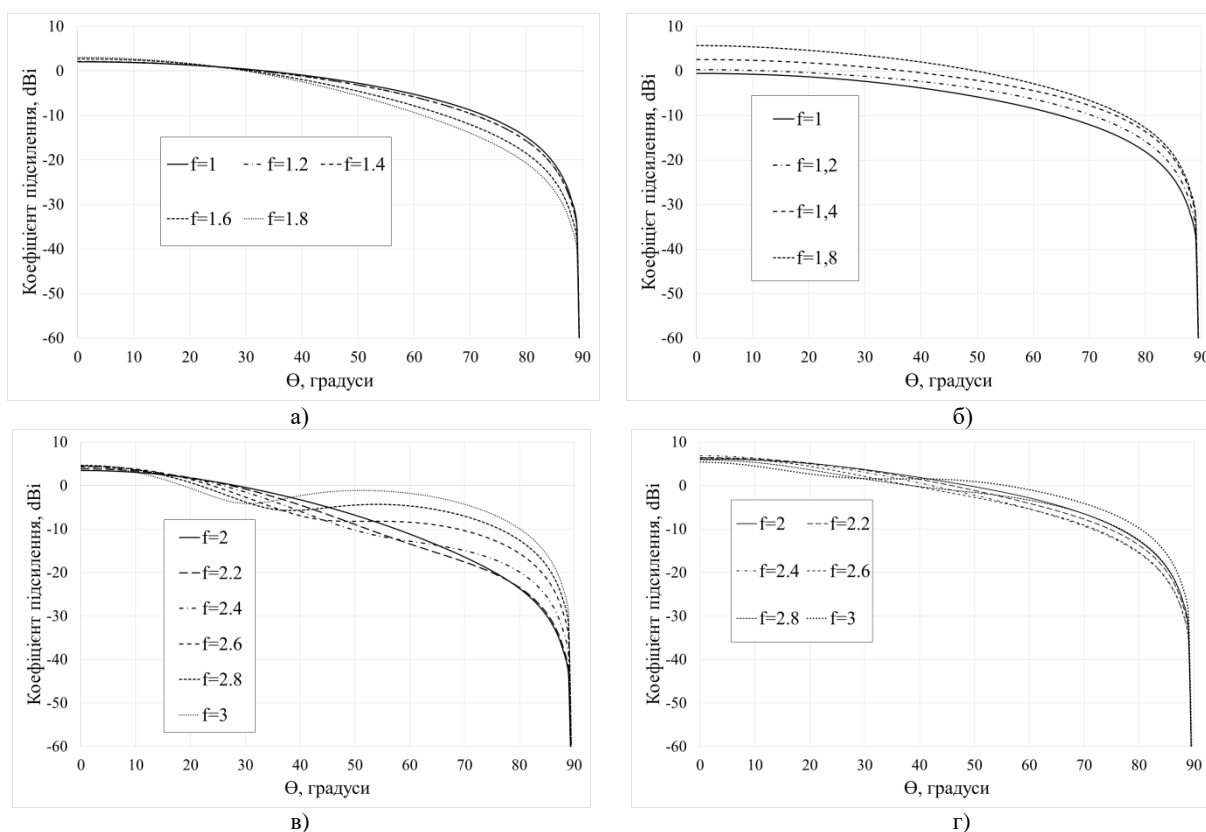


Рис. 8. Коефіцієнти підсилення у Н-площині надширококумової щілини (а, в) та випромінювача Клевїна (б, г) на різних частотах (ГГц)

ВИСНОВКИ

Аналог випромінювача Клевіна може концентрувати енергію випромінювання в заданому напрямку та забезпечувати широкий діапазон робочих частот, що досягає в даній реалізації антени 1 ГГц. Треба відмітити компактність даної структури та наявність низки геометричних параметрів, зміна яких може дозволити покращити часові параметри випромінюваного поля. Надширокопосмугова комбінована вібраторно-щільна структура має декілька напрямків для подальшої оптимізації часових, частотних і напрямлених характеристик відповідно до вимог конкретних застосувань.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

О. М. Dumin  <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

V. A. Plakhtii  <http://orcid.org/0000-0002-0442-2716>

P. G. Fomin  <https://orcid.org/0000-0002-6346-4270>

M.V. Nesterenko  <https://orcid.org/0000-0002-1297-9119>

REFERENCES

1. Luszcz J, Smolenski R. Low frequency conducted emissions of grid connected static converters. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*; 2015;4(1):86-100.
2. Pous M, Silva F. Prediction of the impact of transient disturbances in real-time digital wireless communication system. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2014;3(3):76-82.
3. Keibel R, Stadler T, Rouquette J-A, Flourens F, Avenet A, Rouvrais N. Numeric Lightning Protection Prediction for Wires in an Aircraft Wing Raceway. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2016; 5(4):71-79.
4. Vogel MH. Impact of lightning and high-intensity radiated fields on cables in aircraft. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2014; 3(2):56- 61.
5. Grcev LD, Menter FE. Transient electromagnetic fields near large earthing systems. *IEEE Trans. on Magnetics*. 1996; 32(3):1525-1528.
6. Tanaka H, Baba Y, Barbosa CF. Effect of shield wires on the lightning-induced currents on buried cables. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016; 58(3):738-746.
7. Rachidi F, Janischewskyj W, Hussein AM, Nucci CA, Guerrieri S, Kordi B, Chang Jen-Shih. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*. 2001; 43(3):356-367.
8. Harmuth H. *Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communications*. Academic Press, New York; 1981.
9. Schantz HG. *The art and science of ultrawideband antennas*. Artech House, London; 2005.
10. Penkin YuM, Semenikhin VA, Yatsuk LP. Investigation of the internal and external characteristics of radiators such as a Clavin radiator. *Radio Eng.* 1987; 83:3-10. (in Russian)
11. Tijhuis AG, Zhongqiu P. Transient excitation of a strait thin-wire segment: a new look at an old Problem. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1992; 40(10):1132-1146.
12. Barnes MA. Ultra-wideband magnetic antenna. US patent 6,091,374, 2000 Jul. 18; 16 p.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-03>

УДК 537.86

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ПІДПОВЕРХНЕВОГО ОБ'ЄКТУ ШТУЧНИМИ НЕЙРОННИМИ МЕРЕЖАМИ ТА КОРРЕЛЯЦІЙНИМ МЕТОДОМ

О. М. Думін¹, О. А. Прищенко¹, В. А. Плахтій¹, Д. В. Широкоград², Г. П. Почанін³

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: dumin@karazin.ua

²Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна

E-mail: hoveringphoenix@gmail.com

³Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної академії наук України, .

вул. Акад. Проскури 12, м. Харків, 61085, Україна

E-mail: gpp@ire.kharkov.ua

Надійшла до редакції 9 жовтня 2020 р.

Актуальність. Задача пошуку підземних об'єктів має особливий інтерес для будівництва, археології та гуманітарного розмінування. Виявлення підземних мін за допомогою пристроїв дистанційного обстеження приходить на зміну традиційній процедурі знаходження вибухонебезпечних предметів, так як виключається знаходження людини у зоні можливого ураження при вибуху заряду.

Мета роботи. Метою роботи є покращення розпізнавання тривимірних об'єктів та демонстрація переваги використання більш інформативного набору даних, отриманого спеціальною антенною системою, що має чотири приймальні антени. Крім цього, необхідно порівняти ефективність розпізнавання штучним інтелектом та методом взаємної кореляції при роботі з підповерхневим радаром з урахуванням адитивних шумів різних рівнів, що присутні на практиці.

Матеріали та методи. Електродинамічна задача розв'язується методом скінчених різниць у часовому просторі (FDTD). Штучна нейронна мережа (ШНМ) тренується на ідеальних сигналах для виявлення особливостей поля, які вона буде знаходити у зашумлених даних та давати відповідь щодо положення об'єкту. Взаємна кореляція також передбачає використання масиву ідеальних сигналів, із якими будуть корелювати зашумлені реальні сигнали.

Результати. Встановлено оптимальну та ефективну ШНМ для роботи із прийнятими сигналами. Була проведена її перевірка на завадостійкість. Задачу розпізнавання також було вирішено класичним методом взаємної кореляції, а також досліджено вплив шумів різних рівнів на його розв'язок. Крім цього, проведено порівняння ефективності розпізнавання їх використанням 1 та 4 датчиків.

Висновки. Для задач підповерхневого зондування слід використовувати глибокі нейронні мережі, як мінімум із трьома прихованими шарами нейронів. Це обумовлено складністю та багатовимірністю процесів, що проходять в обстежуваному просторі. Встановлено, що методи штучного інтелекту та взаємної кореляції добре проводять розпізнавання об'єкта, і серед них важко виділити найкращий. Обидва підходи показують гарну завадостійкість. Використання більшого набору даних із чотирьох датчиків позитивно позначається на результатах обстеження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: штучна нейронна мережа; імпульсна електромагнітна хвиля; підповерхневий радар; взаємна кореляція; класифікація об'єктів.

COMPARISON OF SUBSURFACE OBJECT RECOGNITION BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND CORRELATION METHOD

O. M. Dumin¹, O. A. Pryshchenko¹, V. A. Plakhtii¹, D. V. Shyrokorad², G. P. Pochanin³

¹ V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

² Zaporizhia National Technical University, 64, Zhukovs'koho St, Zaporizhzhia, 69061, Ukraine

³ O.Ya.Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Ac. Proskura st., Kharkiv, 61085, Ukraine

Background: The problem of searching for subsurface objects has a particular interest for construction, archeology and humanitarian demining. Detection of underground mines with the help of remote sensing devices replaces the traditional procedure of finding explosive objects, as it excludes the presence of a human in the area of possible damage during a charge explosion.

Objectives: The aim of the work is to improve the recognition of three-dimensional objects and demonstrate the benefits of using a more informative data set obtained by a special antenna system with four receiving antennas. In addition, it is necessary to compare the effectiveness of artificial intelligence and the method of cross-correlation for recognition by subsurface radar, taking into account the additive noise of different levels present in practice.

Materials and methods: The electrodynamic problem was solved by the finite difference time domain (FDTD) method. An artificial neural network (ANN) is trained on ideal signals to detect the features of the field that will be found in noisy data to determine the position of the object. Cross-correlation also involves the use of an array of ideal signals, which will be correlated with noisy real signals.

Results: The optimal and effective ANN structure for work with the received signals is created. It was tested for noise immunity. The recognition problem was also solved by the classical method of cross-correlation, and the influence of noise of different levels on its responses was studied. In addition, a comparison of the efficiency of their recognition using 1 and 4 sensors was made.

Conclusions: For subsurface survey problems, a deep neural networks with at least three hidden layers of neurons should be used. This is due to the complexity and multidimensionality of the processes taking place in the surveyed space. It has been shown that artificial intelligence and cross-correlation techniques perform the object recognition well, and it is difficult to identify the best among them. Both approaches showed good noise immunity. The use of a larger data set of four receivers has a positive effect on the recognition results.

KEY WORDS: artificial neural network; impulse electromagnetic wave; subsurface radar; cross-correlation; object classification.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ОБЪЕКТА ИСКУССТВЕННЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ И КОРРЕЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А. Н. Думин¹, А. А. Прищенко¹, В. А. Плахтий¹, Д. В. Широкоград², Г. П. Почанин³

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

²Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина

³Институт радиофизики и электроники им. О.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, ул. Акад. Проскуры 12, г. Харьков, 61085, Украина

Актуальность. Задача поиска подземных объектов имеет особый интерес для строительства, археологии и гуманитарного разминирования. Обнаружение подземных мин с помощью устройств дистанционного зондирования приходит на смену традиционной процедуре нахождения взрывоопасных предметов, так как исключается нахождение человека в зоне возможного поражения при взрыве заряда.

Цель работы. Целью работы является улучшение распознавания трехмерных объектов и демонстрация преимущества использования более информативного набора данных, полученного специальной антенной системой, имеющей четыре приемные антенны. Кроме этого, необходимо сравнить эффективность искусственного интеллекта и метода взаимной корреляции при работе с подповерхностным радаром с учетом аддитивных шумов различных уровней, присутствующих на практике.

Материалы и методы. Электродинамическая задача решается методом конечных разностей во временной области (FDTD). Искусственная нейронная сеть (ИНС) тренируется на идеальных сигналах для выявления особенностей поля, которые она будет находить в зашумленных данных и давать ответ относительно положения объекта. Взаимная корреляция также предусматривает использование массива идеальных сигналов, с которыми будут коррелировать зашумленные реальные сигналы.

Результаты. Установлена оптимальная и эффективная ИНС для работы с принятыми сигналами. Была проведена ее проверка на помехоустойчивость. Задача распознавания также была решена классическим методом взаимной корреляции, а также исследовано влияние шумов различных уровней на его решение. Кроме этого, проведено сравнение эффективности их распознавания с использованием 1 и 4 датчиков.

Выводы. Для задач подповерхностного зондирования следует использовать глубокие нейронные сети, как минимум с тремя скрытыми слоями нейронов. Это обусловлено сложностью и многомерностью процессов, проходящих в обследуемом пространстве. Установлено, что методы искусственного интеллекта и взаимной корреляции хорошо проводят распознавание объекта, и среди них трудно выделить лучший. Оба подхода показывают хорошую помехоустойчивость. Использование большего набора данных от четырех датчиков положительно сказывается на результатах обследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственная нейронная сеть, импульсная электромагнитная волна, подповерхностный радар, взаимная корреляция, классификация объектов.

ВСТУП

Перспективним підходом до отримання інформації про підземні об'єкти є опромінення поверхні землі надширококутовими імпульсними електромагнітними хвилями за допомогою підповерхневого радару [0]. Він має гарну завадостійкість, точність, чутливість та здатність до ідентифікації об'єкта [2]. Даний підхід може застосовуватись для задачі виявлення підземних мин. Його перевага полягає в тому, що протипіхотні міни нових поколінь містять менше металевих деталей, ніж попередні. Тому застосування традиційних способів їх ідентифікації на основі змін магнітного поля поблизу міни є складним, і для вирішення таких задач пропонується задіяти підповерхневий радар [3]. Особливістю цього радару є надширококутовий (НШС) спектр використуваного поля, що забезпечує його краще проникнення в середовище із втратами завдяки низькочастотній частини спектру [4]. Вищезазначені

властивості такого поля визначають його застосування [5]. Використання імпульсів наносекундної тривалості дозволяє проникнути на глибини до декількох метрів, аналізувати стан дорожнього покриття [6], виявляти повільні рухомі об'єкти, включаючи людей, прихованих за стінами [7]. Також сучасні тенденції розвитку систем розмінування спрямовані на автоматизацію цього процесу, виключаючи людей для їх власної безпеки [Ошибка! Источник ссылки не найден.], на використання штучного інтелекту, нейронних мереж [Ошибка! Источник ссылки не найден.] для поліпшення характеристик таких систем.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) були винайдені для вирішення складних багатовимірних задач, де відсутні прості залежності між вхідним та вихідним сигналом [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Прикладом таких задач є аналіз відбитих полів від об'єктів, які за розмірами близькі до просторової тривалості опромінювального імпульсу [11]. Штучний інтелект успішно застосовується для визначення товщини повітряного шару [12] або товщини шару біологічної тканини [13]. Використання ШНМ є дуже привабливими для вирішення складної задачі виявлення мін.

Поєднання імпульсних хвиль та підходу штучного інтелекту приводить до підвищення загальної чутливості систем підповерхневого зондування [14]. Крім цього, одночасне застосування методу взаємної кореляції та ШНМ було представлено в [15] для підходу у частотній області. Взаємна кореляція є класичним методом обробки сигналів для задач такого роду, що вмотивовано зазнав широкого застосування, і в даній роботі проведено його порівняння із підходом ШНМ, наводиться детальний аналіз переваг, недоліків та особливостей цих двох методів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглядається імпульсне опромінення земної поверхні, подібно до описаного в [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Моделлю ґрунту для числового моделювання є діелектрик з діелектричною проникністю $\varepsilon = 9$ та провідністю $\sigma = 0,005$ См/м, який опромінюється з верхньої половини простору, що складається з повітря. Прихованим об'єктом у ґрунті виступає ідеально провідний металевий циліндр радіусу 5,5 см та висоти 5,3 см як модель міни.

Відбиту хвилю приймають чотири антени з орієнтацією поляризації та координатами, як описано в [17]. Очікується, що збільшення кількості приймачів дозволяє збирати більше інформації про розсіяне поле різної поляризації для подальшої інтелектуальної обробки [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Електродинамічна задача розв'язується числовим методом скінчених різниць у часовій області (FDTD), що дає повну картину поля досліджуваної області.

Метою тренування ШНМ є визначення наявності об'єкта та відстані між ним і антенною системою на основі обробки прийнятих сигналів. Крім цього, для наближення задачі до умов реального дослідження, до прийнятих сигналів буде додаватись білий шум різних рівнів. У наших попередніх дослідженнях [Ошибка! Источник ссылки не найден.] було продемонстровано, що просте знешумлення вхідних сигналів не може помітно покращити якість класифікації ШНМ. Ми очікуємо, що штучний інтелект покаже хорошу стійкість до шуму завдяки своїй апроксимуючій властивості [14].

Крім цього, обробка часових залежностей буде проводитись методом взаємної кореляції, і у даній роботі буде проведено порівняння цих результатів із ШНМ.

ПІДБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ШНМ

Чотири часові залежності, що отримані приймальними антенами, проходять дискретизацію за часом із кроком 0,01 нс та утворюють набір вхідних даних для ШНМ. Метою навчання ШНМ є отримання сигналу рівня одиниці на виході, що відповідає номеру дискретизованої відстані до об'єкта. Виходи з номерами від 1 до 41 показують, що циліндр розташований на відстані від 0 до 40 см від центру приймальної антенної системи. ШНМ буде тестуватись на наборі вхідних даних, розрахованих для випадків зміщення об'єкта на 4 мм вздовж поздовжньої осі та, окремо, у поперечній площині для постійної глибини. Також 42-й вихід ШНМ вказує на наявність об'єкта перед антенною системою на відстані від 0 до 40 см. Рівень одиниці відображає присутність циліндра в області, тоді як нульовий рівень демонструє його відсутність.

Що стосується ШНМ, то в ній застосована функція Softmax в останньому шарі, яка збільшує контраст вихідних сигналів за допомогою спеціальної нормуючої процедури. Для запобігання явища перенавчання застосовувався метод Dropout, що полягає у вилученні деяких нейронів з мережі перед її навчанням. У якості функції активації використано функцію ReLU, що має нульову передатну характеристику для від'ємного аргументу, і лінійну – для додатного. Через те, що вона схожа на вольтамперну характеристику напівпровідникового діода, її називають випрямлячем. Ця функція присутня на виходах кожного шару нейронної мережі, окрім останнього, де працює Softmax.

Сигнали вихідного шару ШНМ структури 2000-100-42 представлені на Рис. 1 для випадку поздовжнього та поперечного зсуву досліджуваного об'єкта на 4 мм від стандартних. Можна побачити

реальне положення циліндра на осі абсцис, тоді як рівні вихідних сигналів ШНМ зображені на осі ординат. Позиції об'єкта класифікуються правильно з однією невеликою помилкою, яка не виходить за допустиму зону. Але більш віддалене положення об'єкта, що перевищує 40 см, помилково визнається найближчим, або не класифікується зовсім (53 см і більше).

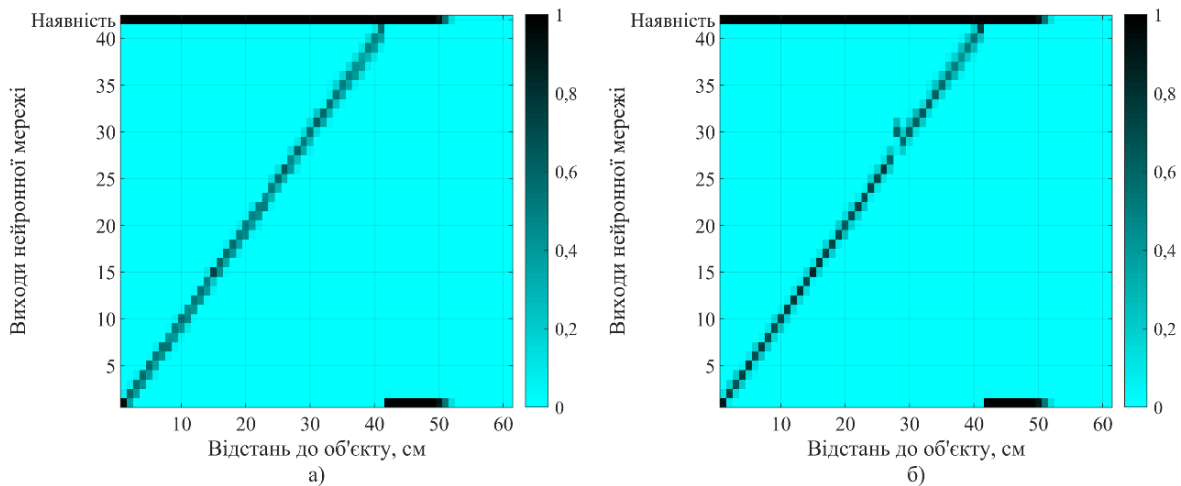


Рис 1. Вихідні сигнали ШНМ структури 2000-100-42 для різних відстаней до циліндру для а) поздовжнього та б) поперечного зсуву на 4 мм.

Була запропонована гіпотеза, що використання більш глибокої нейронної мережі дозволить поліпшити результати розпізнавання. Очікування виправдались частково, як видно з Рис. 2 для ШНМ структури 2000-1000-200-100-42 з трьома прихованими шарами. Можна помітити, що положення об'єкта на відстані більше 40 см не проявляються як найближчі, а відображаються як набір випадкових відповідей.

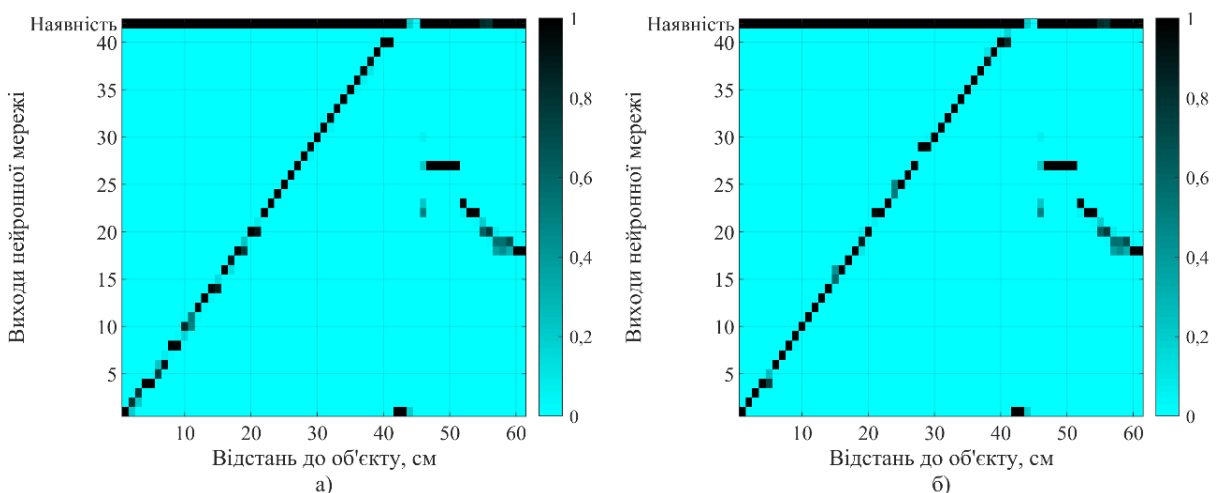


Рис. 2. Вихідні сигнали ШНМ структури 2000-1000-200-100-42 для різних відстаней до циліндру для: а) поздовжнього та б) поперечного зсуву на 4 мм.

Також цікаво перевірити проміжний варіант структури, між двома останніми ШНМ. Це допоможе виявити тенденцію відповідей та проаналізувати наближення розв'язку ШНМ до істинного. Тому результати тестування нової структури 2000-100-50-42 з двома прихованими шарами показані на Рис. 3.

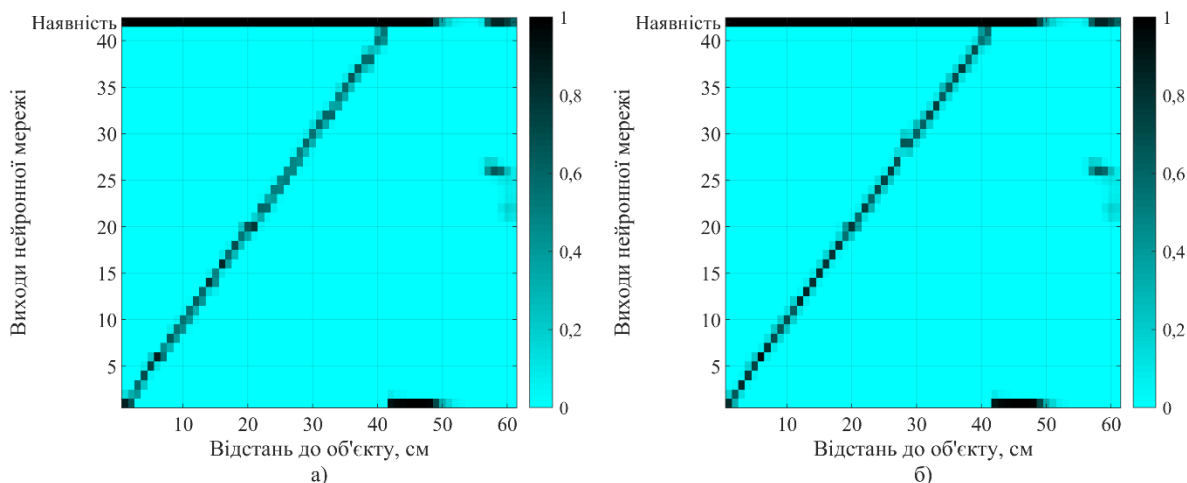


Рис. 3. Вихідні сигнали ШНМ структури 2000-100-50-42 для різних відстаней до циліндру для: а) поздовжнього та б) поперечного зсуву на 4 мм.

Крім цього, слід перевірити нейронну мережу на недонавчання, яке може спровокувати технологія Dropout. Важливо відслідкувати його вплив на результат при ускладненні структури ШНМ. Тому результати тренування першої та більш складної мережі із дома прихованими шарами без Dropout показані на Рис. 5 та Рис. 4 відповідно.

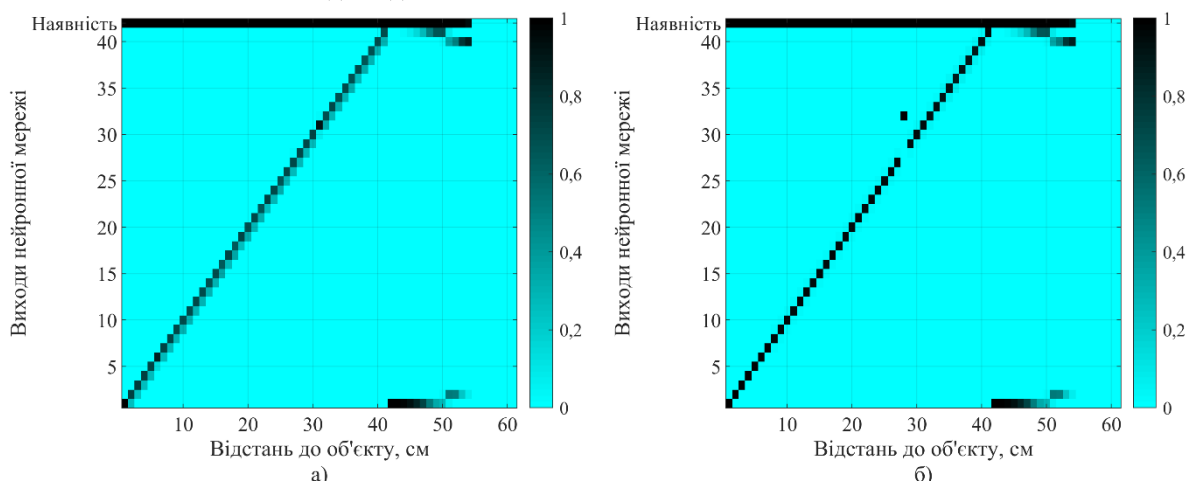


Рис. 4. Вихідні сигнали ШНМ структури 2000-100-50-42, що навчалась без застосування методу “Dropout” для різних відстаней до циліндру для: а) поздовжнього та б) поперечного зсуву на 4 мм.

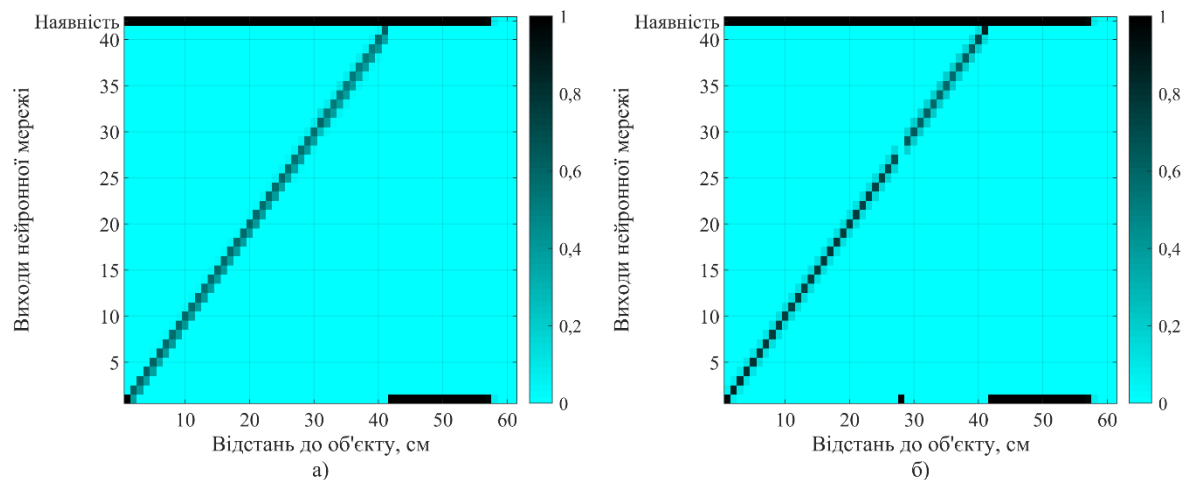


Рис. 5. Вихідні сигнали ШНМ структури 2000-100-42, що навчалась без застосування методу “Dropout” для різних відстаней до циліндру для: а) поздовжнього та б) поперечного зсуву на 4 мм.

Можна бачити, що поведінка ШНМ із двома прихованими шарами на тренуваних дистанціях (0-40 см) майже аналогічна простій ШНМ (див. Рис. 1 та Рис. 3), включаючи незручну точку для поперечного зсуву (30 см). Тренування мережі 2000-100-50-42 без Dropout (Рис. 4) призводить до більш сильного відхилення «проблемної» точки та гіршої апроксимації зсуву об'єкту на 4 мм на всіх дистанціях, ніж це зображено на Рис. 3. Також дослідження впливу методу Dropout для простої ШНМ показало те, що сигнал про наявність циліндра є неправильним для відстаней 42-57 см (див. Рис. 5), тоді як на Рис. 1 вони неправильні для відстаней 42-50 см. Крім того, реакція на «проблемну» точку 30 см на Рис. 5б є абсолютно неправильною, оскільки вихідний результат 0 см має максимальне значення, в той час як на Рис. 1 дана точка відхиляється на допустимі значення. Отже, слід зробити висновок, що використання Dropout не тільки не призводить до недонавчання, а й приносить переваги у роботі ШНМ.

Для запобігання помилковій реакції ШНМ для випадку розташування циліндра на відстані більше 40 см, глибока ШНМ конструкції 2000-1000-200-100-43 з трьома прихованими шарами та гіперболічним тангенсом у якості функції активації навчалась на кілька відстаней більше 40 см. Також було вирішено прибрати шар SoftMax для підвищення контрастності відповідей. Крім того, був внесений ще один вихід № 43 «Відсутність», який подає сигнал про наявність об'єкта на великих відстанях за межами 40 см. Результати роботи ШНМ наведені на Рис. 6. Хоча тренування на великі відстані проводилося лише для 5 точок, положення об'єкта визначені чудово, за винятком "проблемної" точки 30 см для поперечного зсуву (див. Рис. 6б), де помилка не є суттєвою.

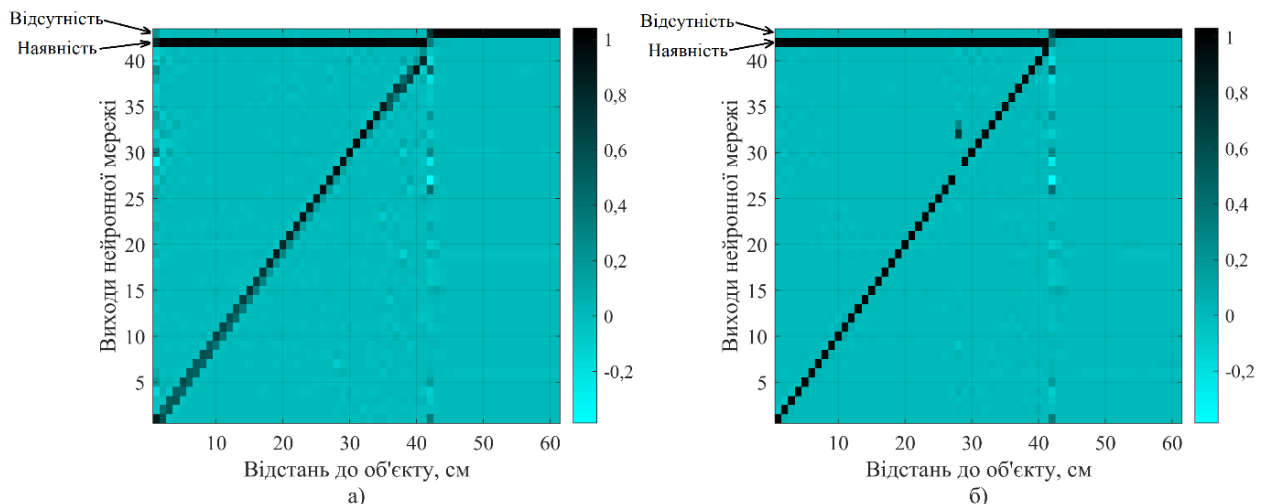


Рис 6. Вихідні сигнали ШНМ структури 2000-1000-200-100-43, що навчалась без шару SoftMax для різних відстаней до циліндру для: а) поздовжнього та б) поперечного зсуву на 4 мм.

Отже тепер, коли ми виявили найуспішнішу структуру для даної задачі, можемо перейти до порівняння результату розпізнавання із методом взаємної кореляції.

МЕТОД ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ТА ЙОГО ПОРІВНЯННЯ ІЗ ШНМ

Перш за все слід проілюструвати спотворення прийнятих сигналів за рахунок збільшення співвідношення сигнал-шум. Приклади вхідних залежностей амплітуди електромагнітної хвилі від часу для співвідношень сигнал-шум (SNR) 23,5 дБ, 11,6 дБ, 3,9 дБ, -6 дБ представлені на Рис. 7. Ці значення задовольняють типовий діапазон потужностей шуму, що зустрічається на практиці.

Далі, щоб проілюструвати вплив різних значень співвідношення сигнал-шум на визначення місцезнаходження моделі міни, побудуємо розподіли відповідей ШНМ для фіксованого місця розташування об'єкта (див. Рис. 8), де червона лінія вказує на правильне розміщення об'єкта. Також слід зауважити, що кожна реалізація моделі білого шуму може дати різний результат класифікації. Отже, кожне розпізнавання для постійного значення сигнал-шум повторюється 500 разів, і ми будемо розподіл результатів класифікації для статистичної оцінки впливу шуму. Із Рис. 8 видно, що, як і очікувалося, збільшення співвідношення сигнал-шум призводить до монотонного зростання дисперсії розподілу відповідей щодо положення об'єкту.

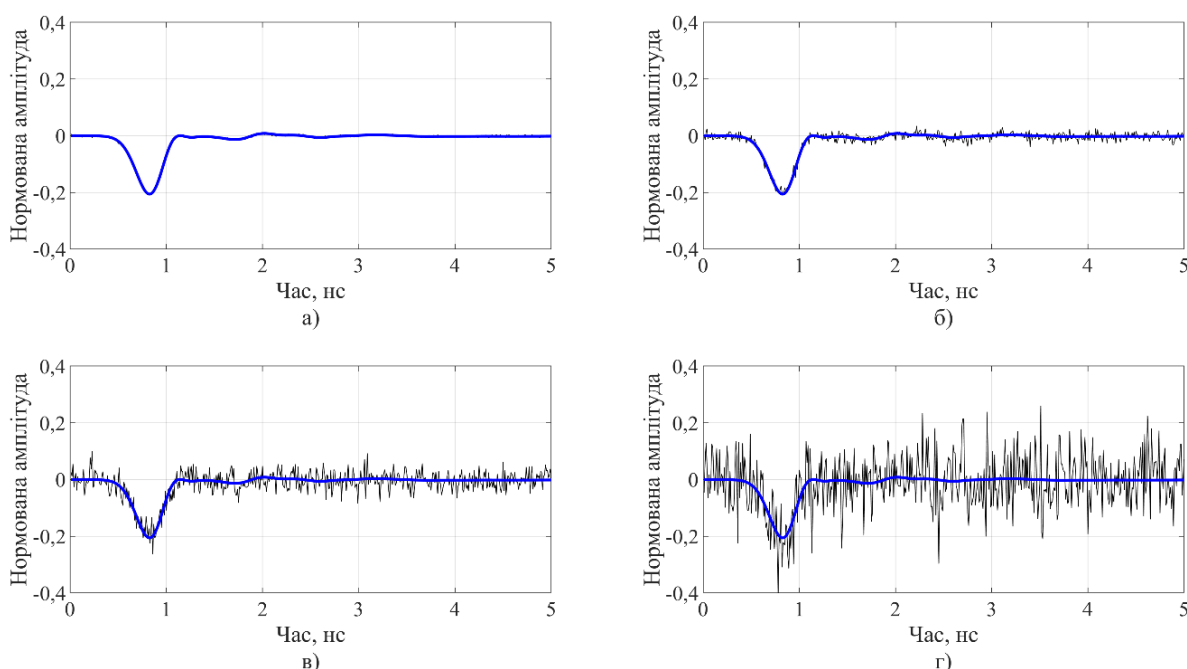


Рис. 7. Приклади вхідних сигналів для різних рівнів сигнал-шум: а) 23.5 дБ, б) 11.6 дБ, в) 3.9 дБ, г) -6 дБ.

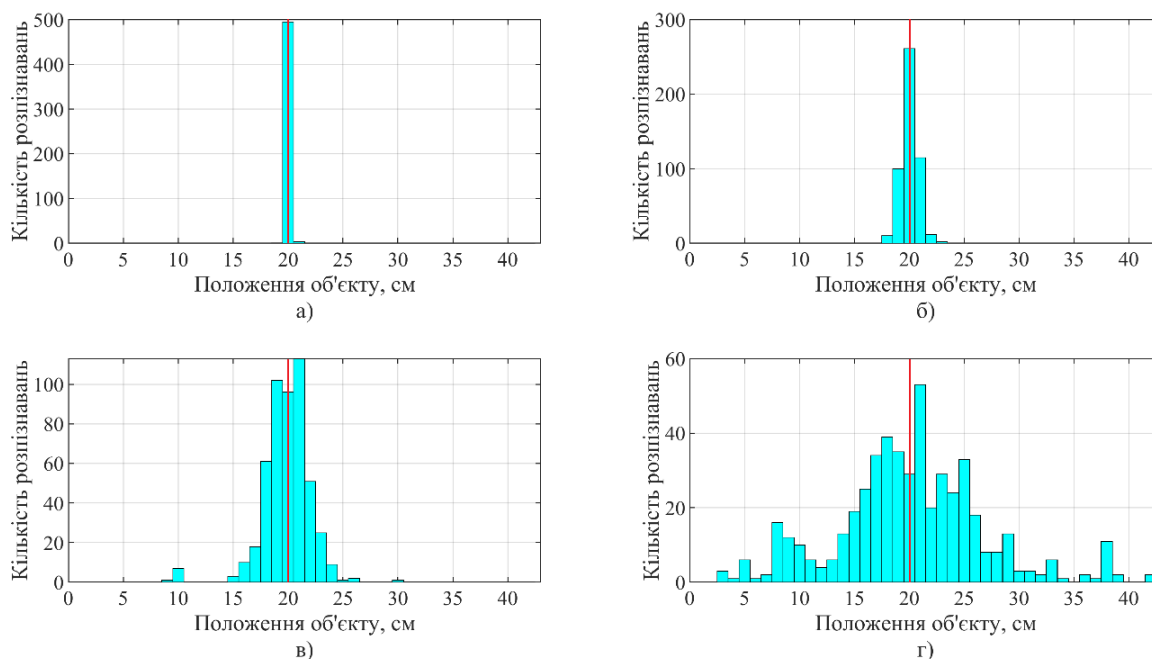


Рис. 8. Розподіли результату розпізнавання положення об'єкта ШНМ для різних рівнів сигнал-шум: а) 23.5 дБ, б) 11.6 дБ, в) 3.9 дБ, г) -6 дБ та постійного положення об'єкта 20 см.

Стабільність класифікації ШНМ може залежати від положення об'єкта. Це пов'язано з багатовимірною апроксимуючою властивістю ШНМ [14]. Для її перевірки на Рис. 9 побудовані розподіли для різних розташувань об'єктів за постійного рівню сигнал-шум 3,9 дБ.

Порівнюючи Рис. 9 з Рис. 8в, можна зробити висновок, що найбільш точне розпізнавання відбувається при центральному положенні об'єкта. Незважаючи на те, що крайнє розташування об'єкта на 42 см (Рис. 9в) має найбільше число правильних відповідей, результат не кращий, ніж на 20 см, через різкий максимум на 9 см.

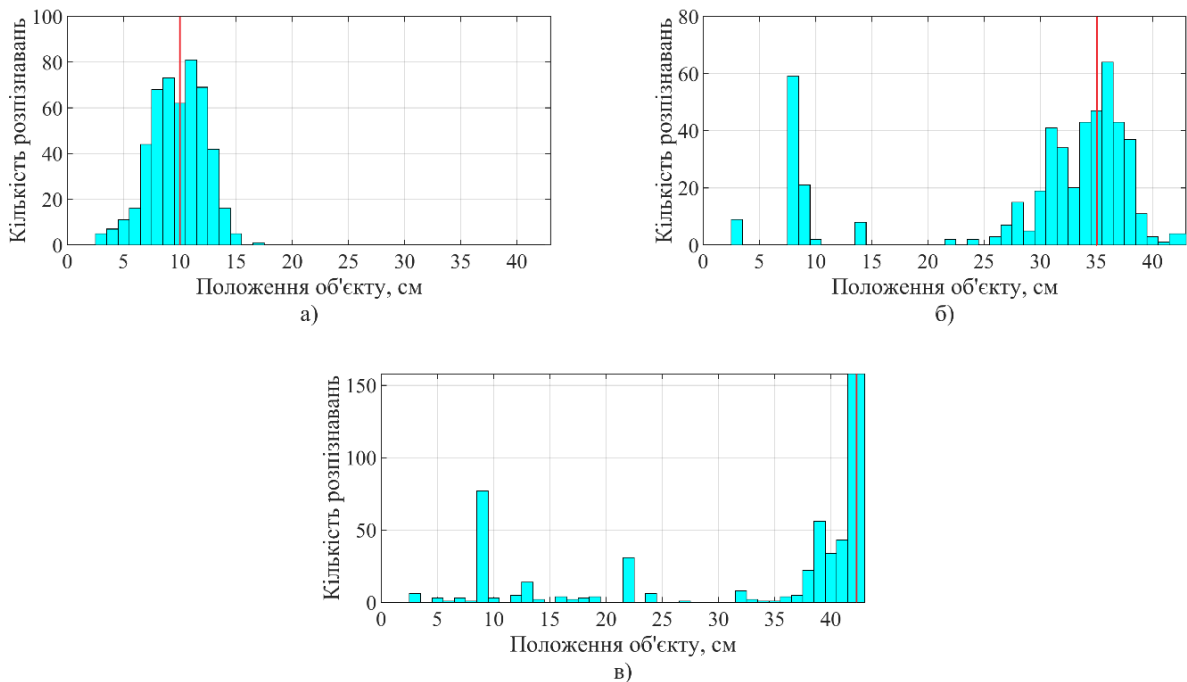


Рис. 9. Розподіли результату розпізнавання положення об'єкта ШНМ для різних відстаней від антени: а) 10 см, б) 35 см, в) 42 см та постійного рівня сигнал-шум 3.9 дБ.

Далі порівняємо результати класифікації, проведеної за допомогою ШНМ, із методом взаємної кореляції. Функція взаємної кореляції [19]

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)dt \quad (1)$$

дозволяє оцінити схожість ідеального зразка сигналу з реальним зашумленим імпульсом, де $f(t)$ – часова залежність досліджуваного сигналу, $g(t - \tau)$ часова форма зразкового сигналу із поступовим зміщенням від $f(t)$ із кроком τ .

Оскільки ми використовуємо дискретний вхідний сигнал, формулу (1) слід переписати з наступною нормалізацією:

$$B_k = \frac{\sum_{(n)} f_n g_{n-k}}{\sqrt{\sum_{(n)} (f_n)^2 \sum_{(n)} (g_n)^2}} \quad (2)$$

де k є цілим числом, яке позначає взаємне зміщення у часі між реальним прийнятим сигналом та ідеальним зразком. Зміщення допомагає нам подолати проблему невизначеності часу приходу хвилі під час підповерхневого обстеження землі.

Максимальне значення функцій взаємної кореляції вказує на найбільшу подібність між цими сигналами. Щоб проілюструвати це, на Рис. 10 представлено 41 функцію взаємної кореляції для 41 положення об'єкта.

З Рис. 10 видно, що основний максимум усіх функцій дуже близький до одиниці, що можна пояснити подібністю всіх відповідей для різних місцезнаходжень об'єкта. Це відбувається через те, що хвиля, яка відбивається від об'єкта, несе дуже малу частину імпульсної енергії в порівнянні з відбитою від поверхні землі. Вирішальна різниця між функціями взаємної кореляції показана у збільшеному вигляді на тому ж Рис. 10, і єдине найбільше значення лише однієї функції взаємної кореляції вказує на номер відповіді для відповідного розташування об'єкта.

Розподіл положень об'єктів за методом взаємної кореляції для різних значень сигнал-шум зображений на Рис. 11, де червона лінія вказує на справжнє розташування об'єкта.

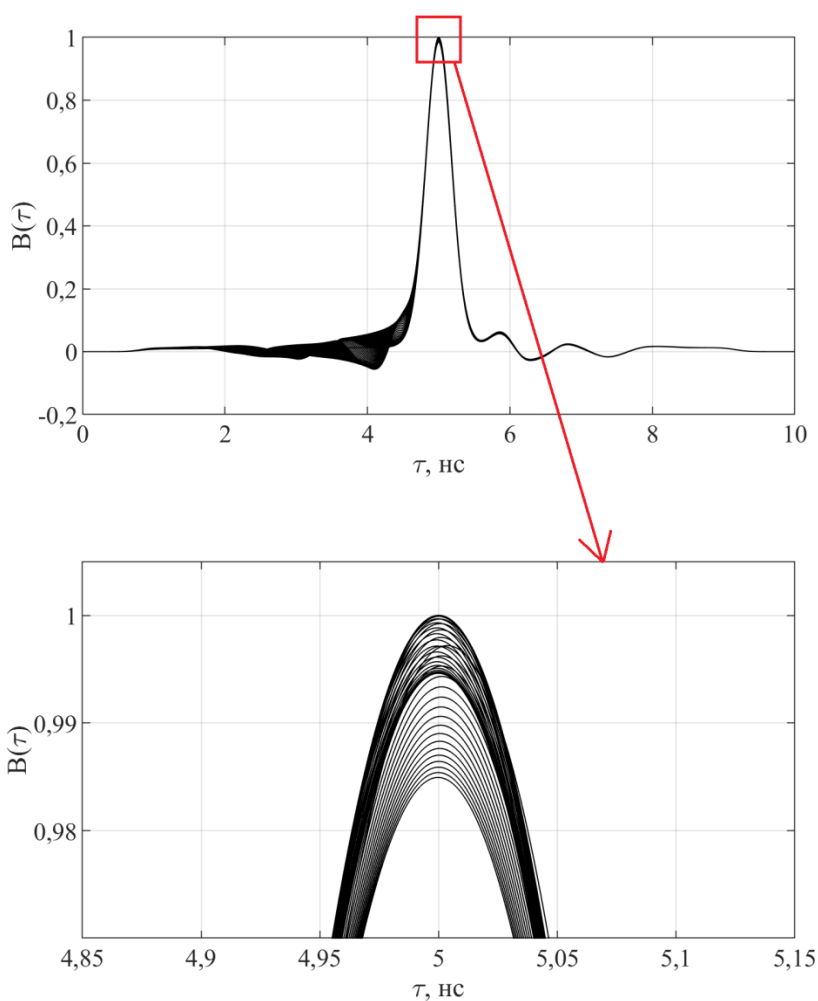


Рис. 10. Часові залежності функцій взаємної кореляції, що відповідають всім 41 можливим положенням об'єкта.

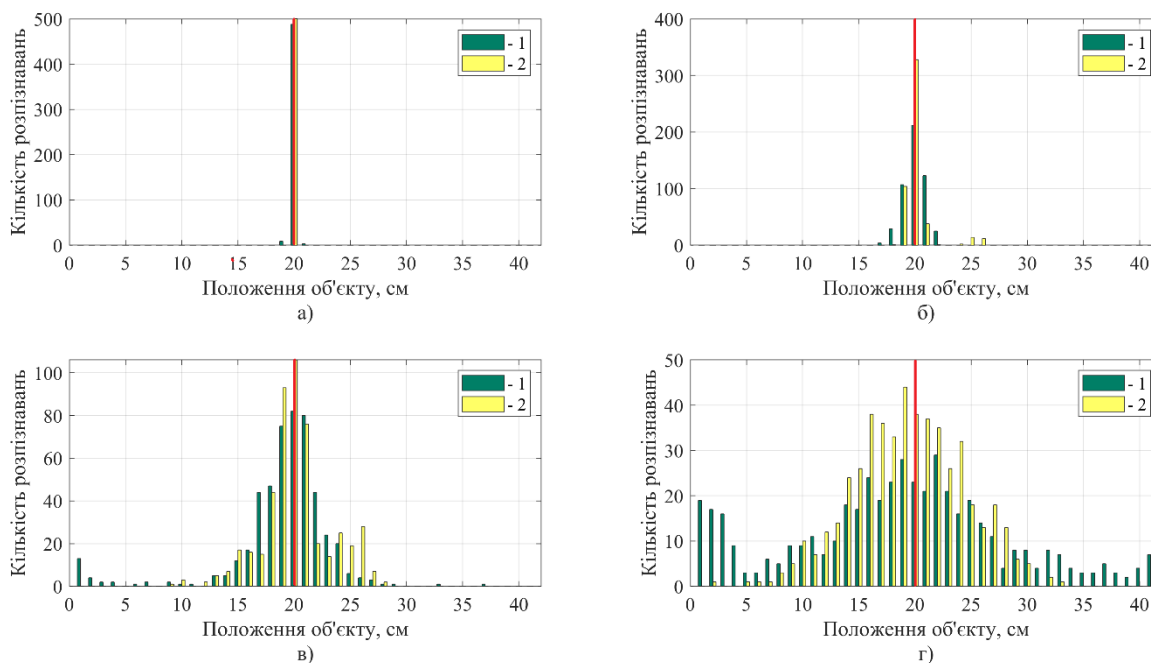


Рис. 11. Розподіли результату розпізнавання положення об'єкта ШНМ для різних рівнів сигнал-шум: а) 23.5 дБ, б) 11.6 дБ, в) 3.9 дБ, г) -6 дБ та постійного положення об'єкта 20 см, 1 – розпізнавання одним випромінювачем, 2 – розпізнавання чотирма випромінювачами.

Окрім розпізнавання за сигналами, отриманими від усіх чотирьох антен, на Рис. 11 представлена також класифікація на основі сигналу від однієї антени. Видно, що для високих значень сигнал-шум відстань точно визначається за допомогою сигналів чотирьох антен настільки ж успішно, як і однією антеною, проте з незначною кількістю помилок (Рис. 11а). Але для більш зашумленого сигналу кількість правильних розпізнавань однією антеною падає вдвічі, тоді як класифікація чотирьох антен демонструє зменшення ймовірності правильної відповіді лише на 30% (Рис. 11б), що краще, ніж результат ШНМ (Рис. 8б).

Подальше підвищення рівня сигнал-шум приводить до незначного поліпшення розпізнавання ШНМ у порівнянні з методом взаємної кореляції, але для класифікації чотирьох антен він має менш великі відхилення від правильних значень. Це означає, що чотири антени можуть збирати більшу кількість інформації про електромагнітне поле, яка отримується із значень напруженості електричного поля для різних поляризацій під різними кутами і положеннями. Як правило, аналіз однією антеною методом взаємної кореляції призводить до гіршого результату в порівнянні з чотирма антенами. Це продемонстровано на Рис. 12, де розподіли положень об'єкта для випадкових реалізацій адитивного білого шуму показані для постійного значення сигнал-шум 3,9 дБ та для різних позицій об'єкта.

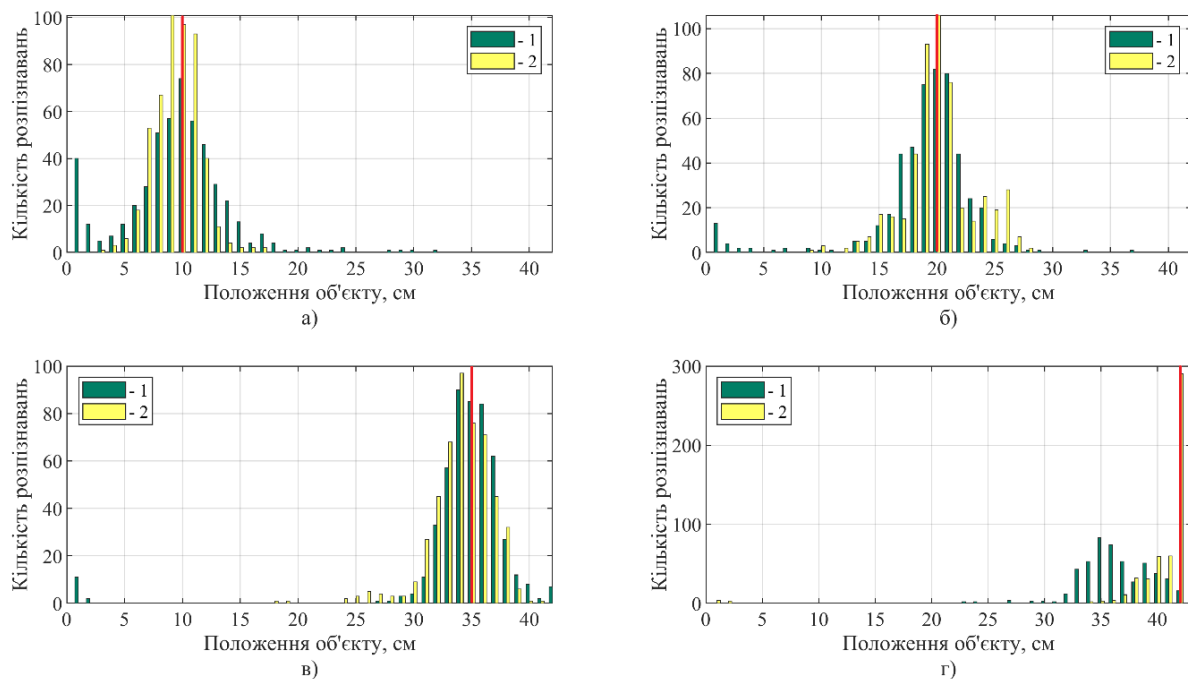


Рис. 12. Розподіли результату розпізнавання положення об'єкта ШНМ для різних позицій: а) 10 см, б) 20 см, в) 35 см, г) 42 см та постійного значення сигнал-шум 3,9дБ, 1 – розпізнавання одним випромінювачем, 2 – розпізнавання чотирма випромінювачами.

Система із чотирьох антен дає кращі результати класифікації методом взаємної кореляції, ніж вимірювання з однією антеною. Найпомітніша різниця між ними зображена на Рис. 12г для 42-го положення об'єкта. Цей пік помітно перевищує той самий результат розпізнавання ШНМ для тієї ж позиції (див. Рис. 9в). Ми можемо зробити висновок, що сигнали системи чотирьох антен забезпечують більш впевнений результат у вигляді концентрації своїх даних навколо правильної відповіді, тоді як одна антена часто демонструє великі відхилення значень і ширший розподіл даних навколо правильного положення об'єкта розпізнавання.

ВИСНОВКИ

Розпізнавання моделі міни, захованої в ґрунті, може бути ефективно здійснено за допомогою ШНМ різних структур. Застосування шару SoftMax робить відповіді ШНМ більш контрастними, але призводить до ледве помітних помилок. Застосування методу Dropout в цілому підвищило якість роботи ШНМ для цієї задачі. Екстраполяція для нетренованих випадків не підходить для всіх видів ШНМ. Найкращих результатів розпізнавання можна досягти за допомогою глибокої ШНМ з нелінійною функцією збудження та без шару SoftMax.

Порівняння методів ШНМ та взаємної кореляції за наявності білого шуму різного рівня показує, що немає достовірних переваг у кінцевих результатах розпізнавання позицій об'єкта для обох підходів. Метод взаємної кореляції не потребує синхронізації часу між випромінювачем та приймачем, на відміну від ШНМ, але вимагає значного часу розрахунку. Існує можливість покращити якість класифікації розташування об'єкта, поєднавши ці два підходи.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

О. М. Dumin  <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>
V. A. Plakhtii  <http://orcid.org/0000-0002-0442-2716>
О. А. Prishchenko  <http://orcid.org/0000-0001-7143-9545>
D. V. Shyrokora  <http://orcid.org/0000-0002-2784-4081>
G. P. Pochanin  <https://orcid.org/0000-0002-1977-2217>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Taylor JD. Ultrawideband radar: applications and design. Boca Raton, CRC Press, New York, London; 2012.
2. Immoreev IJ. Main capabilities and features of ultra wideband (UWB) radars. Radio Physics and Radio Astronomy. 2002;7(4):339-344.
3. Daniels JD. Ground penetrating radar. 2nd ed. London: IEEE, 2004.
4. Harmuth H. Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communications. Academic Press, New York; 1981.
5. Pochanin G, Masalov S, Pochanina I, Capineri L, Falorni P, Bechtel T. Modern Trends in Development and Application of the UWB Radar Systems. In Proc. 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals; 5-11 September 2016; Odessa, Ukraine; p. 7-11.
6. Pochanin GP, Ruban VP, Kholod PV, Shuba OA, Pochanina IYe, Batrakova AG, Urdzik SN, Batrakov DO, Golovin, DV. Advances in ground penetrating radars for road surveying. In Proc. 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals; 15-19 September 2014; Kharkiv, Ukraine; p. 13-18.
7. Sytnik O, Masalov S, Kholod P, Pochanin G, Ruban V. UWB Technology for Detecting Alive People behind Optically Opaque Obstacles. In Proc. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2018); 4-7 September 2018; Odessa, Ukraine; p. 110-114.
8. Хайкин С, Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр. : Пер. с англ. – М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104с
9. Каллан Р, Основные концепции нейронных сетей, Пер. с англ. – М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2001.
10. Ширококор ДВ, Думин АН, Думина ОА, Катрич ВА Анализ импульсных полей, отраженных от слоистой среды с потерями, с помощью искусственной нейронной сети // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2009. – Вип. 15. – №883. – С.35–40.
11. Shyrokora DV, Dumin AN, Dumina OA, Katrich VA. Analysis of Pulsed Fields Reflected from a Layered Lossy Medium Using Artificial Neural Network. Telecommunications and radio engineering. 2011; 70(10):873–881.
12. Drobakhin O, Doronin A. Estimation of thickness of subsurface air layer by neuron network technology application to reflected microwave signal. In Proc. XII Int. Conf. on MMET; 2008; Odessa, Ukraine. p. 150-152.
13. Shyrokora D, Dumin O, Dumina O, Katrich V. Analysis of transient fields reflected from model of human body surface using convolutional neural network. In Proc. IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET); 2010; Kyiv, Ukraine.
14. Shyrokora D, Dumin O, Dumina O, Katrich V, Chebotarev V. Approximating properties of artificial neural network in time domain for the analysis of electromagnetic fields reflected from model of human body surface. In Proc. of International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2010); June 21–26 2010; Kharkov, Ukraine; G-8.
15. El-Bakry HM, Zhao Q. A modified frequency domain cross correlation implemented in MATLAB for fast sub-image detection using neural networks. In Proceedings 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks; 31 July-4 August 2005; Montreal, Que, Canada.
16. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Ширококор ДВ Розпізнавання об'єктів під поверхнею землі при надширококустовій радіоінтроскопії за допомогою штучних нейронних мереж. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2018;28:24-29.
17. Ogurtsova T, Ruban V, Pojedinchuk A, Pochanin O, Pochanin G, Capineri L, Falorni P, Borgioli G, Bechtel T, Crawford F. Criteria for Selecting Object Coordinates at Probing by the Impulse UWB GPR with

- the “1Tx + 4Rx” Antenna System. In Proc. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals; September 4–7, 2018; Odessa, Ukraine; p. 161-164.
18. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Ширококорд ДВ Метод дискретної томографії при обробці даних надширокосмугової підповерхневої радіолокації штучною нейронною мережею. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2018;29:17-26.
 19. Bracewell R. Pentagram Notation for Cross Correlation. The Fourier Transform and Its Applications, New York: McGraw-Hill, 1965. 46 p.

REFERENCES

1. Taylor JD. Ultrawideband radar: applications and design. Boca Raton, CRC Press, New York, London; 2012.
2. Immoreev IJ. Main capabilities and features of ultra wideband (UWB) radars. Radio Physics and Radio Astronomy. 2002;7(4):339-344.
3. Daniels JD. Ground penetrating radar. 2nd ed. London: IEEE, 2004.
4. Harmuth H. Nonsinusoidal Waves for Radar and Radio Communications. Academic Press, New York; 1981.
5. Pochanin G, Masalov S, Pochanina I, Capineri L, Falorni P, Bechtel T. Modern Trends in Development and Application of the UWB Radar Systems. In Proc. 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals; 5-11 September 2016; Odessa, Ukraine; p. 7-11.
6. Pochanin GP, Ruban VP, Kholod PV, Shuba OA, Pochanina IYe, Batrakova AG, Urdzik SN, Batrakov DO, Golovin, DV. Advances in ground penetrating radars for road surveying. In Proc. 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals; 15-19 September 2014; Kharkiv, Ukraine; p. 13-18.
7. Sytnik O, Masalov S, Kholod P, Pochanin G, Ruban V. UWB Technology for Detecting Alive People behind Optically Opaque Obstacles. In Proc. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2018); 4-7 September 2018; Odessa, Ukraine; p. 110-114.
8. Haykin S, Neural networks: complete course, 2nd ed., Rev. : Translate from English. - M.: LLC "I.D. Williams ", 2006. -1104s
9. Callan R, Basic concepts of neural networks, Per. from English. - M.: LLC "I.D. Williams ", 2001.
10. Shirokorad DV, Dumin AN, Dumina OA, Katrich VA Analysis of impulse fields reflected from a layered medium with losses using an artificial neural network. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2009; 15(883):35–40.
11. Shirokorad DV, Dumin AN, Dumina OA, Katrich VA. Analysis of Pulsed Fields Reflected from a Layered Lossy Medium Using Artificial Neural Network. Telecommunications and radio engineering. 2011; 70(10):873–881.
12. Drobakhin O, Doronin A. Estimation of thickness of subsurface air layer by neuron network technology application to reflected microwave signal. In Proc. XII Int. Conf. on MMET; 2008; Odessa, Ukraine. p. 150-152.
13. Shyrokorad D, Dumin O, Dumina O, Katrich V. Analysis of transient fields reflected from model of human body surface using convolutional neural network. In Proc. IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET); 2010; Kyiv, Ukraine.
14. Shyrokorad D, Dumin O, Dumina O, Katrich V, Chebotarev V. Approximating properties of artificial neural network in time domain for the analysis of electromagnetic fields reflected from model of human body surface. In Proc. of International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2010); June 21–26 2010; Kharkov, Ukraine; G-8.
15. El-Bakry HM, Zhao Q. A modified frequency domain cross correlation implemented in MATLAB for fast sub-image detection using neural networks. In Proceedings 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks; 31 July-4 August 2005; Montreal, Que, Canada.
16. Dumin OM, Plajtij VA, Prishhenko OA, Shirokorad DV. Determination of objects from the surface of the earth with over-wide-area radio-introsopy behind the addition of piece neuronal fences. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2018; 28:24-29.
17. Ogurtsova T, Ruban V, Pojedinchuk A, Pochanin O, Pochanin G, Capineri L, Falorni P, Borgioli G, Bechtel T, Crawford F. Criteria for Selecting Object Coordinates at Probing by the Impulse UWB GPR with the “1Tx + 4Rx” Antenna System. In Proc. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals; September 4–7, 2018; Odessa, Ukraine; p. 161-164.
18. Dumin OM, Plajtij VA, Prishhenko OA, Shirokorad DV. The method of discrete tomography in the process of sampling of the data of the over-wide-area under-superficial radio-locating with a piece of neural mesh. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2018;29:17-26.
19. Bracewell R. Pentagram Notation for Cross Correlation. The Fourier Transform and Its Applications, New York: McGraw-Hill, 1965. 46 p.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-04>

УДК 550.34:550.510.533

ПРОЯВ ГЛОБАЛЬНОЇ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ В АТМОСФЕРІ ТА ІОНОСФЕРІ

І. Г. Захаров, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: giz-zig@ukr.net

Надійшла до редакції 1 жовтня 2020 р.

Актуальність. В останні десятиліття сформувалися уявлення про землетруси (ЗТ) як про фінальну стадію загальнопланетарного безперервного самоорганізованого процесу з періодами накопичення і релаксації тектонічних напруг. Однак, в науковій літературі, як і раніше, представлені дослідження відгуку атмосферних та іоносферних процесів на окремі сильні ЗТ. У цій роботі вперше розглянуто взаємозв'язок процесів у літосфері, тропосфері та іоносфері з урахуванням нових уявлень про сейсмічний процес на тлі процесів, зумовлених космічною погодою, що є новим кроком у вивченні середовища проживання людини.

Мета роботи – пошук взаємозв'язків у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера у планетарному масштабі при зміні глобальної сейсмічної активності (ГСА).

Матеріали та методи. Дослідження проведені з використанням чотирьох баз щоденних даних за 2007 – 2015 рр. про космічну погоду і магнітосферу (індекси сонячної і геомагнітної активності), іоносферу (критична частота області F2 у західному і східному півкулях – f_oF2 ; глобальний повний електронний вміст іоносфери – ПЕВ), приземну атмосферу (атмосферний тиск) та літосферу (максимальна за добу амплітуда ЗТ). Використано метод накладених епох та інші статистичні методи аналізу.

Результати. Встановлено квазісинхронні зміни магнітосферних, іоносферних й тропосферних характеристик у періоди різкого посилення ГСА. Часто вони мають циклічний пилкоподібний характер від одного сейсмічно активного періоду до іншого, що вказує на можливість безперервної взаємодії геосфер, а не тільки у періоди збурень. Зокрема, встановлено зростання f_oF2 при різкому посиленні ГСА на величину до 0.5 МГц майже одночасно у східній і західній півкулях.

Висновки. Отримані результати свідчать про можливість тривалої або безперервної взаємодії літосфери з розташованими вище геосферами. Одним із джерел синхронізації можуть виступати зміни космічної погоди. Як можливий механізм появи глобальних ефектів в атмосфері та іоносфері при зміні ГСА запропоновано розглядати роль виходу на поверхню глибинних газів. Цей процес є глобальним і пов'язаний одночасно як з сейсмічністю, так і з параметрами обертання Землі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: літосферно-атмосферно-іоносферна взаємодія, іоносферні та атмосферні збурення.

MANIFESTATION OF GLOBAL SEISMIC ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

I. G. Zakharov, L. F. Chernogor

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. In recent decades, the concept of earthquakes (EQ) has been formed as the final stage of a planetary continuous self-organizing process with periods of accumulation and relaxation of tectonic stresses. However, in the scientific literature, as before, studies of the response of atmospheric and ionospheric processes to individual strong EQs are presented. In this work, the coupling of processes in the lithosphere, troposphere and ionosphere is considered for the first time, taking into account new ideas about the seismic process against the background of processes caused by space weather, which is a new step in the study of the human environment.

Objectives of the work is to find relationships in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system on a planetary scale with a change in global seismic activity (GSA).

Materials and methods. The studies were carried out using four daily databases for 2007–2015 on space weather and the magnetosphere (solar and geomagnetic activity indices), the ionosphere (f_oF2 is the critical frequency of the F2 region in the western and eastern hemispheres; TEC is the global ionospheric total electron content), the surface atmosphere (atmospheric pressure) and the lithosphere (maximum EQ amplitude per day). The method of superimposed epochs and other statistical methods of analysis were used.

Results. Quasi-synchronous changes in magnetospheric, ionospheric, and tropospheric characteristics have been established during periods of a sharp increase in GSA. They often have a cyclical sawtooth character from one seismically active period to another, which indicates the possibility of continuous interaction of geospheres, and not only during periods of disturbances. In particular, an increase in f_oF2 with a sharp increase in GSA by up to 0.5 MHz was found almost simultaneously in the eastern and western hemispheres.

Conclusions. The results obtained indicate the possibility of long-term or continuous interaction of the lithosphere with the geospheres located above. Space weather changes can be one of the sources of synchronization. As a possible mechanism for the appearance of global effects in the atmosphere and ionosphere when the GSA changes, it

is proposed to consider the role of the release of deep gases to the surface. This process is global and is associated simultaneously with both seismicity and the parameters of the Earth's rotation.

KEY WORDS: lithospheric-atmospheric-ionospheric interaction, ionospheric and atmospheric disturbances.

ПРОЯВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

И. Г. Захаров, Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. В последние десятилетия сформировались представления о землетрясениях (ЗТ) как о финальной стадии общепланетарного непрерывного самоорганизующегося процесса с периодами накопления и релаксации тектонических напряжений. Однако, в научной литературе, по-прежнему, представлены исследования отклика атмосферных и ионосферных процессов на отдельные сильные ЗТ. В данной работе впервые рассмотрена взаимосвязь процессов в литосфере, тропосфере и ионосфере с учетом новых представлений о сейсмическом процессе на фоне процессов, обусловленных космической погодой, что является новым шагом в изучении среды обитания человека.

Цель работы – поиск взаимосвязей в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера в планетарном масштабе при изменении глобальной сейсмической активности (ГСА).

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием четырех баз ежедневных данных за 2007–2015 гг. о космической погоде и магнитосфере (индексы солнечной и геомагнитной активности), ионосфере (критическая частота области F2 в западном и восточном полушариях – f_oF2 ; глобальное полное электронное содержание – ПЭС), приземной атмосфере (атмосферное давление) и литосфере (максимальная за сутки амплитуда ЗТ). Использованы метод наложенных эпох и другие статистические методы анализа.

Результаты. Установлены квазисинхронные изменения магнитосферных, ионосферных и тропосферных характеристик в периоды резкого усиления ГСА. Часто они имеют циклический пилообразный характер от одного сейсмически активного периода до другого, что указывает на возможность непрерывного взаимодействия геосфер, а не только в периоды возмущений. В частности, установлено возрастание f_oF2 при резком усилении ГСА на величину до 0.5 МГц почти одновременно в восточном и западном полушариях.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности длительного или непрерывного взаимодействия литосферы с расположенными выше геосферами. Одним из источников синхронизации могут выступать изменения космической погоды. В качестве возможного механизма появления глобальных эффектов в атмосфере и ионосфере при изменении ГСА предложено рассмотреть роль выхода на поверхность глубинных газов. Этот процесс является глобальным и связан одновременно как с сейсмичностью, так и с параметрами вращения Земли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: литосферно-атмосферно-ионосферное взаимодействие, ионосферные и атмосферные возмущения.

ВСТУП

В останні десятиліття виконано велику кількість досліджень впливу землетрусів (ЗТ) та їх провідників на атмосферу та іоносферу (див., наприклад, [1-4]). Розглядають такі основні механізми передачі збурення на іоносферні висоти: збудження й поширення акустико-гравітаційних хвиль від епіцентру ЗТ; модифікація електричних полів і струмів, викликаних електричними процесами в літосфері або в приземній атмосфері. Для досліджень широко використовують навігаційні супутники, що дозволяють контролювати великомасштабні іоносферні процеси (див., наприклад, [3]).

Основна особливість цих досліджень полягає в тому, що автори розглядають відгук атмосфери та іоносфери на окремі сильні ЗТ. У той же час, вже досить давно сформувалися уявлення про ЗТ як про прояв глобального безперервного самоорганізованого процесу з періодами накопичення і релаксації тектонічних напруг [5-7]. Найбільш важливими видаються такі властивості глобальної сейсмічної активності (ГСА) [7]: 1) найбільш сильні ЗТ мають тенденцію групуватися в епохи, протягом яких вони спостерігаються на всій земній кулі; 2) групування ЗТ за величиною їх сейсмічної енергії, що може бути наслідком ієрархічно упорядкованого блокового характеру геофізичного середовища [8]; 3) глобальність сейсмічності тісно пов'язана з глобальним характером процесів у мантиї; 4) вплив на ЗТ процесів в атмосфері, варіацій обертання планети, факторів космічної погоди, місячних припливів.

Очевидно, що глобальний характер сейсмічної активності може зумовити деякі зміни в атмосфері, іоносфері та магнітосфері також глобального масштабу, в тому числі в сейсмічно спокійних регіонах. Така постановка задачі виправдана також тим, що, в світлі сучасних уявлень, Земля та її внутрішні та зовнішні оболонки (система Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера: ЗАІМ) утворюють єдину відкриту нелінійну динамічну ієрархічну систему, в якій взаємодія між підсистемами можлива, у тому числі, за рахунок енергетично слабких (тригерних) механізмів [9].

Мета роботи – пошук взаємозв'язків у системі ЗАІМ у планетарному масштабі при зміні ГСА.

БАЗА ДАНИХ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Розрахунки проведені для 4 незалежних баз даних (БД): БД1: 01.04.2007 – 31.12.2008, БД2: 01.12.2010 – 31.12.2011, БД3: 14.09.2012 – 15.02.2014, БД4: 01.01.2015 – 31.12.2015, які містили такі щоденні дані.

Космічна погода. Сонячна активність (СА): густина потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$; геомагнітна активність (ГМА): індекс A_p .

Іоносфера. Критична частота області F2 (f_0F2) опівдні за даними іоносферних станцій у східному і західному півкулях: Пругоніце (50.0 °N; 14.6 °E), Хабаровськ (48.5 °N; 135.1° E), Москва (55.5 °N; 37.3 °E), Мілстон Гіл (42.6 °N; 288,5 °E), Боулдер (40.1 °N; 254,8 °E). Повний електронний вміст іоносфери (ПЕВ), усереднений по земній кулі (далі – глобальний ПЕВ) – тільки БД4.

Тропосфера. Приземний атмосферний тиск (P) у пунктах спостереження Харків, Москва, Прага, Мілстон Гіл, Боулдер (у безпосередній близькості до пунктів спостереження іоносфери).

Літосфера. Максимальна за добу магнітуда ЗТ (M_{max}) як індикатор ГСА.

Дані взяті з наступних сайтів: космічна погода – <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices>; іоносфера – ulcar.uml.edu/DIDBase, <http://sec.noaa.gov/Data>, <ftp://cdis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>; атмосферний тиск – www.gismeteo.ru, ЗТ – <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.

Розрахунки проведені методом накладених епох з перевіркою достовірності результатів розрахунків за критерієм Фрідмана [10]. Для наочності на графіках вибірково приведено також стандартну похибку середнього σ . Як нульові дати вибиралися дні різкого збільшення M_{max} після тривалого періоду відносного сейсмічного затишшя, що перевищує час появи провісників згідно [11]: ΔT [роки] = $10^{0.26M - 3.50}$. Розрахунки проведені від -20 -ї до $+10$ -ї діб, фактично від одного сейсмічно активного періоду до наступного. Число розглянутих подій: БД1 – 10, БД2 – 13, БД3 – 12, БД4 – 9, всього 44 події. Результати приймалися до розгляду при рівні значущості $p < 0.1$, додатково їх надійність визначалася зіставленням результатів для незалежних БД.

РЕЗУЛЬТАТИ

У східній півкулі (станція Пругоніце) зміни критичної частоти іоносфери f_0F2 (Рис. 1) демонструють два максимуми з амплітудою 0.5 МГц, приурочені до періодів підвищеної ГСА (нижній графік) поблизу -15 -х і 0 -х діб, після яких величина f_0F2 поступово зменшується. Відповідні зміни сонячної активності були невеликі: згідно [12], зміни іонізуючого ультрафіолетового (УФ) випромінювання Сонця складають 2–3 %. Рівень ГМА також був низьким і не досягав значень, характерних для збурених умов: ($A_p > 27$, або $K_p > 4_0$). Проте, відзначимо наявність локального максимуму A_p поблизу нульової дати, при цьому відмінність максимального і мінімального значень A_p є достовірним ($p < 0.1$). Як наслідок, незважаючи на малу величину зростання f_0F2 , пояснити його змінами СА і ГМА складно.

Атмосферний тиск P поблизу Пругоніце (східна півкуля) також мав два локальних екстремуми (мінімуми) поблизу періодів посилення ГСА, положення яких дещо випереджає час збільшення f_0F2 в іоносферних даних. Відзначимо, що мінімуми P спостерігався не лише у середньому, але й для всіх 10 розглянутих випадків різкого зростання ГСА (рівень значущості результату становить $p < 0.02$).

У західній півкулі (станція Мілстон Гіл) зміни f_0F2 і P були, в цілому, аналогічні представленим вище, але максимуми показників досягнуто на 1 – 2 доби раніше. Як наслідок, різниця середніх тисків (умовно прийmemo її за різницю тисків між півкулями) напередодні посилення ГМА відчувала стрибок на 10 мм. рт. ст. Такі зміни тиску могли бути зумовлені потоками повітря між півкулями, які вже давно розглядають як один із тригерів ЗТ у деякому сейсмоактивному регіоні [13]. У нашому випадку ми розглядаємо пункти спостереження у сейсмоспокійних регіонах, тому можемо пов'язати цей ефект лише з глобальними сейсмічними явищами. Можна припустити, що глобальна атмосферна циркуляція і ГСА пов'язані між собою. Одним з механізмів їх зв'язку може виступати нерівномірність обертання Землі.

Ще одна важлива особливість отриманих результатів полягає в тому, що ефекти в атмосферних та іоносферних параметрах часто мають вигляд не локальних сплесків поблизу різкого зростання ГСА, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива – див. пунктир на Рис. 1).

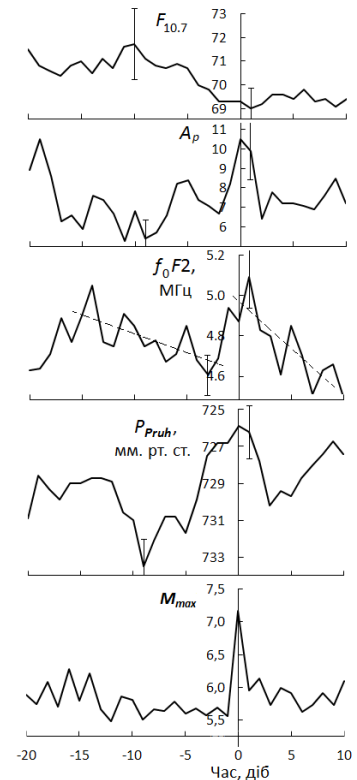


Рис. 1. Варіації f_0F2 і P на ст. Пругоніце, а також СА і ГМА при різкій зміні ГСА (нижній графік).

Відзначимо особливості результатів для інших баз даних. За даними за 2011–2015 рр. (БД2–БД4), максимум f_0F2 поблизу нульової дати присутній у всіх цих БД. Середні зміни f_0F2 по всіх рядах даних і усіх розглянутих станціях представлені на Рис. 2. За даними за 2015 р. зафіксовано також зростання глобального ПЕВ поблизу часу різкого зростання ГСА (Рис. 3, крива 1), яке помітно перевищує зміни, які могли бути викликані сонячною активністю (крива 2: розраховані значення ПЕВ, пропорційні потоку УФ випромінювання Сонця [13]). Відзначимо також схожість змін ПЕВ і f_0F2 (Рис. 2 і 3).

Середні зміни f_0F2 в усіх БД також узгоджуються зі змінами приземного атмосферного тиску P на тій же станції (див. приклад на Рис. 2), що є підтвердженням раніше отриманих результатів [14]. Цей зв'язок більш очевидний в мінімумі СА, і виявляється лише як тенденція на тлі більш сильних варіацій СА і ГМА поблизу максимуму 11-річного сонячного циклу.

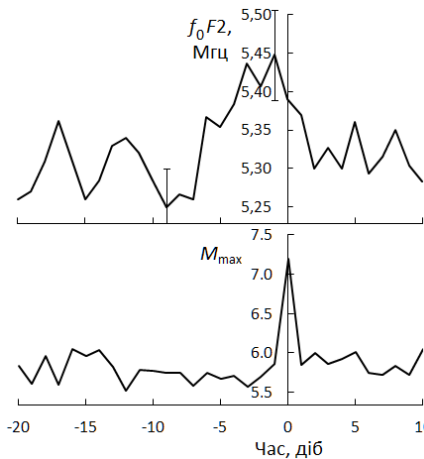


Рис. 2. Середні зміни f_0F2 (БД1–БД4) при різкій зміні ГСА, сумарне $N = 79$.

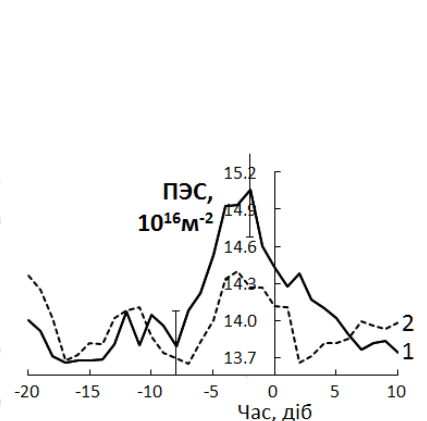


Рис. 3. Середні зміни глобального ПЕВ (БД-4): 1 – експериментальні значення; 2 – розраховані значення за умови, що ПЕВ залежать лише від СА.

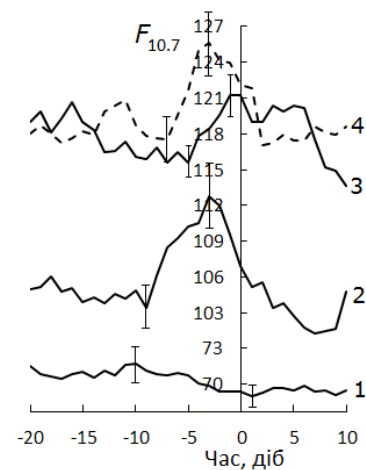


Рис. 4. Зміни СА (індекс $F_{10.7}$) за всі розглянуті періоди: 1 – БД4, 2 – БД3, 3 – БД2, 4 – БД1.

За даними БД2–БД4, що відповідають середньому та високому рівням СА, зміни індексу активності $F_{10.7}$ характеризуються стійким максимумом поблизу різкого зростання ГСА, тоді як за даними БД1 (мінімум СА) вони були невеликі (Рис. 4). Зміни ГМА характеризуються невеликим максимумом поблизу нульової дати (див. приклад на рис. 1), за винятком БД4, що вказує на реальність цього явища (див. також [15]).

Таким чином, ефекти глобальної сейсмічної активності в атмосфері та іоносфері зафіксовані по всіх чотирьох БД, для космічної погоди (індекси сонячної і геомагнітної активностей) наявність характерних змін встановлено за даними 3-х з 4-х БД. Для іоносфери зв'язок з процесами в тропосфері та літосфері більш очевидний в мінімумі 11-річного циклу СА, тоді як при високому рівні СА вплив "знизу" менш помітний. Відзначимо, що ефекти ГСА отримані у сейсмічно спокійних регіонах і незалежно від місця, де відбувалися найбільш сильні ЗТ, тобто зазначені ефекти носили глобальний характер.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Серед розглянутих показників варіації приземного тиску P демонструють найбільш стійкі закономірності при посиленні ГСА. Зокрема, в періоди посилення ГСА у 2013 р. зміни P на ст. Боулдер практично повторювали зміни цього показника на ст. Мілстон Гіл у 2008 р. (Рис. 5). Таким чином, мінімум P , який починає формуватися за 5–9 діб до ЗТ – досить стабільне явище, що охоплює великі території. У західній півкулі мінімум P виражений менше або зміщується на більш ранні дні, збільшуючи різницю тисків між півкулями. Очевидно, що дані окремих станцій не дають повної картини глобальної атмосферної циркуляції, проте, повторюваність ситуації у різні роки вказує на реальність впливу переміщень великих повітряних мас на ініціацію підготовлених ЗТ у глобальному масштабі.

Для іоносфери зв'язок зі змінами ГСА також досить стійкий, але на тлі більш значних варіацій космічної природи. Основні відмінності результатів для окремих іоносферних станцій стосуються деякої відмінності часу появи максимуму f_0F2 поблизу нульової дати у західній і східній півкулях, що можна пов'язати як з особливостями прояву іоносферних збурень на різних геомагнітних широтах, так і впливом на іоносферу процесів у тропосфері, де екстремуми P також не збігаються. І дані про f_0F2 у різних півкулях, і тим більше дані про глобальний ПЕВ вказують на те, що цей ефект носить загальнопланетарний характер і вимагає для свого пояснення інших механізмів, ніж розглядаються в багатьох роботах (див., наприклад, [1-4]).

Отримані результати підтверджують важливу роль СА як одного з тригерів ЗТ (проявляється у 75% від усіх випадків). Наявність локального максимуму ГМА поблизу нульового дня можна пояснити наявністю загального фактору – варіацій параметрів сонячного вітру, що впливають як на геомагнітні, так і на сейсмічні процеси. З одного боку, вони безпосередньо впливають на рівень ГМА, з іншого боку,

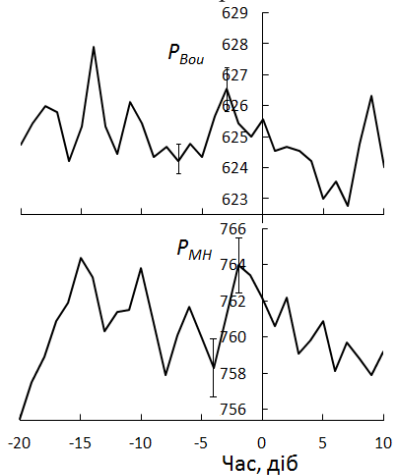


Рис. 5. Порівняння середніх змін приземного атмосферного тиску P на станціях Боулдер (БДЗ) і Мілстон Гіл (БД1) при різкій зміні ГСА.

по ланцюжку сонячний вітер – модуляція галактичних космічних променів – хмарність – циркуляція атмосфери – зміна тиску на земну поверхню під дією переміщення повітряних мас – ініціація підготовлених ЗТ (див., наприклад, [16]) вони можуть впливати на ГСА.

Беручи до уваги наявність зв'язків розглянутих параметрів не тільки з ГСА, а й між собою, можна констатувати часту (хоча і часткову – з урахуванням амплітуди ефектів) синхронізацію процесів у системі ЗАІМ, в якій кожна з підсистем може виступати як джерелом, так і наслідком збурень.

Щоб отримати уявлення про фізичні процеси, відповідальні за варіації ГСА та її ефекти, звернемося до результатів досліджень варіацій природного ДНЧ-випромінювання на межі "земля-повітря", які, як добре відомо, тісно пов'язані з напружено-деформованим станом гірських порід. Зокрема, для періоду часу, який практично збігається з періодом БД1, було показано [17, 18], що варіації ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська область, Україна: 49.7 °N; 36.2 °E) від одного сейсмічно активного періоду до наступного мають циклічний пілоподібний характер, зумовлений, ймовірно, циклічним

характером тектонічних процесів. Таким чином, вплив тектонічних процесів поширюється і на сейсмічно спокійний регіон, при цьому зазначений вище пілоподібний характер змін атмосферних та іоносферних показників виявляється тісно пов'язаним з характером тектонічних процесів. Оскільки всі ефекти зареєстровані у сейсмічно спокійних регіонах, мова йде про глобальні явища.

Механізм появи глобальних ефектів в атмосфері та іоносфері при зміні ГСА можна пов'язати з добре відомим процесом, а саме виходом на земну поверхню із земних надр радону та інших газів. Цей процес зазвичай розглядають як один із складових процесу підготовки та реалізації окремих ЗТ (див., наприклад, [19]). Але, як відомо (див., наприклад, [20, 21]), цей процес носить глобальний характер і відзначається суттєвою неоднорідністю у просторі і часі. Основний потік глибинних газів розвантажується у рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, тобто поза прямої залежності від локалізації та магнітуди окремих землетрусів. Можна очікувати, що ці процеси здатні викликати зміни провідності нижніх шарів атмосфери та глобального електричного кола у планетарному масштабі, викликаючи вторинні ефекти.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено зростання критичної частоти області F2 при різкому посиленні ГСА на величину до 0.5 МГц. Ефект проявляється майже одночасно у східному і західному півкулях, а також у значеннях глобального ПЕВ. При цьому в іоносферних варіаціях, як і раніше, простежується вплив як тропосфери (особливо при низькому рівні СА), так і космічної погоди, характеристики якої в 75% випадків також проявляють зв'язок з ГСА. Отже, космічна погода часто, але не завжди може виступати тригером ЗТ. Швидше за все, одночасно реалізується кілька різних зв'язків між геосферами, частково синхронізованих змінами космічної погоди.

2. Встановлено формування мінімуму приземного атмосферного тиску напередодні посилення ГСА, положення якого, швидше за все, зміщується на більш ранні дні перед сильнішими ЗТ. У цілому, в західній півкулі для досліджених періодів мінімум тиску настає раніше, ніж у східному, що призводить до помітного збільшення різниці тисків між півкулями на 10 мм. рт. ст., що можна розглядати як свідчення зв'язку глобальної сейсмічності і глобальної атмосферної циркуляції.

3. Зміни тропосферних та іоносферних показників, як правило, мають циклічний характер у вигляді стрибка поблизу різкого зростання ГСА з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пілоподібна крива), тобто вплив літосфери на вище розташовані шари є безперервним і тісно пов'язаний з циклічним характером тектонічних процесів.

4. В якості можливого механізму появи глобальних ефектів у атмосфері та іоносфері при зміні ГСА запропоновано розглянути роль виходу на поверхню радону та інших газів. Цей процес є глобальним і нерівномірним у часі, а основний потік глибинних газів розвантажується в рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, поза прямої залежності від локалізації і магнітуди землетрусів.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку А.М. Цимбалу за надані дані про повний електронний вміст іоносфери.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

I.G. Zakharov  <http://orcid.org/0000-0002-3262-9984>.

L.F. Chernogor  <http://orcid.org/0000-0001-5777-2392>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Korepanov V, Hayakawa M, Yampolski Y, Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. of the Earth*. 2009;34(6-7):485-495.
2. Tanimoto T, Heki K, Artru-Lambin J. Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. *Treatise on Geophysics*. Oxford: Elsevier. 2015;4:421-443.
3. Jin S, Occhipinti G, Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics *Earth-Science Reviews*. 2015;147:54-64.
4. Parrot M, Li M. DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.* 2015;355:18-25.
5. Летников ФА. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 230 с.
6. Горькавый НН, Трапезников ЮА, Фридман АМ. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли. *Докл. РАН. Геофизика*. 1994;338(4):525-527.
7. Викулин АВ, Иванчин АГ. Ротационная модель сейсмического процесса. *Тихоокеанская геология*. 1998;17(6):95-103.
8. Садовский МА, Писаренко ВФ. Сейсмический процесс в блоковой среде. Москва: Наука, 1991. 96 с.
9. Chernogor LF. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. of Rem. Sens.* 2011;32(11):3199–3218.
10. Гнедышев МН, Оль АИ. О методике некоторых гелиобиологических исследований. *Проблемы космической биологии*. Л.: Наука, 1982;43:216-219.
11. Добровольский ИП. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1991. 224 с.
12. Казачевская ТВ, Нусинов АА. Прогностическая модель коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца. *Геоматизм и аэрономия*. 1986;15(2):593-596.
13. Боков ВН. Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений. *Известия РГО РАН*. 2003;135(6):54-65.
14. Zakharov IG, Chernogor LF. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018;58(3):430-437.
15. Тертышников АВ. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофизические исследования*. 2013;3:63-70.
16. Veretenenko SV, Ogurtsov MG. Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. *Geomagnetism and aeronomy*. 2015;55(4):442-449.
17. Bogdanov YuA, Zakharov IG. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity. *Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos*. St. Petersburg, Petrodvorets. 2006. P. 357-360.
18. Zakharov IG. The Influence of Global Seismic Activity on Variations in VLF Emissions and Infrasound in a Seismically Quiet Area. *Proc. of the XVIIth Int. Conf.: Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects*. – Kyiv, Ukraine, 2018. N13800. 5 p.
19. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. *Sensours*. 2007;7(7):1141-1158.
20. Войтов ГИ. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. Теоретические и региональные проблемы геодинамики. *Тр. Геол. ин-та РАН*. М.: Наука, 1999;515:242-251.
21. Сывороткин ВЛ. Глубинная дегазация и глобальные катастрофы. М.: Геоинформмарк, 2002. 250 с.

REFERENCES

1. Korepanov V, Hayakawa M, Yampolski Y, Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. of the Earth*. 2009;34(6-7):485-495.
2. Tanimoto T, Heki K, Artru-Lambin J. Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. *Treatise on Geophysics*. Oxford: Elsevier. 2015;4:421-443.
3. Jin S, Occhipinti G, Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics *Earth-Science Reviews*. 2015;147:54-64.
4. Parrot M, Li M. DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.* 2015;355:18-25.
5. Letnikov FA. Synergetics of geological systems. *Novosibirsk: Science*, 1992. 230 p. (Russian).

6. Gorkavyy NN, Trapeznikov YuA, Fridman AM. On the global component of the seismic process and its relationship with the observed features of the Earth's rotation. Dokl. RAS. Geophysics. 1994;338(4):525-527. (Russian).
7. Vikulin AV, Ivanchin AG. Rotational model of the seismic process. Pacific geology. 1998;17(6):95-103. (Russian).
8. Sadovsky MA, Pisarenko VF. Seismic process in a block environment. Moscow: Nauka, 1991.96 p. (Russian).
9. Chernogor LF. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. Int. J. of Rem. Sens. 2011;32(11):3199–3218.
10. Gnedyshev MN, Ol AI. On the methodology of some heliobiological studies. Problems of space biology. L. : Nauka, 1982; 43: 216-219. (Russian).
11. Dobrovolskiy IP. Tectonic earthquake preparation theory. Moscow: Nauka, 1991.224 p. (Russian).
12. Kazachevskaya TV, Nusinov AA. Predictive model of short-wave ultraviolet radiation of the Sun. Geomagnetism and Aeronomy. 1986; 15 (2): 593-596. (Russian).
13. Bokov VN. Atmospheric circulation variability - initiator of strong earthquakes. Izvestiya RGS RAS. 2003; 135 (6): 54-65. (Russian).
14. Zakharov IG, Chernogor LF. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. Geomagnetism and Aeronomy. 2018;58(3):430-437.
15. Tertyshnikov AV. Evaluation of the practical importance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. Heliogeophysical research. 2013; 3: 63-70. (Russian).
16. Veretenenko SV, Ogurtsov MG. Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. Geomagnetism and aeronomy. 2015;55(4):442-449.
17. Bogdanov YuA, Zakharov IG. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity. Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets. 2006. P. 357-360.
18. Zakharov IG. The Influence of Global Seismic Activity on Variations in VLF Emissions and Infrasound in a Seismically Quiet Area. Proc. of the XVIIth Int. Conf.: Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects. – Kyiv, Ukraine, 2018. N13800. 5 p.
19. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. Sensours. 2007;7(7):1141-1158.
20. Voitov GI. Cold degassing of methane into the Earth's troposphere. Theoretical and regional problems of geodynamics. Tr. Geol. Institute of RAS. Moscow: Nauka, 1999; 515: 242-251. (Russian).
21. Syvorotkin VL. Deep degassing and global disasters. M. : Geoinformmark, 2002.250 p. (Russian).

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-05>

УДК 537.86

ГЕОМАГНІТНИЙ ЕФЕКТ АЛБАНСЬКОГО ЗЕМЛЕТРУСУ 26 ЛИСТОПАДА 2019 р.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, М. Ю. Голуб, С. Г. Леус, М. Б. Шевелев, Y. Luo
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com
Надійшла до редакції 2 жовтня 2020 р.

Актуальність. Відомо, що основною причиною геомагнітних збурень є космічні джерела, процеси в сонячному вітрі, в міжпланетному середовищі, а також падіння великих космічних тіл. До геомагнітного ефекту також призводять землетруси. Згідно системної парадигми, об'єкт Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера являє собою єдину систему, в якій мають місце прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки. Механізм впливу землетрусів на магнітне поле вивчено недостатньо. Вважається, що до цього призводять розтріскування порід, флюктууючий рух у поровій рідині, розряди статичної електрики та інші фізичні процеси. При землетрусах генеруються сейсмічні, акустико-гравітаційні та магнітогідродинамічні хвилі, які забезпечують взаємодію підсистем у системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера.

Метою цієї роботи є опис можливої реакції рівня геомагнітного поля на землетрус, який мав місце 26 листопада 2019 р. в Албанії.

Методи і методологія. Вимірювання виконано за допомогою магнітометра-флюксметра, розміщеного в Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Він має високу чутливість (0.5–500 пТл в діапазоні періодів 1–1000 с відповідно) і досить широку смугу досліджуваних частот (від 0.001 до 1 Гц). Для детального дослідження квазіперіодичних процесів використовувався системний спектральний аналіз часових варіацій рівня H і D компонент геомагнітного поля. Він заснований на одночасному застосуванні віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. В останньому використовувався материнський вейвлет у вигляді функції Морле.

Результати. Квазіперіодичні варіації рівня геомагнітного поля, які мають час запізнення близько 6 хв і тривалість 70–80 хв, могли бути викликані землетрусом. Переносником збурень в цьому випадку могли бути магнітогідродинамічні хвилі. Квазіперіодичні збурення, які мають час запізнення 97–106 хв і тривалість близько 130–140 хв, швидше за все, викликані землетрусом. За перенесення збурень відповідали акустико-гравітаційні хвилі, які мають період 7–14 хв. Відносно збурення концентрації електронів у полі акустико-гравітаційної хвилі було близько 5.3%. Результати спостережень за албанським і турецьким землетрусами в цілому узгоджуються між собою.

Висновки. Вивчено магнітні варіації в діапазоні періодів 1–1000 с, що супроводжували підготовку ЗТ та саму сейсмічну подію.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: землетрус, магнітометр-флюксметр, квазіперіодичні збурення, сейсмічні хвилі, акустико-гравітаційні хвилі, МГД імпульс

GEOMAGNETIC EFFECT OF THE ALBANIAN EARTHQUAKE ON NOVEMBER 26, 2019

L. F. Chernogor, K. P. Garmash, M. Yu. Holub, S. G. Leus, M. B. Shevelev, Y. Luo
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. The main cause of geomagnetic disturbances is known to be space sources, processes acting in the solar wind and in the interplanetary medium, as well as falling large celestial bodies. Earthquakes also give rise to geomagnetic effects. In accordance with the systems paradigm, the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system comprises the single system where direct and reverse, positive and negative coupling take place. The mechanism of the earthquake effect on the magnetic field is poorly understood. A rock cracking, a fluctuating movement of fluids in pores, a corona discharge of the high-voltage static charge, etc., are thought to be the processes that give rise to the geomagnetic effect. In the course of earthquakes, seismic, acoustic, atmospheric gravity, and magnetohydrodynamic waves are generated, which provide for coupling between the subsystems in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system.

Purpose of Work. The paper describes the possible response in the level of the geomagnetic field to the earthquake of 26 November 2019 that took place in Albania.

Techniques and Methodology. The measurements were taken with the fluxmeter magnetometer at the V. N. Karazin Kharkiv National University Magnetometer Observatory. It delivers 0.5 – 500 pT sensitivity in the 1–1000 s period range over a quite large frequency band of 0.001 to 1 Hz. To study the quasi-periodic processes in detail, the systems spectral analysis of the temporal dependences of the horizontal (H , D) geomagnetic field components has been employed. It includes the short-time Fourier transform, the Fourier transform in a sliding window with a width

adjusted to be equal to a fixed number of harmonic periods, and wavelet transform, simultaneously. The wavelet transform employs the Morlet wavelet as a basis function.

Results. The quasi-periodic variations in the level of the geomagnetic field observed to appear with a 6 min lag and to last for 70–80 min could be due to the earthquake. These disturbances could be transferred by the magnetohydrodynamic waves. The quasi-periodic variations that were observed to appear with a 97–106 min lag and to last for about 130–140 min were most likely due to the earthquake. They were transferred by the atmospheric gravity waves with a period of 7–14 min. A relative disturbance in the electron density in the atmospheric gravity wave field was observed to be approximately 5.3%. The results obtained from observations of Albanian and Turkish earthquakes show agreement.

Conclusions: The magnetic variations in the 1–1000 s period range that were observed to occur before and during the earthquake have been studied.

KEY WORDS: earthquake, fluxmeter magnetometer, quasi-periodic disturbances, seismic waves, acoustic waves, atmospheric gravity waves, magnetohydrodynamic pulse.

ГЕОМАГНИТНИЙ ЕФФЕКТ АЛБАНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 НОЯБРЯ 2019 г.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, М. Ю. Голуб, С. Г. Леус, Н. Б. Шевелёв, У. Луо

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Известно, что основной причиной геомагнитных возмущений являются космические источники, процессы в солнечном ветре, в межпланетной среде, а также падения крупных космических тел. К геомагнитному эффекту также приводят землетрясения. Согласно системной парадигме, объект Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера представляет собой единую систему, в которой имеют место прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. Механизм воздействия землетрясений на магнитное поле изучен недостаточно. Считается, что к этому приводят растрескивание пород, флуктуирующее движение в поровой жидкости, разряды статического электричества и другие физические процессы. При землетрясениях генерируются сейсмические, акустико-гравитационные и магнитогидродинамические волны, обеспечивающие взаимодействие подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

Целью настоящей работы является описание возможной реакции уровня геомагнитного поля на землетрясение, которое имело место 26 ноября 2019 г. в Албании.

Методы и методология. Измерения выполнены при помощи магнитометра-флюксметра, размещённого в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Он обладает высокой чувствительностью (0.5 – 500 пТл в диапазоне периодов 1 – 1000 с соответственно) и достаточно широкой полосой исследуемых частот (от 0.001 до 1 Гц). Для детального исследования квазипериодических процессов использовался системный спектральный анализ временных вариаций уровня *H* и *D* компонент геомагнитного поля. Он основан на одновременном применении оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. В последнем использовался материнский вейвлет в виде функции Морле.

Результаты. Квазипериодические вариации уровня геомагнитного поля, имеющие время запаздывания около 6 мин и длительность 70–80 мин, могли быть вызваны землетрясением. Переносчиком возмущений в этом случае могли быть магнитогидродинамические волны. Квазипериодические возмущения, имеющие время запаздывания 97–106 мин и длительность около 130–140 мин, скорее всего, вызваны землетрясением. За перенос возмущений отвечали акустико-гравитационные волны, имеющие период 7–14 мин. Относительное возмущение концентрации электронов в поле акустико-гравитационной волны было около 5.3%. Результаты наблюдений за албанским и турецким землетрясениями в целом согласуются между собой.

Выводы. Изучены магнитные вариации в диапазоне периодов 1–1000 с, сопровождавшие подготовку ЗТ и само сейсмическое событие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение, магнитометр-флюксметр, квазипериодические возмущения, сейсмические волны, акустико-гравитационные волны, МГД импульс

ВСТУП

Ще в 1970-ті рр. один з авторів (Л. Ф. Черногор) обґрунтував взаємозв'язок процесів в системах Сонце–міжпланетне середовище–магнітосфера–іоносфера–атмосфера–Земля (СМСМІАЗ) та Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера (ЗАІМ). Ним же було сформульовано системну парадигму (див., наприклад, [1–5]). Згідно цієї парадигми, обидві системи відносяться до відкритих динамічних і, головне, нелінійних систем. Такі системи мають нетривіальні властивості [1–5]. Завдяки наявності прямих і зворотних, позитивних і негативних зв'язків в системах можливі процеси самоорганізації, виникнення нестійкостей, тригерні механізми вивільнення енергії, тощо [1–5]. Розгляд системи СМСМІАЗ є доцільним при вивченні впливу потоків енергії, речовини та випромінювання «зверху», наприклад, під час геокосмічних бур [6]. У разі потоків «знизу» досить обмежитися розглядом системи ЗАІМ. Потoki «знизу» виникають при впливі на систему потужних землетрусів, вивержень вулканів, потужних атмосферних процесів (циклонів, ураганів, торнадо, гроз), а також потужних техногенних джерел (польотів ракет і великих літаків, потужних вибухів і т.п.) [7–20].

Землетруси були першим джерелом, яке дозволило простежити виникнення збурень у атмосфері й іоносфері, тобто виявити взаємодію підсистем у системі ЗАІМ [21–25]. Як виявилось, збурення від літосфери до атмосфери й іоносфери переносяться електромагнітними й акустико-гравітаційними хвилями (АГХ) [21–24].

Досить довго та з перемінним успіхом ведеться пошук магнітних передвісників землетрусів. Огляд відповідних робіт виконано в [13]. Можливий механізм виникнення періодичного магнітного передвісника описаний в роботі [8]. У статті [13] аналізуються варіації рівня геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с, які передували турецькому землетрусу 24 січня 2020 р. з магнітудою $M \approx 6.7$, а також після сейсмічної події. Авторами зроблено висновок, що землетрус міг викликати збурення, які поширюються в іоносфері зі швидкістю ~ 20 км/с та ~ 230 – 320 м/с. Більшу швидкість мають МГД хвилі, а меншу – АГХ. Цікавим було б підтвердити результати роботи [13] шляхом аналізу часових варіацій рівня геомагнітного поля для інших землетрусів з близькою магнітудою.

Метою цієї роботи є описання можливої реакції рівня геомагнітного поля на землетрус, який мав місце 26 листопада 2019 р. в Албанії.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗЕМЛЕТРУС

Землетрус магнітудою $M \approx 6.4$ стався о 02:54 (тут і далі – всесвітній час UT) 26 листопада 2019 р. в Албанії. Координати епіцентру землетрусу наступні: 41.51° півн.ш., 19.53° сх.д. Глибина епіцентру – 22 км. За основною сейсмічною подією спостерігалися афтершоки: о 02:59 ($M \approx 5.1$), 03:03 ($M \approx 5.3$), 05:56 ($M \approx 4.5$), 06:08 ($M \approx 5.5$), 07:13 ($M \approx 4.5$) та 07:27 ($M \approx 4.9$). Афтершоки приблизно з такою ж магнітудою тривали протягом дня та ввечері 26 і 27 листопада 2019 р.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

У даній роботі були використані засоби та методи такі самі ж, як і в роботі [13].

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

При пошуку магнітного передвісника землетрусу, а також реакції геомагнітного поля на землетрус, який відбувся, необхідний ретельний аналіз стану космічної погоди. 24, 25 та в першій половині доби 26 листопада 2019 р. концентрація заряджених частинок у сонячному вітрі флукутувала в межах $(2-3) \cdot 10^6$ м⁻³ (Рис. 1). З 25 по 27 листопада 2019 р. швидкість частинок в сонячному вітрі змінювалася від 350 до 450 км/с. Цієї ж доби температура частинок була в межах $(0.5-1) \cdot 10^5$ К, а тиск частинок – 0.5–1.5 нПа. B_y та B_z компоненти міжпланетного магнітного поля флукутували від -2 до 4 нТл. Значення функції Акасофу з 25 по 27 листопада 2019 р. не перевищували 1–3 ГДж/с. Цієї ж доби значення K_p -індексу змінювались від 2 до 3, а значення D_{st} -індексу варіювали від -15 до -10 нТл.

Таким чином, магнітна обстановка була скоріш спокійною, ніж збуреною. Ця обставина полегшила пошук реакції геомагнітного поля на сейсмічну подію.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Далі опишемо варіації рівня геомагнітного поля в день землетрусу та в контрольні дні 25 і 27 листопада 2019 р. (Рис. 2–4). З Рис. 2а можна бачити, що 25 листопада 2019 р. в інтервалі часу 01:00–07:00 рівень H -компоненти змінювався від ~ 0.1 до 0.2 нТл. У спектрі коливань переважали періоди від 600 до 850 с, але більш тривалий час (з 01:30 до 05:00) відзначалися періоди $T \approx 350$ – 600 с. Приблизно такі ж періоди були присутніми і в варіаціях D -компоненти (Рис. 2б). Крім того, з 02:00 до 03:30 реєструвалися сильні (з амплітудою до 0.2 – 0.3 нТл) коливання з $T \approx 700$ – 1000 с.

У день землетрусу приблизно до 03:00 рівень H -компоненти зазвичай не перевищував ~ 0.1 нТл (Рис. 3а). З 03:00 і по 04:10 рівень дещо (до ~ 0.2 нТл) виріс. Вдруге збільшення амплітуди флукутацій до ~ 0.2 нТл мало місце в інтервалі часу 04:41–06:50. Переважали коливання з $T \approx 600$ – 800 с. Збільшення рівня D -компоненти до 0.2 нТл спостерігалося більш ніж за дві години до землетрусу (Рис. 3б). Ще більше (до 0.3 – 0.4 нТл) збільшення рівня D -компоненти мало місце в інтервалі часу 03:00–04:20. Переважали коливання з $T \approx 700$ – 900 с. Повторне збільшення рівня цієї компоненти відзначалося з 04:30 до 06:40, при цьому $T \approx 300$ – 600 с. 27 листопада 2019 р. рівень H -компоненти змінювався в цілому від 0.1 до 0.2 нТл (Рис. 4а). Лише в окремі моменти часу спостерігалися сплески рівня до 0.3 – 0.4 нТл. Період коливань варіював у широких межах: від 200 до 1000 с. Рівень D -компоненти найчастіше флукутував у межах 0.1 – 0.2 нТл (Рис. 4б). В окремі моменти часу він збільшувався до 0.3 і навіть до 0.5 нТл. В спектрі спостерігалися періоди від 200 до 1000 с.

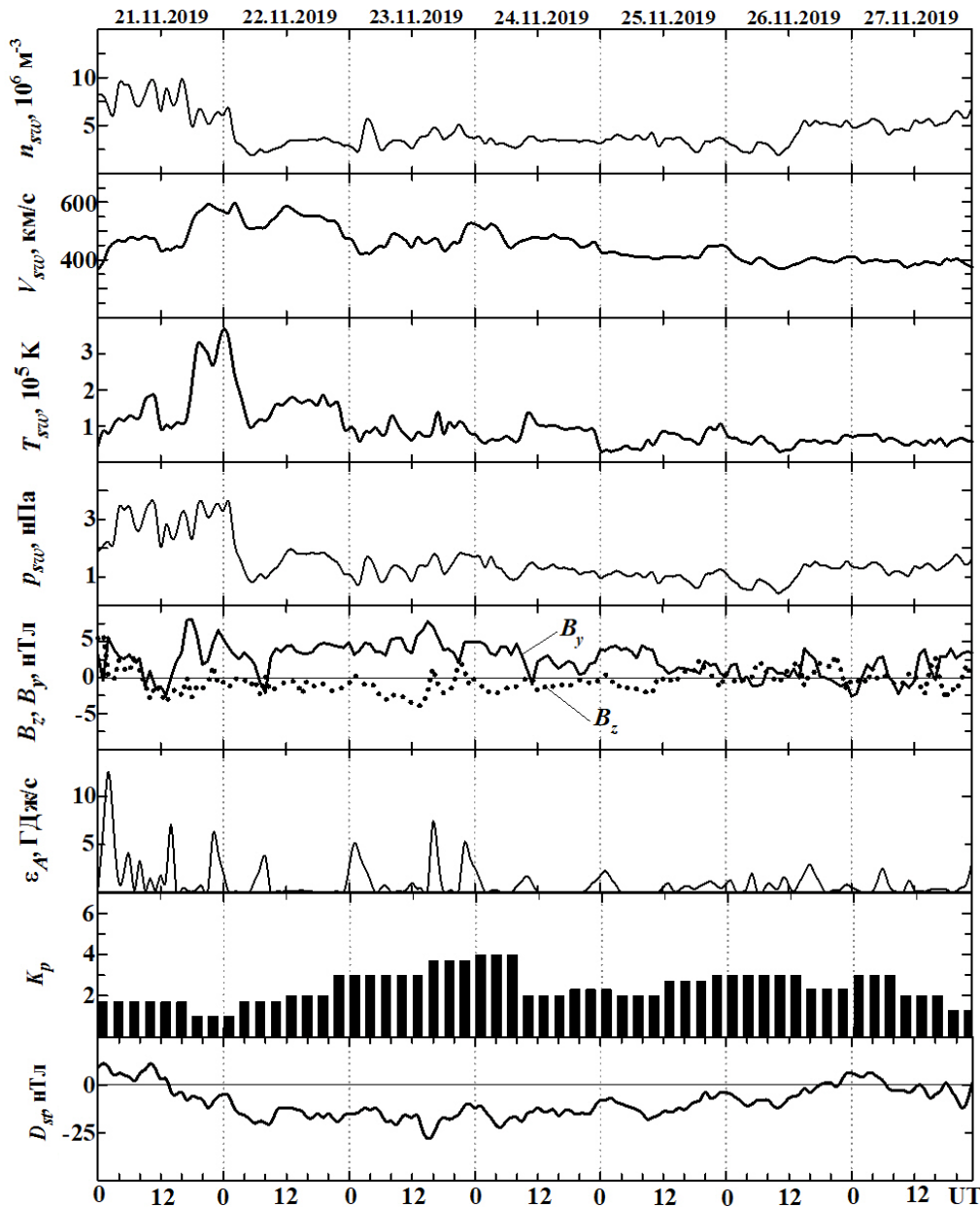


Рис. 1. Часові варіації основних параметрів, які описують стан космічної погоди (панелі зверху вниз): часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації n_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} , температури T_{sw} [Space Weather Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration. Accessible link: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>], і розрахованих значень динамічного тиску p_{sw} , B_y (лінія) та B_z (точки) компонент міжпланетного магнітного поля [Space Weather Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration. Accessible link: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>], розрахованих значень енергії ϵ_A , яка передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу, K_p -індексу [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Accessible link: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>], Dst -індексу [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Accessible link: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html] протягом 21–27 листопада 2019 р.

ОБГОВОРЕННЯ

Можливість існування магнітного передвісника. Спостережуване більш ніж за дві години до землетрусу збільшення рівня D -компоненти могло бути викликано космічними причинами, але не можна виключати й те, що це могло бути магнітним передвісником. Про це свідчать періоди коливань $T \approx 600\text{--}900$ с. За розрахунками автора роботи [8] саме такі періоди повинні бути властиві магнітному передвіснику.

Можливість генерації МГД хвиль. Збільшення рівня обох компонент після 03:00 протягом 70–80 хв могло бути обумовлено генерацією МГД хвиль. Першопричиною служать АГХ, які генеруються землетрусом. Ці хвилі досягають динамо-області іоносфери приблизно за час $\Delta t_0 \approx 5$ хв. АГХ модулюють густину атмосфери, а заодно й концентрацію електронів, викликаючи МГД ефект. Далі ці хвилі поширюються в іоносфері, в тому числі й в напрямку магнітометра. На поверхні Землі прояви МГД хвиль в іоносфері реєструються як магнітні варіації, причому в D -компоненті (проекція Схід–Захід) ефект виражений сильніше. При швидкості МГД хвилі близько 20 км/с [7, 13] час поширення до магнітометра, віддаленого від епіцентру землетрусу на 1620 км, становить близько 80 с. В сумі час запізнення приблизно дорівнює 6.3 хв, а за даними спостережень менший час запізнення становив $\Delta t_1 \approx 6$ хв.

Можливість генерації АГХ. Вдруге характер варіацій рівня H і D компонент змінювався через час Δt_2 , рівний близько 106 та 97 хв для H і D компонент відповідно. Швидкість поширення цих збурень оцінимо з наступної формули:

$$v = \frac{R}{\Delta t_2 - \Delta t_0}$$

Вважаючи $\Delta t_0 \approx 5$ хв і $R \approx 1620$ км, отримуємо, що $v \in$ близькою до 230 та 290 м/с для H і D компонент відповідно. Таку швидкість і періоди 400–800 с або 7–14 хв мають АГХ (див., наприклад, [26]).

Збурення концентрації електронів. Рух газу в полі АГХ супроводжується захопленням зарядженої компоненти плазми, тобто періодичною модуляцією концентрації електронів N . Оцінимо відносну амплітуду δ_N варіацій N . З роторного рівняння Максвелла випливає, що [13]:

$$\Delta B = \mu_0 \Delta j \Delta z = \mu_0 j_0 \delta_N \Delta z,$$

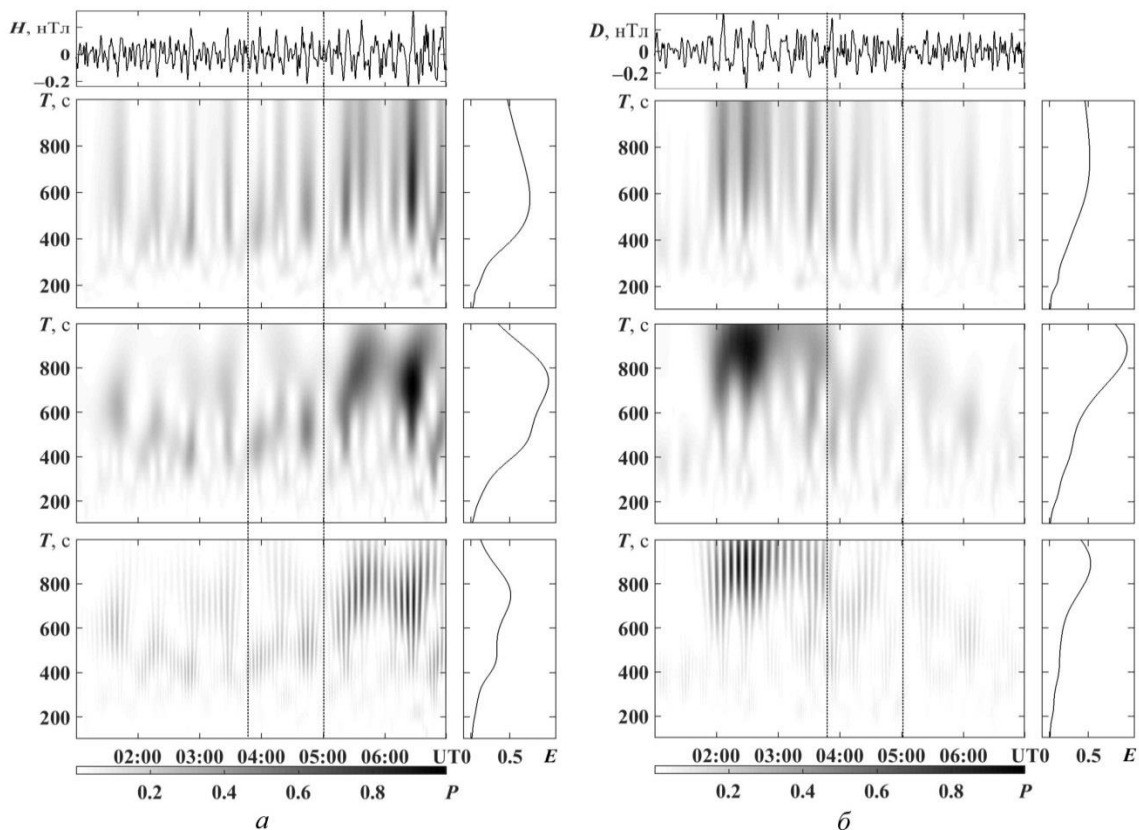


Рис. 2. Результати системного спектрального аналізу рівнів H (а) та D компонент (б) геомагнітного поля 25 листопада 2019 р. Панелі зверху вниз: аналізований сигнал, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення з материнською функцією в якості функції Морле. Праворуч показано енергограми (розподіл енергії сигналу за періодами). Штрихованими лініями позначено момент сходу Сонця на висоті 100 км та на рівні Землі в місці розташування обсерваторії.

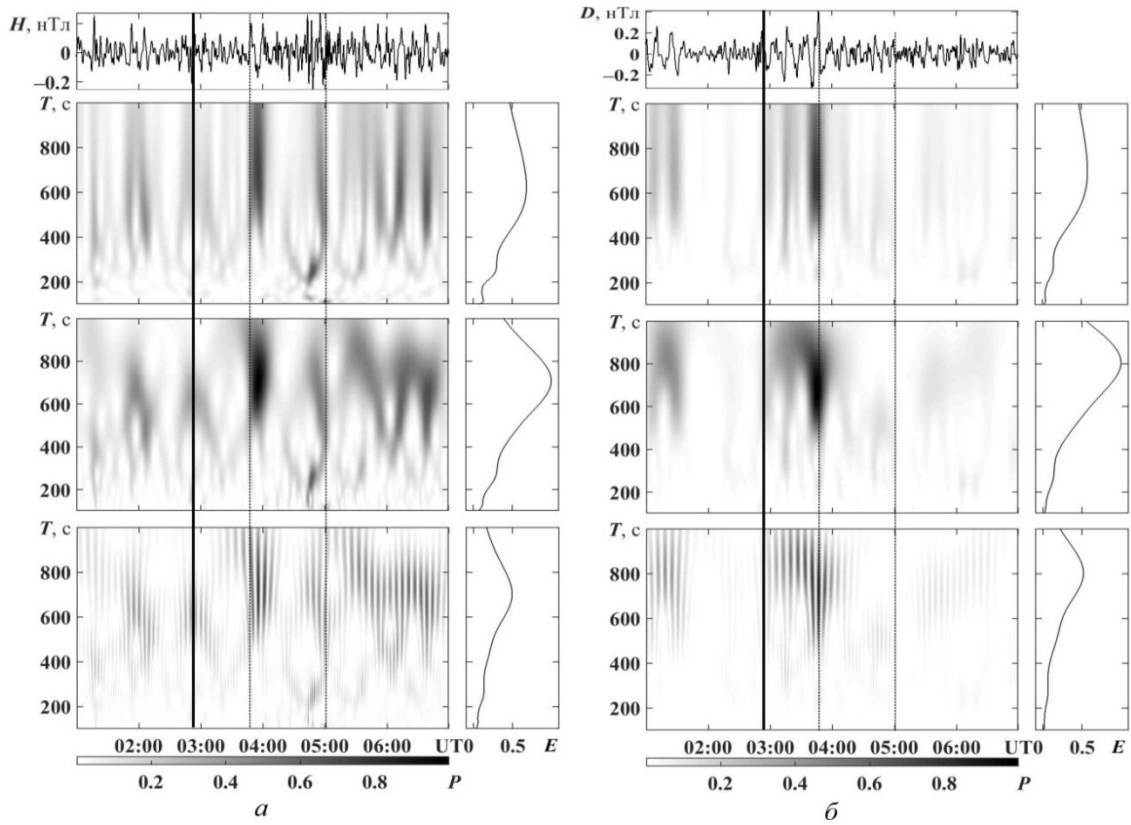


Рис. 3. Те саме, що і на Рис. 2, для 26 листопада 2019 р.
Суцільною лінією показано час головного поштовху магнітудою 6.4.

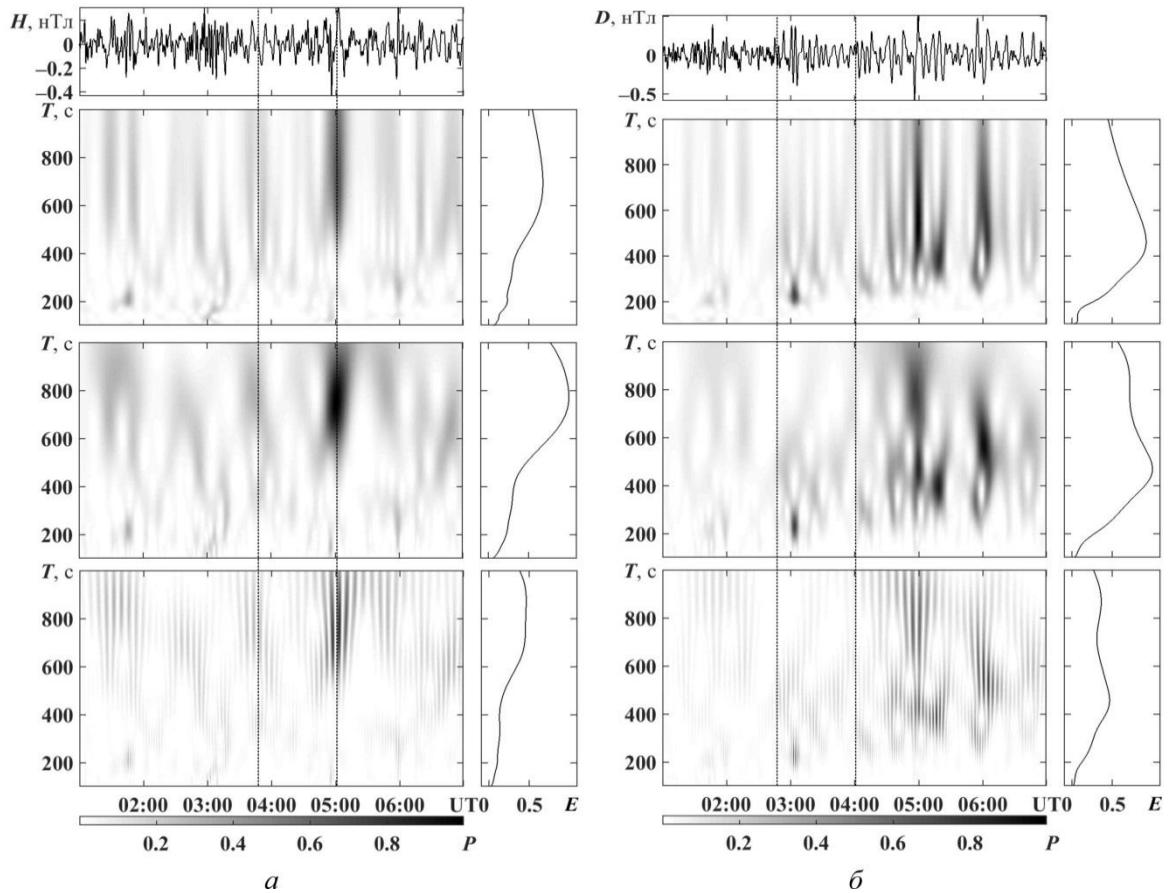


Рис. 4. Те ж саме, що й на Рис. 2, для 27 листопада 2019 р.

де μ_0 – магнітна стала, Δj – збурення густини іоносферного струму в динамо-області атмосфери, j_0 – незбурене значення густини струму, Δz – товщина динамо-області. Припускаючи, що $\Delta B \approx 0.2$ нТл, $j_0 \approx 10^{-7}$ А/м², $\Delta z \approx 30$ км, отримуємо, що $\delta_N \approx 5.3\%$.

Описані в даній роботі результати в цілому узгоджуються з результатами роботи [13]. Однак у випадку албанського землетрусу магнітні ефекти виражені слабше. Цьому є кілька причин. По-перше, магнітуда албанського землетрусу була дещо меншою (6.4 проти 6.7). По-друге, відстань до магнітометра була дещо більшою (1620 км проти 1350 км). По-третє, глибина епіцентру албанського землетрусу була помітно більшою (22 км проти 10 км). По-четверте, реакція на албанський землетрус спостерігалася на тлі природних збурень ($K_p = 3$).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Квазіперіодичні варіації рівня геомагнітного поля, які мають час запізнення близько 6 хв і тривалість 70–80 хв, могли бути викликані землетрусом. Переносником збурень в цьому випадку могли бути МГД хвилі.

2. Квазіперіодичні збурення, які мають час запізнення 97–106 хв і тривалість близько 130–140 хв, скоріш за все, викликані землетрусом. За перенесення збурень відповідали АГХ, які мають період 7–14 хв.

3. Відносне збурення концентрації електронів у полі АГХ хвилі було близько 5.3%.

4. Результати спостережень за албанським і турецьким землетрусами в цілому узгоджуються між собою.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф., Голуб М. Ю., Шевелева М. Б. та Yiyang Luo виконано в рамках проєкту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Також робота Черногора Л. Ф., Гармаша К. П. та Шевелева М. Б. частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0118U002039, 0119U002538).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

K. P. Garmash  <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

Y. Luo  <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор ЛФ. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. Радиофизика и радиоастрономия. 2003;8(1):59-106. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/797/435>
2. Черногор ЛФ. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. Нелинейный мир. 2006;4(12):655-697.
3. Черногор ЛФ. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2. Нелинейный мир. 2007;5(4):198-231.
4. Chernogor LF, Rozumenko VT. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. Radio Phys. Radio Astron. 2008;13(2):120-137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563/134>
5. Chernogor LF. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. International Journal of Remote Sensing. 2011;32(11):3199-3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
6. Черногор ЛФ, Домнін ІФ. Физика геокосмических бурь Харьков: Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина. 2014; 408 p.
7. Chernogor LF. Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. Geomagnetism and Aeronomy. 2019;59(1):62-75. <https://doi.org/10.1134/S0016793219010043>
8. Chernogor LF. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. Geomagn. Aeron. 2019 Jun 17;59(3):374-382.
9. Guo Q., Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>

10. Luo Y, Guo Q, Zheng Yu, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СН. Вариации характеристик радиоволн ВЧ диапазона над Китаем, сопровождавшие умеренное землетрясение в Японии 5 сентября 2018 г. Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». 2019;30:16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>
11. Luo Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. Н. Флуктуации геомагнитного поля, сопровождавшие Чуйские землетрясения в сентябре–октябре 2003 г. Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». 2019;31:87-104. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-09>
12. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Yu. Seismic-ionospheric effects: results of radio soundings at oblique incidence. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(3):218-230. [In Ukrainian].
13. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP. Geomagnetic effect of Turkish earthquake of January 24, 2020. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(4): [In Press]. [In Ukrainian].
14. Chernogor LF. *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.; 2012. 556 p. (Russian).
15. Chernogor LF, Garmash KP. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018;58(5):673-685. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050031>
16. Черногор ЛФ. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина 2009. 386 с.
17. Chernogor LF, Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group; 2013. 542 p.
18. Черногор ЛФ. О возможном воздействии запусков ракетно-космической техники на магнитное поле Земли. В кн.: Воздействие ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Под общей ред. Адушкина ВВ, Козлова СИ, Сильникова МВ. Москва: ГЕОС. 2016. 795 с.
19. Chernogor LF, Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG., Shamota MA. Consistent quasi-periodic variations of the geomagnetic pulsation level and doppler frequency shift of decametric radio waves aspect-scattered by artificial field-aligned ionospheric irregularities. *Radiophys. Quantum. El.* 2011;53(12):688-705. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9262-z>
20. Черногор ЛФ. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2014. 448 с.
21. Bolt BA. Seismic Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *Nature.* 1964 Jun 13;202(4937):1095-1096. <https://doi.org/10.1038/2021095a0>
22. Donn WL, Posmentier ES. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *J. Geophys. Res.* 1964 Dec 15;69(24):5357-5361. <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05357>
23. Davies K, Baker DM. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1965 May;70(9):2251-2253. <https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>
24. Row RV. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1966 Jan;71(1):343-345. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00343>
25. Moore GW. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature.* 1964;203:508-509. <https://doi.org/10.1038/203508b0>
26. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.

REFERENCES

1. Chernogor LF. Physics of the Earth, atmosphere and geocosmos in the light of the systemic paradigm. *Radiophysics and Radio Astronomy.* 2003;8(1):59-106. (Russian). <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/797/435>
2. Chernogor LF. Earth - atmosphere - ionosphere - magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system. 1. *Non-linear world.* 2006; 4 (12): 655-697. (Russian).
3. Chernogor LF. Earth - atmosphere - ionosphere - magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system. 2. *Non-linear world.* 2007; 5 (4): 198-231. (Russian).
4. Chernogor LF, Rozumenko VT. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* 2008;13(2):120-137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563/134>
5. Chernogor LF. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *International Journal of Remote Sensing.* 2011;32(11):3199-3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
6. Chernogor LF, Domnin IF. *Physics of geocosmic storms* Kharkiv: Kharkiv National University. V.N. Karazin. 2014; 408 p. (Russian).

7. Chernogor LF. Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019;59(1):62-75. <https://doi.org/10.1134/S0016793219010043>
8. Chernogor LF. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagn. Aeron.* 2019 Jun 17;59(3):374-382.
9. Guo Q., Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
10. Luo Y, Guo Q, Zheng Yu, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SN. Variations in the characteristics of HF radio waves over China accompanying a moderate earthquake in Japan on September 5, 2018. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics"*. 2019; 30: 16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02> (Russian)
11. Luo Y., Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SN Geomagnetic field fluctuations accompanying the Chuya earthquakes in September – October 2003. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics"*. 2019;31:87-104. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-09> (Russian).
12. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Yu. Seismic-ionospheric effects: results of radio soundings at oblique incidence. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(3):218-230. [In Ukrainian].
13. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP. Geomagnetic effect of Turkish earthquake of January 24, 2020. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(4): [In Press]. [In Ukrainian].
14. Chernogor LF. *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.; 2012. 556 p. (Russian).
15. Chernogor LF, Garmash KP. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018;58(5):673-685. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050031>
16. Chernogor LF. Radiophysical and geomagnetic effects of missile launches: Monograph. Kharkiv: V.N.Karazinay Kharkiv National University 2009.386 p. (Russian).
17. Chernogor LF, Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group; 2013. 542 p.
18. Chernogor LF. On the possible impact of launches of rocket and space technology on the Earth's magnetic field. In the book: *The impact of rocket and space technology on the natural environment*. Ed. Adushkina VV, Kozlova SI, Silnikova MV. Moscow: GEOS. 2016. p. 795 (Russian).
19. Chernogor LF, Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG., Shamota MA. Consistent quasi-periodic variations of the geomagnetic pulsation level and doppler frequency shift of decametric radio waves aspect-scattered by artificial field-aligned ionospheric irregularities. *Radiophys. Quantum. El.* 2011;53(12):688-705. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9262-z>
20. Chernogor LF. *Physics of powerful radio emission in the geocosmos: Monograph*. Kharkiv: V.N.Karazin Kharkiv National University. 2014.448 p. (Russian).
21. Bolt BA. Seismic Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *Nature*. 1964 Jun 13;202(4937):1095-1096. <https://doi.org/10.1038/2021095a0>
22. Donn WL, Posmentier ES. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *J. Geophys. Res.* 1964 Dec 15;69(24):5357-5361. <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05357>
23. Davies K, Baker DM. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1965 May;70(9):2251-2253. <https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>
24. Row RV. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1966 Jan;71(1):343-345. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00343>
25. Moore GW. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature*. 1964;203:508-509. <https://doi.org/10.1038/203508b0>
26. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-06>

УДК 537.868.3

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Є.О. Антоненко, В.О. Кожешкурт, Д.О. Штода, В.О. Катрич, А.І. Божков

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: antonenko@karazin.ua

Надійшла до редакції 12 жовтня 2020 р.

Актуальність. Проблеми контролю та визначення електрофізичних параметрів матеріалів різної фізичної природи є актуальними з точки зору розвитку експрес-методів аналізу речовин у різних галузях науки і техніки, зокрема, у біотехнологіях та біомедицині. Також актуальність роботи обумовлена пошуком та впровадженням нових медичних неінвазивних методів діагностики.

Мета роботи – експериментальна перевірка методу обчислення діелектричної проникності багатошарових структур на основі конформного перетворення, перевірка методу електромагнітного зондування об'єктів з одностороннім доступом за допомогою мікросмужкового резонатора.

Матеріали та методи. У роботі представлено метод обчислення ефективної діелектричної проникності тришарової структури за допомогою мікросмужкового резонатора нової форми. Експериментальним методом досліджено низку твердих та рідких матеріалів. Показано, що резонансна частота та добротність резонатора, навантаженого досліджуванним матеріалом, дозволяють оцінити концентрацію складових бінарних розчинів. Досліджено можливість застосування мікросмужкового резонатора у якості плетизмографічного сенсора.

Результати. Розроблено електромагнітний сенсор для вимірювання діелектричної проникності об'єктів з одностороннім доступом. Дано опис оригінальної конструкції мікросмужкового резонатора, проведено його моделювання та експериментальне дослідження. Отримано результати вимірювань діелектричної проникності об'єктів різної фізичної природи: тверді діелектрики і біологічні рідини. Проведено дослідження впливу відносної концентрації глюкози на резонансні властивості датчика. Показана можливість використання сенсора у якості плетизмографічного датчика у біомедичних системах.

Висновки. Проведені в роботі теоретичні та експериментальні дослідження мікросмужкового резонатора складної геометричної форми підтвердили можливість його застосування у якості сенсора електрофізичних параметрів матеріалів з різними діелектричною проникністю та провідністю. Запропоновано новий метод реєстрації кровоплину, заснований на фіксації зміни ефективної діелектричної проникності тканин, які містять кровоносні судини.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікросмужковий резонатор, діелектрична проникність, електрична провідність, глюкоза, плетизмографія

ELECTROMAGNETIC SENSOR FOR MEASURING THE DIELECTRIC PERMEABILITY OF MATERIALS

Ye.A. Antonenko, V.A. Kozheshkurt, D.A. Shtoda, V.A. Katrich, A.I. Bozhkov

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance: Problems of control and determination of electrophysical parameters of materials of different physical nature are relevant in terms of the development of express methods of analysis of substances in various fields of science and technology, in particular, in biotechnology and biomedicine. Also, the relevance of the work is grounded by the search and implementation of new non-invasive medical diagnostic methods.

The purpose of the work is to experimentally test the method of calculating the dielectric constant of multilayer structures based on conformal transformation, to test the method of electromagnetic probing of objects with one-side access using a microstrip resonator.

Materials and methods: The paper presents a method for calculating the effective dielectric constant of a three-layer structure using a microstrip resonator of a new shape. A number of solid and liquid materials were investigated experimentally. It is shown that the resonant frequency and quality factor of the resonator loaded with the investigated material allow to estimate the concentration of the components of binary solutions. The possibility of using a microstrip resonator as a plethysmographic sensor has been investigated.

Results: An electromagnetic sensor for measuring the dielectric constant of objects with one-side access was developed. The description of the original design of the microstrip resonator is presented and its modeling and experimental research are carried out. The results of measurements of the dielectric constant of objects of different physical nature are obtained: solid dielectrics and biological liquids. The influence of relative glucose concentration on the resonant properties of the sensor was studied. The possibility of using the sensor as a plethysmographic sensor in biomedical systems is shown.

Conclusion: Theoretical and experimental studies of a microstrip resonator of complex geometric shape, which are presented in the paper, confirmed the possibility of its use as a sensor of electrophysical parameters of materials with

different dielectric constant and conductivity. A new method of blood flow registration is proposed, based on the fixation of changes in the effective dielectric constant of tissues containing blood vessels.

KEYWORDS: microstrip resonator, dielectric constant, electrical conductivity, glucose, plethysmography.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. Антоненко, В.А. Кожешкурт, Д.А. Штода, В.А. Катрич, А.И. Божков

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Проблемы контроля и определения электрофизических параметров материалов различной физической природы актуальны с точки зрения развития экспресс-методов анализа веществ в различных областях науки и техники, в частности, в биотехнологиях и биомедицине. Также актуальность работы обусловлена поиском и внедрением новых медицинских неинвазивных методов диагностики.

Цель работы – экспериментальная проверка метода вычисления диэлектрической проницаемости многослойных структур на основе конформного преобразования, проверка метода электромагнитного зондирования объектов с односторонним доступом с помощью микрополоскового резонатора.

Материалы и методы. В работе представлен метод вычисления эффективной диэлектрической проницаемости трехслойной структуры с помощью микрополоскового резонатора новой формы. Экспериментальным методом исследован ряд твердых и жидких материалов. Показано, что резонансная частота и добротность резонатора, нагруженного исследуемым материалом, позволяют оценить концентрацию составляющих бинарных растворов. Исследована возможность применения микрополоскового резонатора в качестве плетизмографического сенсора.

Результаты. Разработан электромагнитный сенсор для измерения диэлектрической проницаемости объектов с односторонним доступом. Дано описание оригинальной конструкции микрополоскового резонатора, проведено его моделирование и экспериментальное исследование. Получены результаты измерений диэлектрической проницаемости объектов различной физической природы: твердые диэлектрики и биологические жидкости. Проведено исследование влияния относительной концентрации глюкозы на резонансные свойства датчика. Показана возможность использования сенсора в качестве плетизмографического датчика в биомедицинских системах.

Выводы. Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования микрополоскового резонатора сложной формы подтвердили возможность его применения в качестве сенсора электрофизических параметров материалов с различными диэлектрической проницаемостью и проводимостью. Предложен новый метод регистрации кровотока, основанный на фиксации изменения эффективной диэлектрической проницаемости тканей, содержащих кровеносные сосуды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микрополосковый резонатор, диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость, глюкоза, плетизмография

ВСТУП

Методи вимірювання діелектричної проникності рідких і твердих матеріалів з одностороннім доступом розвинено в роботах [1-6]. У цих роботах в якості датчиків використовуються мікросмушкові резонатори різних типів. Для вимірювання діелектричної проникності за допомогою мікросмушкового резонатора велике значення має спосіб збудження резонатора. Важливим завданням є виключити вплив досліджуваного об'єкта на живильну лінію, тобто підведення енергії повинно здійснюватися з боку, протилежного від досліджуваного зразка.

Розвиток медичного приладобудування і впровадження досягнень науки в медичну практику дозволили відкрити принципово нові можливості для дослідження біологічних об'єктів. Особлива увага приділяється розвитку неінвазивних (безконтактних і не травмуючих) методів. Основою неінвазивної діагностики є реєстрація власних фізичних полів біологічних об'єктів (БО) або реєстрація ефектів взаємодії зовнішніх фізичних полів з БО. Великі перспективи для вирішення завдань медицини відкриваються при використанні електромагнітних полів (ЕМП). По-перше, закони поширення ЕПМ вивчені досить добре. По-друге, існують технічні можливості генерування, реєстрації і керування параметрами ЕМП практично у всьому діапазоні довжин хвиль.

Основними показниками, що визначають поширення ЕМП в живій матерії, є електропровідність і діелектрична проникність. Характер взаємодії ЕМП з біологічною тканиною залежить від діелектричної проникності. Живі тканини, що складаються з клітин і позаклітинної рідини, містять іони і полярні молекули. Під впливом ЕМП виникають два ефекти, що визначають діелектричні властивості – коливання вільних зарядів і обертання дипольних молекул з частотою прикладеного поля. Перший ефект призводить до збільшення струмів провідності і втрат енергії. Другий ефект впливає на струми зміщення. Таким чином, відносна діелектрична проникність має комплексний вид:

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = (\varepsilon' - j\varepsilon''), \quad (1)$$

де ε^* – комплексна діелектрична проникність, ε_0 – проникність вакууму, ε' – реальна частина діелектричної проникності, ε'' – уявна частина діелектричної проникності, яка визначає втрати в середовищі. Величина електропровідності середовища σ пов'язана зі струмами провідності і діелектричними втратами співвідношенням:

$$\sigma = \varepsilon''\omega\varepsilon_0, \quad (2)$$

де ω – частота. Кут втрат при цьому дорівнює:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Величина ε'' проявляє дисперсією, пов'язану з різними релаксаційним процесами, які супроводжують ефект поляризації. Діелектричні властивості і електропровідність тканин відіграють основну роль при визначенні ефектів поширення ЕМП і визначенні величини поглиненої енергії. Тому визначення діелектричних властивостей і електропровідності живої матерії в цілому і окремих її складових є важливим завданням, без вирішення якого неможливе створення нових методів і засобів терапевтичного або діагностичного призначення.

Окрім задачі визначення діелектричних властивостей БО для потреб розробки нових методів діагностики, діелектрична проникність може самостійно виступати як носій інформації в основі роботи низки типів приладів діагностики, в яких діелектричні властивості інтерпретуються через їх зв'язок з фізіологічними процесами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У даній статті пропонується оригінальна геометрична форма електромагнітного сенсора для оцінки діелектричної проникності матеріалів. Сенсор, топологію якого зображено на Рис. 1 а, являє собою мікросмужковий резонатор, який складається з елементів мікросмужкової лінії в $\frac{3}{4}$ і $\frac{1}{2}$ частин кола. Таким чином, довжина резонатора l задається радіусом кола r і дорівнює $l = 10\pi r$. Вибір такої форми обумовлений двома причинами. Перша - така форма дозволяє зменшити розміри датчика в 1,6 разів у порівнянні з кільцевим резонатором. Друга - мінімум геометричних параметрів для оптимізації. Таким чином, вдалося знайти оптимальну форму мікросмужкового резонатора, розміри якого становлять $0,2\lambda$ для основної моди коливань, а кількість геометричних параметрів оптимізації дорівнює двом, а саме: товщина мікросмужкової лінії w і радіус елементів кіл r .

Збудження резонатора здійснюється через зосереджену ємність C . Конденсатор може розташовуватися в отворі, що висвердлено в діелектричній підкладці. Матеріал підкладки - тефлон, армований склом, товщиною $h = 1,5$ мм. Над резонатором розташовується досліджуваний зразок товщиною h (Рис. 1 б). Фото експериментально зразка резонатора показано на Рис. 1 в.

За допомогою такої структури можна проводити вимірювання діелектричної проникності матеріалів відомої товщини. Також, метод може бути розвинений для визначення діелектричної проникності одного шару в багатшаровому діелектрику при відомих параметрах інших шарів.

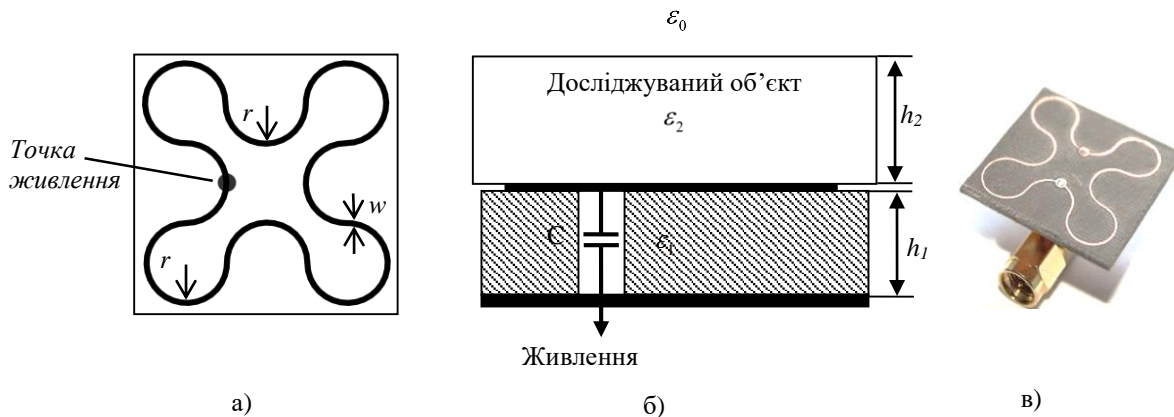


Рис. 1. Топологія мікросмужкового резонатора (а), взаємне розташування резонатора та об'єкта дослідження (б) та експериментальний зразок резонатора (в)

Рішення завдання зводиться до пошуку діелектричної проникності досліджуваного зразка. Одним з

простих аналітичних методів є метод, розвинений Jiri Svacina [7, 8]. Метод заснований на застосуванні конформного перетворення однієї площини в іншу. Знайдемо спочатку ефективну діелектричну проникність мікросмушкової лінії в тришаровому діелектрику. Мікросмушкова лінія розташована між шарами діелектрика ε_1 і ε_2 , над шаром з ε_2 знаходиться вільний простір з діелектричною проникністю ε_0 (Рис. 2 а). Після здійснення конформного перетворення [9] маємо структуру, аналогічну плоскому конденсатору з неоднорідним заповненням (Рис. 2 б).

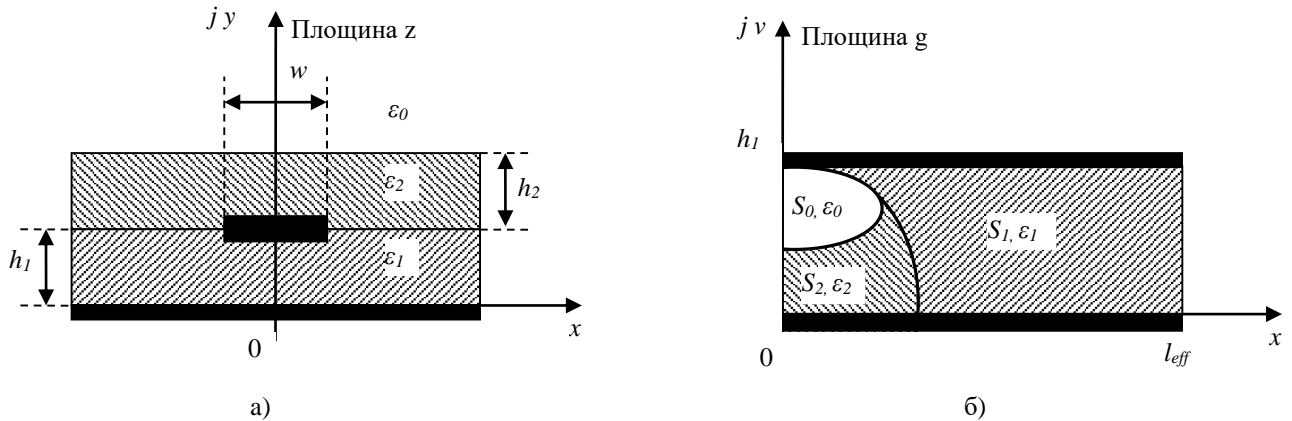


Рис. 2. Перетин мікросмушкової лінії (а) та її конформне перетворення (б)

У загальному випадку, вплив кожного діелектричного шару ε_i на ефективну діелектричну проникність обумовлено коефіцієнтом заповнення q_i :

$$q_1 = \frac{S_1}{S} = 1 - \frac{S_0 + S_2}{S}, \quad q_2 = \frac{S_2}{S} = 1 - q_1 - \frac{S_0}{S}, \quad q_0 = 1 - q_1 - q_2. \quad (4)$$

Експериментально встановлено, що найкраща добротність резонатора досягається при геометричних розмірах $w = 0,2$ мм, $h_1 = 1,5$ мм, $\varepsilon_1 = 2,5$. Коефіцієнти заповнення визначаються як:

$$q_1 = \frac{1}{2} + \frac{0,9}{\pi \ln \frac{h_1}{w}}, \quad (5)$$

$$q_1 = \frac{1}{2} + \frac{0,9 + \frac{\pi}{4} \ln \left(\frac{\frac{h_2}{h_1} + 2}{\frac{h_2}{h_1} + w/4h_1} \right) \arccos \left\{ \left[1 - \frac{h_1}{(h_1 + h_2)} \left(1 - \frac{w}{8h_1} \right) \right] \sqrt{\frac{\frac{h_2}{h_1} + 2}{\frac{h_2}{h_1} + w/4h_1}} \right\}}{\pi \ln \frac{8h_1}{w}}. \quad (6)$$

Далі, знаючи коефіцієнти заповнення, можна обчислити діелектричну проникність досліджуваного зразка з ε_2 за формулою:

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{eff} - q_0 \varepsilon_0 - q_1 \varepsilon_1}{q_2}, \quad (7)$$

де ε_{eff} - ефективна діелектрична проникність розраховується по вимірній резонансній частоті навантаженого резонатора f_1 і резонансній частоті резонатора у вільному просторі f_0 :

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{f_0}{f_1} \right)^2. \quad (8)$$

Об'єкт зондування повинен мати плоский зріз або бути еластичним і приймати плоску форму. Геометричні розміри мікросмушкового резонатора вибираються згідно з робочою довжиною хвилі і

розмірами досліджуваного об'єкта. Лінійні розміри резонатора повинні бути менше розмірів досліджуваного об'єкта, що дозволяє при розрахунках розглядати досліджуваний об'єкт як нескінченну напівплощину. Розміри резонатора можуть бути довільними, на їх вибір впливають такі вимоги: номер моди на якій збуджується резонатор, максимальне узгодження імпедансу резонатора з опором генератора на частоті обраної моди, структура електромагнітного поля в ближній зоні випромінювання.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Експериментальні дослідження проведено для трьох матеріалів: тефлон, скло та оксид алюмінію. На Рис. 3 а представлена залежність коефіцієнта відбиття від частоти для ненавантаженого резонатора і трьох діелектриків. Спостерігається зменшення резонансної частоти при збільшенні діелектричної проникності досліджуваного об'єкта. Слід зазначити, що товщина зразка становить 3 мм.

На Рис. 3 б представлені залежності резонансної частоти резонатора для перших трьох мод від діелектричної проникності досліджуваного зразка. З практичної точки зору, для отримання більш точних результатів, доцільно проводити вимірювання на більш високих модах. В такому випадку збільшується кут нахилу залежності. Результати тестування матеріалів з малими діелектричними втратами та повітря наведені в Таблиці 1.

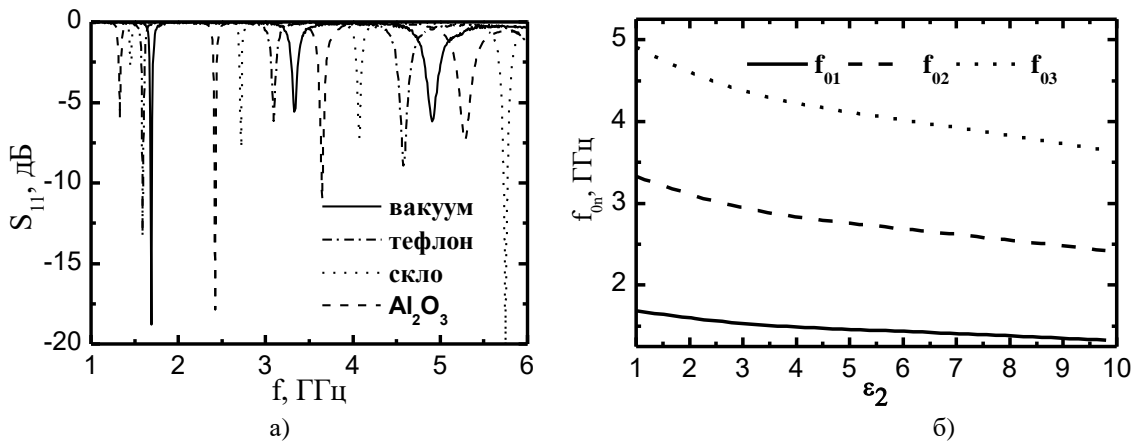


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відбиття для твердих діелектриків (а) та теоретична залежність частоти резонансу від діелектричної проникності (б)

Таблиця 1. Результати вимірювань твердих діелектриків

Матеріал	Встановлене значення	Виміряне значення	Відносна похибка, %
Повітря	1,00019	1,0024	0,22
Тефлон	2,1	2,1394	1,88
Скло	5,5	4,9865	9,34
Оксид алюмінію	9,8	9,8425	0,43

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ РІДИН

Далі, розглянемо приклад навантаження резонатора квіткою з рідким полярним діелектриком – водним розчином глюкози. Вимірювальна комірка (Рис. 4 а) уявляє собою резонатор, над яким розташована ємність або квітка з досліджуваною рідиною. Відомо, що дистильована вода при нормальних умовах має діелектричну проникність $\epsilon = 81$. Перші три резонанси коефіцієнту відбиття, які спостерігаються при взаємодії електромагнітного поля з дистильованою водою, представлені на Рис. 4 б. Внаслідок збільшення діелектричної проникності спостерігається зсув резонансів у низькочастотну область.

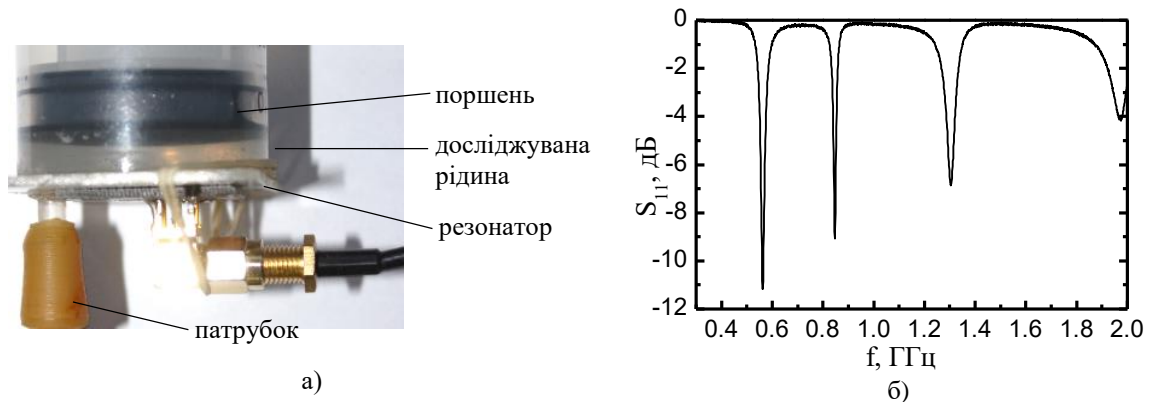


Рис. 4. Вимірвальна комірка (а), частотна залежність коефіцієнта відбиття (б)

Електродинамічні властивості досліджуваного об'єкта обрані зважаючи на властивості біологічних тканин з високим вмістом води [1]. Наприклад, зміна діелектричної проникності крові при зміні концентрації глюкози в діапазоні від 0,7 до 1,5 г/л, при постійній температурі, частоті і провідності приблизно становить $\Delta\varepsilon \approx 0,05$.

На Рис. 5 представлені експериментальні залежності коефіцієнтів відбиття резонатора від частоти при різних концентраціях глюкози у водному розчині. З графіків видно, що зміна діелектричної проникності на 0,06% призводить до помітного зсуву частоти резонансу на 3 МГц. Даний ефект пов'язаний зі зміною ефективного значення діелектричної проникності, яка може бути обчислена за формулою змішування: $\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1\nu + \varepsilon_2(1-\nu)$, де ε_1 - діелектрична проникність води, ε_2 - діелектрична проникність глюкози, ν - об'ємна концентрація води. Таким чином, даний підхід може бути використаний для вимірювання концентрації глюкози в крові людини *in vitro*.

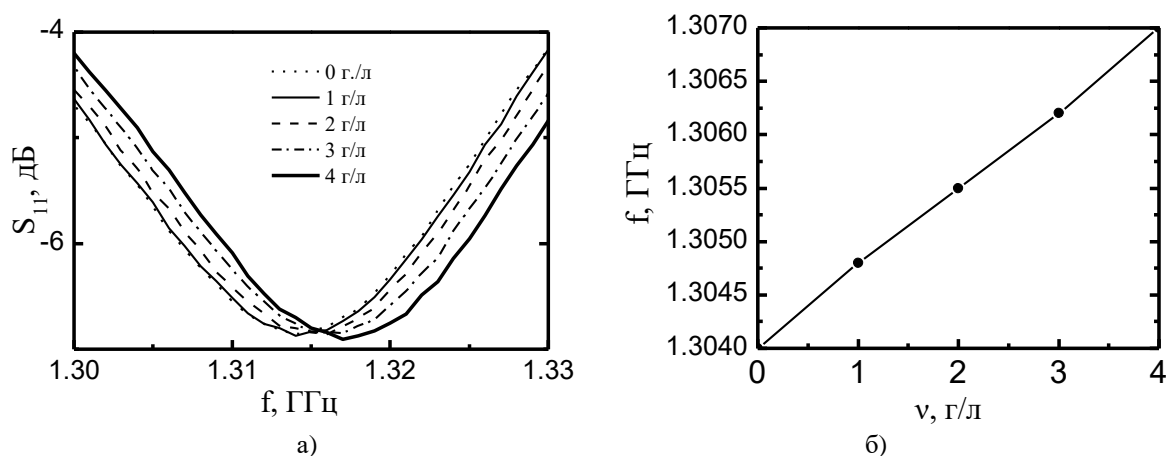


Рис. 5. Залежність коефіцієнта відбиття для різних концентрацій глюкози (а) і залежність частоти резонансу від концентрації глюкози у воді (б)

Слід зазначити, що чутливість до зміни діелектричної проникності та провідності зростає з частотою. Тому для подальших вимірювань та аналізу будемо використовувати третій резонанс, частота якого приблизно складає $f_p \approx 1,37\text{ ГГц}$.

На Рис. 6 представлена серія експериментальних кривих, які характеризують поведінку коефіцієнта відбиття резонатора в залежності від провідності водно-сольового розчину. При збільшенні концентрації солі у воді резонанс стає гладким, що свідчить про зростання струму провідності, і як наслідок, - про зниження добротності системи.

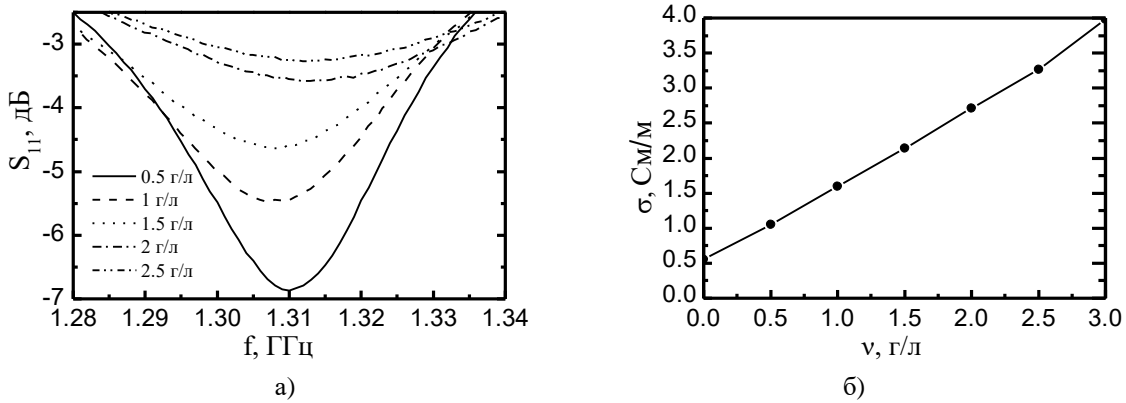


Рис. 6. Частотна залежність коефіцієнта відбиття від концентрації солі у воді (а) та залежність провідності від концентрації (б)

При перенесенні вимірювань на людину, особливу роль відіграє електрична провідність біологічної тканини, яка залежить від вмісту електролітів в плазмі крові. Електрична провідність суцільної крові на 70% визначається присутніми у плазмі солями (головним чином хлоридом натрію), на 25% - білками плазми і лише на 5% клітинами крові. У людському організмі концентрація солей у крові може знаходитись у межах від 0,5 г/л до 1,5 г/л. У цьому діапазоні залежність має характер близький до лінійного.

ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРА У СИСТЕМАХ ПЛЕТИЗМОГРАФІЇ

Одним з варіантів застосування розробленого резонатора можуть бути медичні системи експрес-діагностики. Зокрема, пристрої плетизмографії, які використовуються у медичній практиці для оцінки стану серцево-судинної системи, оцінки кровонаповнення (мікроциркуляції) окремих органів. Наразі відомо декілька основних неінвазивних методів реєстрації пульсової хвилі, які можна поділити на наступні групи: акустичні (доплерографія), оптичні (фотоплетизмографія), електричні (реографія) та механічні (механічна плетизмографія). Всі ці методи засновані на різних фізичних принципах і ефектах.

Запропонований метод реєстрації пульсової хвилі базується на циклічній зміні значення ефективної діелектричної проникності біологічної тканини, що відбувається внаслідок зміни кровотоку у судинах та капілярах. Далі, реєструється амплітуда сигналу, відбитого від мікросмужкового резонатора-аплікатора, який має щільний контакт з ділянкою тіла, наприклад, зап'ястка руки. Вимірювання амплітуди відбитого сигналу здійснюється на фіксованій частоті, яка є близькою до резонансної і вибирається експериментально таким чином, щоб під час реєстрації амплітуда відбитої хвилі не переходила через мінімум.

Під час проведення експериментальних досліджень розробленого мікросмужкового резонатора-аплікатора, розташованого на зап'ясті (Рис. 7 а), було зареєстровано пульсову хвилю, графік якої представлено на Рис. 7 б.

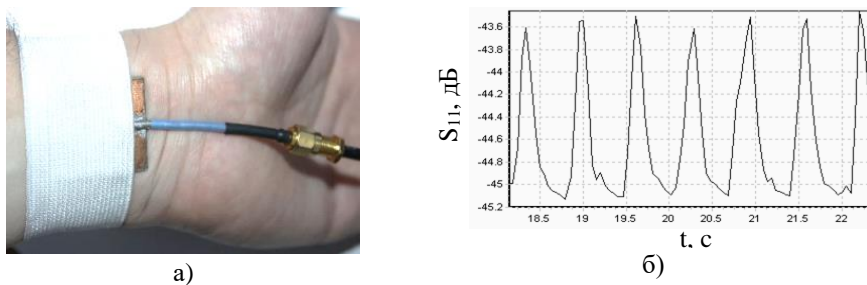


Рис. 7. Розташування сенсора на зап'ястку (а), фрагмент зареєстрованої пульсової хвилі (б)

Як видно з наведеного графіку, зміна кровонаповнення судин, і, як наслідок, зміна ефективної діелектричної проникності досліджуваної ділянки тканини, призводить до зміни коефіцієнта відбиття від мікросмужкового резонатора-аплікатора у діапазоні від -45,2 дБ до -43,7 дБ.

ВИСНОВКИ

Запропоновано оригінальну конструкцію мініатюрного мікросмужкового резонатора, який апробовано у якості сенсора діелектричних властивостей твердих і рідких матеріалів.

Даний електромагнітний сенсор має перспективи застосування у системах діелектрометрії для тестування об'єктів з одностороннім доступом. В основі методу лежить ефект зміни ефективного

значення діелектричної проникності шару, що знаходиться у безпосередній близькості до мікросмужкового резонатора. На основі методу конформного перетворення представлено простий алгоритм для обчислення ефективного значення діелектричної проникності тришарової пласкої структури.


Проведено експериментальну перевірку методу та надано оцінку похибки при вимірюваннях діелектричної проникності твердих матеріалів з малими діелектричним втратами.

Представлені результати вимірювань вказують на перспективи застосування сенсора у системах вимірювання концентрації складових бінарних розчинів. Виготовлений резонатор-аплікатор апробовано у якості плетизмографічного датчика для реєстрації пульсової хвилі. В основі методу лежить явище зміни ефективного значення діелектричної проникності об'єкта, розташованого в ближній зоні реактивного поля мікросмужкового резонатора. Даний метод перспективний для дослідження діелектричних властивостей біологічних тканин, зокрема, крові.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

Ye. Antonenko  <https://orcid.org/0000-0003-1090-5017>
V. Kozheshkurt  <https://orcid.org/0000-0001-9613-0878>
D. Shtoda  <https://orcid.org/0000-0001-9831-6510>
V. Katrich  <https://orcid.org/0000-0001-5429-6124>
A. Bozhkov  <https://orcid.org/0000-0001-8418-5716>

REFERENCES

1. Ebrahimi A, Scott J, Ghorbani K. Dual-Mode Resonator for Simultaneous Permittivity and Thickness Measurement of Dielectrics. *IEEE Sensors Journal*. 2019;20(1):185-192.
2. Saeed K, Guyette A, Hunter I, Pollard R. Microstrip Resonator Technique for Measuring Dielectric Permittivity of Liquid Solvents and for Solution Sensing. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium;2007:1185-1188*.
3. Yamashita E, Mittra R. Variational Method for the Analysis of Microstrip Lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1968;16(4):251-256.
4. Bogner A, Steiner C, Walter S, Kita J, Hagen G, Moos R. Planar Microstrip Ring Resonators for Microwave-Based Gas Sensing. *Design Aspects and Initial Transducers for Humidity and Ammonia Sensing. Sensors*. 2017;17(10):2422.
5. Baghelani M, Hosseini N, Daneshmand M. Selective Measurement of Water Content in Multivariable Biofuel Using Microstrip Split Ring Resonators. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. 2020: 225-228.
6. Sun H, Li R, Tian G, Tang T, Du G, Wang B. Determination of complex permittivity of thin dielectric samples based on high-q microstrip resonance sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019.31-37.
7. Svacina J. Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1992;40(4):769-772.
8. Svacina J. A simple quasi-static determination of basic parameters of multilayer microstrip and coplanar waveguide. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 1992;2(10):385-387.
9. Wheeler H. Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1965;13(2):172-185.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-07>

УДК 537.87:621.31

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ РЕЧОВИН ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЗОНДУВАННЯМ У ХВИЛЕВОДІ

В.В. Овсяніков¹, М. М. Горобець², О.Р. Безносова¹

¹ Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, проспект Гагаріна 72, м. Дніпро, 49010, Україна
E-mail: thalia@i.ua

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи 4, Харків, 61022,
Україна

E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua
Надійшла до редакції 15 жовтня 2020 р.

Актуальність. Проблеми дистанційного неруйнуючого визначення й контролю показників якості широкої різноманітності матеріальних середовищ, зокрема, господарських і продовольчих товарів, актуальні практично для всіх областей народного господарства, науки й техніки. Актуальність наукових досліджень в області діелектрометрії в мікрохвильовому діапазоні обумовлена також потребами розвитку високих технологій у медицині й охороні здоров'я, народному господарстві в реальному часі.

Ціль роботи – розвиток методу мікрохвильовий хвильоводної діелектрометрії на основі застосування теорії багатопарових плоскошаруватих діелектричних структур до визначення комплексної діелектричної проникності речовини за значеннями коефіцієнта стоячої хвилі досліджуваних зразків у хвильоводі на дві близьких частотах.

Матеріали й методи. Дослідження засновані на добре вивчених явищах інтерференції електромагнітних хвиль на багатопарових плоскошаруватих діелектричних структурах. За рахунок використання математичної моделі явища інтерференції плоскої електромагнітної хвилі на тришаровій діелектричній структурі переборена неоднозначність визначення комплексної діелектричної проникності речовини класичним методом хвильоводної діелектрометрії в мікрохвильовому діапазоні по вимірюваннях коефіцієнта стоячої хвилі зразка діелектрика, розміщеного у хвильоводі, і фазового кута коефіцієнта відбиття.

Результати. Запропонований метод забезпечення однозначності визначення комплексної діелектричної проникності речовини у хвильоводній діелектрометрії на основі теорії багатопарових плоскошаруватих діелектричних структур. Метод приводить до явного вираження для комплексного коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі від досліджуваного зразка діелектрика, поміщеного в прямокутний хвильовід. Комплексна діелектрична проникність речовини визначається за значеннями коефіцієнта стоячої хвилі на дві близьких частотах у мікрохвильовому діапазоні. За знайденим значенням діелектричної проникності й тангенсу кута діелектричних втрат визначається параметр якості речовини шляхом порівняння й оптимізації двох цільових функцій, що включають отриманий у процесі вимірів і складений зарані масиви еталонних значень комплексної діелектричної проникності, і шляхом порівняння й оптимізації третьої цільової функції, що включає результати оптимізації двох попередніх функцій. Як приклад показника якості речовини визначена питома теплота згорання вугіль.

Висновки. Запропонований метод визначення комплексної діелектричної проникності й показників якості діелектричних матеріалів у мікрохвильовому діапазоні частот апробований у випадку різних типів вугіль, доведена його працездатність і забезпечення вірогідності результатів. Метод і реалізовані на його основі прилади й математичне забезпечення перспективні для неруйнуючого експрес - контролю діелектричних матеріалів і середовищ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікрохвилі, комплексна діелектрична проникність, хвильоводна діелектрометрія, оптимізація цільової функції, показник якості речовини, питома теплота згорання.

QUALITY CONTROL OF SUBSTANCES BY ELECTROMAGNETIC SENSING IN A WAVEGUIDE

V.V. Ovsyanikov¹, N.N. Gorobets², E.R. Beznosova¹

¹ O. Honchar Dnipro National University, 72 Gagarin Avenue, Dnipro, 49010, Ukraine
Email: thalia@i.ua

² V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Sq. Svobody, Kharkiv, 61022, Ukraine
Email: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

Relevance. The problems of remote non-destructive determination and control of quality indicators of a wide variety of material environments, in particular, household and food products, are relevant practically for all areas of the national economy, science and technology. The relevance of scientific research in the field of dielectrometry in the microwave range is also due to the needs for the development of high technologies in medicine and health care, the national economy in real time.

The aim of this work is to develop the method of microwave waveguide dielectrometry based on the application of the theory of multilayer plane-layered dielectric structures to the determination of the complex dielectric constant of a substance from the values of the standing wave ratio of the samples under study in a waveguide at two close frequencies.

Materials and methods. The research is based on well-studied phenomena of interference of electromagnetic waves on multilayer plane-layered dielectric structures. By using a mathematical model of the phenomenon of interference of a plane electromagnetic wave on a three-layer dielectric structure, the ambiguity of determining the complex dielectric constant of a substance by the classical method of waveguide dielectrometry in the microwave range by measuring the standing wave ratio of a dielectric sample placed in the waveguide and the phase angle of the reflection coefficient is overcome.

Results. A method is proposed for ensuring the unambiguity of determining the complex dielectric constant of a substance in waveguide dielectrometry on the basis of the theory of multilayer plane-layered dielectric structures. The method leads to an explicit expression for the complex reflection coefficient of an electromagnetic wave from the investigated dielectric sample placed in a rectangular waveguide. The complex dielectric constant of a substance is determined from the values of the standing wave ratio at two close frequencies in the microwave range. By the found value of the dielectric constant and the tangent of the dielectric loss angle, the quality parameter of the substance is determined by comparing and optimizing two objective functions, including the arrays of reference values of the complex dielectric constant obtained in the course of measurements and compiled in advance, and by comparing and optimizing the third objective function, previous functions. As an example of an indicator of the quality of a substance, the specific heat of combustion of coal was determined.

Conclusions. The proposed method for determining the complex dielectric constant and quality indicators of dielectric materials in the microwave frequency range has been tested in the case of various types of coals, its efficiency has been proven and the reliability of the results has been proven. The method and the devices and software implemented on its basis are promising for non-destructive express control of dielectric materials and media.

KEY WORDS: microwaves, complex dielectric constant, waveguide dielectrometry, objective function optimization, material quality index, specific heat of combustion.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВЕЩЕСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЗОНДИРОВАНИЕМ В ВОЛНОВОДЕ

В.В. Овсяников¹, Н. Н. Горобец², Е.Р. Безносова¹

¹ Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, проспект Гагарина 72, г. Днепр, 49010, Украина

E-mail: thalia@i.ua

² Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы 4, Харьков, 61022, Украина

E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

Актуальность. Проблемы дистанционного неразрушающего определения и контроля показателей качества широкого разнообразия материальных сред, в частности, хозяйственных и продовольственных товаров, актуальны практически для всех областей народного хозяйства, науки и техники. Актуальность научных исследований в области диэлектromетрии в микроволновом диапазоне обусловлена также потребностями развития высоких технологий в медицине и здравоохранении, народном хозяйстве в реальном времени.

Цель работы – развитие метода микроволновой волноводной диэлектromетрии на основе применения теории многослойных плоскостойких диэлектрических структур к определению комплексной диэлектрической проницаемости вещества по значениям коэффициента стоячей волны исследуемых образцов в волноводе на двух близких частотах.

Материалы и методы. Исследования основаны на хорошо изученных явлениях интерференции электромагнитных волн на многослойных плоскостойких диэлектрических структурах. За счет использования математической модели явления интерференции плоской электромагнитной волны на трехслойной диэлектрической структуре преодолена неоднозначность определения комплексной диэлектрической проницаемости вещества классическим методом волноводной диэлектromетрии в микроволновом диапазоне по измерениям коэффициента стоячей волны образца диэлектрика, размещенного в волноводе, и фазового угла коэффициента отражения.

Результаты. Предложен метод обеспечения однозначности определения комплексной диэлектрической проницаемости вещества в волноводной диэлектromетрии на основе теории многослойных плоскостойких диэлектрических структур. Метод приводит к явному выражению для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от исследуемого образца диэлектрика, помещенного в прямоугольный волновод. Комплексная диэлектрическая проницаемость вещества определяется по значениям коэффициента стоячей волны на двух близких частотах в микроволновом диапазоне. По найденному значению диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь определяется параметр качества вещества путем сравнения и оптимизации двух целевых функций, включающих полученный в процессе измерений и составленный заранее массивы эталонных значений комплексной диэлектрической проницаемости, и путем сравнения и оптимизации третьей целевой функции, включающей результаты оптимизации двух предыдущих функций. В качестве примера показателя качества вещества определена удельная теплота сгорания углей.

Выводы. Предложенный метод определения комплексной диэлектрической проницаемости и показателей качества диэлектрических материалов в микроволновом диапазоне частот апробирован в случае различных типов углей, доказана его работоспособность и обеспечение достоверности результатов. Метод и реализованные на его основе приборы и математическое обеспечение перспективны для неразрушающего экспресс - контроля диэлектрических материалов и сред.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроволны, комплексная диэлектрическая проницаемость, волноводная диэлектрометрия, оптимизация целевой функции, показатель качества вещества, удельная теплота сгорания.

ВСТУП

В даний час однією з актуальних проблем народного господарства є визначення показників якості широкої різноманітності речовин і товарів, як електротехнічної промисловості, так і різних палив, руд, будівельних матеріалів, господарських і продовольчих товарів, і інших речовин з діелектричними властивостями, що характеризують певною мірою показники якості даних речовин. Дослідженню відносної комплексної діелектричної проникності (КДП) речовин із застосуванням електромагнітного (ЕМ) поля присвячений ряд робіт [1 - 6] та інших актуальних до нашого часу і пізніших публікацій [7 - 15, 17]. Дані про КДП деяких речовин приведені в таблиці 1.

В даній статті наведені результати досліджень і визначення відносної КДП речовин ($\bar{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$) і її використання для визначення їх показників якості.

Таблиця 1. Дані з літератури і результати вимірювань КДП твердих і рідких речовин

Речовина	Параметри речовин			f , ГГц	Примітка
	ϵ'	ϵ''	tg δ		
Вода дистильована	79,3	7,9	0,1	1,74	[2, 4, 6] і ін.
	75,8	10,3	0,14		Вимірювання
	76,3	15,6	0,20	3,65	[2, 4, 6] і ін.
	74,3	13,2	0,18		Вимірювання
Ацетон	21,4	–	–	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	20,9	–	–		Вимірювання
Олія трансформаторна	2,1 – 2,3	–	$(2 - 5) \times 10^{-3}$	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	2,178	–	$5,64 \times 10^{-3}$		Вимірювання
Поліетилен	2,25	–	2×10^{-4}	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	2,18	–	$1,5 \times 10^{-4}$		Вимірювання
Фторопласт-4	1,9 – 2,2	–	$(2-3) \times 10^{-4}$	3,0	[2, 4, 6] і ін.
	2,0	–	$2,5 \times 10^{-4}$		Вимірювання
Вугілля марки ТК	4,1 – 5,0	–	–	1,0	[2, 4, 6] і ін.
	4, 5	–	0,035		Вимірювання
Вугілля - антрацит	> 5,0	–	–	1,0	[2, 4, 6] і ін.
	5,5	1,4	0,25		Вимірювання

ПРО НЕДОНЕДОЛКИ ХВИЛЕВОДНОГО МЕТОДУ БРАНДТА-ХАРВЕЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КДП ДІЕЛЕКТРИКІВ

В роботах Брандта [1], Харвея [2] і інших для визначення КДП діелектричного зразка товщиною d хвильовим методом запропоновано наведене нижче комплексне трансцендентне рівняння (1).

$$\frac{th(hd)}{hd} = -i \frac{\lambda_B}{2\pi d} \cdot \frac{1 - iK_C \operatorname{tg}\theta_\phi}{K_C - i \operatorname{tg}\theta_\phi}, \quad (1)$$

Це рівняння включає заздалегідь визначені значення за допомогою вимірювальної лінії (ВЛ) або іншого приладу: коефіцієнту стоячої хвилі за напругою (K_C), довжини хвилі у хвильоводі λ_B , фазового кута коефіцієнту відбиття $\theta_\phi = \frac{2\pi}{\lambda_B} x_m$, який відповідає відстані x_m від поверхні зразка до першого мінімуму стоячої хвилі. Також включає товщину досліджуваного зразка d і поздовжнє хвильове h (або постійну поширення) ЕМ хвилі у хвильоводі зі зразком

$$h(f, \bar{\epsilon}) = \sqrt{k^2 - \chi^2} = \sqrt{(2\pi f / c)^2 \cdot \bar{\epsilon} - \chi^2}, \quad (2)$$

де: χ – поперечне хвильове число для даного типу хвилі у прямокутному хвильоводі π/a , розмір широкої стінки хвильовода a, робоча частота f і швидкість поширення ЕМ потужності у вільному просторі c.

Після отримання та підстановки в (1) зазначених вище параметрів з цього виразу визначається КДП досліджуваного зразка, присутня в вираженні (2). Визначення КДП можливо виконувати за допомогою вимірювальної лінії (ВЛ), наприклад типу Р1-17 та подібних їй, електромеханічна частина яких виконана з високою точністю. При цьому розглянутий вище відомий метод визначення КДП речовин має такі недоліки:

1. Неможливість аналітичного рішення рівняння (1), а при його численному рішенні отримуємо рівномірну безліч різних результуючих значень $\bar{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$, обумовлених періодичністю входять до нього функцій, що приводить до неоднозначності і невизначеності результату (Метод Брандта-Харвея, таблиця 2), що є неприйнятним для використання на практиці.

2. Так як одним з важливих вихідних параметрів при визначенні КДП за допомогою формул (1) і (2) є K_C у хвилеводі, при вимірюваннях великих значень ($K_C > 2$) іноді знижується точність отриманого результату. Це приводить до зростання похибки визначення КДП по формулам (1) і 2). До того ж дослідження показали, що K_C для різних видів речовин може приймати значення приблизно від 1,1 до 10 і вище. При цьому для звичайних ВЛ їх розробники гарантують відносну похибку вимірювання K_C в межах 2 – 6 % тільки при $K_C < 2$ і частоті НВЧ генератора 0,5 – 3 ГГц, а при $K_C > 2$ точність вимірювань K_C взагалі не гарантована. Це обумовлено також тим, що при великих значеннях K_C важко досить точно визначити його значення за звичайною формулою $K_C = U_{\max}/U_{\min}$, тому, що значення U_{\max} часто великі і перевищують максимальну межу шкали вимірювального приладу, а значення U_{\min} вельми малі і знаходяться поблизу області шумів. В літературі [1, 2] та іншої запропоновані більш точні методи визначення K_C , що однак ускладнює процес вимірювання і автоматизацію визначення K_C і КДП. Також відзначимо, що на відміну від хвилеводного методу визначення K_C , розглянутого вище, його можна визначити ЕМ зондуванням досліджуваної речовини у вільному просторі, наприклад, роботи [9, 12] та інші, однак такий метод не відповідає тематиці даної статті і буде розвинутий пізніше.

Нижче запропоновано метод усунення зазначених вище недоліків методу Брандта-Харвея при визначенні КДП речовин шляхом застосування теорії багат шарових структур.

ВИЗНАЧЕННЯ КДП РЕЧОВИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР

Для усунення зазначеного вище недоліку методу Брандта-Харвея [1, 2] - тобто неоднозначності визначення КДП із застосуванням виразів (1) і (2) пропонується застосувати дещо інший підхід з використанням теорії багат шарових діелектричних структур [3]. Відповідно до цієї теорії одним з шарів даної структури (рис. 1) може бути досліджувана речовина 2 з товщиною, сумірною з довжиною робочої ЕМ хвилі, падаючої на межі розділу середовищ повітря 1, досліджуваного речовини 2 і повітря 3. На рис.2 показаний загальний вигляд діючого макету хвилеводної вимірювальної комірки (ХВК), що реалізує структуру (рис. 1), під'єднуємого со своїм фланцем до вимірювального НВЧ приладу. З урахуванням позначення через d товщини досліджуваного шару 2 запропоновані вирази для комплексних коефіцієнтів відбиття R від кордонів розділу шарів 1 - 2 і 2 - 3 для ЕМ хвилі типу ТЕ. При цьому середовища 1 - 3 знаходяться у вільному просторі і їх розміри в горизонтальній площині прагнуть до нескінченності.

Вираз для коефіцієнтів відбиття ЕМ хвилі для тришарової системи (рис. 2) має вигляд:

$$R = \frac{R_{12} + R_{23} e^{-2i\beta}}{1 + R_{12} R_{23} e^{-2i\beta}}, \quad (3)$$

де: $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta_2$ и $n_j = \sqrt{\epsilon'_j - i\epsilon''_j}$, $j = 1, 2, 3 \dots$

n_j – коефіцієнт заломлення середовища.

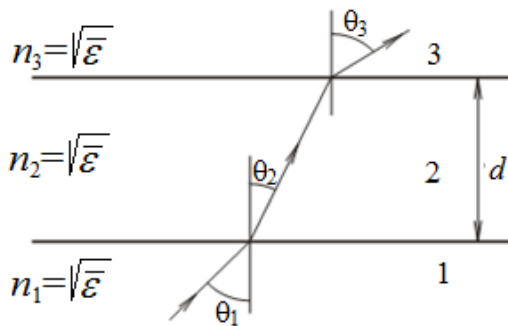


Рис. 1. Тришарова діелектрична структура [3] для дослідження взаємодії шарів між собою: повітря - 1, досліджувана речовина - 2, повітря - 3.

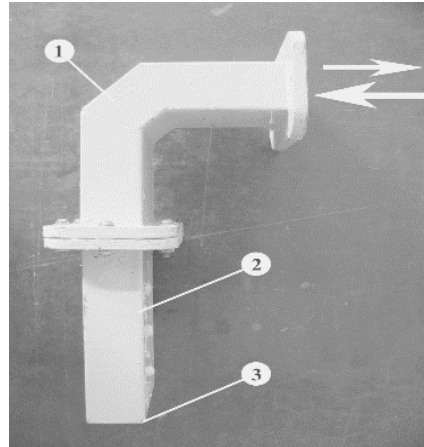


Рис. 2. Діючий зразок ХВК: 1 - невідбивальний вигин прямокутного хвильоводу; 2 - контейнер з досліджуваною речовиною; 3 – короткозамикач

Зокрема, для нормального падіння ЕМ хвилі на цю структуру ($\theta = 0^0$) маємо такі вирази:

$$R_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad R_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}. \quad (4)$$

Перетворимо записані математичні залежності (3) і (4) для коефіцієнтів відбиття у вільному просторі в реальну розрахункову модель для випадку хвильоводної структури ХВК (рис. 2) і тришарового середовища в замкнутому просторі з відрізка металевого прямокутного хвильоводу, всередині якого розповсюджується плоска ЕМ хвиля типу H_{10} від генератора в напрямку ХВК. При цьому для прямокутного хвильоводу з розміром широкої стінки рівним a , з урахуванням робіт [1, 2] поздовжнє хвильове число (2) еквівалентне коефіцієнту заломлення n в роботах [3, 4]. Тоді вираз (4) для комплексного коефіцієнта відбиття хвилі від першого кордону середовищ має вигляд

$$R_{12} = \frac{h_1(f) - h_2(f, \bar{\epsilon})}{h_1(f) + h_2(f, \bar{\epsilon})} = \frac{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} - \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} + \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}, \quad (5)$$

де: h_1 - поздовжнє хвильове число (2) або постійна поширення ЕМ хвилі для середовища 1; h_2 - поздовжнє хвильове число для середовища 2; $\bar{\epsilon}$ - комплексна відносна діелектрична проникність середовища 2; $k_0 = 2\pi/\lambda$ - хвильове число середовища 1; f - робоча частота ЕМ хвилі.

З огляду на те, що днище 3 ХВК з досліджуваним зразком (рис. 3) - металеве, у вираженні (3) коефіцієнт відбиття від короткозамикача 3 дорівнює $R_{23} = -1$ (за умови, що втрати в ньому не враховуються) воно набуває вигляду

$$R_{(f, \bar{\epsilon})} = \frac{R_{12} - e^{-2i\beta}}{1 - R_{12} e^{-2i\beta}}. \quad (6)$$

Тоді з урахуванням (6) для випадку наявності досліджуваного зразка речовини у середині ХВК, отримаємо розрахункову формулу для загального комплексного коефіцієнту відбиття $R(f, \bar{\epsilon}, d)$ у вигляді:

$$R(f, \bar{\epsilon}, d) = \frac{R_{12}(f, \bar{\epsilon}) - \exp\left(-i 2d \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}\right)}{1 - R_{12}(f, \bar{\epsilon}) \cdot \exp\left(-i 2d \sqrt{k_0^2 \cdot \bar{\epsilon} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}\right)}, \quad (7)$$

де R_{12} визначено формулою (5).

Для визначення КДП речовини, що входить до співвідношень (5-7) беремо до уваги відоме співвідношення між модулем коефіцієнта відбиття R і КСХН [1 - 5] у вигляді

$$\left| R_i(\varepsilon', \varepsilon'', f_i, d) \right| = \frac{K_{ci}^{\text{изм}} - 1}{K_{ci}^{\text{изм}} + 1}, \quad (8)$$

де $i = 1, 2, 3 \dots$ - номер частоти заданого діапазону, на якій визначається КСХН. За допомогою виразів (7) та (8) можна визначити КДП речовини [8, 13, 14] тільки за допомогою КСХН, що вельми важливо. При визначенні КДП вимірювання КСХН виконуємо на двох близько розташованих частотах для значень КСХН $i = 1, 2$, при умові, що систематична похибка відліку частот вимірювального приладу зведена до мінімуму і значення КДП між цими частотами величина приблизно постійна. На цьому інтервалі двох відліків $i = 1, 2$ визначаємо дійсну і уявну частини КДП даної речовини. Аналогічним чином визначаємо КСХН і потім КДП для наступної пари відліків $i = 2, 3$ близько розташованих частот. У якості вимірювальної апаратури для визначення КСХН можна застосовувати вимірювальну лінію. Для автоматизації вимірювань доцільно використовувати модульний автоматизований вимірювач КСХН та ослаблення типу P2 або P2M, векторний вимірювач Spectrum Analyzer R & S FSH (Німеччина), і іншу апаратуру. У таблиці 2 наведені результати визначення КДП двома розглянутими вище методами

Таблиця 2. Результати визначення КДП трьох зразків вугілля марки ТК

Номер зразка	Метод Брандта-Харвея Частота вимірювань 3, 57 ГГц. Вимірювальний прилад –ВЛ типу P1-17)				Запропонований метод Частоти вимірювань K_{c1} і $K_{c2} : f_1$ и $f_2 =$ 4,0 ГГц і 4, 15 ГГц, відповідно. Вимірювальний прилад - типу P2-53			
	K_c	θ_ϕ	ε'	ε''	K_{c1}	K_{c2}	ε'	ε''
1	4,41	4,52	2,78 4,03 5,54	0,19 0,31 0,48	2,20	2,30	4,46	0,25
2	5,12	4, 54	2,79 4,07 5,62	0,17 0,27 0,41	1,95	2, 01	3,80	0,16
3	4,58	4, 22	2,60 3,77 5,19	0,15 0,22 0,29	1,44	1,48	3,38	0,12

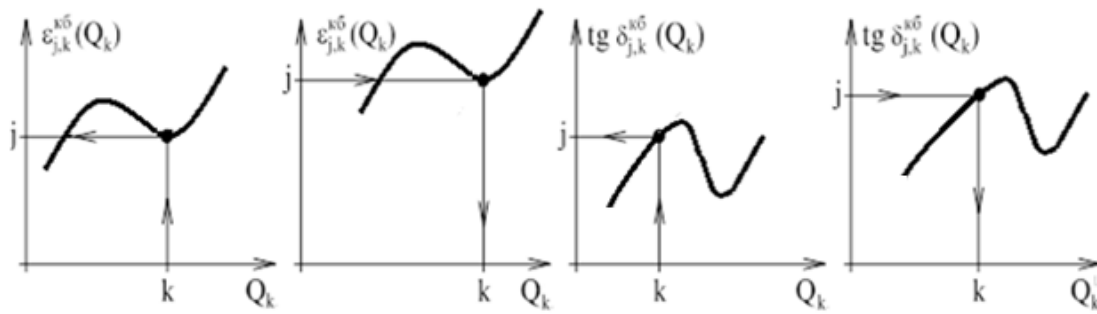
В даній таблиці: θ_ϕ - фазовий кут коефіцієнту відбиття від досліджуваного зразка $\theta_\phi = \frac{2\pi}{\lambda_B} x_m$, де λ_B - довжина хвилі у вимірювальному хвилеводі і ХВК; x_m - відстань від поверхні зразка у ХВК до першого мінімуму стоячої хвилі.

З таблиці 2 випливає, що, якщо при визначенні КДП відомим методом Брандта-Харвея отримуємо невизначену безліч рішень трансцендентного рівняння (1), що неприйнятно, то за допомогою виразів (5) - (8) такої невизначеності результатів КДП можна уникнути

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕЧОВИНИ ПРИ ВІДОМОМУ ЗНАЧЕННІ ЙОГО КДП

Після відшукування значення КДП досліджуваної речовини для визначення даного нас його параметра якості (ПЯ) застосовуємо відомий метод зіставлення знайденого значення КДП з масивом заздалегідь накопичених каліброваних (еталонних) значень ПЯ даної речовини з відповідними їм КДП, тобто за правилом: «відома КДП ймовірної речовини - відповідне їй значення ПЯ, подібно роботам [9, 12] та інших. На першому етапі визначення ПЯ даної речовини і завчасно виконуємо градування, тобто, вимірюємо за допомогою НВЧ апаратури ЕМ характеристики різних речовин, в даному випадку їх КДП і ПЯ на одній або декількох частотах мікрохвильового діапазону і створюємо масив каліброваних даних з інформацією про всі можливі варіанти речовин, що підлягають дослідженню. Процес створення масивів даних з калібрувальними значеннями дійсної частини КДП $\varepsilon_{j,k}^{\text{КБ}}(Q)$ і тангенса кута діелектричних

втраг $tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$ - показаний на спрощених графіках залежності $\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q)$ і $tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$ від ПЯ речовин (Q). (Рис. 3, а і рис.4, а).



а) Калібрування залежності

б) Визначення ПЯ речовини (Q)

а) Калібрування залежності

б) Визначення ПЯ речовини (Q)

$$\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q)$$

$$tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$$

Рис. 3. Спрощені графіки визначення ПЯ речовини по дійсній частині її КДП ε' .

Рис. 4. Спрощені графіки визначення ПЯ речовини по значенням її $tg\delta$

Ці калібрувальні характеристики представляємо у вигляді таблиці дискретних значень відповідності КДП заздалегідь відомим ПК речовин. Отримані результати перетворюємо в цифровий код і зберігаємо в пам'яті ЕОМ у вигляді масиву еталонних значень. На другому етапі вимірюємо за допомогою тієї ж апаратури на тих же частотах КДП досліджуваної речовини з ПК, що підлягають визначенню. На третьому етапі проводимо порівняння і оптимізацію даних першого і другого етапів вимірювань з використанням отриманого на першому етапі масиву калібрувальних даних і знайдених на другому етапі даних вимірювань $\varepsilon^{узМ}(Q)$ і $tg\delta^{узМ}(Q)$ досліджуваного невідомої речовини, шляхом зіставлення калібрувальних і виміряних значень: КДП - відповідно ПЯ речовини, як показано на спрощених графіках рис. 3, б і рис. 4, б. На цьому ж етапі визначення шуканого значення ПК речовини (Q), відповідного вимірюваної парі параметрів $\varepsilon^{узМ}(Q)$ і $tg\delta^{узМ}(Q)$, на початку застосовуємо процедуру порівняння і оптимізації виміряних і калібрувальних значень КДП речовини шляхом мінімізації двох цільових функцій за двома параметрами j і k у вигляді:

$$X_{\varepsilon}(Q_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q) - \varepsilon^{узМ}(Q) \right] / \varepsilon^{узМ}(Q) \right\}^2, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

$$X_{\varepsilon}(Q_k) \Rightarrow \min, \tag{9}$$

$$X_{tg\delta}(Q_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[tg\delta_{j,k}^{кб}(Q) - tg\delta^{узМ}(Q) \right] / tg\delta^{узМ}(Q) \right\}^2, \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$X_{tg\delta}(Q_k) \Rightarrow \min, \tag{10}$$

де j – номери відліків $j = 1, 2, \dots, N$ критеріїв оптимізації $\varepsilon_{j,k}^{кб}(Q)$; $tg\delta_{j,k}^{кб}(Q)$ по вертикальній осі значень (рис. 4, 5); k – номери відліків $k = 1, 2, \dots, K$ шуканих параметрів $Q_{\varepsilon_1}, Q_{\varepsilon_2}, \dots, Q_{\varepsilon_k}$ и $Q_{tg\delta_1}, Q_{tg\delta_2}, \dots, Q_{tg\delta_k}$ по горизонтальній осі цих значень.

З урахуванням мінімальних значень цільових функцій (9) і (10), знаходимо ряд значень ПЯ речовин $Q_{\varepsilon_1}, Q_{\varepsilon_2}, \dots, Q_{\varepsilon_k}$ и $Q_{tg\delta_1}, Q_{tg\delta_2}, \dots, Q_{tg\delta_k}$, які відповідають цим мінімумам.

Далі виробляємо зіставлення відібраних значень ПЯ із загального масиву даних, знайдених при мінімізації (9) зі значеннями ПЯ речовин, знайдених при мінімізації (10) у відповідності з наступною цільовою функцією

$$X(Q_k) = \left| Q_i^r(\varepsilon_{j,k}^{K\bar{b}}) - Q_i^r(\text{tg}\delta_{j,k}^{K\bar{b}}) \right|, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad X(Q_k) \Rightarrow \min, \quad (11)$$

В результаті мінімізації цільової функції (11) отримуємо остаточне значення ПЯ речовини, відповідне початковому значенню його КДП (ε' і $\text{tg}\delta$).

Розглянемо приклад визначення такого ПЯ як питома теплота згоряння (ПТЗ), Дж / кг, одної з горючих речовин таких як вугілля - в залежності від відомого значення його КДП. Відповідно до запропонованих вище трьох етапів визначення ПЯ речовин в залежності від їх КДП на першому етапі отримуємо дискретні калібрувальні залежності між УТС (ε' і $\text{tg}\delta$) і КДП для ряду різних вугілля марки ТК. Ці дискретні значення для зручності пояснення процесу визначення ПЯ апроксимовано гладкими кривими і наведені на рис. 5. Як видно з графіків, в даному випадку КДП різних зразків вугілля значно змінюють свою ПТЗ в межах 20-23 МДж / кг, а саме: крива 1 - $\varepsilon_{j,k}^{K\bar{b}}(Q)$ істотно коливається при зростанні

значення ε' і три рази перетинає горизонтальну пунктирну лінію заданого значення $\varepsilon^{u3M} = 4,4$, а крива 2 - $\text{tg}\delta_{j,k}^{K\bar{b}}(Q)$ наростаючі коливається більш різко і також три рази перетинає задану

горизонтальну пунктирну лінію $\text{tg}\delta^{u3M} = 30 \times 10^{-3}$, що має бути враховано в комп'ютерній програмі визначення ПЯ речовини запропонованим в розділі 3 методом. Відзначимо, що подібна ситуація з коливаннями КДП і УТС вугілля та інших речовин може мати місце на практиці. На другому етапі для визначення ПЯ одного з вугілля марки ТК отримані, наприклад, такі значення КДП $\varepsilon^{u3M} = 4,4$ і $\text{tg}\delta^{u3M} = 30 \times 10^{-3}$ (рівні цих значень відзначені пунктирними горизонтальними лініями на графіках рис. 5). На третьому етапі як показано на спрощених графіках рис. 3, б і рис. 4, б. визначаємо ПЯ відповідного вугілля порівнянням і оптимізацією (мінімізацією) за допомогою цільових функцій (9) і (10) з урахуванням роботи [16]. Результат представлений на графіках (рис.5) вертикальними лініями 1 і 2 зі стрілками на горизонтальній осі: «1» - результат визначення ПТЗ (Q) за допомогою цільової функції (9) і «2» - за допомогою функції (10). Таким чином, за допомогою цільових функцій (9) і (10) знайдені ПЯ вугілля окремо в залежності від заданих параметрів $\varepsilon^{u3M}(Q)$ і $\text{tg}\delta^{u3M}(Q)$, що показано на графіках (рис.5) вертикальними лініями 1 і 2 зі стрілками на горизонтальній осі. Як впливає з графіків, має місце певна різниця між результатами пошуку ПЯ вугілля в залежності від значень його ε' і $\text{tg}\delta$. Ці результати на горизонтальній осі графіків рис. 5 показані дужками «а», «б» і «с». Найменша різниця між найближчими шуканими Q належить скобці «с», що відповідає мінімальному значенню цільової функції (11), призначеної для «об'єднання» значень ПЯ, отриманих в залежності від значень його ε' і $\text{tg}\delta$.

Остаточне рішення даного завдання визначення ПЯ речовини буде шукане значення ПТЗ = 21,7 МДж, що відповідає скобці «с»

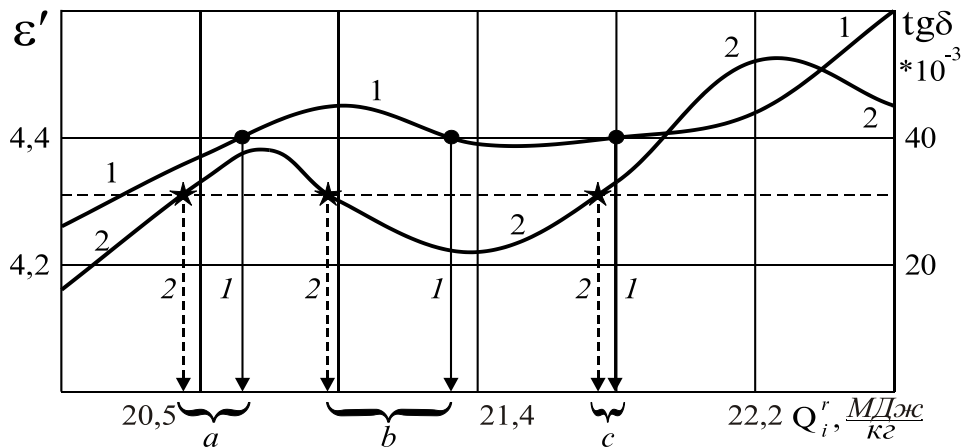


Рис. 5. Експериментальні калібрувальні залежності КДП на частоті 3,43ГГц набору різних вугіль марки ТК в залежності від їх ПТЗ (Q): крива 1 – $\varepsilon_{j,k}^{KB}(Q)$; 2 – $tg\delta_{j,k}^{KB}(Q)$

Різниця між знайденими значеннями ПТЗ (лапки «а», «б» і «с» на графіках рис.5) виникла через похибки вимірювань КДП параметрів поточних і калібрувальних зразків, недостатню кількість варіантів калібрувальних значень в базі даних ПТЗ і малому ступені дискретизації і квантування аналогових даних за допомогою аналого-цифрового перетворювача при записі в цифровому вигляді в пам'ять ЕОМ значень поточних і калібрувальних значень. При цьому очевидно, чим менше інтервали дискретизації і квантування вимірюваних аналогових значень ПТЗ і ПЯ, тим менше будуть інтервали «а», «б» і «с» і менше похибка при визначенні шуканого значення ПЯ речовини для даного ПТЗ.

ВИСНОВКИ

Наведені в статті результати досліджень двох методів визначення КДП речовин, що володіють діелектричними властивостями, показали, що перший відомий хвилеводний метод не зовсім придатний для практичного застосування через неоднозначність одержуваного результату, а другий запропонований метод позбавлений цього недоліку і дозволяє однозначно визначити показник якості речовини по відомим значенням його КДП, для визначення якого досить знати КСХН проби на двох найближчих частотах. Запропонований в статті другий метод контролю якості речовин може бути корисним як в області промисловості, для контролю якості товарів народного споживання, а також для генеруючих енергію підприємств для контролю параметрів вугілля, газу та інших палив, в тому числі визначення октанового числа і забрудненості нафтопродуктів та інших галузей народного господарства. Розроблений метод і його математичне можуть бути застосованими для визначення діелектричної проникності і параметрів якості багатокомпонентних діелектричних сумішей і розчинів [17]. Також може знайти застосування для оцінки ослаблення ЕМ хвилі в різних перешкодах таких як рослинність, будівлі, споруди та інші на шляху її поширення у НВЧ каналах наземного і супутникового радіозв'язку. Реалізація наведених у статті алгоритмів визначення якості речовин, аналого-цифрове перетворення значень КДП і ПЯ речовин, створення електронної таблиці їх значень, запам'ятовування цього масиву, мінімізація цільових функцій і інші операції виконуються за допомогою відповідного програмного забезпечення на ЕОМ. Достовірність і похибка визначення параметрів якості речовин визначається похибкою застосовуваної вимірювальної апаратури, похибкою чисельних розрахунків і параметрами навколишнього середовища.

Автори статті висловлюють подяку к.т.н., доценту Дніпровського національного університету імені О. Гончара Бухарову С.В. за консультації при підготовці статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брандт АА. Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Физматизд, 1964. 404с.
2. Харвей АФ. Техника сверхвысоких частот. Перевод с англ. под ред. Сушкевича ВИ. Т.1. Москва. 1965. 783 с.
3. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. Перев. с англ. Под ред. Мотулевича ГП. Издательство «Наука». ГРФМЛ.-Москва. 1973 г.
4. Надь ШБ. Диэлектрометрия. Перев. с венг. под ред. Малова ВВ. Москва: Энергия, 1976. 200 с.
5. Викторов ВА, Викторов ВА, Лункин БВ, Совлуков АС. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 208 с.
6. Ovsyanikov VV. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. Proceedings of the Intern. Confer. on Actual Problems of Measuring Techniq. Kyiv. Ukraine 7-10 Sept 1998. p. 224-225.
7. Gorobets NN, Ovsyanikov VV, Morozov BM, Beznosova ER, Tsytko LZ. Broadband antennas with reactive loads. 9th International Conference UWBUSIS. Sept 4-7 2018. Odessa, Ukraine. p. 353-356.
8. Мищенко СВ, Малков НА. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов. Тамбов: Изд. Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 128 с.
9. Овсяніков ВВ, Бухаров СВ, Овсяніков ВолВ. Деклараційний патент України на винахід № 71301А. Спосіб експрес-контролю якісних характеристик речовин у НВЧ діапазоні. 15.11.04, Бюл № 11.
10. Куценко ВП, Трегубов НФ. Радиоволновой контроль изделий из диэлектрических материалов. 17th Int. Crimean Confer. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2007). 10-14 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine.
11. Куценко ВП, Яненко ОП. Радиометричний неруйнівний контроль діелектричних виробів. Вісник НТУУ «КПІ» Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2010;41:124-131.
12. Кузнецов ГВ, Випанасенко СІ, Овсяніков ВВ, Вовк СМ, Гусев ОЮ, Овсяніков ВолВ, та інші. Патент України на винахід № 90540 С2. Спосіб автоматизованого контролю якісних характеристик речовин у мікрохвильованому діапазоні та пристрій для його реалізації / - 11.05.2010, Бюл. № 9.

13. Бухаров СВ, Овсяніков ВолВ. Діагностика параметрів якості вугілля і рідких нафтопродуктів електромагнітними методами. Стаття Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіопаратобудування. 2011;45:120-129.
14. Сук АФ, Себко ВП, Сучков ГМ, Лазаренко АГ, Музил ВВ, Майстренко АМ. Современные методы неразрушающего контроля в машиностроении. Учебные пособия - НТУ "ХПИ". Харьков. 2012. 173 с.
15. Овсяніков Вл. Система інформаційного забезпечення теплогенеруючих об'єктів показателями якості палива. Тезиси доповіді. Всеукраїнська НП конференція молодих учених і студентів «Перспективні напрямки сучасної електроніки ІТ та КС» MEICS – 25-27. 11. 2015. Дніпропетровськ. Україна. С. 91-93.
16. Атрошенко ЛМ, Горобец НН, Сафронова ЛП. Комплексная диэлектрическая проницаемость дисперсных гетерогенных системных компонент. Вісник Харківськ. нац. ун-ту ім.В.Н.Каразіна, №712, Радіофізика та електроніка, 2006;10:10-16.
17. Моисеев НН, Иванілов ЮП, Столярова ЕМ. Методы оптимизации. Москва: Наука, 1978. 352с.

REFERENCES

1. Brandt AA. Research of dielectrics at microwave frequency. Moscow: Fizmatizd, 1964. P. 404. (Russian).
2. Harvey AF. Microwave technology. Translation from English. ed. Sushkevich VI. Vol. 1. Moscow. 1965. p. 783. (Russian).
3. Born M, Wolf E. Fundamentals of optics. Transl. from English. Ed. Motulevich GP. Publishing house "Science". GRFML.-Moscow. 1973. (Russian).
4. Nagy ShB. Dielectrometry. Transl. with Hung. ed. Malova VV. Moscow: Energiya, 1976. p. 200. (Russian).
5. Viktorov VA, Viktorov VA, Lunkin BV, Sovlukov AS. Radio wave measurements of technological process parameters. Moscow: Energoatomizdat, 1989, p. 208. (Russian)
6. Ovsyanikov VV. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. Proceedings of the Intern. Confer. on Actual Problems of Measuring Techniq. Kyiv. Ukraine 7-10 Sept 1998. p. 224-225.
7. Gorobets NN, Ovsyanikov VV, Morozov BM, Beznosova ER, Tsytko LZ. Broadband antennas with reactive loads. 9th International Conference UWBUSIS. Sept 4-7 2018. Odessa, Ukraine. p. 353-356.
8. Mishchenko SV, Malkov NA. Design of radio wave (microwave) devices for non-destructive testing of materials. Tambov: Ed. Tamb. state tech. University, 2003.128 p. (Russian).
9. Ovsyanikov VV, Bukharov SV, Ovsyaniov VolV. Declarative patent of Ukraine for the invention № 71301A. Method of express control of quality characteristics of substances in microwave range. 15.11.04, Bull № 11. (Ukrainian).
10. Kutsenko VP, Tregubov NF. Radivolnovoy control of products made of dielectric materials. 17th Int. Crimean Confer. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2007). 10-14 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine. (Russian).
11. Kutsenko VP, Yanenko OP. Radiometric non-destructive testing of dielectric products. Bulletin of NTUU "KPI" Series Radio Engineering. Radio equipment. 2010;41:124-131. (Ukrainian).
12. Kuznetsov GV, Vypanasenko SI, Ovsyanikov VV, Vovk SM, Gusev OY, Ovsyanikov VolV, and others. Ukrainian patent for invention № 90540 C2. Method of automated control of qualitative characteristics of substances in microwave range and device for its realization / - 11.05.2010, Bull. № 9. (Ukrainian).
13. Bukharov SV, Ovsyanikov VolV. Diagnosis of quality parameters of coal and liquid oil products by electromagnetic methods. Article Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio equipment. 2011; 45: 120-129. (Ukrainian).
14. Suk AF, Sebko VP, Suchkov GM, Lazarenko AG, Musil VV, Maistrenko AM. Modern methods of non-destructive testing in mechanical engineering. Textbooks - NTU "KhPI". Kharkov. 2012.173 p. (Russian).
15. Ovsyanikov VI. Information system for providing heat generating facilities with fuel quality indicators. Abstracts of additional information. All-Ukrainian NP conference of young scientists and students "Perspectives in the field of modern electronics IT and KS" MEICS - 25-27. 11. 2015. Dnipropetrovsk. Ukraine. S. 91-93. (Russian).
16. Atroshenko LM, Gorobets NN, Safronova LP. Complex dielectric constant of dispersed heterogeneous system components. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2006;10(712):10-16. (Russian).
17. Moiseev NN, Ivanilov YP, Stolyarova EM. Optimization methods. Moscow: Nauka, 1978.352s. (Russian).

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-08>

УДК 537.876.23:537.877

ПРО АНОМАЛЬНЕ ПОГЛИНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СУБХВИЛЬОВИМ МЕТАЛЕВИМ ДРОТОМ

М.Г. Кокодій, В.О. Маслов, К.І. Мунтян

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: v.a.maslov@karazin.ua

Надійшла до редакції 30 вересня 2020 р.

Актуальність. Розглянуто ефект аномально сильного поглинання, розсіювання і ослаблення мікрохвильового електромагнітного випромінювання тонкими провідними дротами. Досліджуваний ефект може знайти застосування при розробці матеріалів, що поглинають радіовипромінювання та маскують об'єкти від радіолокаційного виявлення.

Мета роботи – з'ясування фізичної природи ефекту.

Матеріали та методи. На підставі узагальненої теорії Лоренца-Мі побудована математична модель дифракційної взаємодії мікрохвильового випромінювання з циліндричним об'єктом, матеріал якого характеризується комплексним показником заломлення. Розглянуто випадок нормального падіння плоскої електромагнітної хвилі E - і H -поляризацій на циліндр. Чисельні розрахунки розподілу полів виконані в середовищі MathCard.

Результати. Показано, що для товстих циліндрів, діаметр яких більше довжини хвилі, спостерігаються характерні резонансні піки поглинання і розсіювання енергії хвилі. Для дуже тонких циліндрів, діаметр яких значно менше довжини хвилі, спостерігаються максимуми поглинання і розсіювання енергії падаючого випромінювання, які не можна пояснити резонансними явищами. Отримано спрощені аналітичні вирази для коефіцієнтів ефективності ослаблення, поглинання і розсіювання електромагнітного випромінювання тонкими циліндрами. Розраховані розподіли полів всередині і зовні діелектричного і металевого циліндрів при різних співвідношеннях їх діаметра і довжини хвилі падаючого випромінювання. Досліджено ефективність поглинання випромінювання при різних співвідношеннях діаметра дрота і товщини скін-шару.

Висновки. З'ясовано, що ефект аномально сильного поглинання мікрохвильового випромінювання дуже тонкими металевими дротами обумовлений існуванням скін-ефекту для провідних матеріалів, що взаємодіють з мікрохвильовим випромінюванням. Отримано, що максимальна ефективність поглинання випромінювання досягається в тому випадку, коли діаметр дроту в два рази менше товщини скін-шару. Спостережуваний ефект аномального поглинання носить нерезонансний характер.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікрохвилі, дифракція, тонкий дріт, поглинання, фактор ефективності.

ON ANOMALOUS ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY A SUBWAVE METAL WIRE

N. G. Kokodii, V. A. Maslov, K.I. Muntean

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: The effect of anomalously strong absorption, scattering and attenuation of microwave electromagnetic radiation by thin conductive wires is considered. The investigated effect can be used in the development of radio-absorbing and radio-masking materials for various purposes.

The aim of the work is to clarify the physical nature of the effect.

Materials and methods: On the basis of the generalized Lorentz-Mi theory the mathematical model of diffraction interaction of microwave radiation with a cylindrical object which material is characterized by a complex refractive index is constructed. The case of normal incidence of a plane electromagnetic wave of E - and H -polarizations on a cylinder is considered. Numerical calculations of the field distribution were performed in the MathCard environment.

Results: It is shown that for thick cylinders with a diameter greater than the wavelength, characteristic resonant peaks of absorption and scattering of wave energy are observed. For very thin cylinders, the diameter of which is much smaller than the wavelength, there are maxima of absorption and scattering of energy of incident radiation, which cannot be explained by resonant phenomena. Simplified analytical expressions for the efficiency coefficients of attenuation, absorption and scattering of electromagnetic radiation by thin cylinders are obtained. The field distributions inside and outside the dielectric and metal cylinders at different ratios of their diameter and wavelength of incident radiation are calculated. The efficiency of radiation absorption by a thin wire at different ratios of its diameter and skin-layer thickness for wire material has been studied.

Conclusion: It was found that the effect of abnormally strong absorption of microwave radiation by very thin metal wires is due to the existence of a skin effect for conductive materials that interact with microwave radiation. It is obtained that the maximum efficiency of radiation absorption is achieved when the diameter of the wire is twice less than the thickness of the skin layer. The observed effect of anomalous absorption is nonresonant.

KEYWORDS: microwaves, diffraction, thin wire, absorption, efficiency factor.

ОБ АНОМАЛЬНОМ ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СУБВОЛНОВОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Н.Г. Кокодій, В.А. Маслов, К.И. Мунтян

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Рассмотрен эффект аномально сильного поглощения, рассеивания и ослабления микроволнового электромагнитного излучения тонкими проводящими проволоками. Исследуемый эффект может найти применение при разработке радиопоглощающих и радиомаскирующих материалов различного назначения.

Цель работы – выяснение физической природы эффекта.

Материалы и методы. На основании обобщенной теории Лоренца-Ми построена математическая модель дифракционного взаимодействия микроволнового излучения с цилиндрическим объектом, материал которого характеризуется комплексным показателем преломления. Рассмотрен случай нормального падения плоской электромагнитной волны E- и H-поляризации на цилиндр. Численные расчеты распределения полей выполнены в среде MathCard.

Результаты. Показано, что для толстых цилиндров, диаметр которых больше длины волны, наблюдаются характерные резонансные пики поглощения и рассеяния энергии волны. Для очень тонких цилиндров, диаметр которых значительно меньше длины волны, наблюдаются максимумы поглощения и рассеяния энергии падающего излучения, которые нельзя объяснить резонансными явлениями. Получены упрощенные аналитические выражения для коэффициентов эффективности ослабления, поглощения и рассеяния электромагнитного излучения тонкими цилиндрами. Рассчитаны распределения полей внутри и снаружи диэлектрического и металлического цилиндров при различных соотношениях их диаметра и длины волны падающего излучения. Исследована эффективность поглощения излучения при различных соотношениях диаметра проволоки и толщины скин-слоя.

Выводы. Выяснено, что эффект аномально сильного поглощения микроволнового излучения очень тонкими металлическими проволоками обусловлен существованием скин-эффекта для проводящих материалов, взаимодействующих с микроволновым излучением. Получено, что максимальная эффективность поглощения излучения достигается в том случае, когда диаметр проволоки в два раза меньше толщины скин-слоя. Наблюдаемый эффект аномального поглощения носит нерезонансный характер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроволны, дифракция, тонкий провод, поглощение, фактор эффективности.

ВСТУП

Проблема дифракції електромагнітного випромінювання на циліндричних об'єктах є однією з найвідоміших в електродинаміці. Це пов'язано з безліччю її наукових та практичних застосувань. Аналіз дифракційної картини дозволяє отримати інформацію про розмір перерізу циліндра, його форму та показник заломлення речовини, з якої він складається. Численні методи вимірювання цих параметрів описані в різних статтях та монографіях [1-3].

Дифракційна взаємодія залежить від співвідношення між довжиною хвилі випромінювання λ та діаметром циліндра D . Для деяких значень D/λ виникають резонанси, тоді розсіювання та поглинання збільшуються. У [4] наведено результати розрахунків залежності коефіцієнта ефективності розсіювання Q_{sca} для товстого заломлюючого циліндра ($D/\lambda \gg 1$) від параметра $\rho = \pi D/\lambda$ при нормальному падінні хвилі (хвильовий вектор перпендикулярний осі циліндра).

Математичний аналіз резонансних явищ у товстих заломлюючих циліндрах проведено в [5-7]. Взаємодія хвилі з об'єктом (розсіювання та поглинання) є найпотужнішою, коли його розміри порівнянні з довжиною хвилі. Невеликі предмети, розташовані на шляху поширення хвилі, хвиля зазвичай "не помічає". Але в роботах [8, 9] описано ефект сильного поглинання електромагнітного випромінювання в дуже тонких провідних циліндрах (металевих дротах і графітових волокнах), коли електричний вектор хвилі паралельний осі дроту. У роботі [8] було описано експеримент, в якому близько 10% енергії падаючого пучка випромінювання з довжиною хвилі 3 см поглиналося в платиновому дроті діаметром 20 мкм. Діаметр пучка становив 2 см, тобто в 1000 разів більший діаметра дроту. Промінь не сфокусований.

Ефект сильної взаємодії електромагнітної хвилі з дуже тонкими проводами також теоретично розглядався в [10-13]. У той же час в [12] теоретично було показано, що цей ефект також існує, якщо провід розташований вздовж осі пучка випромінювання.

Усі ці роботи не пояснюють фізичної природи ефекту – чому дуже тонкі провідні волокна сильно поглинають і розсіюють електромагнітне випромінювання.

Дана проблема розглядається в цій роботі.

ТЕОРЕТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Значення коефіцієнтів ефективності розсіювання Q_{sca} , поглинання Q_{abs} і ослаблення Q для випадку нормального падіння хвилі на циліндр можна розрахувати за формулами [1, 2]:

$$Q^E = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \operatorname{Re}(b_l) , \quad Q_{sca}^E = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |b_l|^2 \quad - \text{ для } E\text{-хвилі,} \quad (1)$$

$$Q^H = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \operatorname{Re}(a_l) , \quad Q_{sca}^H = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |a_l|^2 \quad - \text{ для } H\text{-хвилі,} \quad (2)$$

$$Q_{abs}^E = Q^E - Q_{sca}^E , \quad Q_{abs}^H = Q^H - Q_{sca}^H \quad (3)$$

$$b_l = \frac{m J_1'(m\rho) J_1(\rho) - J_1(m\rho) J_1'(\rho)}{m J_1'(m\rho) H_1^{(2)}(\rho) - J_1(m\rho) H_1^{(2)'}(\rho)} , \quad (4)$$

$$a_l = \frac{m J_1(m\rho) J_1'(\rho) - J_1'(m\rho) J_1(\rho)}{m J_1(m\rho) H_1^{(2)}(\rho) - J_1'(m\rho) H_1^{(2)'}(\rho)} , \quad (5)$$

де $J_l(z)$ — функції Бесселя, $H_l^{(2)}(z)$ — функції Ганкеля другого роду. Знак « ' » означає диференціювання функції по всьому аргументу, $m = n - ik$ — комплексний показник заломлення. Індеси E і H відповідають двом типам поляризації хвилі: E -поляризації, коли електричний вектор хвилі паралельний осі циліндра, і H -поляризації, коли магнітний вектор хвилі паралельний осі циліндра.

На Рис. 1а представлений графік залежності коефіцієнта корисної дії (ККД) розсіювання хвиль діелектричним циліндром від його діаметра. Показник заломлення циліндра $n = 1,5$. Добре видно резонансні піки, розташовані на відстані $\Delta\rho = 0,75$ один від одного. Це добре описується формулою:

$$\Delta\rho = \frac{\arctg \sqrt{n^2 - 1}}{\sqrt{n^2 - 1}} , \quad (6)$$

де n — показник заломлення циліндра.

На Рис. 1б представлений графік залежності ККД поглинання $Q_{abs}(\rho)$ від значення комплексного показника заломлення циліндра $m = 1,5 - 0,001i$, на якому також присутні характерні резонансні піки. Особливо відзначимо, що значення параметра ρ для резонансів розсіювання і поглинання на Рис. 1а і 1б збігаються.

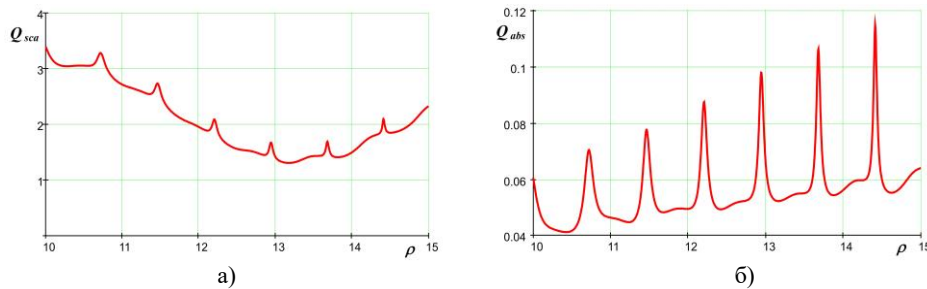


Рис. 1. Резонанси розсіювання (а) та поглинання (б) хвилі в циліндрі.

На Рис. 2 представлені графіки залежності коефіцієнта ефективності поглинання платиного дроту від його діаметра для кількох довжин хвиль для E -поляризації, які розраховані за формулами (2) – (6). При деяких відносинах D/λ спостерігається максимум поглинання. При $\lambda = 8$ мм в максимумі $Q_{abs} = 962$, при $\lambda = 10$ см $Q_{abs} = 2615$, при $\lambda = 1$ м $Q_{abs} = 7928$. Максимум досягається при дуже малих діаметрах дроту. Це 4,1 мкм на довжині хвилі 1 м, 1,5 мкм на довжині хвилі 10 см, 0,3 мкм на довжині хвилі 8 мм.

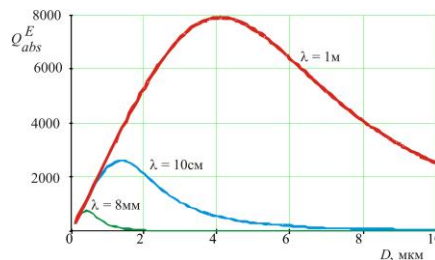


Рис. 2. Залежності коефіцієнта ефективності поглинання платиного дроту від його діаметра

У розрахунках комплексний показник заломлення визначався виразом

$$m = \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\epsilon_0}}(1 - i), \quad (7)$$

де σ - провідність, ω - кругова частота, ϵ_0 - діелектрична проникність вільного простору.

ПОГЛИНАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ТОНКОМУ ДРОТІ. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

З вищевикладеного випливає, що зростання ефективності поглинання випромінювання субхвильовими дротами не може бути пояснено резонансними явищами. Дійсно, на Рис. 3 показані графіки коефіцієнтів ефективності ослаблення Q , поглинання Q_{abs} і розсіювання Q_{sca} для платиного дроту на довжині хвилі 10 см. По осі абсцис відкладені значення добутку $n\rho = \pi D/\lambda_i$, де $\lambda_i = \lambda/n$ — довжина хвилі випромінювання всередині циліндра. Максимуми графіків знаходяться в різних місцях по осі абсцис. Це говорить про те, що їх положення визначається не умовами резонансу - певним співвідношенням діаметра циліндра і довжини хвилі, як, наприклад, в резонансах, показаних на Рис. 1, де положення максимумів поглинання і розсіювання збігаються.

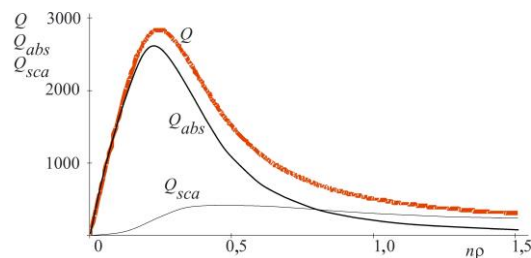


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів поглинання, розсіювання та ослаблення випромінювання тонким дротом від добутку $n\rho$

Діаметр циліндра при максимальному поглинанні менше довжини хвилі як у вільному просторі, так і всередині нього, так що навіть одна півхвиля значно більше характерного розміру циліндра (діаметра або довжини окружності), і умови резонансу не можуть бути дотримані.

Чисельні розрахунки поглинання електромагнітного випромінювання в тонкому дроті дозволяють встановити деякі закономірності цього процесу.

Для випромінювання з довжиною хвилі більше 100 мкм, де добре працює теорія Друде, виконується наближене співвідношення

$$n\rho \approx 0,275 \quad (8)$$

або

$$D/\lambda_i \approx 0,1. \quad (9)$$

Таким чином, нерезонансність ефекту підтверджується наступними фактами.

1) Положення максимумів на графіках залежності коефіцієнтів ефективності ослаблення Q , поглинання Q_{abs} і розсіювання Q_{sca} від параметра ρ не збігаються (Рис.3), а на графіках для товстих циліндрів такі максимуми розташовані при однакових значеннях ρ — в місцях, визначених умовами резонансу в циліндрі (Рис. 1).

2) Співвідношення (8) і (9) показують, що максимум поглинання виникає, коли довжина хвилі всередині циліндра приблизно в 10 разів більше діаметру циліндра. Очевидно, що в таких умовах не може виникнути резонансу. При резонансі одна або кілька півхвиль випромінювання повинні накладатися на характерний розмір об'єкта.

Розрахунки показали, що залежність поглинання в максимумі від довжини хвилі добре описується формулою

$$Q_{abs \max} \approx \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma\lambda}{\pi c \epsilon_0}}, \quad (10)$$

де σ - провідність, λ - довжина хвилі випромінювання у вільному просторі, c - швидкість світла у вільному просторі, ϵ_0 - діелектрична проникність вільного простору.

КОЕФІЦІЄНТ ЕФЕКТИВНОСТІ ОСЛАБЛЕННЯ ДЛЯ ТОНКОГО ПРОВІДНОГО ЦИЛІНДРА

Розглянемо особливості взаємодії електромагнітної хвилі з тонким циліндром, який проводить. Умова $D \ll \lambda$ виконується, тому $\rho = \pi D/\lambda \ll 1$. Поглинання циліндром визначається комплексним показником заломлення $m = n - ik$. Для циліндрів, які добре проводять, цей показник описується

формулою (7). У цій формулі $n \gg 1$ і $k \gg 1$, але для тонкого дроту $|m\rho| \ll 1$. Хвиля падає перпендикулярно осі циліндра. Розглянемо Е-хвилю, для якої наявний значний ефект поглинання.

Для дуже тонких циліндрів ($\rho \ll 1$, $|m\rho| \ll 1$) ми можемо обмежити ряди (1) - (3) тільки першим членом. Обмежимо також першим членом коефіцієнти b_l розкладання в ряди функцій Бесселя і Ганкеля.

З графіків Рис. 3 видно, що положення максимумів поглинання і ослаблення близькі один до одного. Тому ми будемо аналізувати коефіцієнт ефективності ослаблення Q_{abs} , який описується більш простою формулою.

Для малих аргументів функції Бесселя $J_n(z)$ і Неймана $N_n(z)$ і їх похідні можуть бути визначені наступним чином:

$$\begin{aligned} J_0 &\approx 1 - \frac{z^2}{4}, & J'_0 &\approx -\frac{z}{2}, \\ N_0(z) &\approx -\frac{2}{\pi} \ln \frac{2}{qz}, & N'_0(z) &\approx \frac{2}{\pi z}. \end{aligned} \quad (11)$$

де $q = e^\gamma = 1,781$, $\gamma = 0,5772 \dots$ - постійна Ейлера.

Вираз (5) для коефіцієнта b_l можна записати в наступному вигляді:

$$b_l = \frac{1}{1 - i \frac{B_l}{A_l}}, \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} A_l &= m J'_l(m\rho) J_l(\rho) - J_l(m\rho) J'_l(\rho) \\ B_l &= m J'_l(m\rho) N_l(\rho) - J_l(m\rho) N'_l(\rho) \end{aligned}$$

Перший член ряду визначається підстановкою (11) в ці вирази:

$$A_0 = -\frac{(m^2 - 1)\rho}{2}, \quad B_0 = \frac{m^2 \rho}{2\pi} \left(1 + 2 \ln \frac{2}{q\rho} \right) - \frac{2}{\pi\rho}.$$

Підставляючи ці вирази в (12), отримуємо:

$$b_0 = \frac{1}{1 - i \left[\frac{4}{\pi\rho^2(m^2 - 1)} - \frac{m^2}{\pi(m^2 - 1)} \left(1 + 2 \ln \frac{2}{q\rho} \right) \right]}.$$

Зробимо кілька спрощень цієї формули. Оскільки $|m| \gg 1$, тоді $m^2 - 1 \approx m^2$ і $m^2 / (m^2 - 1) \approx 1$. Оскільки $\rho \ll 1$, то $2 \ln(2/q\rho) \gg 1$ і $1 + 2 \ln(2/q\rho) \approx 2 \ln(2/q\rho)$. Значення $2/q = 1,123$. Це близько до 1, тому $\ln(2/q\rho) \approx -\ln \rho$.

Отже, отримуємо:

$$b_0 = \frac{1}{1 - \frac{2i}{\pi} \left(\ln \rho + \frac{2}{m^2 \rho^2} \right)}. \quad (13)$$

Оскільки $m = n(1 - i)$, то $m^2 = -2in^2$, і формула (13) прийме наступний вигляд:

$$b_0 = \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2} \right) - i \frac{2 \ln \rho}{\pi}}. \quad (14)$$

Коефіцієнт ефективності ослаблення визначається за формулою (14) наступним чином:

$$Q = \frac{2}{\rho} \operatorname{Re}(b_0). \quad (15)$$

Таким чином, необхідно знайти дійсну частину виразу (14) і підставити її в формулу (15).

У формулі (14) обидва члени знаменника по модулю є величинами одного порядку. Жодним із них не можна нехтувати. Отже, вони обидва повинні міститися в формулі:

$$Q = \frac{2}{\rho} \frac{1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2}}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2} \right)^2 + \left(\frac{2 \ln \rho}{\pi} \right)^2}.$$

Ми можемо спростити вираз, нехтуючи одиницями:

$$Q = \frac{\pi n^2 \rho}{1 + (n^2 \rho^2 \ln \rho)^2} . \quad (16)$$

Залежність коефіцієнта ефективності ослаблення від параметра $n\rho$, розрахована за точними формулами (жирна лінія) і за формулою (16) (тонка лінія), показана на Рис. 4. Видно, що наближена формула (16) добре описує хід кривої $Q(n\rho)$ і положення максимуму.

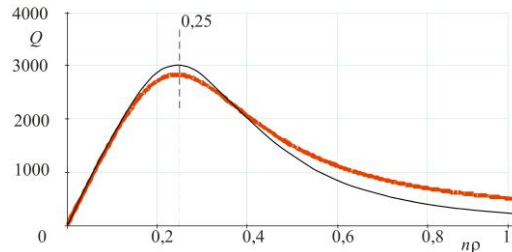


Рис. 4. Послаблення випромінювання тонким платиновим дротом

Тепер визначимо положення і амплітуду максимуму. З формули (16) видно, що хід кривої в основному визначається величиною $n\rho$. Величина $\ln(\rho)$ змінюється набагато повільніше. Отже, ми визначаємо стан мінімуму знаменника шляхом диференціювання по n і вважаючи $\ln(\rho) = \text{const}$. Для умови максимуму ККД ослаблення і близького до нього максимуму ККД поглинання виходить таке значення:

$$n\rho = \frac{2}{\sqrt[3]{2(\ln \rho)^2}} . \quad (17)$$

Положення максимуму в основному визначається співвідношенням довжини хвилі і розміру циліндра, але це співвідношення не є постійним, як при звичайному резонансі, а залежить, хоча і слабо, від параметра ρ .

Таким чином, аналіз підтверджує нерезонансний характер ефекту великого поглинання випромінювання в дуже тонкому циліндрі.

На Рис. 5 показано положення максимуму щодо параметра ρ . Ця залежність слабка, і наближені співвідношення можна записати аналогічно співвідношенням (8) і (9), отриманим чисельним аналізом ефекту:

$$n\rho \approx 0,25, \quad (18)$$

$$\frac{\pi D}{\lambda_i} \approx 0,08 . \quad (19)$$

Вони узгоджуються з наведеними в формулах (8) і (9).

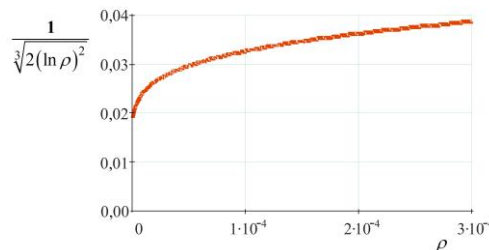


Рис. 5. Положення максимального ослаблення випромінювання тонким дротом

Максимальне поглинання можна знайти, підставивши вираз (17) в (16). З огляду на то, що в цьому випадку

$$n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma \lambda}{\pi c \epsilon_0}} ,$$

ми отримуємо

$$Q_{\max} \approx 0,6n = 0,3 \sqrt{\frac{\sigma \lambda}{\pi c \epsilon_0}} . \quad (20)$$

Це добре узгоджується з виразом (10), отриманим в результаті чисельного аналізу.

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗСІЯННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ

Вираз (14) для коефіцієнта b_0 також входить в формули для коефіцієнтів ефективності розсіювання Q_{sca} і поглинання Q_{abs} . Підставляючи його в формули (2) і (4), отримуємо:

$$Q_{sca}^E = \frac{2}{\rho} \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \ln \rho}{\pi}\right)^2},$$

$$Q_{abs}^E = \frac{2}{\rho} \frac{\frac{2}{\pi n^2 \rho^2}}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \ln \rho}{\pi}\right)^2}.$$

На Рис. 6 тонкими лініями показані результати розрахунків ККД Q , Q_{sca} , Q_{abs} по наближених формулах для значень ρ в області максимумів. Вони добре збігаються з результатами розрахунків за точними формулами (жирні лінії).

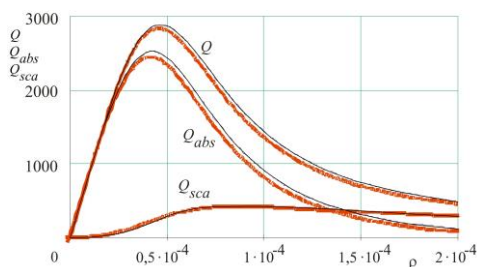


Рис. 6. Коефіцієнти ефективності затухання, розсіювання та поглинання. Товсті лінії - строгий розрахунок, тонкі лінії - приблизні формули.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ВСЕРЕДИНІ ЦИЛІНДРА

Розглянемо розподіл електричного поля всередині і навколо циліндра, коли електромагнітна хвиля падає перпендикулярно осі циліндра.

Рефракційний циліндр

Нехай електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,01$ м у вільному просторі падає на циліндр з показником заломлення $n = 1,5$. Довжина хвилі всередині циліндра буде $\lambda_i = \lambda/n = 0,00667$ м. На Рис. 7 показано розподіл напруженості електричного поля в циліндрі і його околицях для діаметра $D = \lambda_i / 2$. Це точка резонансу. Випромінювання падає на циліндр зліва. Циліндр фокусує випромінювання, і на виході з циліндра виникає область високої напруженості поля.

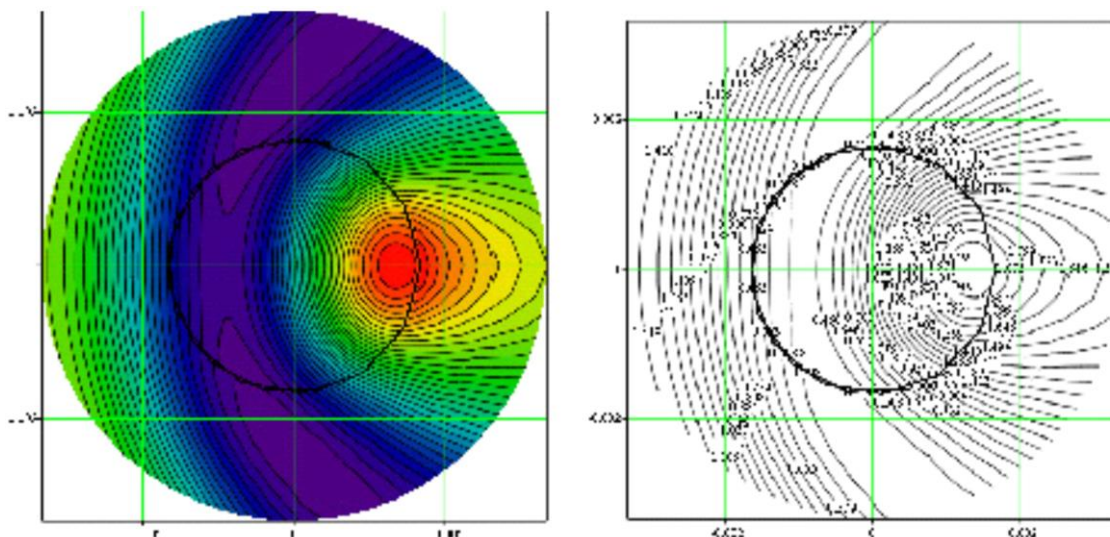


Рис. 7. Розподіл поля в заломлюючому циліндрі з $D = \lambda_i / 2$

На Рис. 8 показано розподіл напруженості електричного поля в циліндрі з $D = \lambda_i / 10$. Тут він практично постійний по всьому перетину циліндра.

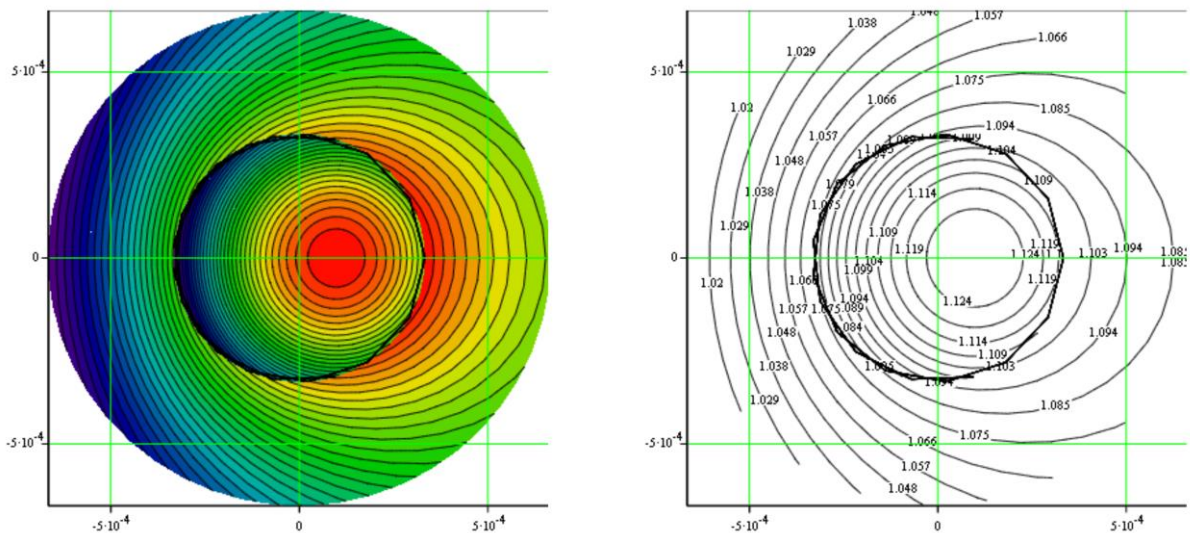


Рис. 8. Розподіл поля в заломлюючому циліндрі з $D = \lambda_i / 10$

Циліндр, що поглинає

Якщо циліндр поглинає падаюче випромінювання, картина дифракції істотно змінюється. Напруженість поля всередині циліндра зменшується, і за циліндром утворюється область тіні (Рис. 8).

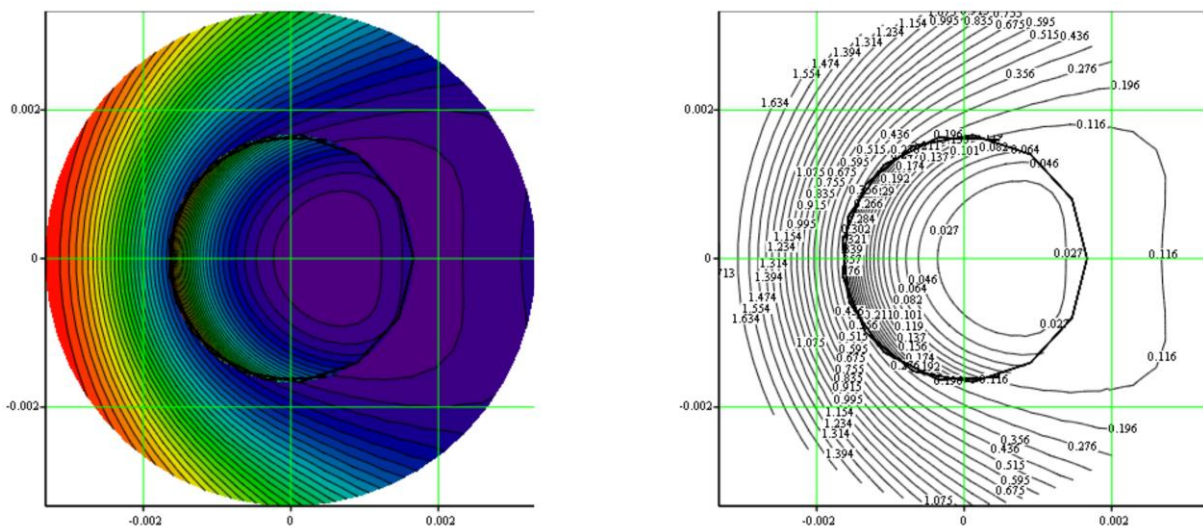


Рис. 9. Розподіл поля в поглинаючому циліндрі з $D = \lambda_i / 2$ ($n = 1,5$, $k = 2$)

Дуже тонкий металевий дріт

Коли діаметр металевого циліндра (дроту) можна порівняти з товщиною скін-шару, напруженість електричного поля всередині нього мало відрізняється від напруженості поля зовні.

Товщина скін-шару в металі δ визначається за відомою формулою

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}},$$

де μ - магнітна проникність середовища, ω - кругова частота випромінювання, σ - питома провідність середовища. Для платини на частоті 30 ГГц ($\lambda = 0,01$ м) $\delta = 0,94$ мкм.

Максимальна ефективність поглинання платинового дроту для довжини хвилі випромінювання $\lambda = 0,01$ м досягається при діаметрі $D = 0,45$ мкм, що в два рази менше товщини скін-шару. Розподіл напруженості електричного поля всередині і навколо дроту показано на Рис. 9. З рисунка випливає, що напруженість поля практично однакова як всередині циліндра, так і поблизу нього, і вона набагато

менше напруженості поля. в падаючій хвилі, яка приймається рівною одиниці. Цей факт вказує на те, що взаємодія випромінювання з дротом дуже сильна, незважаючи на його невеликий діаметр.

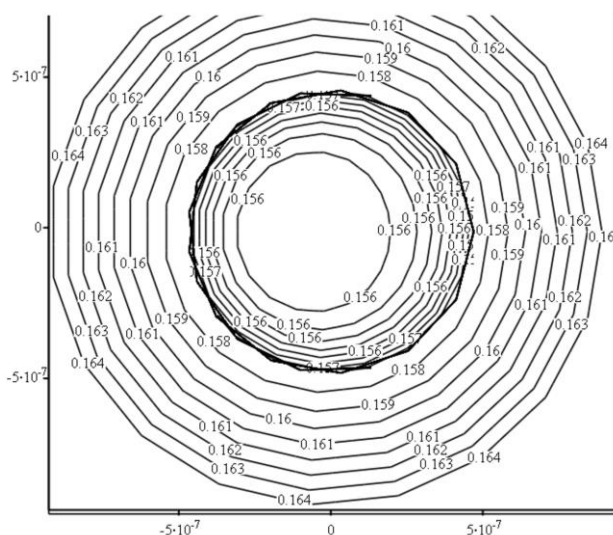


Рис. 9. Розподіл електричного поля в тонкому металевому дроті ($D = 0,94$ мкм, $\lambda = 0,01$ м)

Оцінимо енергію, що поглинається дротом діаметром D і довжиною L . Густина енергії в дроті визначається законом Джоуля-Ленца в диференціальній формі $w = \sigma |E_0|^2 = \sigma I_E$. Загальна енергія, поглинена проводом за 1 с, є

$$W_{abs} = \sigma I_E (D) \frac{\pi D^2}{4} L .$$

Енергія, що падає на відрізок дроту діаметром D і довжиною L за 1 с, є

$$W = I_0 D L ,$$

де I_0 - інтенсивність падаючого випромінювання:

$$I_0 = |E_0|^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} .$$

Відношення енергії W_{abs} , поглиненої проводом, до енергії W , падаючої на геометричну площу освітлюваної частини дроту, є фактором ефективності поглинання:

$$Q_{abs} = \frac{\pi \sigma I_E (D) D}{4 I_0} .$$

Енергія W_{abs} зменшується зі збільшенням діаметра через наявність скін-ефекту і ослаблення проникнення випромінювання в метал. Енергія W , падаюча на геометричну площу освітлюваної частини дроту, збільшується за рахунок збільшення її діаметра. Отже, існує оптимальний діаметр дроту, який відповідає максимальному відношенню цих енергій. Залежність $W_{abs}(D)$ від діаметра дроту показана на Рис.10 суцільною лінією. Цей графік повністю збігається з графіком залежності коефіцієнта ефективності поглинання від діаметра дроту, розрахованого за формулами (4) - (6), що показано на Рис. 11 квадратними маркерами.

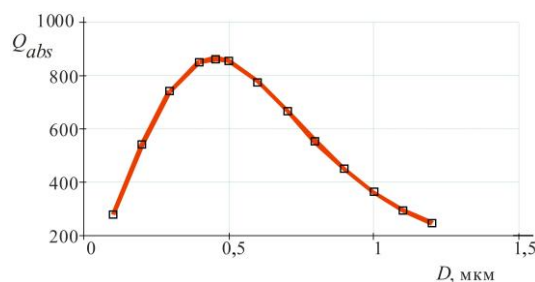


Рис. 10. Залежність коефіцієнта ефективності поглинання дроту від його діаметра

Якісний ефект можна пояснити так. Він відбувається, коли діаметр волокна менше або порівнянний з товщиною скін-шару. Тоді поле заповнює весь поперечний переріз волокна, і середнє значення напруженості електричного поля максимально можливе. Густина енергії електричного поля і потужність поглиненого випромінювання P_{abs} великі. Вона пропорційна об'єму волокна, тобто квадрату його діаметра. Потужність випромінювання P , що потрапляє на волокно, пропорційна діаметру. У міру збільшення діаметра коефіцієнт ефективності поглинання збільшується. Але коли діаметр волокна стає більше, ніж товщина скін-шару, середнє значення напруженості електричного поля зменшується зі збільшенням діаметра. Споживана потужність і коефіцієнт ефективності поглинання знижуються. Цим пояснюється наявність пологого максимуму на графіку залежності коефіцієнта ефективності поглинання від діаметра волокна. Таким чином, цей ефект не є резонансним.

ВИСНОВКИ

1. Якісний і кількісний аналіз ефекту аномально сильного ослаблення, поглинання і розсіяння електромагнітного випромінювання дуже тонкими металевими дротами доводить, що природа цього явища пояснюється існуванням скін-ефекту при взаємодії мікрохвильового випромінювання з матеріалами, які проводять.

2. Ефект аномального поглинання спостерігається в тому випадку, коли діаметр дроту одного порядку з товщиною скін-шару.


3. Максимум поглинання має місце, коли діаметр дроту приблизно на порядок менше довжини хвилі падаючого випромінювання. Для більшості металів в цьому випадку товщина скін-шару вдвічі більше діаметра дроту.


4. Спостережуваний ефект сильного поглинання має нерезонансний характер.


КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

Кокодій М.Г.  <https://orcid.org/0000-0003-1325-4563>

Маслов В.О.  <https://orcid.org/0000-0001-7743-7006>

Мунтян К.І.  <https://orcid.org/0000-0001-6479-3511>

REFERENCES

- 1 Hulst van de HC. Light Scattering by Small Particles. New York, USA: Dover Publications, 1981.
- 2 Kerker M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. New York-San Francisco-London, USA: Academic Press, 2016.
- 3 Lazarev LP, Mirovitskaya SD. Control of the Geometric and Optical Parameters of Fibres, Moscow, USSR: Radio and Svyaz', 1988. [in Russian].
- 4 Irvine WM. Light scattering by spherical particles: radiation pressure, asymmetry factor, and extinction cross section. J. Opt. Soc. Am. Jan 1965;55(1):16-21. doi 10.1364/JOSA.55.000016
- 5 Kokodii NG. Nature of resonances in a thick refracting cylinder during of an electromagnetic wave. Opt. Spectrosc. 1992;72(2):249-251.
- 6 Kotlyar VV, Kozlov DA, Kovalev AA. Calculation of the resonant radius of a dielectric cylinder illuminated by a plane TE-wave. Comput. Opt. 2015;39(2):163-171.
- 7 Kozlov DA. Whispering gallery modes in a dielectric cylinder with circular cross-section. Comput. Opt. 2017;41(3):377-384.
- 8 Kuzmichev VM, Kokodii NG, Safronov BV, Balkashin VP. Values of the absorption efficiency factor of a thin metal cylinder in the microwave band. J. Commun. Technol. Electron. 2003;48(11):1240-1242.
- 9 Kokodii NG. Microwave radiation absorption in an ultrathin doublelayer cylinder. J. Commun. Technol. Electron. 2006;51(2):175-178.
- 10 Shevchenko VV. On the absorption of an electromagnetic wave by a thin wire. Radiotekh. Elektron. (Moscow). 1991;36(12):2400-2403.
- 11 Akhmeteli AM. Efficient heating of thin cylindrical targets by broad electromagnetic beams I. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/physics/0405091.pdf>. Accessed on: Apr 10, 2020.
- 12 Akhmeteli AM. Efficient heating of thin cylindrical targets by broad electromagnetic beams II. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/physics/0611169.pdf>. Accessed on: Apr 10, 2020.
- 13 Odarenko EN, Switch VA, Shmatko AA. Scattering of a wave beam by a thin dielectric cylinder with losses. Proc. 17th Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol; 2007. p. 934-935.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-09>

УДК 57.084.1+577.3.0

ШКІРНО-ОПТИЧНЕ СПРИЙНЯТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РІЗНИХ ДОВЖИН ХВИЛЬ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ ШКІРОЮ ДОЛОНЬ СЛАБОЗОРИХ ЛЮДЕЙ

В.П. Титар, Ю.В. Єльчищева, О.В. Шпаченко, А.В. Мельнікова, В.М. Мізрахі

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022,
Україна

E-mail: julyreine7@gmail.com

Надійшла до редакції 14 жовтня 2020 р.

Актуальність. На даний момент не існує єдиної точки зору, яка б пояснювала точні механізми шкірно-оптичного сприйняття й особливостей обробки мозком неспецифічних стимулів, але для розуміння особливостей цього сприйняття досить важливо дослідити реакцію різних рецепторів шкіри долонь на різний колір.

Мета роботи – визначення впливу електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль видимого діапазону на активність різних типів соматосенсорних рецепторів шкіри долонь та нервових волокон, що приймають участь в іннервації шкіри.

Матеріали та методи. В експериментах брали участь 12 слабозорих дітей (за їх бажанням та при наявності дозволу їх батьків). Вимірювання стану різних соматосенсорних рецепторів, розташованих на долонях, а також іннервації шкіри слабозорих дітей, що приймали участь у навчанні шкірно-оптичному сприйняттю, проводилося за допомогою апарату «КСД» шляхом реєстрації та комп'ютерного аналізу електромагнітних коливань, що випромінюються організмом.

Результати. Проведено експериментальне дослідження зміни активності різних соматосенсорних рецепторів, розташованих на долонях, а також іннервації шкіри слабозорих дітей під дією електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль видимого діапазону. Виявлено, що під дією світла в залежності від конкретних довжин хвиль відбувається активація або пригнічення досліджуваних рецепторів та нервових волокон. Встановлено зростання активності теплової чутливості (тілець Руффіні) під дією електромагнітного випромінювання на шкіру долонь в діапазоні хвиль від 380-700 нм (у всьому спектральному діапазоні видимого світла). Найбільша активація спостерігалася на «теплих» (червоний, помаранчевий) та зеленому кольорах. На білому, чорному та «холодних» кольорах (блакитний, синій) активація тілець Руффіні була меншою, ніж на «теплих» кольорах.

Висновки. Отримані експериментальні результати свідчать про здатність різних соматосенсорних рецепторів шкіри долоней адаптуватися до сприйняття деякої інформації за допомогою неспецифічного для них стимулу – електромагнітного випромінювання видимого діапазону. Виявлено, що дермо-оптичне сприйняття шкірою долонь зумовлене не тільки температурною чутливістю (яку забезпечують терморецептори), але й іншими типами рецепторів: барорецепторами (тілець Фатера-Пачіні), тактильними рецепторами (тілець Мейснера), механорецепторами (тілець Гольджі).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електромагнітне випромінювання видимого діапазону; колір; шкірно-оптичне сприйняття; соматосенсорні рецептори; іннервація шкіри.

DERMO-OPTICAL PERCEPTION OF THE VISIBLE RANGE DIFFERENT WAVELENGTHS ELECTROMAGNETIC RADIATION BY THE PALMS SKIN OF VISUALLY IMPAIRED PEOPLE

V.P. Titar, Yu.V. Ielchishcheva, O.V. Shpachenko, A.V. Melnikova, V.M. Mizrahi

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. There is no single point of view which would explain the exact mechanisms of dermo-optical perception and nonspecific stimuli brain processing features at the moment, but to understand this perception peculiarities it is important to study the different skin receptors response to different colors.

Objectives. The work aim is to determine the visible range different wavelengths electromagnetic radiation influence on the palms skin different types somatosensory receptors activity and nerve fibers involved in the skin innervation.

Materials and methods. The experiments involved 12 visually impaired children (at their request and with their parents permission). The various somatosensory receptors condition measurement located on the palms, as well as the skin innervation of visually impaired children who participated in the dermo-optical perception training, was performed using the device "KSD" by recording and computer analysis of the electromagnetic oscillations emitted by the organism.

Results. An experimental study of changes in the various somatosensory receptors activity located on the palms, as well as the visually impaired children skin innervation under the visible range different wavelengths electromagnetic radiation action was performed. It was found that under the light action, depending on the specific wavelengths, the studied receptors and nerve fibers are activated or suppressed. An increase in the thermal sensitivity activity (Ruffini's body) under the electromagnetic radiation influence on the palms skin in the wave range from 380-700 nm (in the entire visible light spectral range). The greatest activation was observed in «warm» (red, orange) and green colors. On white, black and «cold» colors (blue, blue) the Ruffini's bodies activation was less than on «warm» colors.

Conclusions. The obtained experimental results indicate the palms skin various somatosensory receptors ability to adapt to the some information perception with a non-specific stimulus - the visible range electromagnetic radiation. It was found that the palms skin dermo-optical perception is due not only to temperature sensitivity (provided by thermoreceptors), but also to other types of receptors: baroreceptors (Pacinian corpuscles), tactile receptors (Meissner's corpuscles), mechanoreceptors (Golgi receptors).

KEYWORDS: electromagnetic radiation of visible range; color; dermo-optical perception; somatosensory receptors; skin innervation.

КОЖНО-ОПТИЧЕСКОЕ ВОСПРИЯТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА КОЖЕЙ ЛАДОНЕЙ СЛАБОВИДЯЩИХ ЛЮДЕЙ

В.П. Титарь, Ю.В. Ельчищева, О.В. Шпаченко, А. В. Мельникова, В.М. Мизрахи

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022,
Украина*

Актуальность. На данный момент не существует единой точки зрения, которая объясняла бы точные механизмы кожно-оптического восприятия и особенностей обработки мозгом неспецифических стимулов, но для понимания особенностей этого восприятия, достаточно важно исследовать реакцию разных рецепторов кожи ладоней на разный цвет.

Цель работы – определение влияния электромагнитного излучения различных длин волн видимого диапазона на активность различных типов соматосенсорных рецепторов кожи ладоней и нервных волокон, участвующих в иннервации кожи.

Материалы и методы. В экспериментах участвовали 12 слабовидящих детей (по их желанию и при наличии разрешения их родителей). Измерения состояния различных соматосенсорных рецепторов, расположенных на ладонях, а также иннервации кожи слабовидящих детей, принимавших участие в обучении кожно-оптическому восприятию, проводилось с помощью аппарата «КСД» путем регистрации и компьютерного анализа электромагнитных колебаний, излучаемых организмом.

Результаты. Проведено экспериментальное исследование изменения активности различных соматосенсорных рецепторов, расположенных на ладонях, а также иннервации кожи слабовидящих детей под действием электромагнитного излучения различных длин волн видимого диапазона. Выявлено, что под действием света в зависимости от конкретных длин волн происходит активация или угнетение исследуемых рецепторов и нервных волокон. Установлено повышение активности тепловой чувствительности (тельца Руффини) под действием влияния электромагнитного излучения на кожу ладоней в диапазоне волн от 380-700 нм (во всем спектральном диапазоне видимого света). Наибольшая активация наблюдалась на «теплых» (красный, оранжевый) и зеленом цветах. На белом, черном и «холодных» цветах (голубой, синий) активация тельца Руффини была меньше, чем на «теплых» цветах.

Выводы. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о способности различных соматосенсорных рецепторов кожи ладоней адаптироваться к восприятию некоторой информации с помощью неспецифического для них стимула - электромагнитного излучения видимого диапазона. Выявлено, что дермо-оптическое восприятие кожей ладоней обусловлено не только температурной чувствительностью (которую обеспечивают терморецепторы), но и другими типами рецепторов: барорецепторами (тельца Фатера-Пачини) тактильными рецепторами (тельца Мейснера), механорецепторами (тельца Гольджи).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитное излучение видимого диапазона; цвет; кожно-оптическое восприятие; соматосенсорные рецепторы; иннервация кожи.

ВСТУП

Шкірно-оптичне сприйняття – це здатність шкіри людини сприймати кольори, різницю у яскравості та/або сформовані зображення [1]. Про це явище повідомлялося ще з середини сімнадцятого століття [2], але і в наш час все ще й досі невідомі його точні механізми, а навколо даної тематики багато суперечливих думок та дискусій.

Існує велика кількість різноманітних досліджень шкірно-оптичного сприйняття, особливо багато їх було проведено в Росії та Франції в 20-му столітті [3-8]. Ведеться вивчення цього явища й по теперішній час.

Деякі дослідники, серед яких А.І. Ларнер [9], дотримуються думки, що шкірно-оптичне сприйняття кольору є різновидом синестезії. Синестезію можна визначити як мультисенсорне сприйняття від одної сенсорної стимуляції [10], або як постійний мимовільний перелив сенсорних вражень таких, що стимуляція одного сенсорного каналу призводить до сприйняття в іншому або більше, ніж в одному [11].

Інші вчені вважають, що шкірно-оптичне сприйняття зумовлене температурною чутливістю шкіри [12], адже колір – це суб'єктивна характеристика сприйняття світлової хвилі, яка ґрунтується на здатності розрізнити електромагнітне випромінювання з довжиною хвиль в області видимого діапазону [13]. Згідно з прийнятими міжнародними нормами, до видимого діапазону електромагнітних хвиль відноситься світло з довжинами хвиль від 380-400 нм до 760-780 нм [14]. Також шкірно-оптичне сприйняття пов'язують з особливістю розташування рецепторів шкіри на долонях [15] й вважають, що воно ніяким чином не відноситься до явища синестезії.

Водночас, Cohen, L. G. та інші [16] у своїх експериментальних дослідженнях показали, що первинна зорова кора може бути активізована різними тактильними стимулами. Значення цієї міжмодальної пластичності незрозуміле, оскільки невідомо, чи зорова кора може обробляти соматосенсорну інформацію функціонально релевантним шляхом. Водночас ця міжмодальна пластичність може частково пояснювати вищі тактильні сприймальні здібності предметів сліпими або слабозорими людьми.

На даний момент не існує єдиної точки зору, яка б пояснювала точні механізми шкірно-оптичного сприйняття й особливостей обробки мозком неспецифічних стимулів, але для зрозуміння особливостей цього сприйняття, досить важливо дослідити реакцію різних рецепторів шкіри долонь на різний колір.

Саме тому метою нашого дослідження було визначення впливу електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль видимого діапазону на активність різних типів соматосенсорних рецепторів шкіри долонь та нервових волокон, що приймають участь в іннервації шкіри.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Експерименти проводилися за участю слабозорих дітей на базі Комунального закладу «Харківська спеціальна школа імені В.Г. Короленка» Харківської обласної ради. Участь в експериментах неповнолітніх дітей здійснювалася з письмового дозволу їх батьків. Проведення даного дослідження також повністю відповідало біоетичним нормам.

Група слабозорих вихованців школи ім. В.Г. Короленка проходила навчання шкірно-оптичному сприйняттю за авторською методикою, яка розроблена науковим співробітником лабораторії радіо- та оптичної голографії ХНУ ім. В.Н. Каразіна, кандидатом психологічних наук В.М. Мізрахі. Під час цих занять на різних етапах навчання шкірно-оптичному сприйняттю проводилися вимірювання активності різних соматосенсорних рецепторів, розташованих на долонях, а також іннервації шкіри слабозорих дітей, що приймали участь у навчанні. Вимірювання проводилися за допомогою комплексу спектрально-динамічного (апарату «КСД»), принципи роботи якого наведені нижче.

До початку експериментів нами було проведено дослідження спектрів електромагнітного випромінювання, відбитого від зразків кольорового паперу, який використовувався під час навчання дітей шкірно-оптичному сприйняттю. Дослідження проводилося за допомогою монохроматора УМ-2, в якості джерела освітлювання використовувалася лампа розжарювання. Проведені дослідження показали, що папір білого кольору відбивав спектр падаючого світла практично без змін: у видимому діапазоні були присутні рівною мірою всі довжини хвиль, з дещо підвищеним представництвом довгохвильової частини, що характерно для світла, яке випромінюється лампою розжарювання. Спектри електромагнітних хвиль, відбитих від паперових аркушів наступних кольорів мали один максимум на довжинах хвиль, який попадав у відповідний піддіапазон: червоний папір – 632,8 нм, помаранчевий – 603,1 нм, жовтий – 582,3 нм, зелений – 536,1 нм, блакитний – 492,3 нм, синій – 463,8 нм. Спектри електромагнітного випромінювання, відбитого від фіолетового та чорного паперів, мали по два максимуми – один короткохвильовий і другий довгохвильовий. Фіолетовий папір мав один максимум в області хвиль фіолетового піддіапазону (440,9 нм), що було очікувано, та другий максимум – на 667,7 нм (область хвиль червоного піддіапазону). Чорний папір відбивав світло, що мало також максимуми у фіолетовому та червоному піддіапазонах – 422,6 нм та 653 нм. При цьому інтенсивність світла, що було

відбито від чорного паперу, була в середньому у 2,2 рази меншою, ніж інтенсивність світла, відбитого від фіолетового паперу, а інтенсивність світла, відбитого від фіолетового паперу була у 1,6 рази нижчою, ніж інтенсивність світла, відбитого від білого паперу.

ПРИНЦИПИ РОБОТИ АПАРАТУ «КСД»

Як відомо, живі біологічні системи генерують електростатичні поля, а також електромагнітні хвилі різної частоти та інтенсивності. Цей факт було покладено в основу низки об'єктивних методів визначення функціонального стану внутрішніх органів та окремих систем організму людини. Починаючи з середини двадцятого століття в медичну практику міцно увійшли такі методи дослідження, як електроенцефалографія, електрокардіографія, електроміографія, електроретинографія та ін. Такі дослідження є неінвазивними та дозволяють виявляти патологічні процеси в досліджуваному органі, що буває дуже важливо для уточнення діагнозу та визначення оптимальної стратегії лікування.

Слід зазначити, що ще у 70-ті роки минулого сторіччя проводилися дослідження з реєстрації зовнішніх електромагнітних полів живого організму в діапазоні від 10^{-2} до 10^4 Гц на відстанях від 1 мм до 1 м [17-20]. В результаті цих досліджень була показана можливість безконтактно реєстрації електрокардіограм [19], електрогастрограм [18], а також електричної активності інших органів та тканин [17, 20], що обумовлена їхньою життєдіяльністю.

У подальшому науково-дослідні роботи, які проводилися в різних країнах у напрямку вивчення електромагнітних полів тіла людини, завершилися створенням низки лікувально-діагностичних апаратно-комп'ютерних комплексів, які базуються на реєстрації та комп'ютерній розшифровці електромагнітних спектрів живого організму [21-26].

В Україні було створено і впроваджено у практику прилад – апарат «КСД» (комплекс спектрально-динамічний), принцип роботи якого заснований на реєстрації та обробці спектрів електромагнітних коливань, що випромінюються тілом людини.

Спектрально-динамічна технологія «КСД» захищена патентами та авторськими свідоцтвами [27-34]. Апарат «КСД» пройшов клінічні випробування, а також офіційну реєстрацію та сертифікацію в Україні, Російській Федерації та Євросоюзі і дозволений до використання в якості медичного обладнання.

До складу апарату КСД входить чутливий датчик – ергономічно зроблений біполярний електрод [30, 31]. Датчик дозволяє приймати електромагнітні коливання в широкому діапазоні спектра, які випромінюються всіма органами і тканинами пацієнта (досліджуваного). Прийнятий сигнал після попереднього підсилення піддається дискретизації та кодуванню в двійковій системі числення за допомогою АЦП та надходить у комп'ютер для подальшої обробки і аналізу за допомогою спеціальних програм. Аналіз отриманих спектрів проводиться шляхом їх вейвлет-перетворень та порівняння з набором еталонів, які зберігаються в комп'ютерній базі апарату «КСД» та містять дані про спектри різних органів та груп клітин людського тіла в здоровому стані та при наявності захворювань. Вейвлет-перетворення переводить сигнал з часового представлення у частотно-часове та являє собою узагальнення спектрального аналізу. Розшифровка зареєстрованого спектра шляхом його порівняння з еталонним набором є стандартною процедурою під час проведення спектрального аналізу, незалежно від природи сигналів, що вивчаються. Тобто за своєю суттю апарат КСД є спектроаналізатором, що обумовлює особливості його використання в діагностичних та дослідницьких цілях.

Для виключення можливих помилок, пов'язаних з випадковими факторами, які впливають на стан пацієнта/досліджуваного, за час, який відведено для обстеження, проводиться запис декількох спектрів. Багаторічна практика використання апарату «КСД» в дослідницько-діагностичних цілях показує, що оптимальним є аналіз трьох «одномоментних» спектрів стану людини. Програма користувальницького інтерфейсу апарату «КСД» зроблена таким чином, що на екрані комп'ютера показуються дані про кількість зареєстрованих у пацієнта «одномоментних» спектрів, які збіглися або не збіглися з відповідним спектральним еталоном, а також демонструються відсотки їх часткового збігу.

Таким чином, особливістю інформації, яка отримується за допомогою апарату «КСД», є те, що ця інформація надається не в абсолютних величинах, а у відсотках до середньостатистичної норми. Однак слід зазначити, що результати розшифровки електроенцефалограм або електрокардіограм, які отримуються за допомогою традиційних апаратів, що використовуються в сучасній медицині, також не надаються у абсолютних величинах, а містять відносну інформацію про розподілення енергії електричних (електромагнітних) коливань у досліджуваній смузі частот та говорять лише про те, чи виходять зафіксовані показники за межі певної середньостатистичної норми.

Оскільки у своєму дослідженні ми займалися вивченням реакції (зміни активності) соматосенсорних рецепторів та іннервації шкіри під дією на долоні світла різного кольору, то нам було важливо порівняти ступінь активації тих чи інших рецепторів шкіри до та після зазначеного впливу. З цієї точки зору будь-які абсолютні значення вимірюваних величин були не так важливі, як їх відносні зміни до та після впливу. Користувальницький інтерфейс апарату «КСД» дозволяє зберігати в базі даних результати вимірювань, які були проведені до, під час та після впливу якого-небудь фактору (у нашому випадку –

електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль видимого діапазону), що дозволило нам легко проводити порівняльний аналіз ступеню впливу фактору, що вивчався, на організм. Автоматичний аналіз вимірюваних показників у поєднанні зі зручним інтерфейсом, а також можливість отримати дані про стан відразу багатьох органів і систем людського організму за допомогою одного пристрою, який є простим та зручним в експлуатації, зумовили наш вибір апарату «КСД» в якості дослідницького приладу при проведенні наших експериментів.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ АПАРАТУ «КСД» ТА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Для реєстрації електромагнітного спектру, який випромінюється тілом, датчик «КСД» розташовувався в руці у досліджуваного. Згідно з інструкцією, для реєстрації хвильового поля пацієнт/досліджуваний повинен доторкатися до датчика безпосередньо або крізь стерильний матеріал. З метою дотримання норм гігієни, між рукою досліджуваного та датчиком в процесі проведення експериментів розташовувалася одноразова паперова серветка білого кольору, що не впливало на результати вимірювань.

Для виявлення особливостей реакції різних соматосенсорних рецепторів шкіри долонь та нервових волокон, що приймають участь в іннервації шкіри на отриману оптичну інформацію під час шкірно-оптичного сприйняття електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль, у групі досліджуваних слабозорих під час проведених експериментів нами вивчалися зміни активності таких обраних параметрів: тілець Фатера-Пачіні, тілець Руффіні, тілець Мейснера, тілець Гольджі, а також адренергічних нервових волокон, синапсів, іннервації кровоносних судин шкіри, іннервації сосочкового відділу шкіри.

Всі отримані показники дослідження були занесені до комп'ютерного банку даних та потім проходили статистичну обробку.

Всього в експериментах приймало участь 12 слабозорих дітей, які проходили курс навчання шкірно-оптичному сприйняттю за авторською методикою В.М. Мізрахі [35]. На пелюсткових діаграмах, що наведені нижче, представлено середньостатистичні значення активності вимірюваних параметрів, розраховані у відсотках.

Статистична обробка даних проводилася з використанням пакета прикладних програм SPSS Statistics 17.0. Для статистичної оцінки одержаних результатів використовувався критерій Хі-квадрат. Всі статистичні гіпотези були перевірені при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Значення ймовірності (р) порівнювалися з рівнем значущості (α); результати вважалися статистично значущими, коли $p < \alpha$ ($p < 0,05$).

Перед початком занять проводилося вимірювання перелічених вище параметрів кожної дитини, яка приймала участь у експериментах з навчання шкірно-оптичному сприйняттю. З цим початковим значенням досліджуваних параметрів організму дитини в подальшому порівнювалися результати вимірів, що проводилися в процесі навчання. На рисунках, що наведені нижче, діаграми, які відображають це початкове вимірювання, помічено словом «до». При цьому дитина в одній руці тримала електрод (вимірювальний датчик) апарату «КСД», а друга рука лежала долонею вниз на спеціальному столику (підставці), зробленому з оргскла.

Під час навчання шкірно-оптичному сприйняттю очі дитини закривалися чорною пов'язкою, щоб повністю виключити можливість використання звичайного зору за допомогою очей. Для експериментів використовувалися аркуші паперу різного кольору з однаковою фактурою. На перших заняттях діти навчалися розпізнавати контактним способом контрастні кольори, наприклад, відрізнити білий колір паперу від чорного, торкаючись паперу рукою. Аркуш паперу розташовувався на підставці з оргскла, а дитина при контактному способі розпізнавання водила пальцями по паперу, навчаючись відрізнити за своїми тактильними відчуттями один колір від іншого. Потім на одному з подальших занять дітям було запропоновано з зав'язаними очима розпізнавати всі дев'ять кольорів (сім кольорів спектру плюс білий та чорний), відрізняючи їх один від одного. Після того, як на цьому занятті діти навчилися впевнено визначати колір паперу за допомогою шкірно-оптичної чутливості, було проведено вимірювання обраних параметрів у дітей в той момент, коли вільна від датчика рука дитини лежала долонею на папері певного кольору. Таким чином були проведені виміри під час торкання рукою таких кольорів: білого, чорного, червоного, помаранчевого, жовтого, зеленого, блакитного синього та фіолетового. При порівнянні з початковим вимірюванням («до»), точки на пелюсткових діаграмах, що позначені словами «білий», «чорний», «червоний», «помаранчевий», «жовтий», «зелений», «блакитний», «синій», «фіолетовий» показують, як змінювалася активність досліджуваних параметрів під дією на шкіру долонь відповідних кольорів.

Наприкінці фінального заняття було проведено контрольне вимірювання параметрів у дітей, які брали участь в експериментах. При цьому, як і при початковому вимірюванні, діти не торкалися рукою паперових аркушів. На наведених нижче діаграмах це вимірювання позначено словами «фінальний»

контроль». При порівнянні з початковим вимірюванням (з діаграмами, які позначені словом «до») фінальне вимірювання («фінальний контроль») дає можливість визначити, як змінилися показники активності вимірюваних параметрів за весь час навчання без впливу кольору на шкіру долонь.

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження впливу на шкірні рецептори та нервові волокна електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль, що діяло на долоні, дозволило виявити особливості реакцій (чутливості) різних соматосенсорних рецепторів на конкретний колір.

Пластинчаті тільця Фатера-Пачіні – складний інкапсульований нервовий рецептор. Може виступати як барорецептор. Мережа капілярів у просторі між зовнішньою і внутрішньою капсулами змінює стан вторинночутливих клітин за рахунок зміни тиску на них крові, що викликає індукування нервового імпульсу [36]. Як передбачає фізіологія, головною функцією цих тілець шкіри є детектування вібрації [36].

При вивченні впливу електромагнітного випромінювання видимого діапазону на шкіру долонь була встановлена здатність активації тілець Фатера-Пачіні хвилями діапазонів від 570-760 нм (жовтий, помаранчевий, червоний), та від 380 до 480 нм (фіолетовий та синій кольори), а також білим кольором. Експерименти показали, що під дією цих кольорів відбувалася активація тілець Фатера-Пачіні на 30%-40% порівняно зі значенням до проведення експерименту (Рис. 1). Водночас, активність цих рецепторів знижувалася на 8% під дією хвиль у діапазоні 470-580 нм (зелений та блакитний кольори) (Рис. 1).

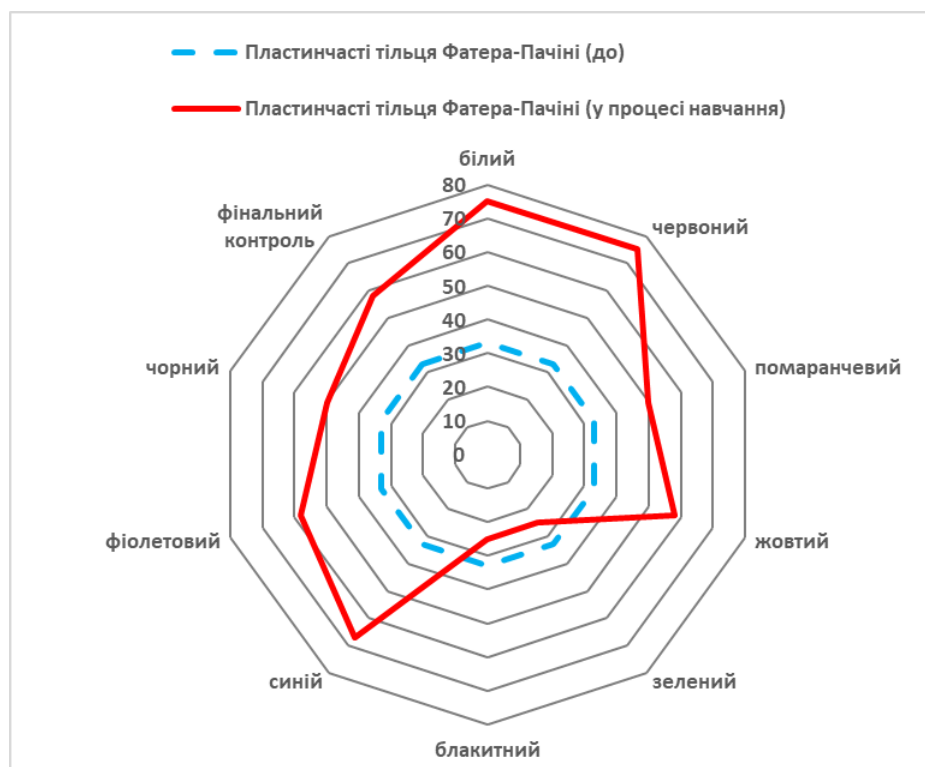


Рис. 1. Вплив електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль на активність тілець Фатера-Пачіні, %

Існує два типи шкірних терморекторів – холодіві та теплові. І ті, і інші повільно адаптуються, хоча можуть давати належну відповідь на швидкі зміни температури шкіри. Тільця Руффіні є рецепторами, що реагують на тепло, а колбочки Краузе реагують на холод [37]. При зігріванні шкіри імпульсація холодівих рецепторів припиняється, і навпаки, при охолодженні замовкають теплові рецептори [37].

Встановлено зростання активності теплової чутливості (тілець Руффіні) під дією впливу електромагнітного випромінювання на шкіру долонь в діапазоні хвиль від 380-700 нм (у всьому спектральному діапазоні видимого світла) (Рис. 2). Найбільша активація спостерігалася на так званих теплих (червоний, помаранчевий) та зеленому кольорах, а також наприкінці циклу занять (фінальний контроль). На білому, чорному та кольорах, які прийнято називати холодними (блакитний, синій), активація тілець Руффіні була меншою, ніж на теплих кольорах (Рис. 2).

Терміни «теплий колір», «холодний колір» широко використовуються в образотворчому мистецтві та дизайні. Походження цих термінів зазвичай пояснюється з точки зору психології сприйняття: червоний, помаранчевий та жовтий сприймаються нами як теплі кольори, тому що асоціюються з вогнем та сонцем, а синій, блакитний, фіолетовий асоціюються з водою та зимовою погодою (льодом, снігом) і



Рис. 2. Вплив електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль на активність тілець Руффіні, %

тому вважаються холодними. Слід, однак, відмітити, що у випадку шкірно-оптичного сприйняття мова йде вже не про асоціації, а про суб'єктивні відчуття. Згідно з багаторічними спостереженнями В.М. Мізрахі, під час шкірно-оптичного визначення кольору як зрячі так і слабозорі (із зав'язаними очима), і сліпі однаково описують свої відчуття різних кольорів, характеризуючи їх наступним чином: червоний – гарячий, помаранчевий – теплий, жовтий – ледь теплий, зелений – температурно-нейтральний, блакитний – прохолодний, синій – холодний, фіолетовий – такий, що морозить [35]. Такі суб'єктивні відчуття в цілому корелюють з даними, отриманими нами під час експериментів зі слабозорими дітьми. Під дією на шкіру рук червоного кольору, який відчувався як гарячий, активація тілець Руффіні (теплових рецепторів) підвищилася на 42% у порівнянні з контрольним виміром до початку занять. На помаранчевому кольорі, який характеризувався досліджуваними як теплий, спостерігалася активація теплових рецепторів на 34%. На блакитному та синьому (суб'єктивно – прохолодному та холодному, відповідно) відбулася активація тілець Руффіні на 25%, а на фіолетовому кольорі, який суб'єктивно «морозив», активація не спостерігалася зовсім, залишаючись такою самою, як і до початку експериментів.

Тільця Мейснера – це рецептори відчуття, які знаходяться в сосочковому шарі дерми й поряд з іншими тактильними рецепторами створюють відчуття дотику [38].

При вивченні тактильної чутливості тілець Мейснера було встановлено, що під дією електромагнітного випромінювання видимого діапазону усіх довжин хвиль (крім жовтого, синього і фіолетового кольорів) відзначалася активація цих рецепторів. Найбільший ефект активації (на 40%) мали довжини хвиль в діапазоні 590-620 нм (помаранчевий колір), 510-570 нм (зелений колір) (на 20%) та під впливом 480-510 нм (блакитний колір) (на 30%) (Рис. 3).

Тільця Гольджі – це механорецептори опорно-рухового апарату, розташовані в сухожиллях зазвичай на межі м'язової і сухожильної тканин, в опорних ділянках капсул суглобів, в зовнішніх та внутрішніх суглобових зв'язках [39]. Представляють собою основні нервові закінчення сухожилків, що має дуже велике значення при здійсненні рухливих актів.

Була встановлена здатність пригнічення активності тілець Гольджі хвилями електромагнітного випромінювання усіх досліджених нами діапазонів. Найбільш виражені зміни спостерігалися під впливом довжин хвиль 620-700 нм (червоний колір), помаранчевого та синього кольорів, при цьому

активність цих показників була на 20-30% меншою, порівняно зі значенням до проведення експерименту (Рис. 4).

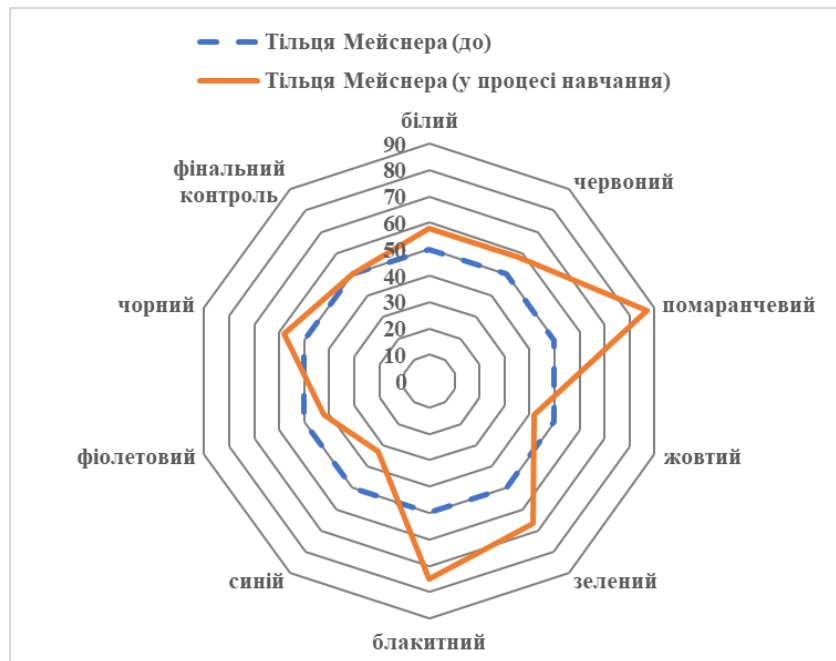


Рис. 3. Вплив електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль на активність тілець Мейснера, %

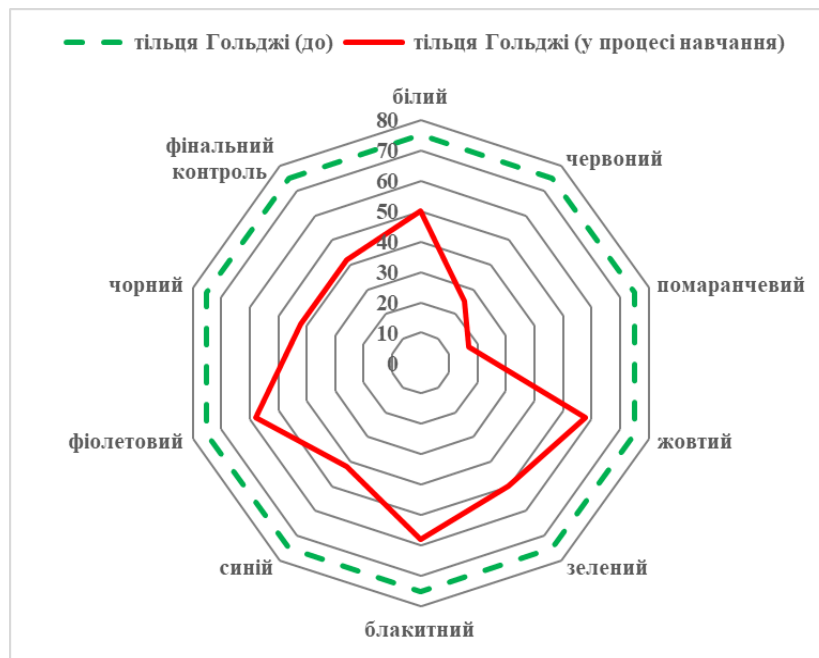


Рис. 4. Вплив електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль на активність тілець Гольджі, %

Адренергічні нервові волокна – волокна вегетативної нервової системи, по яких збудження від нервового вузла (ганглії) передається за допомогою медіаторів (в основному норадреналіну) на іннервованій робочий орган.

Активність адренергічних нервових волокон зростала під дією білого, блакитного та фіолетового кольорів на 20-35% відповідно, порівняно зі значенням до проведення експерименту (Рис. 5А).

Синапси – особливий тип міжклітинного контакту між нейроном і клітиною-мішенню [40, 41]. В синапсі (з хімічною передачею нервового імпульсу) роль посередника (медіатора передачі) виконує хімічна речовина [40].

Під впливом електромагнітного випромінювання видимого діапазону на шкіру долонь встановлена активація синаптичної передачі нервових імпульсів в діапазонах хвиль червоного (на 25%), зеленого (на 35%), фіолетового (на 37%), а також білого та чорного кольорів (на 18%), порівняно зі значенням до проведення експерименту (Рис.5Б).

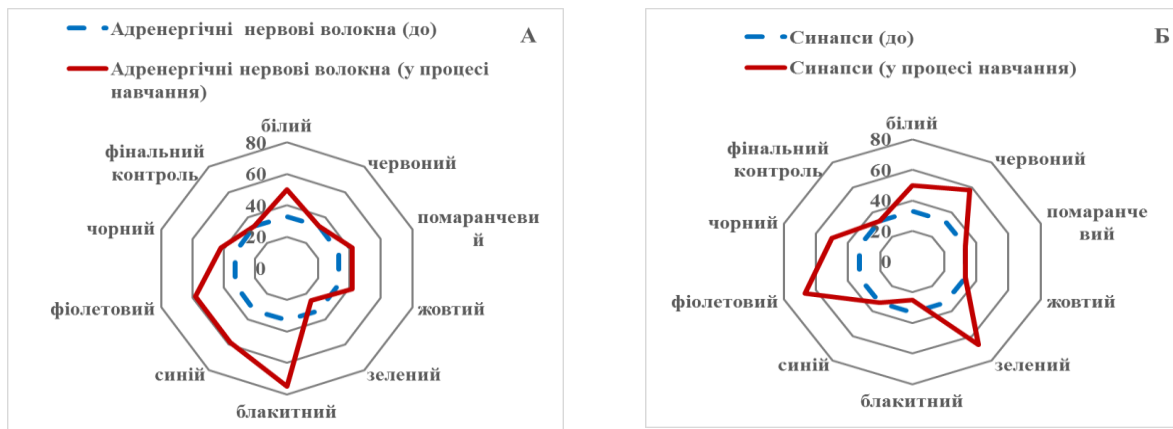


Рис. 5. Вплив електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль на активність адренергічних нервових волокон (А) та синапсів (Б), %

Симпатична судинозвужувальна іннервація охоплює кровоносні судини практично усіх органів і тканин тіла людини і тварин. Виняток складають судини плаценти, які взагалі позбавлені іннервації. Судинозвужувальні волокна тонічно активні, тобто по них до кровоносних судин увесь час надходять імпульси з частотою 0,5–2,0 імпл/с в стані спокою і до 8,0–15,0 імпл/с при максимальному збудженні, що супроводжується сильним звуженням і навіть закриттям дрібних кровоносних судин.

Під впливом електромагнітного випромінювання видимого діапазону на шкіру долонь встановлена здатність інгібування іннервації кровоносних судин шкіри (що не призводило до звуження кровоносних судин) і сосочкового відділу шкіри під впливом усіх вивчених дожин хвиль (Рис. 6).

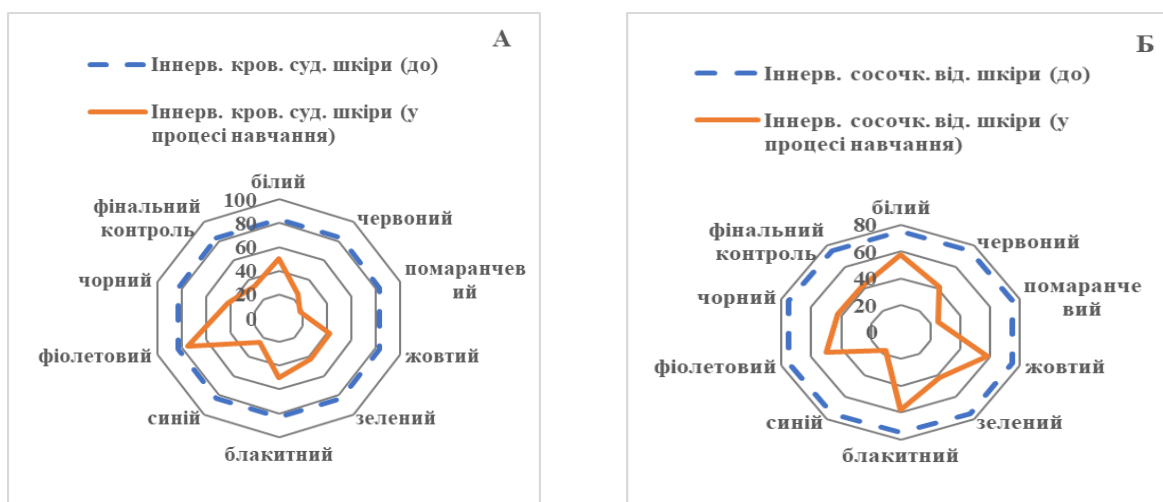


Рис. 6. Вплив електромагнітного випромінювання видимого діапазону з різними довжинами хвиль на активність іннервації кровоносних судин шкіри (А), іннервації сосочкового відділу шкіри (Б), %

ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження з визначення впливу електромагнітного випромінювання різних довжин хвиль видимого діапазону на активність різних типів соматосенсорних рецепторів шкіри долонь та нервових волокон, що приймають участь в іннервації шкіри, дозволили розширити наукові


знання про шкірно-оптичне сприйняття. А саме, нами було виявлено, що дермо-оптичне сприйняття шкірою долонь зумовлене не тільки температурною чутливістю (яку забезпечують терморцептори), але й іншими типами рецепторів: барорецепторами (тільця Фатера-Пачіні), тактильними рецепторами (тільця Мейснера), механорецепторами (тільця Гольджі). Це підтверджується різною реакцією досліджуваних рецепторів та нервових волокон на вплив світла конкретних довжин хвиль електромагнітного випромінювання різних кольорів. Таким чином, нами було показано, що рецептори шкіри здатні сприймати неспецифічні для них діючі фактори, а саме – оптичні стимули та продукувати у відповідь нервові імпульси, а потім передавати їх далі по нервових шляхах до центральної нервової системи. Вивчення реакції центральної нервової системи, зокрема зорової кори головного мозку, на вплив оптичних стимулів, що діють через неспецифічний сенсорний орган (шкіру), ще потребує подальших досліджень.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

V.P.Titar  <https://orcid.org/0000-0002-4874-8929>

Iu.V. Ielchishcheva  <https://orcid.org/0000-0002-4422-9582>

O.V.Shpachenko  <https://orcid.org/0000-0002-6072-5340>

A.V. Melnikova  <https://orcid.org/0000-0002-2291-6859>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Passini R, Rainville C. The dermo-optical perception of color as an information source for blind travelers. *Perceptual and motor skills*. 1992;75(3):995-1010.
2. Larner AJ. A possible account of synaesthesia dating from the seventeenth century. *Journal of the History of the Neurosciences*. 2006;15(3):245-249.
3. Duplessis Y. La perception dermo-optique. *Le monde inconnu. Chronique scientifique*. 1978;8:63.
4. Duplessis Y. Dermo-optic sensitivity and pedagogy. *Newsletter of the World Council for Curriculum and Instruction*. 1981;12:2.
5. Duplessis Y. *La couleurs visibles et non visibles: ouvrage collectif*. Monaco: Edition du Rocher. 1984.
6. Duplessis Y. Dermo-optical sensitivity and perception: its influence on human behavior. *International Journal of Biosocial Research*. 1985;7:76-93.
7. Novomeysky S. Developpement de la perception dermo-optique chez les aveugles. *Questions de Psychologie*. 1965;7:111-112.
8. Novomeysky S. Le changement de la sensibilitf dermo-optique dans les differentes conditions de l'clairage. In *fiuestions de (n psycho-pbysologie de l'activit6 et autor6gultion de l'individu*. Sverdlovsk: Institut Pbdagogique. 1968. p. 73-81.
9. Larner AJ. A possible account of synaesthesia dating from the seventeenth century. *Journal of the History of the Neurosciences*. 2006;15(3):245-249.
10. Loring DW (ed.): *INS Dictionary of Neuropsychology*. New York, OUP. 1999. p. 155.
11. Pryse-Phillips W. *Companion to Clinical Neurology* (2nd edition). New York, OUP. 2003. p. 915.
12. Brugger P, Weiss PH. Dermo-optical perception: The non-synesthetic "palpability of colors" a comment on Larner (2006). *Journal of the History of the Neurosciences*. 2008;17(2):253-255.
13. Zeki S. *A vision of the brain*. Cambridge, MA, US: Blackwell Scientific Publications. 1993.
14. ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин. Межгосударственный стандарт. Издательство официальное. М.: Издательство стандартов; 1980. p. 18.
15. Zavala A, Van Cott HP, Orr DB, Small VH. Human dermo-optical perception: Colors of objects and of projected light differentiated with fingers. *Perceptual and motor skills*. 1967;25(2):525-542.
16. Cohen LG, Celnik P, Pascual-Leone A, Corwell B, Faiz L, Dambrosia J, Hallett M. Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature*. 1997;389(6647):180-183.
17. Валеев ІС, Осенній ОС, Торнуєв ЮВ, Ракітянській ДФ. До питання про походження зовнішнього електричного поля, що реєструється поблизу тварин і людини. *Фізіолог. журн. УРСР*. 1963;19(1):99-104.
18. Собакин МА. Физические поля желудка. Наука; 1978. 112 с.
19. Кулин ЕТ. Биоэлектретный эффект. Минск: Наука и техника; 1980. 216 с.
20. Березовский ВА, Колотилов НН. Биофизические характеристики тканей человека. Справочник. Отв. ред. и авт. предисл. Костюк П.Г. Киев: Наук. Думка; 1990. 224 с.
21. Ростовцев ВН, Рубан АП. Метод спектрально-динамической диагностики: Инструкция по применению. Минск; 2005. 14 с.

22. Регистрационное удостоверение на медицинское изделие от 27 февраля 2015 г. № ФСР 2009/04973.
23. Кафанов ЮН, Мягков ВИ, Юрин ДВ. Методические и аппаратные средства современной интегральной медисзины: комплекс медицинский экспертный (КМЭ). http://web.archive.org/web/20191018035224/https://kmedex.org/technology_CME.php.
24. Литавева МП. Компьютерные информационные медицинские технологии: перспективные направления. Ежемесячный научный журнал; Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2014;8:65-67.
25. Регистрационное удостоверение МОЗ РФ ФСЗ № 2009/05666 от 1 декабря 2009 г.
26. Сертифікат відповідності МОЗ України № УА.ТР.039.560, дата видачі` – 27.06.2018.
27. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30892 «База даних електромагнітних характеристик біологічних об'єктів», Україна / Коптелов ОО. – Дата реєстрації 05.11.2009.
28. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №35528: комп'ютерна програма «Програма для запису електромагнітних характеристик біологічних об'єктів», Україна / Коптелов ОО. Дата реєстрації 23.03.2010.
29. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 25853: комп'ютерна програма «Програмно-апаратний комплекс «Сімейний лікар»», Україна / Коптелов ОО. – Дата реєстрації 26.09.2008.
30. Патент № 19807, Україна, МПК А61Н 5/00, А61Б 5/04, А61Н 39/02 (2006.01) Спосіб запису біоінформаційних характеристик біологічного об'єкта / Тютюнник Ю, Тютюнник П, Дяченко ВВ, Коптелов ОО. – Номер заявки u200611298, заявл. 26.10.2006, опубл. 15.12.2006, бюл. № 12/2006.
31. Патент № 19808, Україна, МПК А61Н 5/02, А61Б 5/04, А61Н 39/02 (2006.01) Пристрій для запису та коригування біоінформаційних характеристик біологічного об'єкта / Тютюнник Ю, Тютюнник П, Дяченко ВВ, Коптелов ОО. – Номер заявки u200611299, заявл. 26.10.2006, опубл. 15.12.2006, бюл. № 12/2006.
32. Патент № 30545, Україна, МПК А61Н 5/00, А61Н 39/02 (2007.01) Пристрій для запису та контролювання біоінформаційних характеристик біологічного об'єкта / Коптелов ОО, Дяченко ВВ, – Номер заявки u200713651, заявл. 06.12.2007, опубл. 25.02.2008, бюл. № 2/2008.
33. Патент № 4606, Республика Беларусь, МПК А61Б 5/04, А61Н 5/00, А61Н 39/02 (2006.01) Устройство для записи и корректирования бионформационных характеристик биологического объекта / Коптелов АО, Дяченко ВВ. – Номер заявки u20080032, заявл. 17.01.2008, опубл. 30.08.2008, бюл. № 8/2008.
34. Патент №102882, РФ, МПК А61Б 5/04 (2006.01) Диагностический прибор / Бондарь МП, Минаев ВТ, Коптелов АО, Дяченко ВВ. – Номер заявки 2010128883, заявл. 12.07.2010, опубл. 20.03.2011, бюл. № 8/2011.
35. Мизрахи ВМ. Проблемы кожно-оптического восприятия света слепыми // Сб. статей. Харьков: ХГУ; 1993. 48 С.
36. Cauna N, Mannan G. The structure of human digital pacinian corpuscles (corpuscula lamellosa) and its functional significance. *Journal of anatomy*. 1958;92(1):1.
37. Hensel H. Thermoreceptors. *Annual review of physiology*. 1974;36(1):233-249.
38. Cauna N, Ross LL. The fine structure of Meissner's touch corpuscles of human fingers. *The Journal of Cell Biology*. 1960;8(2):467-482.
39. Catton WT. Mechanoreceptor function. *Physiological reviews*. 1970;50(3):297-318.
40. McLachlan EM. The statistics of transmitter release at chemical synapses. *International Review Physiology*. 1978;17:49-117.
41. Dani A, Huang B, Bergan J, Dulac C, Zhuang X. Superresolution imaging of chemical synapses in the brain. *Neuron*. 2010;68(5):843-856.

REFERENCES

1. Passini R, Rainville C. The dermo-optical perception of color as an information source for blind travelers. *Perceptual and motor skills*. 1992;75(3):995-1010.
2. Larner AJ. A possible account of synaesthesia dating from the seventeenth century. *Journal of the History of the Neurosciences*. 2006;15(3)245-249.
3. Duplessis Y. La perception dermo-optique. *Le monde inconnu. Chronique scientifique*. 1978;8:63.
4. Duplessis Y. Dermo-optic sensitivity and pedagogy. *Newsletter of the World Council for Curriculum and Instruction*. 1981;12:2.
5. Duplessis Y. *La couleurs visibls et non visibles: ourage collectif*. Monaco: Edition du Rocher. 1984.
6. Duplessis Y. Dermo-optical sensitivity and perception: its influence on human behavior. *International Journal of Biosocial Research*. 1985;7:76-93.
7. Novomeysky S. Developpement de la perception derrno-optique chez les aveugles. *Questions de Psychologie*. 1965;7:111-112.

8. Novomeysky S. Le changement de la sensibilit6 dermo-optique dans les differentes conditions de l'clairage. In fiuestions de (n psycho-pbysologie de l'activit6 et autor6gultion de l'individu. Sverdlovsk: Institut Pbdagogique. 1968. p. 73-81.
9. Larnar AJ. A possible account of synaesthesia dating from the seventeenth century. *Journal of the History of the Neurosciences*. 2006;15(3):245-249.
10. Loring DW (ed.): *INS Dictionary of Neuropsychology*. New York, OUP. 1999. p. 155.
11. Pryse-Phillips W. *Companion to Clinical Neurology* (2nd edition). New York, OUP. 2003. p. 915.
12. Brugger P, Weiss PH. Dermo-optical perception: The non-synesthetic "palpability of colors" a comment on Larnar (2006). *Journal of the History of the Neurosciences*. 2008;17(2):253-255.
13. Zeki S. *A vision of the brain*. Cambridge, MA, US: Blackwell Scientific Publications. 1993.
14. GOST 7601-78. *Physical optics. Terms, letter designations and definitions of basic quantities*. Interstate standard. Official publishing house. M.: Standards publishing house; 1980. p. 18. (Russian)
15. Zavala A, Van Cott HP, Orr DB, Small VH. Human dermo-optical perception: Colors of objects and of projected light differentiated with fingers. *Perceptual and motor skills*. 1967;25(2):525-542.
16. Cohen LG, Celnik P, Pascual-Leone A, Corwell B, Faiz L, Dambrosia J, Hallett M. Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature*. 1997;389(6647):180-183.
17. Valeev IS, Autumn OS, Tornuev SE, Rakityanskaya SF. On the question of the origin of the external electric field, which is registered near animals and humans. *Physiologist. magazine. USSR*. 1963;19(1):99-104. (Ukrainian).
18. Sobakin MA. *Physical fields of the stomach. The science*; 1978.112 s. (Russian).
19. Kulin ET. *Bioelectric effect*. Minsk: Science and Technology; 1980. p. 216. (In Russian).
20. Berezovsky VA, Kolotilov NN. *Biophysical characteristics of human tissues. Directory*. Resp. ed. and ed. foreword Kostyuk P.G. Kiev: Nauk. Dumka; 1990. p. 224. (In Russian).
21. Rostovsev VN, Ruban AP. *Method of spectral dynamic diagnostics: Instructions for use*. Minsk; 2005. p. 14. (Russian).
22. Registration certificate for a medical device dated February 27, 2015 No. FSR 2009/04973. (Russian).
23. Kafanov YN, Myagkov VI, Yurin DV. *Methodical and hardware means of a modern integral medicine: a medical expert complex (CME)*. (Russian) http://web.archive.org/web/20191018035224/https://kmedex.org/technology_CME.php.
24. Litaeva MP. *Computer information medical technologies: promising directions*. *Monthly scientific journal; Eurasian Union of Scientists (ESU)*. 2014;8:65-67. (Russian).
25. Registration certificate of the Ministry of Health of the Russian Federation FSZ No. 2009/05666 dated December 1, 2009. (Russian).
26. Certificate of conformity of the Ministry of Health of Ukraine № UATR.039.560, date of issue` - 06/27/2018. (Ukrainian).
27. Certificate of registration of copyright to the work № 30892 "Database of electromagnetic characteristics of biological objects", Ukraine / Koptelov OO. - Date of registration 05.11.2009. (Ukrainian).
28. Certificate of registration of copyright to the work №35528: computer program "Program for recording electromagnetic characteristics of biological objects", Ukraine / Koptelov OO. Date of registration 23.03.2010. (Ukrainian).
29. Certificate of copyright registration for the work № 25853: computer program "Software and hardware complex" Family Doctor ", Ukraine / Koptelov OO. - Date of registration 26.09.2008. (Ukrainian).
30. Patent № 19807, Ukraine, IPC A61H 5/00, A61B 5/04, A61H 39/02 (2006.01) Method of recording bioinformation characteristics of a biological object / Tobacco IO, Tobacco II, Dyachenko BB, Koptelov OO. - Application number u200611298, application no. 26.10.2006, publ. 15.12.2006, bul. № 12/2006. (Ukrainian).
31. Patent № 19808, Ukraine, IPC A61H 5/02, A61B 5/04, A61H 39/02 (2006.01) Device for recording and adjusting the bioinformation characteristics of a biological object / Tobacco IO, Tobacco II, Dyachenko VV, Koptelov OO. - Application number u200611299, application no. 26.10.2006, publ. 15.12.2006, bul. № 12/2006. (Ukrainian).
32. Patent No. 30545, Ukraine, IPC A61H 5/00, A61H 39/02 (2007.01) Pristriy for recording that control of biological information characteristics of a biological object / Koptulov OO, Dyachenko VV, - Application number u200713651, app. 06.12.2007, publ. 02.25.2008, bul. No. 2/2008. (Ukrainian).
33. Patent No. 4606, Republic of Belarus, IPC A61B 5/04, A61H 5/00, A61H 39/02 (2006.01) A device for recording and correcting the bionformational characteristics of a biological object / Koptelov AO, Dyachenko VV. - Application number u20080032, app. 01/17/2008, publ. 08/30/2008, bul. No. 8/2008. (Russian).
34. Patent No. 102882, RF, IPC A61B 5/04 (2006.01) Diagnostic device / Bondar MP, Minaev VT, Koptelov AO, Dyachenko VV. - Application number 2010128883, app. 12.07.2010, publ. 03/20/2011, bul. No. 8/2011. (Russian).

35. Mizrahi VM. Problems of skin-optical perception of light by the blind // Sat. articles. Kharkiv: KhSU; 1993. p. 48. (Russian).
36. Cauna N, Mannan G. The structure of human digital pacinian corpuscles (corpuscula lamellosa) and its functional significance. *Journal of anatomy*. 1958;92(1):1.
37. Hensel H. Thermoreceptors. *Annual review of physiology*. 1974;36(1):233-249.
38. Cauna N, Ross LL. The fine structure of Meissner's touch corpuscles of human fingers. *The Journal of Cell Biology*. 1960;8(2):467-482.
39. Catton WT. Mechanoreceptor function. *Physiological reviews*. 1970;50(3):297-318.
40. McLachlan EM. The statistics of transmitter release at chemical synapses. *International Review Physiology*. 1978;17:49-117.
41. Dani A, Huang B, Bergan J, Dulac C, Zhuang X. Superresolution imaging of chemical synapses in the brain. *Neuron*. 2010;68(5):843-856.

Наукове видання

ВІСНИК ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В.Н. Каразіна

Серія
“Радіофізика та електроніка”

Випуск 32

Збірник наукових праць

Українською, російською та англійською мовами

Підписано до друку 27.10.2020. Формат 60x84/8.
Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. 11,2. Обл.-вид. арк. 14. Наклад 50 пр. Зам.№ 62/2020.

61022, Харків, майдан Свободи, 4,
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна

Видавець і виготовлювач
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна.
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3367 від 13.01.2009.