

ISSN 2311-0872

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Серія “ РАДІОФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА ”

Випуск 33

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 навколосемному 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 № 19 від 28.12.2020 р.).

Редакційна колегія

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

д.ф.-м.н., проф. **Аркуша Ю.В.**, Україна

проф. **Блаунштейн Н.**, Ізраїль

д.ф.-м.н., проф. **Горобець М.М.**, Україна

д.ф.-м.н., проф. **Дюбко С.П.**, Україна

д.ф.-м.н., проф. **Катрич В.О.**, Україна

д.ф.-м.н., проф. **Колчигін М.М.**, Україна

акад. НАНУ **Литвиненко Л.М.**, Україна

д.ф.-м.н., проф. **Шматько О.О.**, Україна

акад. НАНУ **Шульга В.М.**, 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 33

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 № 19 dated 28.12.2020).

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. **Katrish V.A.**, Ukraine

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

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

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

Address: 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 IIP dated 04.10.2006

© V.N. Karazin Kharkiv National University, 2020

ЗМІСТ

<i>Думін О. М., Прищенко О. А., Плахтій В. А., Почанін Г. П.</i> Виявлення та класифікація наземних мін за допомогою надширококуткового радару та штучних нейронних мереж	7
<i>Батраков Д.О.</i> Пошук дефектів й оцінка поточного стану інженерних споруд за допомогою георадарів (оглядова стаття. частина II)	20
<i>Антоненко Є.О., Кожешкурт В.О., Штода Д.О., Катрич Г.С., Катрич В.О.</i> Радіофізичні методи у дослідженні фізико-хімічних властивостей рідин	31
<i>Чорногор, Л. Ф., Гармаш К. П., Жданко Є. Г., С. Г. Леус Є. Г., Поднос В. А.</i> Програмно-апаратний комплекс багаточастотного похилого зондування іоносфери	42
<i>Пушин В. Ф., Чорногор Л. Ф.</i> Комбінаційні частоти сигналу доплерівського ВЧ радару в діапазоні геомагнітних пульсацій Pc1	60
<i>Чорногор Л. Ф., Голуб М. Ю., У. Люо.</i> Статистика геомагнітних бур протягом циклу сонячної активності (2009 – 2020 рр.)	69

CONTENTS

<i>Dumin O. M. , Pryshchenko O. A. , Plakhtii V. A. , Pochanin G. P.</i> Detection and classification of landmines using UWB antenna system and ANN analysis	7
<i>Batnikov D.O.</i> Search for defects and assessment of the current condition of engineering structures with the help of georadars (review. part ii)	20
<i>Antonenko Y.E., Kozheshkurt V., Shtoda D., Katrich G., Katrich V.</i> Radiophysical methods in the study of physicochemical properties of liquids	31
<i>Chernogor L. F. , Garmash K. P. , Zhdanko Y. H. , Leus S. G. , Podnos V. A.</i> Software and hardware system of multi-frequency oblique sounding the ionosphere	42
<i>Pushin V. F. , Chernogor L. F.</i> Combinational frequencies of HF Doppler radar signals in the Pc1 geomagnetic pulsation range	60
<i>Chornogor L. F., Holub M. Yu. , Y. Luo.</i> Statistical characteristics of geomagnetic storm activity during solar cycle 24, 2009–2020	69

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-01>

УДК 537.86

ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ НАЗЕМНИХ МІН ЗА ДОПОМОГОЮ НАДШИРОКОСМУГОВОГО РАДАРУ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

О. М. Думін¹, О. А. Прищенко¹, В. А. Плахтій¹, Г. П. Почанін²

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

E-mail: dumin@karazin.ua

² Інститут 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 17 листопада 2020 р.

Актуальність. У сучасному світі задача виявлення підземних об'єктів зустрічається у багатьох галузях діяльності людини: швидкий огляд території на предмет наявності підземних інженерних комунікацій для проведення земельних робіт, знаходження розташування конструкцій заземлення, обриву кабелю або його замикання, дистанційне зондування для виявлення та картографування археологічних об'єктів. Також в Україні є важливим питання гуманітарного розмінування в Донецькій та Луганській областях. Новітні пристрої дистанційного обстеження землі, такі як надширококустовий підповерхневий радар, вже стали на поміч військовим саперам у розвинених країнах, щоб зробити процес розмінування безпечнішим.

Мета роботи. Метою даної роботи є покращення розпізнавання підповерхневих об'єктів шляхом використання штучної нейронної мережі (ШНМ) для обробки сигналів, перевірка впливу завад у сигналах, що надходять від надширококустової антенної системи, на надійність визначення положення об'єкта в досліджуваній області та його типу.

Матеріали та методи. В даній роботі використаний метод ШНМ для розпізнавання прихованих об'єктів надширококустовим підповерхневим радаром. Процес поширення електромагнітного поля моделюється методом скінченних різниць у часовому просторі (FDTD). Тестування нейронної мережі проводиться шляхом додавання до вхідного сигналу Гаусового шуму різних рівнів. Для виключення випадковості розпізнавання для різних реалізацій шуму моделювання задачі проводиться 1000 разів.

Результати. Отримані гістограми розпізнавання об'єктів для двох типів мін та шести різновидів бляшанок. Великий набір хибних об'єктів для тренування нейронної мережі дав гарні результати розпізнавання протипіхотних мін, що відобразилося на чудовій стійкості визначення положення та типу об'єкту навіть за наявності завад із високим рівнем співвідношення сигнал-шум.

Висновки. Задача підповерхневого зондування може бути розв'язана використанням повнозв'язної нейронної мережі з п'ятьма прихованими шарами нейронів. Визначено, що використання штучного інтелекту дає гарні результати розпізнавання підземних об'єктів, якщо попередньо підготувати якісний навчальний набір даних для штучної нейронної мережі. Показана задовільна стійкість до роботи із зашумленими сигналами, що є перспективним для подальшого тестування розробленого методу у застосуванні до підповерхневого радара в умовах реального експерименту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: підповерхневий радар, надкороткий електромагнітний імпульс, штучна нейронна мережа, надширококустова антена, розпізнавання об'єктів, гуманітарне розмінування.

DETECTION AND CLASSIFICATION OF LANDMINES USING UWB ANTENNA SYSTEM AND ANN ANALYSIS

O. M. Dumin¹, O. A. Pryshchenko¹, V. A. Plakhtii¹, G. P. Pochanin²

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

² 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 detecting underground objects is found in many areas of human activity in the modern world, for example, a quick survey of the territory for the presence of underground utilities for earthworks, finding the location of grounding structures, cable breakage or short circuit, remote sensing for detecting and mapping of archaeological objects. The issue of humanitarian demining in Donetsk and Lugansk regions is also important in Ukraine. The latest ground surveying devices, such as ultrawideband subsurface radar, have already come to the aid for military sappers in developed countries to make the demining process safer.

Objectives: The goal of this work is to improve the recognition of subsurface objects by using an artificial neural network (ANN) for signal processing, to test the influence of interference in signals coming from ultrawideband antenna system on the reliability of determining the object in the observation area, its type and distance to subsurface radar.

Materials and methods: In this work, the ANN method is used to recognize the hidden objects by ultrawideband subsurface radar. The process of electromagnetic field propagation is simulated by finite time difference method

(FDTD). Neural network testing is performed by adding Gaussian noise of different levels in the input signal. Simulation of the problem is performed 1000 times to exclude the randomness of recognition for different realizations of a noise.

Results: Histograms of objects recognition for two types of mines and six types of cans were obtained. A large set of false objects for neural network training gave good results in the detection of antipersonnel mines, which was reflected in the excellent stability of determining the position and type of object, even in the presence of interference with a high signal-to-noise ratio.

Conclusions: The problem of subsurface survey can be solved by using a fully connected neural network with five hidden layers of neurons. It has been determined that the use of artificial intelligence gives good results in the recognition of underground objects, if a high-quality learning data set for ANN will be prepared. Satisfactory stability of noisy signal operation is shown, which gives prospects for further testing of the developed method in application to a subsurface radar in the conditions of a real experiment.

KEY WORDS: subsurface radar, ultrashort electromagnetic impulse, artificial neural network; ultrawideband antenna, object recognition, humanitarian demining.

ОБНАРУЖЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ НАЗЕМНЫХ МИН С ПОМОЩЬЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО РАДАРА И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Думин¹, А. А. Прищенко¹, В. А. Плахтий¹, Г. П. Почанин²

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

²Институт радиофизики и электроники им. О.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, ул. Акад. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

Актуальность. В современном мире задача обнаружения подземных объектов встречается во многих областях деятельности человека: быстрый осмотр территории на предмет наличия подземных инженерных коммуникаций для проведения земляных работ, нахождение расположения конструкций заземления, обрыва кабеля или его замыкания, дистанционное зондирование для выявления и картографирования археологических объектов. Также для Украины важен вопрос гуманитарного разминирования в Донецкой и Луганской областях. Новейшие устройства дистанционного обследования земли, такие как сверхширокополосный подповерхностный радар, уже стали на помощь военным саперам в развитых странах, чтобы сделать процесс разминирования безопаснее.

Цель работы. Целью данной работы является улучшение распознавания подповерхностных объектов путем использования искусственной нейронной сети (ИНС) для обработки сигналов, проверка влияния помех в сигналах, поступающих от сверхширокополосной антенной системы, на надежность определения объекта в исследуемой области и его типа.

Материалы и методы. В данной работе использован метод ИНС для распознавания скрытых объектов сверхширокополосным подповерхностным радаром. Процесс распространения электромагнитного поля моделируется методом конечных разностей во временной области (FDTD). Тестирование нейронной сети производится путем добавления Гауссова шума различных уровней к входному сигналу. Для исключения случайности распознавания для различных реализаций шума моделирование задачи проводится 1000 раз.

Результаты. Получены гистограммы распознавания объектов в виде двух типов мин и шести разновидностей банок. Большой набор ложных объектов для тренировки нейронной сети дал хорошие результаты распознавания противопехотных мин, что отразилось на прекрасной устойчивости определения положения и типа объекта даже при наличии помех с высоким уровнем соотношения сигнал-шум.

Выводы. Задача подповерхностного зондирования может быть решена использованием полносвязной нейронной сети с пятью скрытыми слоями нейронов. Определено, что использование искусственного интеллекта дает хорошие результаты распознавания подземных объектов, если предварительно подготовить качественный набор данных для обучения искусственной нейронной сети. Показана удовлетворительная устойчивость к работе с зашумленными сигналами, что перспективно для дальнейшего тестирования разработанного метода применительно к подповерхностному радару в условиях реального эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подповерхностный радар, сверхкороткий электромагнитный импульс, искусственная нейронная сеть, сверхширокополосная антенна, распознавание объектов, гуманитарное разминирование.

У наш час в Україні в Донецькій та Луганській областях встановлено різноманітні вибухонебезпечні предмети на території близько 7000 квадратних кілометрів [1]. Серед цих об'єктів найбільш небезпечними є наземні міни. Зазвичай розмінування території виконують військові сапери, але ідея виготовлення спеціального роботизованого обладнання для виявлення мін є привабливою альтернативою [2]. Найбільш перспективним пристроєм для сканування підземного простору для різних цілей є надширококустовий (НШС) підповерхневий радар [3]. Завдяки використанню надкоротких наносекундних імпульсів забезпечується висока роздільна здатність сканування [4]. Спектр застосування імпульсних електромагнітних хвиль досить широкий: виявлення людей за непрозорими перешкодами [5], аналіз ґрунту для інспекції ліній метро [6], гуманітарне розмінування [7] тощо.

Для будь-якого з можливих застосувань НШС радару слід використовувати технологію обробки сигналів, що відповідає цій конкретній задачі. Наприклад, напіваналітичний алгоритм узгодження режимів [8], узагальнене перетворення Хафа [9], метод кореляції [10]. В останні роки високу популярність набирають підходи розпізнавання на основі ШНМ [11]. Суттєвою перевагою застосування останнього метода є висока швидкість розпізнавання об'єкта за допомогою нейропроцесора [12].

Для навчання ШНМ слід збирати та готувати заздалегідь відому інформацію про зв'язок між вхідними даними та вихідними результатами розпізнавання. Це дозволяє отримувати правильні результати класифікації об'єктів для вхідних даних, які нейронна мережа раніше не бачила. Наприклад, вхідними даними можуть бути амплітуди поля, що сформовані відбитим імпульсом [13]. Чим складніший об'єкт, який потрібно розпізнати, тим складніша ШНМ нам потрібна. Крім того, застосування ШНМ дозволяє зробити класифікацію об'єктів менш чутливою до впливу шуму в прийнятих сигналах [14].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

НШС антена опромінює поверхню землі з діелектричною проникністю ґрунту $\varepsilon = 9$ та провідністю $\sigma = 0,005 \text{ См/м}$ імпульсною електромагнітною хвилею з тривалістю 0,23 нс [14]. Хвиля, відбита від компонентів приймальної антенної системи, наземних та підземних об'єктів, приймається чотирма антенами з різною орієнтацією поляризації. Особливе просторове розташування однакових антен дозволяє фіксувати відбиття хвилі від об'єктів, що досягають кожної антени в різні моменти часу, що вказує на напрямок приходу хвилі. Крім того, чим більше незалежних каналів прийому, тим стійкішим є процес класифікації [15]. НШС антенна система "1Tx + 4Rx" [16] зображена на Рис 1, де 1Tx (центральна антена) є випромінювачем електромагнітних полів, а 4Rx (антени на краях) є приймачами відбитих хвиль.

Для врахування всіх особливостей антенної системи, електрофізичних параметрів ґрунту та складних конструкцій об'єктів дослідження, електромагнітна задача моделюється методом скінченних різниць в часовому просторі (FDTD).

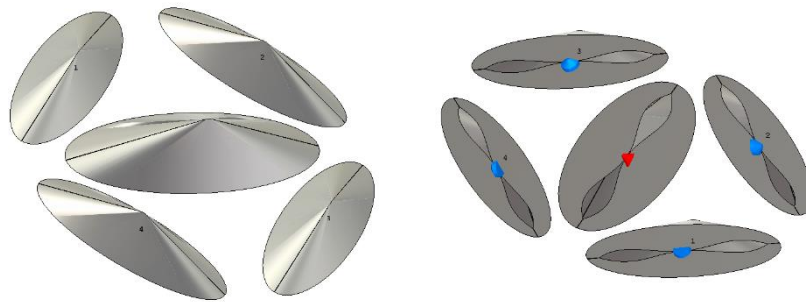


Рис. 1 НШС антенна система. Центральна антена – випромінювач електромагнітних полів, антени на краях – приймачі відбитого сигналу.

Fig. 1 UWB antenna system. The central antenna is a transmitter of electromagnetic fields, the antennas on the edges are receivers of the reflected signal.

ОБРОБКА СИГНАЛІВ ДЛЯ НАВЧАННЯ ШНМ

Чотири сигнали, отримані під час зондування земної поверхні, потребують попередньої обробки перед подачею на вхід ШНМ. Потрібно провести їх дискретизацію для отримання чотирьох часових залежностей із постійним кроком у часі, нормувати їх на квадратні корені від їхньої енергії E та сформувати єдиний сигнал, що складається з шести зшитих різницевого сигналів, про які піде мова далі. Цей результуючий сигнал – вхідний масив даних для навчання або тренування ШНМ. На Рис. 2 показані нормовані амплітуди A чотирьох сигналів, прийнятих НШС антенною системою під час зондування. Слід зазначити, що антени мають різну орієнтацію площини поляризації, що допомагає отримати більше інформації від відбитої хвилі та дізнатись про напрямок приходу сигналу.

Кожен із цих чотирьох сигналів можна умовно розділити на 2 частини: перша – перевідбиття між всіма елементами антенної системи та відбиття від земної поверхні, друга – та, що несе інформацію про прихований об'єкт. Бачимо, що амплітуда другої, потрібної нам частини сигналу, значно менша за амплітуду завад у першій частині. І це можна сказати про всі сигнали цих чотирьох приймачів. Це може дуже ускладнити розпізнавання, так як досліджуваний об'єкт може знаходитись на різній відстані від приймальної антени, але в той же час відбитий від нього імпульс під час руху антенної системи буде змінюватись незначним чином за рахунок змін тільки у малоамплітудній частині часової залежності. Крім цього, скоріш за все, малоамплітудні зміни будуть ігноруватись нейронною мережею під час роботи, особливо, якщо прийнятий сигнал буде зашумленим.

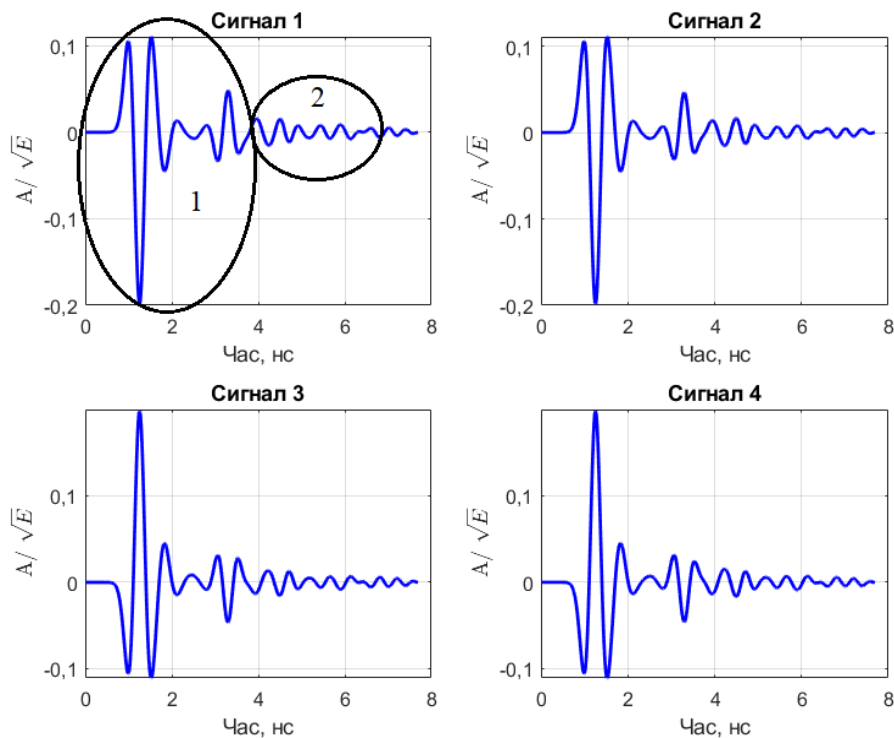


Рис. 2. Приклади сигналів, отриманих ШНС антенною системою, де 1 - взаємні відбиття від антенної системи, 2 - корисна частина сигналу, що містить інформацію про прихований об'єкт.

Fig. 2. Examples of signals received by the UWB antenna system, where 1 - mutual reflections from the antenna system, 2 - useful part of the signal containing information about the hidden object.

Тому для зменшення взаємного впливу антен пропонується використати різницеві сигнали, що являють собою сумування та віднімання сигналів, отриманих приймачами. Вибір операцій зумовлений нашим бажанням збільшити вищезазначені низькоамплітудні компоненти отриманих даних. На Рис. 3 показані шість необхідних комбінацій віднімання та додавання початкових сигналів, де S1, S2, S3 та S4, відповідно є першим, другим, третім та четвертим прийнятими сигналами із Рис. 2. Можна помітити, що було виконано віднімання сигналів із однаковими знаками початкових моноімпульсів та додавання сигналів із протилежними знаками початкових моноімпульсів. Таким чином, отримано усі 6 можливих комбінацій. Результати операцій послідовно об'єднуються в єдиний масив даних, який посилається на вхідний шар ШНМ. Було вирішено використовувати повнозв'язну ШНМ, що має 7 шарів, де перший шар містить 4614 вхідних нейронів, що відповідає розмірності масиву зшитих даних (див. вісь абсцис на Рис. 3). Наступні п'ять прихованих шарів мають по 4000 нейронів у кожному шарі. Вихідний шар має 65 нейронів, що відповідають всім об'єктам на всіх можливих змодельованих відстанях від опромінюючої установки, а також додатковий вихід для виявлення присутності або відсутності об'єкта в даній області.

ДОСЛІДЖУВАНІ ОБ'ЄКТИ

У даній роботі для моделювання було використано дві найбільш поширені та небезпечні міни, що трапляються у місцях проведення збройних конфліктів у Донецькій та Луганській областях: ПМН-1 та ПМН-4. Модель міни ПМН-1 має висоту 53 мм і діаметр 110 мм (див. Рис. 4). Її корпус показаний оранжевим кольором, матеріалом якого є бакеліт. Зверху міна обладнана каучуковим ковпаком, що помічений сірим кольором. В середині міна має проміжний шар з повітрям, металевий механізм детонації та вибухову речовину з електричними характеристиками $\varepsilon = 3$ та $\sigma = 0,0044$ См/м [17], [18].

Міна ПМН-4 зображена на Рис. 5. Вона має висоту 42 мм і діаметр 95 мм. ПМН-4 має схожу внутрішню конструкцію, як у ПМН-1, але її металевий механізм детонації більш масивний, що даватиме більше відбиття електромагнітного імпульсу, і як наслідок можливо більш стабільне виявлення. Матеріали корпусу та електричні характеристики вибухової речовини у ПМН-4 такі ж, як і у ПМН-1.

Для вирішення задачі гуманітарного розмінування важливо точно класифікувати об'єкт за відбитою хвилею, до того ж в режимі реального часу [19]. Крім того, пристрій для проведення розмінування має забезпечити мінімальну кількість помилкових спрацювань. Під ними мається на увазі визначення небезпечної міни у якості, наприклад, сміття чи використаних бляшанок. Територія проведення військових

конфліктів в достатній мірі переповнена подібними об'єктами, тому, щоб наблизити задачу до реальних умов, було вирішено врахувати можливість присутності у обстежуваному просторі використаної металеві банки в різних станах у якості хибного об'єкту.

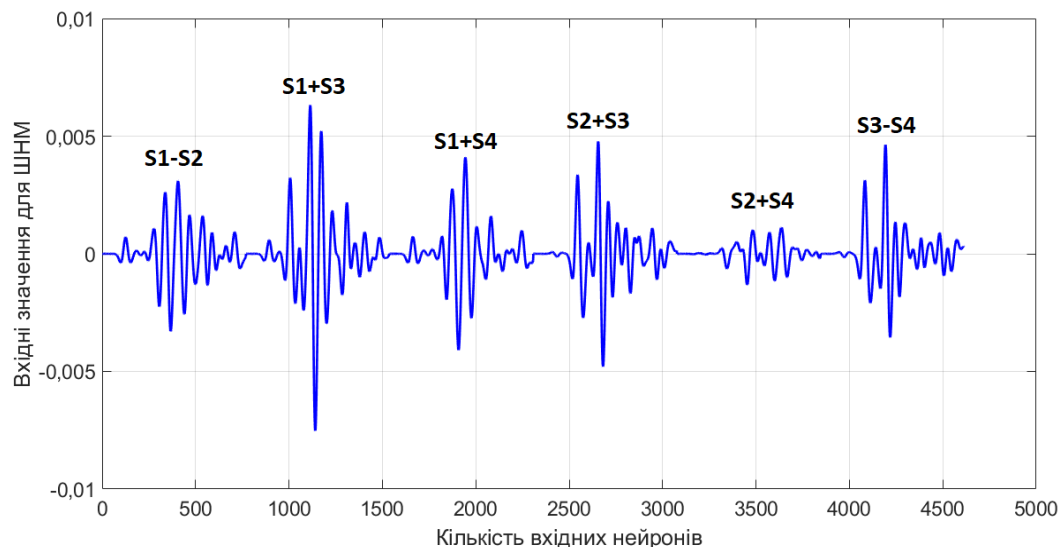


Рис. 3. Приклад сигналу для навчання ШНМ, який містить результати операцій додавання та віднімання чотирьох прийнятих сигналів.

Fig. 3. An example of a signal for learning ANN, which contains the results of operations of addition and subtraction of four received signals.

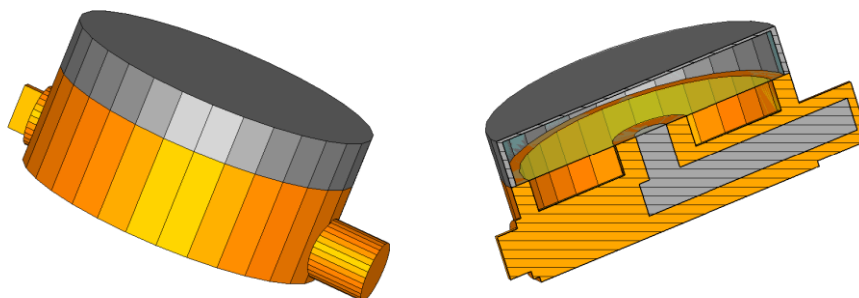


Рис. 4. Модель міни ПМН-1.

Fig. 4. Model of PMN-1 mine.

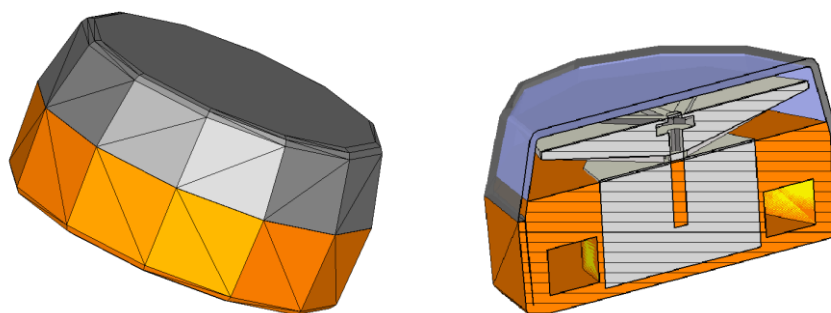


Рис. 5. Модель міни ПМН-4.

Fig. 5. Model of PMN-4 mine.

В свою чергу, навчання ШНМ на розпізнавання як мін, так і інших предметів забезпечить якість підповерхневого зондування. Для числового моделювання були обрані найбільш поширені типи банок в Україні. Перша типова форма має діаметр 10 см і висоту 3,5 см. Вона може знаходитись у 3 можливих станах, позначених як cap1 – відкрита бляшанка без кришки, cap2 – бляшанка з відкритою кришкою, cap3 – порожниста бляшанка із закритою кришкою, яка утворює майже кільцеву щілину (див. Рис. 6). Друга конструкція банки має діаметр 8,5 см і висоту 5 см. Вона відповідно може бути в тих самих станах як і

попередня, які вже позначені як can4, can5 та can6 (див. Рис.8-13). Таким чином, ШНМ повинна навчитися відрізняти протипіхотну міну від подібного сміття, яке може гальмувати процес розмінування та взагалі робити його вкрай небезпечним.

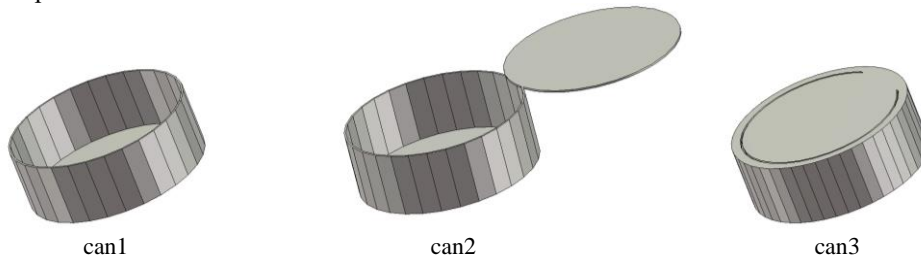


Рис. 6. Три стани бляшанки, де can1 – бляшанка без кришки, can2 – бляшанка з відкритою кришкою, can3 – бляшанка із закритою кришкою, що формує щілину.

Fig. 6. Three states of a can, where can1 is a can without a lid, can2 is a can with an open lid, can3 is a can with a closed lid that forms a slot.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОЗПІЗНАВАННЯ

Далі, щоб наблизити задачу до реальних умов експериментальних досліджень, вхідні сигнали повинні містити шум, який, нажаль, присутній у НШС радіолокаційних дослідженнях [16]. Гаусовий шум додається до початкових чотирьох сигналів і лише після цього застосовується їх віднімання та додавання. Такий порядок операцій значно погіршує якість результуючого сигналу навіть для невеликих співвідношень сигнал-шум у початкових прийнятих сигналах, але в свою чергу це відповідає реальним умовам підповерхневого зондування, так як ми приймаємо вже зашумлені сигнали і після цього маємо можливість виконувати над ними певні операції. Ефект погіршення рівню сигнал-шум відбувається тому, що відокремлення низькоенергетичної частини сигналу, що містить інформацію про об'єкт, значно зменшує початковий максимум сигналу до якого було застосовано певний шум, тим самим погіршуючи співвідношення корисного сигналу до шуму.

Цей ефект проілюстрований на Рис. 7. На верхніх рисунках зображено порівняння часової форми сигналу, що приймається однією з чотирьох антен (Signal1), і різницевого сигналу. На нижніх графіках задіяно масштабування для отримання більш детальної картини. Для вибраного рівня сигнал-шум 25 дБ, коли початковий прийнятий сигнал несуттєво змінює свою часову форму, різницевий сигнал, що надходить до ШНМ, серйозно пошкоджений завадами, як видно на нижніх графіках на Рис. 7, і де співвідношення сигнал-шум вже складає -7,4 дБ. Таким чином, перед нейронною мережею стоїть складне завдання вилучення корисної інформації із більш зашумлених даних, отриманих з різницевого сигналу.

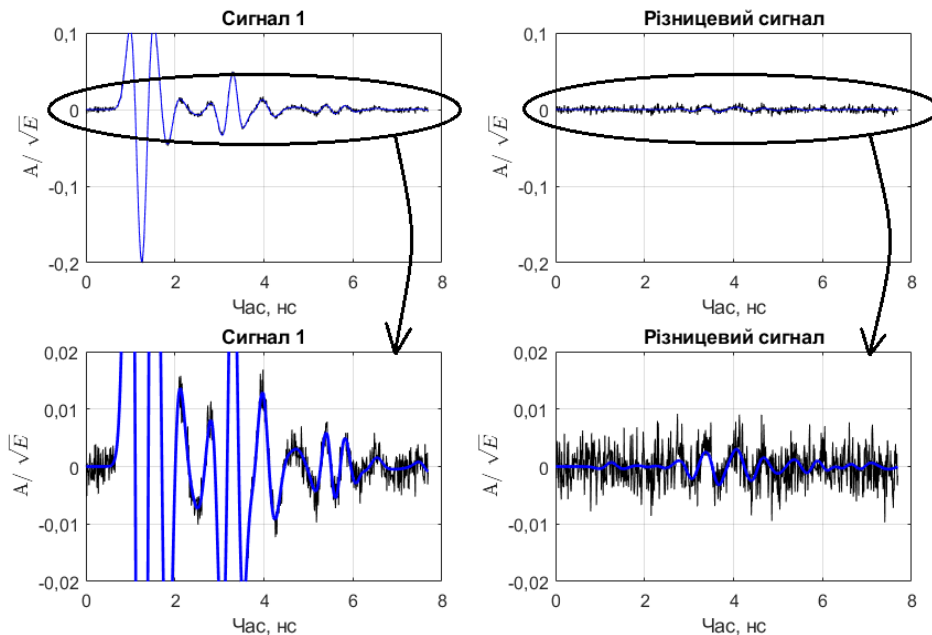


Рис. 7. Ілюстрація зміни рівня сигнал-шум у прийнятому нормованому сигналі та різницевому сигналі для співвідношення сигнал-шум 25 дБ у прийнятому сигналі.

Fig. 7. Illustration of the change of signal-to-noise level in the received normalized signal and the difference signal for the signal-to-noise ratio of 25 dB in the received signal.

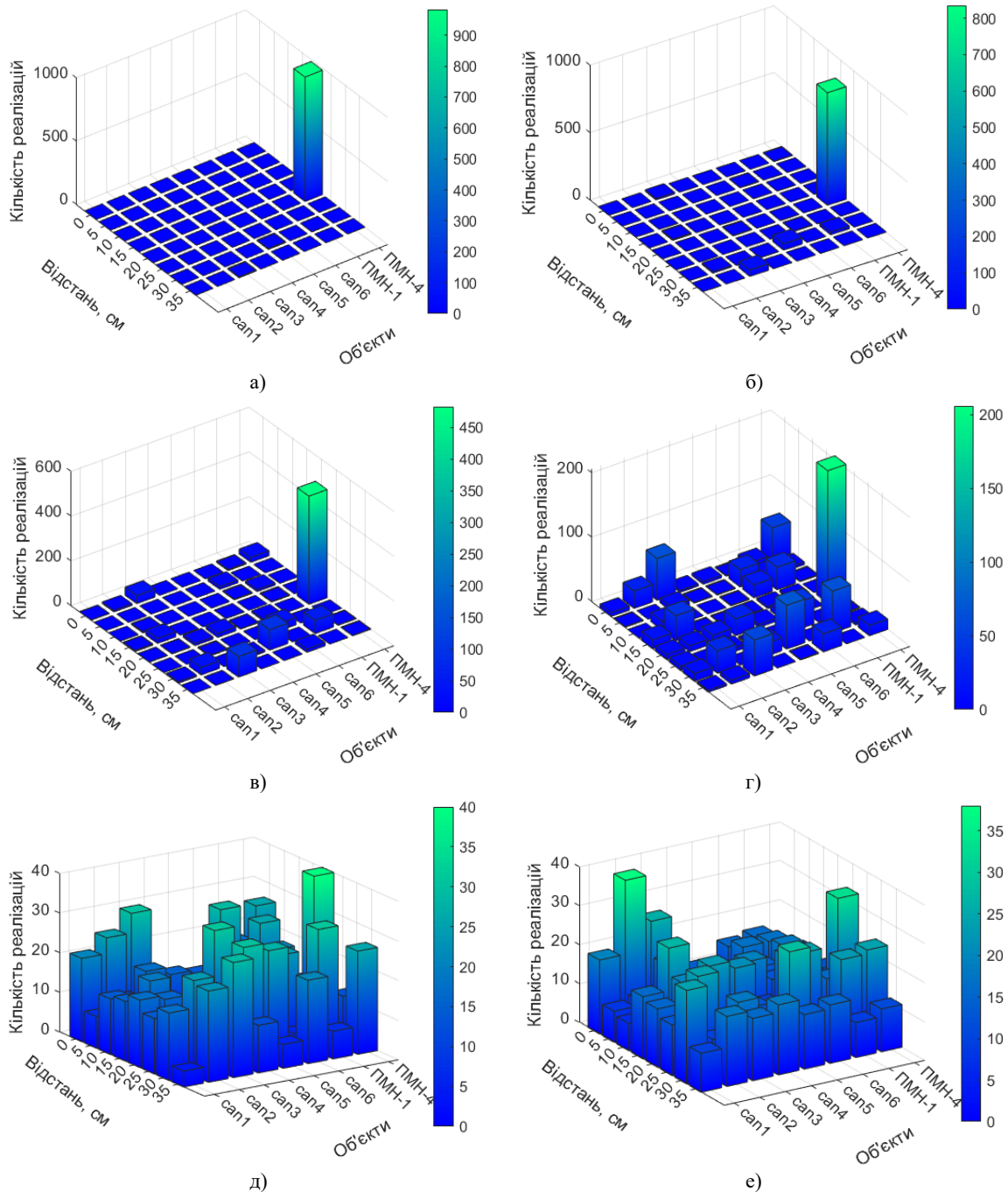


Рис. 8. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-4 на відстані 20 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ, д) 10 дБ, е) 5 дБ.

Fig. 8. Statistical distribution of neural network responses for PMN-4 mine recognition at a distance of 20 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB, д) 10 dB, е) 5 dB.

Те саме моделювання, але для міни ПМН-1, проілюстровано на Рис. 9, де ми бачимо, що результати класифікації об'єкта та визначення відстані менш стабільні за наявності шуму рівнів, аналогічних до попередніх. Тут розпізнавання стає неможливим вже на рівні сигнал-шум 10 дБ. Однак така стійкість до шуму також є прийнятною. Також слід нагадати, що ПМН-1 має менш масивний металічний механізм детонації, ніж ПМН-4, що дає гірше відбиття електромагнітної імпульсної хвилі. І це, в свою чергу, як ми і припускали, ускладнило розпізнавання.

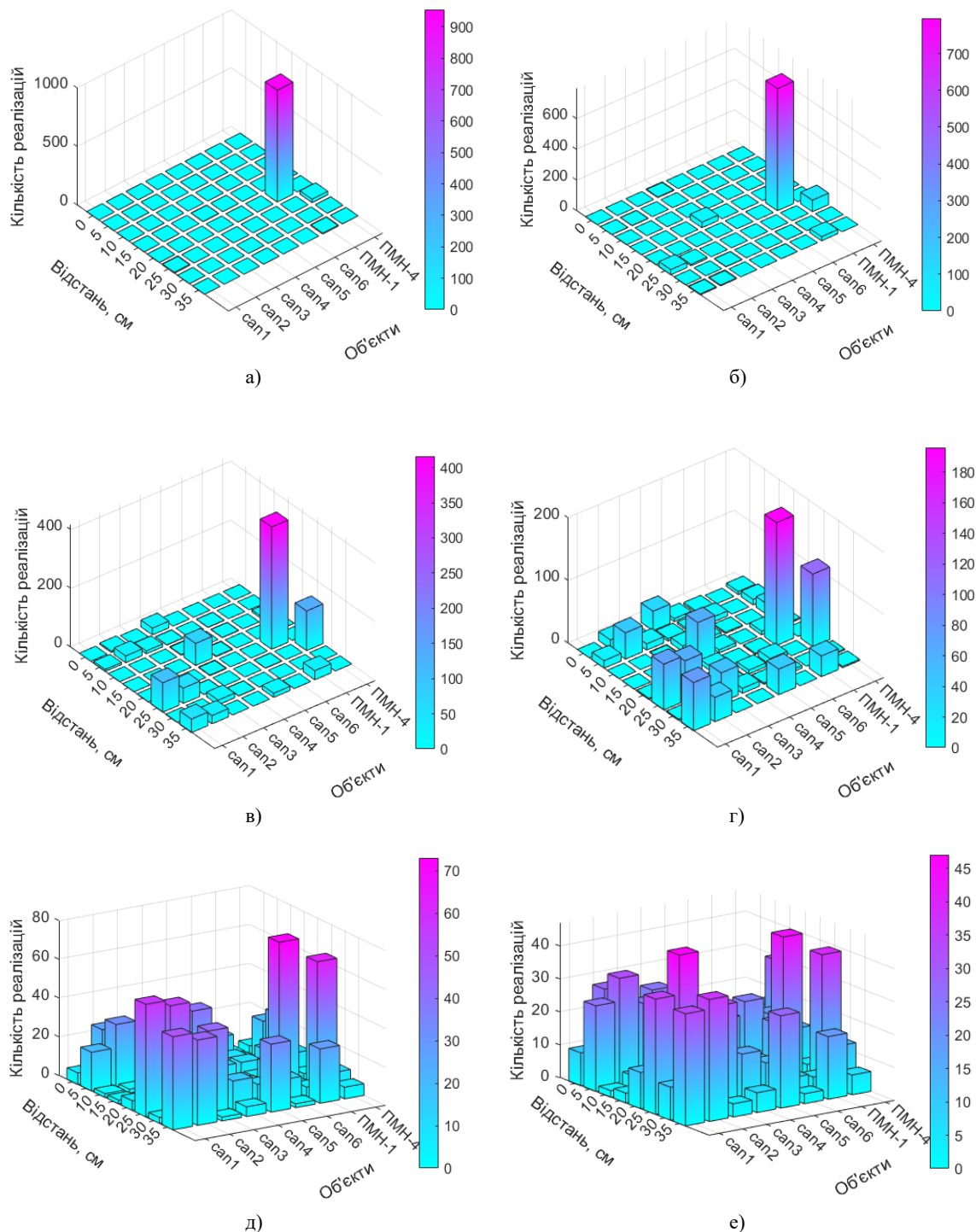


Рис. 9. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-1 на відстані 20 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ, д) 15 дБ, е) 10 дБ.

Fig. 9. Statistical distribution of neural network responses for PMN-1 mine recognition at a distance of 20 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB, д) 15 dB, е) 10 dB.

Із Рис.9в – д можна помітити, що із додаванням шуму ШНМ починає плутати ПМН-1 та ПМН-4 і відстань (20 та 25 см). Для гуманітарного розмінування така помилка у класифікації міни не є принциповою, бо принаймні до рівня сигнал-шум 15 дБ ми маємо чітку вказівку на міну, а не на бляшанку. Також із Рис.8-9 ми бачимо, що вище рівня сигнал-шум 35 дБ, ШНМ видає безпомилковий результат розпізнавання для обох мін.

Далі розглянемо, як нейронна мережа розпізнає граничні положення об'єктів, а саме, коли об'єкт знаходиться над антенною системою, тобто відстань 0 см, і на максимально віддаленій змодельованій відстані від приймачів – 35 см.

Ми бачимо, що якщо ПМН-1 (Рис. 10) або ПМН-4 (Рис. 11) знаходиться під антенною, то при високих значеннях шуму ШНМ буде спрацьовувати краще для ПМН-1, однак, в обох випадках спостерігається стабільна класифікація. Це відбувається завдяки попередньому розширенню тренувальної вибірки як корисними, так і хибними об'єктами.

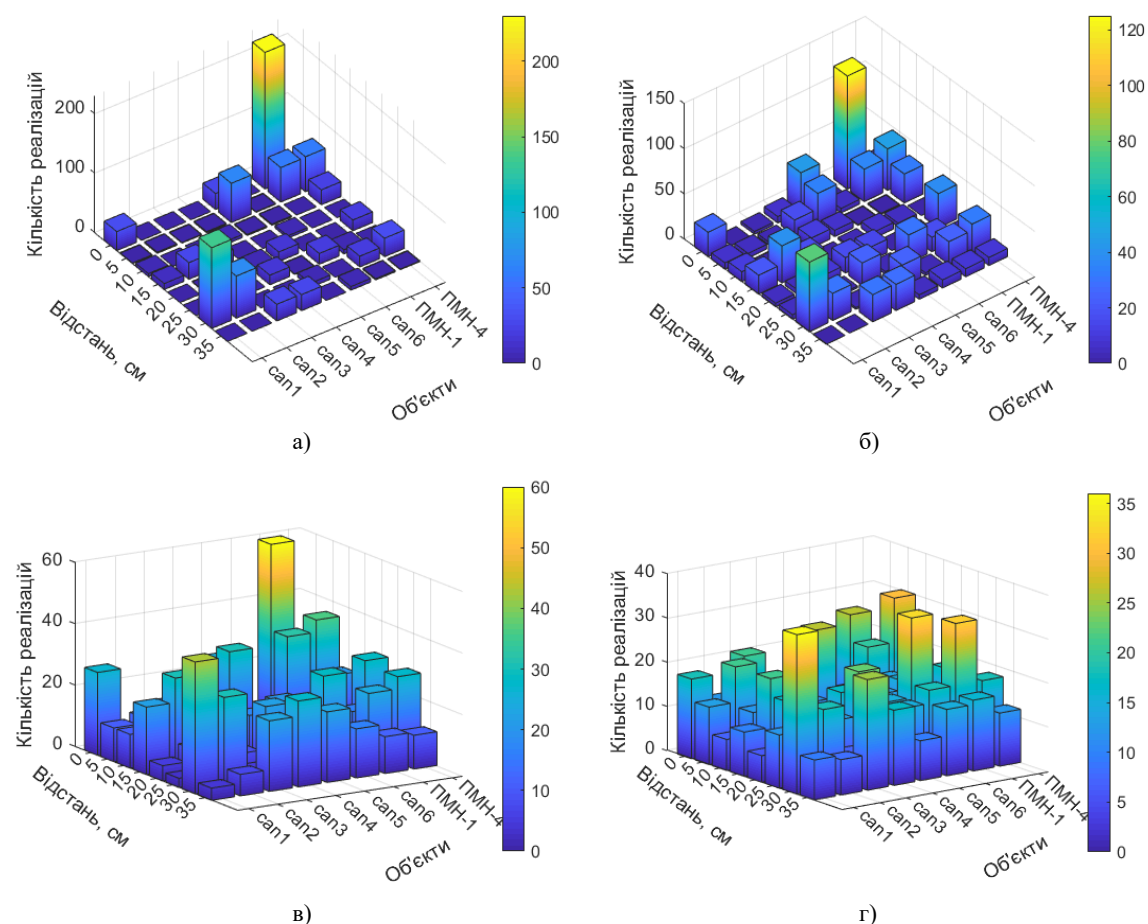


Рис. 10. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-1 на відстані 0 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 25 дБ, б) 20 дБ, в) 15 дБ, г) 10 дБ.

Fig. 10. Statistical distribution of neural network responses for PMN-1 mine recognition at a distance of 0 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: a) 25 dB, б) 20 dB, в) 15 dB, г) 10 dB.

Далі розглянемо найбільш віддалене положення ПМН-1 та ПМН-4. Результати його розпізнавання зображені на Рис. 12 та Рис. 13.

З Рис. 12-13 ми бачимо впевнену класифікацію за високих рівнів сигнал-шум. Для обох мін було отримано подібний результат щодо стабільності розпізнавання, але тут ПМН-4 визначається краще [20].

За результатами моделювання можна сказати, що нейронна мережа у поєднанні з підповерхневим радаром краще розпізнає середнє положення об'єкту у досліджуваному просторі із врахуванням вибраної дискретизації сектору обстеження. Це, можливо, обумовлено відсутністю навчальних зразків за межами використання ШНМ. Для вирішення даної проблеми досліджувану область можна подовжити та удосконалити із врахуванням фізичних особливостей задачі підповерхневого зондування.

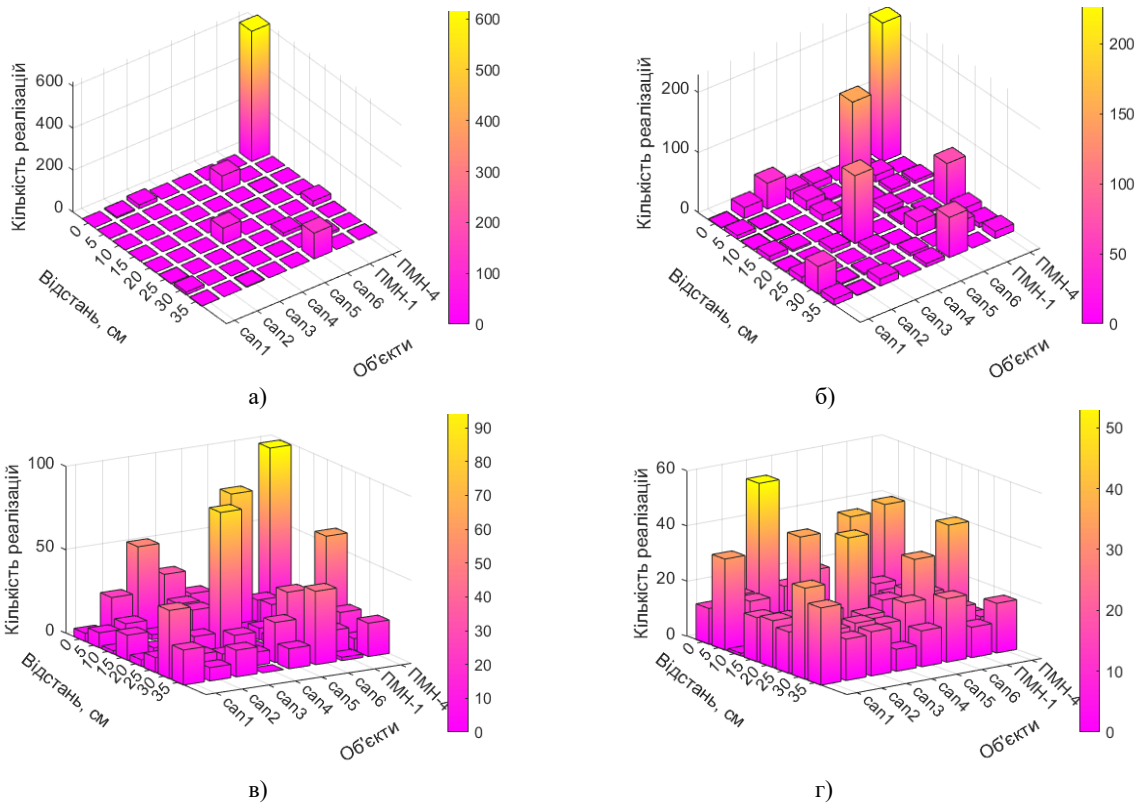


Рис. 11. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-4 на відстані 0 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ.
 Fig. 11. Statistical distribution of neural network responses for PMN-4 mine recognition at a distance of 0 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB.

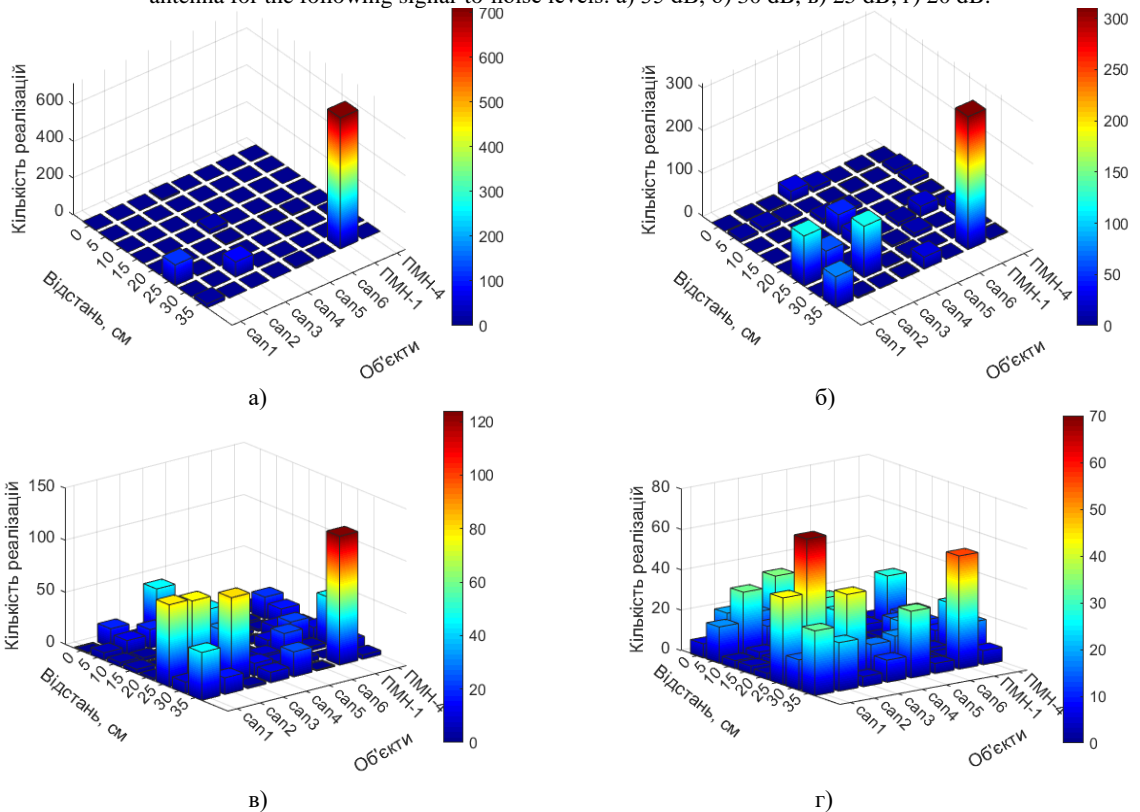


Рис. 12. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-1 на відстані 35 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 35 дБ, б) 30 дБ, в) 25 дБ, г) 20 дБ.
 Fig. 12. Statistical distribution of neural network responses for PMN-1 mine recognition at a distance of 35 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: а) 35 dB, б) 30 dB, в) 25 dB, г) 20 dB.

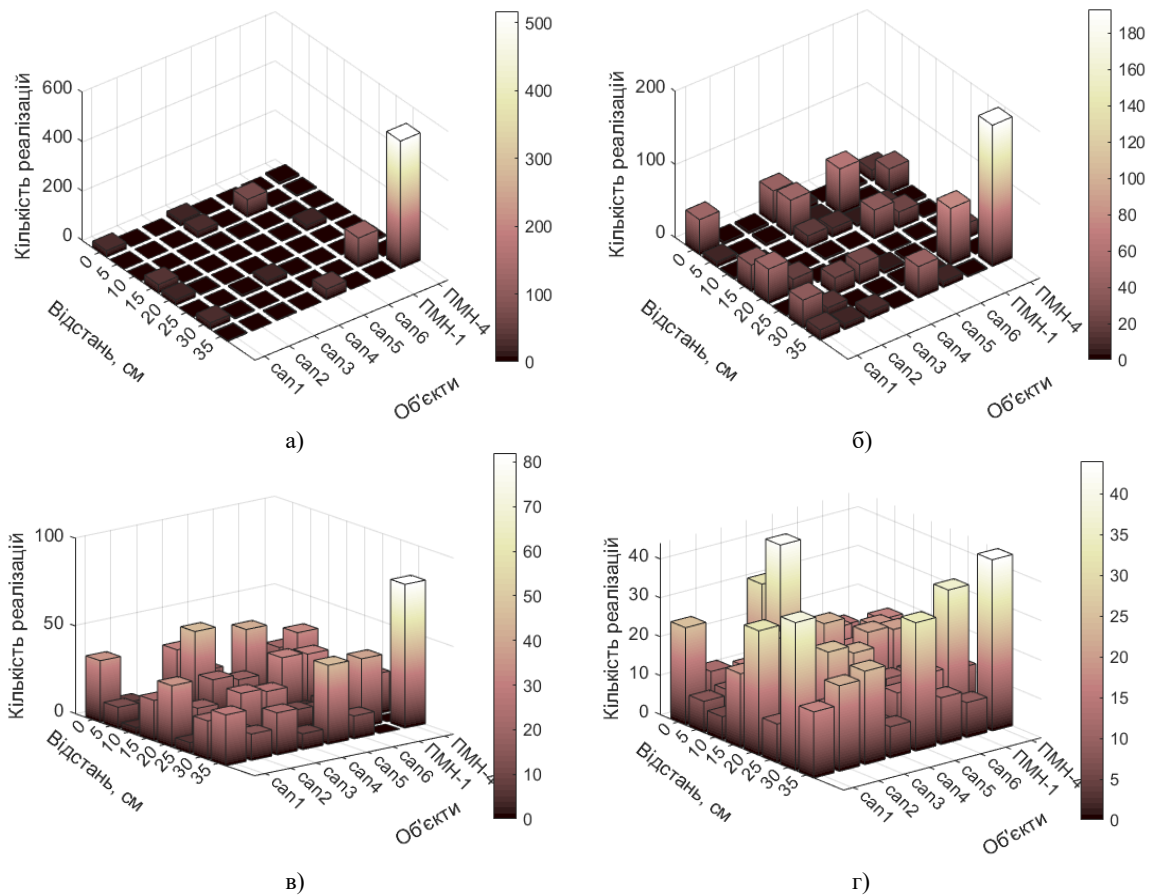


Рис. 13. Статистичний розподіл відповідей нейронної мережі для розпізнавання міни ПМН-4 на відстані 35 см від антени для таких рівнів сигнал-шум: а) 30 дБ, б) 25 дБ, в) 20 дБ, г) 15 дБ.

Fig. 13. Statistical distribution of neural network responses for PMN-4 mine recognition at a distance of 35 cm from the antenna for the following signal-to-noise levels: a) 30 dB, б) 25 dB, в) 20 dB, г) 15 dB.

ВИСНОВОК

Використання повнозв'язної штучної нейронної мережі з п'ятьма прихованими шарами нейронів для обробки сигналів в системах підповерхневого зондування дає успішні результати виявлення та класифікації об'єктів. Була продемонстрована задовільна стійкість до шуму на різних відстанях від системи опромінення. Виправдане використання різницевих сигналів у якості тренувальних даних для нейронної мережі. ШНМ забезпечує стабільні результати розпізнавання протитипотних мін, незважаючи на сильну зашумленість вхідних сигналів.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

О. М. Dumin [id http://orcid.org/0000-0001-5067-9689](http://orcid.org/0000-0001-5067-9689)

О. А. Pryshchenko [id http://orcid.org/0000-0001-7143-9545](http://orcid.org/0000-0001-7143-9545)

V. A. Plakhtii [id http://orcid.org/0000-0002-0442-2716](http://orcid.org/0000-0002-0442-2716)

G. P. Pochanin [id https://orcid.org/0000-0002-1977-2217](https://orcid.org/0000-0002-1977-2217)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. NATO supports humanitarian demining in Ukraine [Internet]. NATO News. 27 May 2016. Available from: https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_131607.htm?selectedLocale=en
2. Maki KH. Development of robot and navigation techniques for humanitarian demining. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics; 2008 13-16 July Daejeon, South Korea; 2008. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618135>

3. Earp SL, Hughes ES, Elkins TJ, Vickers R. Ultra-wideband ground-penetrating radar for the detection of buried metallic mines. Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference; 1996 13-16 May; USA, Ann Arbor, MI.; 1996. <https://doi.org/10.1109/NRC.1996.510648>
4. Taylor JD. Ultrawideband radar: applications and design. Boca Raton, London, New York: CRC Press; 2012.
5. Millot P, Castanet L, Casadebaig L, Maaref N, Gaugue A, Ménard M, Khamlichi J, Louis G, Fortino N, Dauvignac J-Y, Clementi G, Schortgen M, Quellec L, Laroche V. An UWB Through-The-Wall radar with 3D imaging, detection and tracking capabilities. European Radar Conference (EuRAD); 2015 9-11 September; Paris, France; 2015. <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2015.7346281>
6. Hai-zhong Y, Yu-feng O, Hong C. Application of ground penetrating radar to inspect the metro tunnel. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June, Shanghai, China; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254963>
7. Hölbling Z, Mihaldinec H, Ambruš D, Džapo H, Bilas V, Vasić D. UWB localization for discrimination-enabled metal detectors in humanitarian demining. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS); 2017 13-15 March; USA, Glassboro, NJ; 2017. <https://doi.org/10.1109/SAS.2017.7894073>
8. Morgenthaler A, Rappaport C. Fast GPR underground shape anomaly detection using the Semi-Analytic Mode Matching (SAMM) algorithm. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS; 2013 21-26 July; Australia, Melbourne, VIC; 2013. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723051>
9. Li W, Zhou H, Wan X. Generalized Hough Transform and ANN for subsurface cylindrical object location and parameters inversion from GPR data. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June; China, Shanghai; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254874>
10. O Dumin, Plakhtii V, Pryshchenko O, Pochanin G. Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020); 2020 February 25-29; Ukraine, Lviv-Slavske; 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>
11. Sharma P, Kumar B, Singh D, Gaba SP. Metallic Pipe Detection using SF -GPR: A New Approach using Neural Network. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); 2016 10-15 July; China, Beijing; 2016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730726>
12. Callan R. The essence of neural networks. New York: Prentice Hall Europe; 1999.
13. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Широкоград ДВ. Розпізнавання об'єктів під поверхнею землі при надширокосмуговій радіоінтроскопії за допомогою штучних нейронних мереж. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2018;28:24-29.
14. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Широкоград ДВ, Вольвач ЯС. Вплив зменшення шуму вхідного сигналу на класифікацію місцезнаходження об'єкту штучною нейронною мережею при надширокосмуговій радіоінтроскопії. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2019;31:27–35. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-03>
15. Думін ОМ, Плахтій ВА, Прищенко ОА, Широкоград 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. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-03>
16. Pochanin G, Capineri L, Bechtel T, Falorni P, Borgioli G, Ruban V, Orlenko O, Ogurtsova T, Pochanin O, Crawford F, Kholod P, Bossi L. Measurement of Coordinates for a Cylindrical Target Using Times of Flight from a 1-Transmitter and 4-Receiver UWB Antenna System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020;58(2):1363-1372. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946064>
17. Duque A, Perry W, Anderson-Cook C. Complex Microwave Permittivity of Secondary High Explosives. Propellants Explosives Pyrotechnics. 2013;39(2):275-283. <https://doi.org/10.1002/prop.201300032>
18. Vander Gaasta B, McFeeb J, Russella K, Fausta A. Design and validation of inert homemade explosive simulants for Ground Penetrating Radar. Proc. SPIE 9454, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX; 2015 20-24 April; USA, Baltimore, Maryland; 2015 21 May. 945412 <https://doi.org/10.1117/12.2175586>
19. Zafir H, Bregman Y, Wolf D, Hershler S. Super-sensitive, real time and wide coverage, all terrain ground robotic and hand held systems for mine and UXO detection and mapping. 1998 Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines; 1998 12-14 October; UK, Edinburgh; IEE Conf. Publ. No. 458; 1998. <https://doi.org/10.1049/cp:19980721>
20. Dumin O, Pryshchenko O, Plakhtii V, Pochanin G. Landmine detection and classification using UWB antenna system and ANN analysis. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW); 2020 September 21-25; Ukraine, Kharkiv; 2020. p. 1030–1035. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252574>

REFERENCES

1. NATO supports humanitarian demining in Ukraine [Internet]. NATO News. 27 May 2016. Available from:

- https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_131607.htm?selectedLocale=en
2. Maki KH. Development of robot and navigation techniques for humanitarian demining. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics; 2008 13-16 July Daejeon, South Korea; 2008. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618135>
 3. Earp SL, Hughes ES, Elkins TJ, Vickers R. Ultra-wideband ground-penetrating radar for the detection of buried metallic mines. Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference; 1996 13-16 May; USA, Ann Arbor, MI.; 1996. <https://doi.org/10.1109/NRC.1996.510648>
 4. Taylor JD. Ultrawideband radar: applications and design. Boca Raton, London, New York: CRC Press; 2012.
 5. Millot P, Castanet L, Casadebaig L, Maaref N, Gaugue A, Ménard M, Khamlichi J, Louis G, Fortino N, Dauvignac J-Y, Clementi G, Schortgen M, Quellec L, Laroche V. An UWB Through-The-Wall radar with 3D imaging, detection and tracking capabilities. European Radar Conference (EuRAD); 2015 9-11 September; Paris, France; 2015. <https://doi.org/10.1109/EuRAD.2015.7346281>
 6. Hai-zhong Y, Yu-feng O, Hong C. Application of ground penetrating radar to inspect the metro tunnel. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June, Shanghai, China; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254963>
 7. Hölbling Z, Mihaldinec H, Ambruš D, Džapo H, Bilas V, Vasić D. UWB localization for discrimination-enabled metal detectors in humanitarian demining. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS); 2017 13-15 March; USA, Glassboro, NJ; 2017. <https://doi.org/10.1109/SAS.2017.7894073>
 8. Morgenthaler A, Rappaport C. Fast GPR underground shape anomaly detection using the Semi-Analytic Mode Matching (SMM) algorithm. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS; 2013 21-26 July; Australia, Melbourne, VIC; 2013. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723051>
 9. Li W, Zhou H, Wan X. Generalized Hough Transform and ANN for subsurface cylindrical object location and parameters inversion from GPR data. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR); 2012 4-8 June; China, Shanghai; 2012. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254874>
 10. O Dumin, Plakhtii V, Pryshchenko O, Pochanin G. Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020); 2020 February 25-29; Ukraine, Lviv-Slavske; 2020. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235459>
 11. Sharma P, Kumar B, Singh D, Gaba SP. Metallic Pipe Detection using SF -GPR: A New Approach using Neural Network. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); 2016 10-15 July; China, Beijing; 2016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730726>
 12. Callan R. The essence of neural networks. New York: Prentice Hall Europe; 1999.
 13. Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA, Shyrokorad DV. Recognition of objects under the earth's surface by ultra-wideband radio introscopy using artificial neural networks. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2018;28:24–29. [In Ukrainian].
 14. Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA, Shyrokorad DV, Volvach YaS. The effect of reducing the noise of the input signal on the classification of the location of the object by an artificial neural network in ultra-wideband radio introscopy. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2019;31:27–35 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-03>
 15. Dumin OM, Plakhtii VA, Pryshchenko OA, Shyrokorad DV. Discrete tomography method in data processing of ultra-wideband subsurface radar by artificial neural network. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2018;29:17–26. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-03>
 16. Pochanin G, Capineri L, Bechtel T, Falorni P, Borgioli G, Ruban V, Orlenko O, Ogurtsova T, Pochanin O, Crawford F, Kholod P, Bossi L. Measurement of Coordinates for a Cylindrical Target Using Times of Flight from a 1-Transmitter and 4-Receiver UWB Antenna System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020;58(2):1363-1372. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2946064>
 17. Duque A, Perry W, Anderson-Cook C. Complex Microwave Permittivity of Secondary High Explosives. Propellants Explosives Pyrotechnics. 2013;39(2):275-283. <https://doi.org/10.1002/prop.201300032>
 18. Vander Gaasta B, McFeeb J, Russella K, Fausta A. Design and validation of inert homemade explosive simulants for Ground Penetrating Radar. Proc. SPIE 9454, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX; 2015 20-24 April; USA, Baltimore, Maryland; 2015 21 May. 945412 <https://doi.org/10.1117/12.2175586>
 19. Zafir H, Bregman Y, Wolf D, Hershler S. Super-sensitive, real time and wide coverage, all terrain ground robotic and hand held systems for mine and UXO detection and mapping. 1998 Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines; 1998 12-14 October; UK, Edinburgh; IEE Conf. Publ. No. 458; 1998. <https://doi.org/10.1049/cp:19980721>
 20. Dumin O, Pryshchenko O, Plakhtii V, Pochanin G. Landmine detection and classification using UWB antenna system and ANN analysis. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW); 2020 September 21-25; Ukraine, Kharkiv; 2020. p. 1030–1035. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252574>

Оглядова стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-02>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

ПОШУК ДЕФЕКТІВ Й ОЦІНКА ПОТОЧНОГО СТАНУ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОРАДАРІВ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ. ЧАСТИНА II)

Д.О. Батраков

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

E-mail: batrakov@karazin.ua

Надійшла до редакції 12 листопада 2020 р.

Актуальність. Розвиток технічних засобів неруйнівного контролю та дистанційного зондування є важливим практичним завданням. Це пов'язано в першу чергу з тим, що сучасні засоби неруйнівного контролю відкривають широкі можливості впровадження нових технологій і підвищення економічної ефективності заходів по обслуговуванню різних технічних і будівельних об'єктів при відносно невеликій собівартості проведення таких робіт. Важливе значення в зв'язку з цим набуває і розвиток обчислювальних алгоритмів обробки первинних даних і програмних продуктів для подальшої інтерпретації отриманих результатів за допомогою систем комп'ютерної інженерії.

Мета роботи - огляд технічних засобів, методів обробки сигналів і деяких комп'ютерно орієнтованих інженерних систем для вирішення завдань виявлення різних дефектів в інженерних спорудах і будівельних конструкціях.

Матеріали та методи. В роботі наведено короткий огляд методів обробки первинних наборів даних, отриманих за допомогою імпульсних георадарів. На наступному етапі обробка здійснюється за допомогою програми GeoVizu. Нарешті, основна увага в роботі приділена аналізу можливостей сучасних засобів комп'ютерної інженерії. Також використані чисельно - аналітичні методи сучасної теорії дифракції та методи аналізу сигналів в просторово часовій області.

Результати. Основу результатів складають не тільки наукові статті, а й аналіз можливостей сучасних систем комп'ютерного моделювання, а також деякі математичні моделі, отримані автором.

Висновки. Представлені в статті результати дозволяють говорити про започаткування нового напрямку в наукових дослідженнях. Цей напрямок може бути визначено як комбінований багато-параметричний аналіз. Метою даного напрямку є проведення досліджень різних взаємопов'язаних процесів в технічних конструкціях за допомогою методів математичної фізики при об'єднанні не тільки аналізу їх взаємодії з полями різної фізичної природи, але і відповідних моделей з різних областей математичної фізики. Значимість отриманих результатів складається не тільки з нових моделей обробки та інтерпретації даних, а й з перспектив подальшого прогресу в галузі технічних засобів контролю і діагностики.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпульсні георадари, комп'ютерні системи обробки даних, дистанційне зондування.

SEARCH FOR DEFECTS AND ASSESSMENT OF THE CURRENT CONDITION OF ENGINEERING STRUCTURES WITH THE HELP OF GEORADARS (REVIEW. PART II)

D. O. Batrakov

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

The relevance. The development of technical means for non-destructive testing and remote sensing is an important practical task. This is primarily due to the fact that modern means of non-destructive testing open up ample opportunities for the introduction of new technologies and increase the economic efficiency of measures for the maintenance of various technical and construction objects at a relatively low cost of such work. In this regard, the development of computational algorithms for processing primary data and software products for the subsequent interpretation of the results obtained using computer engineering systems is of great importance.

The purpose of the work is to review technical means, signal processing methods and some computer-oriented engineering systems for solving problems of detecting various defects in engineering structures and building structures.

Materials and methods. The paper provides a brief overview of methods for processing primary data sets obtained using pulsed GPR. At the next stage, processing is carried out using the GeoVizu program. Finally, the main focus of the work is on the analysis of the capabilities of modern computer engineering tools. Also used the numerical - analytical methods of the modern theory of diffraction and methods of signal analysis in the space-time domain.

Results. The results are based not only on scientific articles, but also on the analysis of the capabilities of modern computer modeling systems, as well as some mathematical models obtained by the author.

Conclusions. The results presented in the article allow one to talk about a new direction in scientific research. This direction can be defined as combined multi-parametric analysis - CoMPA. The purpose of this direction is to conduct research of various interrelated processes in technical structures by using the methods of mathematical physics,

combining not only the analysis of their interaction with fields of different physical nature, but also involving the appropriate models from various areas of mathematical physics. The significance of the results obtained consists not only of new models of data processing and interpretation, but also of the prospects for further progress in the field of technical means of control and diagnostics.

KEY WORDS: impulse georadars, computer data processing systems, remote sensing.

ПОИСК ДЕФЕКТОВ И ОЦЕНКА ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРОВ (ОБЗОР. ЧАСТЬ II)

Д.О. Батраков

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

Актуальность. Развитие технических средств неразрушающего контроля и дистанционного зондирования является важной практической задачей. Это связано в первую очередь с тем, что современные средства неразрушающего контроля открывают широкие возможности внедрения новых технологий и повышения экономической эффективности мероприятий по обслуживанию различных технических и строительных объектов при относительно небольшой себестоимости проведения таких работ. Важное значение в связи с этим приобретает и развитие вычислительных алгоритмов обработки первичных данных и программных продуктов для последующей интерпретации полученных результатов с помощью систем компьютерной инженерии.

Цель работы – обзор технических средств, методов обработки сигналов и некоторых компьютерно-ориентированных инженерных систем для решения задач обнаружения различных дефектов в инженерных сооружениях и строительных конструкциях.

Материалы и методы. В работе приведен краткий обзор методов обработки первичных наборов данных, полученных с помощью импульсных георадаров. На следующем этапе обработка осуществляется с помощью программы GeoVizu. Наконец, основное внимание в работе уделено анализу возможностей современных средств компьютерной инженерии. Также использованы численно – аналитические методы современной теории дифракции и методы анализа сигналов в пространственно-временной области.

Результаты. Основу результатов составляют не только научные статьи, но и анализ возможностей современных систем компьютерного моделирования, а также некоторые математические модели, полученные автором.

Выводы. Представленные в статье результаты позволяют говорить о новом направлении в научных исследованиях. Это направление может быть определено как комбинированный многопараметрический анализ. Целью данного направления является проведение исследований различных взаимосвязанных процессов в технических конструкциях с помощью методов математической физики при объединении не только анализа их взаимодействия с полями различной физической природы, но и соответствующих моделей из различных областей математической физики. Значимость полученных результатов складывается не только из новых моделей обработки и интерпретации данных, но и из перспектив последующего прогресса в области технических средств контроля и диагностики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импульсные георадары, компьютерные системы обработки данных, дистанционное зондирование.

ВСТУП

У першій частині статті [1] були розглянуті питання, які пов'язані з виявленням за допомогою георадарів небезпечних та таких, що не спостерігаються зовні, у першу чергу підповерхневих, тріщин у будівельних і промислових конструкціях. Одним з найбільш характерних прикладів вдалого застосування георадарів для виявлення підповерхневих тріщин є конструкції автомобільних доріг з нежорстким покриттям. Після етапу виявлення тріщини необхідно вирішити наступні завдання [2]:

- 1) розробити моделі оцінки поточного стану технічних споруд й, зокрема, дорожніх одягів нежорсткого типу;
- 2) запропонувати моделі прогнозування як на рівні мережі доріг, так і для окремих ділянок автомобільних доріг, при наявності умов експлуатації, які відрізняються від проектних;
- 3) для підвищення надійності одержуваних оцінок залучити моделі, які пов'язують різні об'ємні частки води й повітря з обмірюваним значенням ефективної діелектричної проникності;
- 4) провести аналіз можливостей різних схем зондування за допомогою імпульсних георадарів й у підсумку запропонувати загальну схему одержання первинних даних й алгоритми їхньої наступної обробки;
- 5) досліджувати можливість застосування сучасних систем комп'ютерної інженерії для побудови моделі оцінки стану дорожніх одягів нежорсткого типу.

У свою чергу, кожний із цих п'яти пунктів є сукупністю завдань наступного рівня деталізації. Зокрема проблемі розробки моделей оцінки поточного стану різних технічних споруджень присвячені роботи [3-6]. Очевидно, що тема розробки й використання моделей оцінки технічного стану в такому формулюванні є надзвичайно широкою. Це має відношення й до різних фізичних принципів, що покладено в основу теоретичних моделей, і до математичного апарату, який використовується. Розвиток рішення більш вузького завдання по створенню й застосуванню моделей інтерпретації результатів виявлення тріщин у конструкціях дорожніх одягів нежорсткого типу було розглянуто в [7-10].

Це ж можна сказати й про інші завдання. Наприклад, моделі прогнозування в [2] запропоновано розглядати у вигляді суперпозиції завдань локального й мережевого рівнів із залученням динамічних моделей на локальному рівні й марківських матриць переходу на рівні мережі доріг. Надалі ці ідеї одержали розвиток у роботах [11-12]. Моделі, що зв'язують об'ємні частки води й повітря з відповідними значеннями ефективної діелектричної проникності, були далі розвинені в роботах [13]. Питання детального аналізу можливостей дистанційного зондування за допомогою імпульсних георадарів були розглянуті в [14-16], а схема одержання даних й алгоритми обробки були розвинені в роботах [17-19]. Нарешті, питання застосування сучасних систем комп'ютерної інженерії для створення моделей роботи різних технічних конструкцій розглянуті в [10, 20, 21]. Однак, багато основних результатів виявилися розташованими в різних роботах, доступ до яких часто є обмеженим.

Тому метою даної публікації є огляд методів і підходів до рішення завдань прогнозування зміни стану технічних об'єктів (у першу чергу - автомобільних доріг) на основі отриманої за допомогою георадарів інформації та із залученням систем чисельного моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ Й МЕТОД РІШЕННЯ

Вище вже було сказано, що завдання виявлення, позиціонування, ідентифікації різних дефектів з наступним прогнозуванням на базі різних моделей і залученням систем комп'ютерного моделювання є по суті різними етапами одного комплексного завдання. Тому в даній частині статті основна увага буде приділена проблемам об'єднання досягнень різних галузей фізики. Ця тенденція особливо чітко простежується в процесі розвитку найбільш передових технологій та подальшому їх об'єднанні для отримання рішень комплексних завдань. Наприклад, для того, щоб краще представити процеси взаємодії надширококутних імпульсних сигналів з різними шарувато-неоднорідними середовищами й змодельовати процеси зношування й руйнування в промислових конструкціях, необхідно залучити комбіновані моделі, які враховували б всі нюанси. Такий напрямок одержав назву *multiphysics* (мультифізика). У найбільш загальному змісті мультифізика може бути визначена як об'єднання процесів або систем, що припускає включення двох або більше фізичних полів [22, 23]. Мається на увазі, що метою такого об'єднання є наступна спільна обробка отриманих даних із залученням фізичних, математичних й обчислювальних моделей. Залучені математичні моделі в основному опираються на теорію диференціальних рівнянь і тензорний аналіз. Інші варіанти визначення терміна мультифізика спираються на обчислення, що залучають кілька фізичних моделей або кілька фізичних явищ. Включення до складу терміна поняття декількох фізичних моделей надає йому достатню спільність і широту використовуваних концепцій. Однак у певних ситуаціях таке визначення є трохи надмірним, оскільки фізичні моделі можуть містити в собі фізичні явища. У більш вузькому змісті поняття мультифізика визначає крос-платформний додаток COMSOL Multiphysics, що спирається на аналіз за допомогою методу кінцевих елементів і платформу віртуальних обчислень [24]. У прийнятому визначенні мультифізика визначається як:

1. Об'єднання фізичних явищ у рамках однієї системи комп'ютерного моделювання.
2. Дослідження декількох взаємозалежних фізичних властивостей.

Згідно ще одному визначенню, мультифізична система складається з більш ніж одного компонента, що регулюється власними принципами еволюції/рівноваги, а також і законами збереження або конститутивними (фундаментальними) законами. [22,23]. Це визначення дуже близько до попереднього, за винятком того факту, що воно не підкреслює фізичні властивості. Більш жорстке формулювання стверджує, що мультифізика може бути визначена як процеси, що включають тісно пов'язані взаємодії між окремими континуальними фізичними явищами [22,23]. У цьому визначенні важливою особливістю є двосторонній обмін інформацією між фізичними полями, що може включати неявну конвергенцію в межах кроку в часі. На підставі цих визначень, мультифізика може бути позначена як сукупність пов'язаних процесів або систем, які включають більше одного одночасно виникаючого фізичного поля, а також дослідження й знання про ці процеси й системи [22, 24]. Сучасна мультифізика це вже область не тільки досліджень, але й додатків у багатьох наукових і технічних дисциплінах. Існує чітка тенденція, що всі суттєво складні науково-технічні проблеми є пов'язаними з такими фізичними процесами, які не можуть бути вирішені в рамках однієї традиційної дисципліни або галузі знань. Ця тенденція у свою чергу вимагає розширення можливостей аналізу для рішення більш складних і багатопрофільних завдань. Як результат, виникають проблеми швидко зростаючої складності, які виходять за традиційні дисциплінарні межі між фізикою й іншими областями (хімією, матеріалознавством, біологією). У промисловій практиці програми моделювання перетворилися в інструмент проектування, розробки продукції й контролю якості. Під час цих процесів розроблювачі повинні мати знання в областях, що виходять за рамки їхньої вузької спеціалізації й залучити відповідні інструменти моделювання. Це приводить до того, що інженерам тепер необхідно знати й розуміти концепцію того, що усередині інженерного світу відомо як «мультифізика» [25].

Реалізація її завдань звичайно складається з таких етапів:

- ідентифікація мультифізичного процесу / системи;
- розробка математичного опису цього процесу / системи;
- дискретизація цієї математичної моделі в алгебраїчну систему;
- розв'язання відповідної системи алгебраїчних рівнянь;
- постобробка даних.

Абстрагування (відокремлення) мультифізичної проблеми від більш складного явища (або сукупності явищ) й наступний опис такої проблеми звичайно не акцентуються. Однак, вони дуже важливі для успіху мультифізичного аналізу. Це вимагає визначення системи, яку необхідно проаналізувати, включаючи геометрію, матеріали й домінуючі механізми. Така система буде інтерпретуватися з використанням математичних визначень (функція, тензор, диференціальне рівняння), а також із залученням таких понять як розрахункова область, граничні умови, допоміжні рівняння й керуючі рівняння. Дискретизація, рішення й постобробка виконуються за допомогою комп'ютерів. Таким чином, описана вище процедура мало чим відрізняється від звичайних методів чисельного моделювання, заснованих на дискретизації диференціальних рівнянь у частинних похідних [22-25].

Математична модель - це, по суті, сукупність рівнянь разом з додатковими умовами. Цих умов не повинно бути занадто багато (інакше рішення може не існувати) і занадто мало, щоб забезпечити єдино вірне рішення. Також відзначимо, що фізична модель це, по суті, набір спрощень і виділення головної сутності. Наприклад, коли цікавляться відбиттям імпульсного сигналу георадару від поверхні реального покриття автомобільної дороги, звичайно зневажають шорсткістю поверхні й частотною дисперсією в матеріалах шарів, а як модель просторового розподілу електромагнітного поля приймають плоску хвилю. У такому випадку для розрахунку параметрів відбитого поля та поля, що пройшло, можна використати формули Френеля [26]:

$$T_{II} = \frac{2 \sin \theta_t \cdot \cos \theta_i}{\sin(\theta_i - \theta_t) \cdot \cos(\theta_i - \theta_t)} A_{II} ; \quad T_{\perp} = \frac{2 \sin \theta_i \cdot \cos \theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)} A_{\perp} . \quad (1)$$

$$R_{II} = \frac{\operatorname{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\operatorname{tg}(\theta_i + \theta_t)} A_{II} ; \quad R_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} A_{\perp} . \quad (2)$$

де: $\theta_i, \theta_t, A_{II, \perp}, T_{II, \perp}, R_{II, \perp}$ – кути падіння й заломлення, а також амплітуди падаючих, переломлених і відбитих хвиль відповідно. Паралельна й ортогональна поляризації при цьому позначені індексами II й \perp . Зрозуміло, модель плоскої хвилі з погляду електродинаміки є ідеалізацією, і використання цієї моделі вимагає додаткового обґрунтування. Відповідне обґрунтування необхідно здійснювати щораз при використанні нових антен [14, 21].

При реалізації обчислень мультифізика звичайно спирається на методи дискретизації. До них традиційно відносять [27-31]: метод кінцевих елементів, метод скінченних різниць і метод кінцевих об'ємів. Багато популярних програмних пакетів (ANSYS, ABAQUS) в основному покладаються на метод кінцевих елементів або аналогічні розповсюджені чисельні методи для моделювання взаємозалежної фізики: теплової напруги, електро- і акустимагнітомеханічної взаємодії.

Принципово інший підхід запропонований у роботах [1, 14, 15]. Він спирається на застосування спеціалізованого програмного забезпечення GeoVizu для обробки даних зондування за допомогою георадарів на першому етапі. На наступних етапах проводиться залучення математичних моделей прогнозування різних рівнів (для мережі автомобільних доріг це моделі мережевого рівня й динамічні моделі локального рівня) і на заключній стадії проводиться моделювання напружено-деформованого стану з використанням методу кінцевих елементів [27].

Розглянемо цю схему більш детально. В [10-12] запропоновано розвиток ідей роботи [2]. Сенс у тому, щоб до вже наявних критеріїв у рамках загальної операторної моделі [2] включити додатковий набір елементів. Цей набір запропоновано записати як оператор, що забезпечує корекцію моделі з

урахуванням економетричних показників (\hat{Lecon}):

$$P(t_2) = \hat{L}_D \cdot V(t_1) + \hat{P}'_T \cdot P_{j, V}(t_1) + \hat{Lecon} \cdot V(t_1), \quad (3)$$

де $\hat{L}_D \cdot V(t_1)$ – результат використання адаптивної динамічної моделі для прогнозування станів обстежених ділянок; \hat{P}'_T – результат коректування вихідної матриці переходу із застосуванням

динамічної моделі; $\hat{L}_{econ} \cdot V(t_1)$ – результат коректування із залученням економетричної моделі.

Природно, що таке розширення процедури комплексного застосування динамічних і марківських моделей істотно підвищує ефективність одержуваних оцінок в умовах обмеженого фінансування. Таким чином, запропонований загальний алгоритм коректування оцінок складається з наступних етапів:

1) аналіз отриманих даних про особливості різних ділянок з метою їхнього коректного об'єднання за об'єднаними критеріями техніко-експлуатаційного стану (наприклад, по швидкості зміни індексу стану) і по економетричних критеріях (собівартість поточного ремонту й утримання);

2) проведення аналізу обсягів робіт по обстеженню мережі й зіставлення його результатів з реально наявними ресурсами;

3) підготовка масивів вихідних даних і проведення відбору груп ділянок для подальшого обстеження.

У підсумку, якщо позначити об'єм ресурсів, які виділено у j -му році на обстеження мережі через $Z_{\Sigma, j}$, то в загальному вигляді завдання оптимізації цього етапу слід компактно записати як:

$$F[\xi_{\Sigma}] \rightarrow \min; \quad Z_j \leq Z_{\Sigma, j},$$

$$\xi_{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \varphi(n_1, n_2, \dots, n_M) \quad (4)$$

де m – індекс стану групи ділянок (загальною кількістю n), ξ_{Σ}, φ – функції, що описують загальний і парціальні індекси стану по групах ділянок.

Як розвиток цих ідей, в [19] використаний наступний набір співвідношень для побудови моделі прогнозування:

$$\begin{cases} P_1(t_2) = P_{1,1} \cdot P_1(t_1) + 0 \cdot P_2(t_1) \\ P_2(t_2) = P_{2,1} \cdot P_1(t_1) + P_{2,2} \cdot P_2(t_1) \end{cases} \quad (5)$$

У такому випадку значення коефіцієнта $P_{1,2} = 0$ відображає той очевидний факт, що ділянка дороги не може мимовільно перейти з гіршого стану в кращий, за умови, що за розглянутий проміжок часу ремонтні роботи на ньому не проводилися. Тепер результати можна компактно переписати в наступній формі:

$$P_i(t_2) = P_{i,j} \cdot P_j(t_1); \quad i, j = 1, \dots, 5. \quad (6)$$

Тут неявно передбачається підсумовування по повторюваних індексах. Тобто $P_{i,j} \cdot P_j(t_1) \equiv \sum_j P_{i,j} \cdot P_j(t_1)$. Дотримуючись робіт [2, 12, 19], ми увели поняття вектора стану

ділянки дороги $\mathbf{P}(t_k)$. Компонентами такого вектора є ймовірності знаходження даної ділянки у відповідних станах у момент часу (t_k) , що дозволяє записати останнє співвідношення в ще більш компактній формі:

$$\mathbf{P}(t_2) = \mathbf{P}_T \cdot \mathbf{P}(t_1), \quad (7)$$

де \mathbf{P}_T – матриця переходу, елементами якої є ймовірності переходу ділянки з одного стану в інший. У загальному випадку ця матриця має вигляд:

$$\mathbf{P}_T = \begin{vmatrix} P_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{2,1} & P_{2,2} & 0 & 0 & 0 \\ P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} & 0 & 0 \\ P_{4,1} & P_{4,2} & P_{4,3} & P_{4,4} & 0 \\ P_{5,1} & P_{5,2} & P_{5,3} & P_{5,4} & 1 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Одиниця в правому нижньому куті підкреслює той очевидний факт, що ділянка, що перебувала у самому гіршому з можливих станів може при відсутності ремонтних робіт тільки залишитися в цьому ж стані.

Зручність й ефективність такого формалізованого апарата складається також у тому, що для знаходження стану ділянки через $2 \cdot \Delta t$ (за умови, що ймовірності початкових станів ділянки відомі) досить просто двічі застосувати операцію множення вектора початкового стану на матрицю переходу:

$$P_i(t_3) = P_{i,j} \cdot P_j(t_2) = P_{i,j} \cdot P_{i,j} \cdot P_j(t_1) = P_{i,j}^2 \cdot P_j(t_1), \quad (9)$$

або в більш компактній формі:

$$\mathbf{P}(t_3) = \mathbf{P}_T^2 \cdot \mathbf{P}(t_1). \quad (10)$$

Очевидно, що застосування такої процедури справедливо лише у випадку, коли є повний набір даних про стан всіх ділянок і хід (швидкість) процесу руйнування покриття не змінюється з часом. Такі процеси називають стаціонарними. У загальному випадку швидкість руйнування конструкції залежить від часу й тому застосування останнього співвідношення без урахування цього фактору некоректно. Тому в моделі побудови (обчислення елементів) матриць переходу необхідно використати інтервали часу, протягом яких процес є стаціонарним. Альтернативою цьому є алгоритм внесення корегування відповідно до динамічних моделей [2, 12].

У підсумку був запропонований розвиток методу регресійної оптимізації. Цей метод припускає використання функціональної нелінійної оптимізації для мінімізації суми абсолютних значень різниці між регресійною залежністю, що якнайкраще апроксимує фактичні дані, і результатами прогнозів відповідно до використання марківських матриць переходу. Ця схема може бути представлена математичною моделлю виду:

$$\Psi = \sum_{m=1}^M |J(t_m) - J(t_m, P_{m-1,m})| \rightarrow \min, \quad (11)$$

де Ψ – цільова функція; $J(t_m)$ – індекс стану в період t_m відповідно до регресійної моделі; $J(t_m, P_{m-1,m})$ – індекс стану в той же період, але відповідно до марківської моделі.

Ця модель, природно, припускає наявність інформації про стан всіх або значної (більшої) частини ділянок. Також передбачається, що відома інформація й про проведення в попередні періоди ремонтних заходів. Оскільки ця інформація в повному обсязі в багатьох випадках відсутня у базах даних, то доцільно застосувати метод пропорцій. Технологія застосування цього методу спирається на наступне співвідношення для елементів матриці переходу:

$$P_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{n_i}, \quad (12)$$

де $n_{i,j}$ – кількість ділянок, що перейшли протягом даного періоду часу з i -го стану в j -і; n_i – число ділянок, що перебували в i -м стані на початок періоду.

Стосовно до діагностики автомобільних доріг цей метод ефективний й у випадку, коли відомі дані обстежень по всіх ділянках на початку й наприкінці попереднього періоду, тобто тільки за попередній рік, а не за весь попередній строк експлуатації. У такому випадку зручним інструментом є таблиці даних про стан ділянок. Ці таблиці можуть бути складені як щодо окремих пошкоджень і руйнувань (відомості дефектів), так і щодо індексу стану.

На наступному етапі аналізу для оцінки стану конструкцій дорожніх одягів за результатами діагностики й наступного призначення ремонтних заходів необхідно досліджувати вплив внутрішніх параметрів моделі оцінки стану дорожніх одягів (тріщин, зон перезволоження й недоуцільнення) на показники, що характеризують міцнісний й деформаційний стани конструкції. Як було відзначено в роботах [2, 12], такими показниками є: загальний еквівалентний модуль пружності конструкції; напруги, що розтягують, діючі в монолітних шарах конструкції; напруги зрушення, що діють у ґрунтах земляного полотна й шарів з незв'язаних матеріалів, а також коефіцієнти запасу міцності за відповідними критеріями. У рамках запропонованої схеми інтерпретації результатів на даному етапі здійснюється моделювання за допомогою методу кінцевих елементів. Суть такого підходу складається в об'єднанні результатів попередніх етапів з можливостями сучасних систем комп'ютерного моделювання. У такому

випадку в основі розрахунків напружено-деформованого стану (далі – НДС) дорожніх одягів лежать базові рівняння теорії пружності, які складаються із трьох груп [32]. Для одержання цих рівнянь в околі розглянутої точки виділяється елементарний паралелепіпед з розмірами dx , dy , dz і перша група рівнянь, які називають статичними, визначає умови рівноваги цього елемента. Друга група – це геометричні рівняння, що пов'язують деформації елемента з переміщеннями його точок. І остання група, яка по суті є рівняннями, що виражають залежність між напругами й деформаціями. Оскільки в цих рівняннях враховуються механічні властивості матеріалу, їх прийнято називати фізичними. По суті, вони є відображенням закону Гука й мають вигляд [32]:

1. Статичні рівняння:

$$\mathbf{A} \vec{\sigma} + \vec{g} = 0, \quad (13)$$

де: $\vec{\sigma}$ – вектор напруг, а \vec{g} – вектор інтенсивності об'ємного навантаження (наприклад, вага, сила інерції й т.д.). Матричний оператор диференціювання має вигляд:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{vmatrix}. \quad (14)$$

2. Геометричні рівняння (їх називають також рівняннями Коші):

$$\vec{\varepsilon} = \mathbf{A}^T \vec{u}, \quad (15)$$

де: $\vec{\varepsilon}$ і \vec{u} вектори деформацій і переміщень, а матриця \mathbf{A}^T є транспонованою стосовно матриці \mathbf{A} (14).

3. Фізичні рівняння теорії пружності:

$$\vec{\varepsilon} = \mathbf{C} \vec{\sigma}. \quad (16)$$

де: \mathbf{C} – матриця пружної піддатливості матеріалу.

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Це рівняння для лінійно-пружних ізотропних тіл є виразом узагальненого закону Гука з урахуванням зв'язку між модулями пружності при розтяганні (E), зрушенні (G) і коефіцієнтом Пуассона (μ):

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (18)$$

Рівняння (16) дозволяють визначати деформації, якщо відомі напруги, й представляють закон Гука в прямій формі. Іноді при рішенні практичних завдань виникає необхідність зворотної постановки завдання, тобто визначення напруг по відомих деформаціях. У такій ситуації необхідно розв'язати рівняння (16) щодо напруг. Для цього можна використати закон Гука у зворотній формі:

$$\vec{\sigma} = \mathbf{D} \vec{\varepsilon}, \quad (19)$$

де: \mathbf{D} – матриця твердості матеріалу, що має вигляд:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 2G + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2G + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2G + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{pmatrix} \quad (20)$$

а, параметр λ - коефіцієнт Ламе:

$$\lambda = \frac{2 \mu G}{1 - 2 \mu} = \frac{\mu E}{(1 - 2 \mu) \cdot (1 + \mu)}. \quad (21)$$

Оскільки рівняння (13, 15) є диференціальними рівняннями, то для знаходження єдиного рішення завдання в кожному конкретному випадку до співвідношень (13, 15, 16) необхідно додати додаткові умови. При розгляді статичних завдань це повинні бути як власне умови на границях (граничні умови), так й умови, що задають навантаження. Всі разом вони повинні забезпечувати з математичної точки зору існування й єдність розв'язку завдання, що сформульовано. Ці співвідношення являють собою основу для побудови обчислювальних алгоритмів і проведення комплексного аналізу поведінки конструкції.

Після цього вже може бути реалізований етап прогнозування, але тепер на якісно новому рівні. Зрозуміло, у межах однієї статті складно дати детальний огляд всіх можливих напрямків розвитку систем обробки й інтерпретації даних, які спираються на досягнення сучасної математичної фізики, теорії електромагнетизму, а також методів і засобів обчислювальної діагностики й прогнозування. Відповідні результати автор сподівається опублікувати в наступній частині роботи.

ВИСНОВКИ

У статті наведено аналіз раніше отриманих результатів, в основі яких лежить сукупність не тільки різних методів, але й фактичне об'єднання декількох наукових напрямків. Запропонований підхід включає об'єднання етапів одержання первинних даних за допомогою георадарів і наступної їхньої обробки із залученням створеного програмного забезпечення GeoVizu, а далі - виконання на наступному етапі оцінки й прогнозування стану конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу на основі процедури комплексного застосування динамічних моделей локального рівня й марковських моделей мережевого рівня. Цей підхід показав ефективність одержуваних оцінок, особливо в умовах обмеженого фінансування. Наступний етап оцінки стану промислових і будівельних конструкцій за результатами діагностики й подальшого призначення ремонтних заходів припускає дослідження впливу так званих внутрішніх параметрів моделі. До них ставляться міцнісні й деформаційні параметри, які визначають напружено-деформований стан конструкції. Подальший розвиток операторного підходу дозволив в підсумку запропонувати більш досконалу математичну модель оцінки й прогнозування поточного стану різних технічних і будівельних конструкцій, зокрема автомобільних доріг.

Таким чином, представлені результати дозволяють говорити про новий напрямок у наукових дослідженнях, що може бути визначен як комбінований багатопараметричний аналіз (combined multi-parametric analysis - CoMPA). Метою даного напрямку є дослідження взаємозалежних процесів у технічних конструкціях за допомогою методів математичної фізики при об'єднанні не тільки аналізу їхньої взаємодії з полями різної фізичної природи, але й при залученні математичних моделей з різних технічних областей.

Значимість отриманих результатів складається не тільки з нових моделей обробки й інтерпретації даних, але також з перспектив подальшого розвитку технічних засобів контролю й діагностики. Стимулом до такого розвитку є також накопичений досвід численних експериментальних досліджень, що дозволить глибше врахувати всю повноту фізичних явищ, що супроводжують процеси дистанційного зондування й неруйнівного контролю й забезпечити подальший прогрес у даному напрямку.

Authors' ORCID ID

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Батраков Д.О. Алгоритми пошуку дефектів в інженерних спорудах за допомогою георадарів. (оглядова стаття, Частина I). Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. 2019;31:16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-02>.
2. Батракова А.Г. Методология мониторинга дорожных одежд нежесткого типа с применением георадиолокационных технологий [Дис. доктора техн. наук, 05.22.11 – Автомобильные дороги и аэродромы]. Харьков; 2014. 397 с.
3. ДСТУ-НБВ.1.2-18:2016 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану.
4. Чуканова Наталя Петрівна Удосконалення організаційно-технологічних рішень моніторингу технічного стану будівель старої забудови. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук. 05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного будівництва, Харків, 2020. http://kstuca.kharkov.ua/wp-content/uploads/2020/03/_chukanova_avtoreferat.pdf
5. Flanagan R, Jewell C, Norman G. Whole life appraisal for construction. John Wiley and Sons; 2005. 182 p.
6. Core Competencies for Federal Facilities Asset Management Through 2020: Transformational Strategies / National Research Council (U.S., 2008. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12049.
7. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV; Batrakova AG. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR); 2017; Edinbourg, Scotland, IEEE Conference Publications; p. 1-6. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7996072/>
8. Батраков Д.О., Антюфеева М.С., Батракова А.Г., Антюфеев А.В., Фан Хаоцзе. Применение георадаров для идентификации подповерхностных дефектов в дорожных покрытиях. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, серія: «Радіофізика та електроніка». 2017;26:17-23.
9. Батраков Д.О., Антюфеева М.С., Хе Илунь, Батракова А.Г., Чень Дунбо. Обнаружение цилиндрической неоднородности в плоско-слоистой среде. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Радіофізика та електроніка». 2017;27:17-23.
10. Батракова А.Г., Урдзик С.М., Батраков Д.О. Моделирование и оценка состояния дорожных одежд со сквозными трещинами в покрытии. Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр. 2019;85:48-58. **ISSN: 2219-5548**
11. Batrakova AG, Batrakov DO, Antyufeyeva Mariya S. Pavement deterioration model based on GPR datasets. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, [S.l.]. 2018;17(1):55-71. ISSN 2449-769X. Available at: <>. Date accessed: 19 Apr. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.004>
12. Батракова А.Г., Урдзик С.М., Батраков Д.О. Динамические и эконометрические модели прогнозирования состояния автомобильных дорог. Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр. 2019;85:59-65. **ISSN: 2219-5548**
13. Батракова А.Г., Процюк В.О. Алгоритм оцінки вологості ґрунтів земляного полотна за результатами георадіолокаційного обстеження. Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр. 2016;72:157-161. ISSN: 2219-5548.
14. Батраков Д.О. Радиофизические Методы решения задач неразрушающего контроля и дистанционного зондирования в частотной области. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». 2018;28:8-15.
15. Батраков Д.О., У Дион, Белошенко К.С., Антюфеева М.С., Батракова А.Г. Сравнительный анализ двух алгоритмов толщинометрии плоскостойких сред с помощью импульсных георадаров. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». 2018;28:16-23.
16. Batrakov D, Beloshenko K, Antyufeyeva M, Batrakova A, Urdzik S. COMPARATIVE STUDY OF SIGNAL PROCESSING OF TWO UWB GPR ANTENNA UNITS. Telecommunications and Radio Engineering. 2019;78:109-116. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20)
17. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Beloshenko KS, Batrakova AG, Troyanovsky VV. GPR Signals Processing for the Road Pavements Monitoring with the Weak Contrast Layers. Conference Paper, Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe; May 13-15, 2019; Prague, Czech Republic; p. 390-393.
18. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Troyanovsky VV, Pilicheva MO. UWB Signal Processing for the Road Pavements Assessment. Conference Paper, Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON); 2019. p. 1-4. <http://ukrcon.ieee.org.ua/program/> DOI: [10.1109/UKRCON.2019.8879866](https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879866)

19. Angelika G. Batrakova, Vladimir V. Troyanovsky, Dmitry O. Batrakov, Maryna O. Pilicheva, Nataliia S. Skrypnuk. Prediction of the road pavement condition index using stochastic models. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 2020;19(3):225-242. DOI: [10.7409/rabd.2020.015](https://doi.org/10.7409/rabd.2020.015). Published: 2020-09-30
20. Benny R, Smith IFC. *Fundamentals Computer-Aided Engineering*. John Wiley & Sons. Paperback; 2003, 328 p. ISBN-13 : 978-0471487159.
21. Батраков Д.О. *Радиофизические модели дистанционного зондирования и диагностики*. Lambert Academic Publishing, Düsseldorf, Germany; 2017. 309 p. ISBN: 978-620-2-09485-6.
22. Krzhizhanovskaya VV, Sun S. Simulation of Multiphysics Multiscale Systems: Introduction to the ICCS'2007 Workshop. *Computational Science ICCS 2007*, Springer Berlin Heidelberg; 2007; p. 755-761, doi:[10.1007/978-3-540-72584-8_100](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72584-8_100), ISBN [9783540725831](https://doi.org/10.1007/9783540725831)
23. Groen D, Zasada SJ, Coveney PV. Survey of Multiscale and Multiphysics Applications and Communities. 2012-08-31. [arXiv:1208.6444](https://arxiv.org/abs/1208.6444)
24. "COMSOL Modeling Software". COMSOL.com. Comsol, Inc. Retrieved 20 November 2015.
25. Martin Courtney. Multiphysics brings the real world into simulations. *Eandt.theiet.org*, Published Monday, March 16, 2015. PP. 1-5. <https://eandt.theiet.org/content/articles/2015/03/multiphysics-brings-the-real-world-into-simulations/>
26. Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics (Sixth Edition)*. Pergamon; 1980. 891 p. ISBN 9780080264820, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-026482-0.50001-3>.
27. Karan Kumar, Pradhan Snehashish. Chakraverty. *Finite Element Method. Computational Structural Mechanics, Static and Dynamic Behaviors*; 2019. p. 25-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815492-2.00010-1>
28. Chari MVK, Salon SJ. *Numerical Methods in Electromagnetism, Electromagnetism, The finite difference method*; 2000. p. 105-141.
29. Roe PL. Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *J. of Comp. Physics*. 1981;43:337-372.
30. Anderson WK, Thomas JL, van Leer B. Comparison of Finite Volume Flux Vector Splittings for the Euler Equations. *AIAA J*. 1986;24(9):1453-1460.
31. Ковеня ВМ, Чирков ДВ. *Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики Учебное пособие, Новосибирск; 2013. с. 87. <http://www.ict.nsc.ru/matmod/files/textbooks/KovenyaChirkov.pdf>*
32. Александров АВ, Потапов ВД. *Основы теории упругости и пластичности*. Москва: Высш. шк.; 1990. 400 с.

REFERENCES

1. Batrakov DO. Algorithms for searching defects in engineering structures using GPR (Review article, Part I) *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. "Radiophysics and Electronics"*. 2019;31:16-26. [In Russian] DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-02>.
2. Batrakova AG. Methodology for monitoring non-rigid road pavements with the use of ground-penetrating radar technologies [dis. ... doctor tech. Sciences: 05.22.11 - Highways and airfields]. – Kharkov; 2014. 397 p. [In Russian]
3. DSTU-NBV.1.2-18: 2016 *Nastanova for routine maintenance and assessment of technical conditions*. [In Ukrainian].
4. Chukanova Natalya Petrivna. Improvement of organizational and technological solutions for monitoring the technical condition of old buildings. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 05.23.08 - technology and organization of industrial and civil construction, Kharkiv, 2020. [In Ukrainian]. http://kstuca.kharkov.ua/wp-content/uploads/2020/03/chukanova_avtoreferat.pdf
5. Flanagan R, Jewell C, Norman G. *Whole life appraisal for construction*. John Wiley and Sons; 2005. 182 p.
6. *Core Competencies for Federal Facilities Asset Management Through 2020: Transformational Strategies / National Research Council (U.S., 2008. – [Electronic resource]. – Available at: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12049*.
7. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakova AG. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR); 2017, Edinbourg, Scotland, IEEE Conference Publications; p. 1-6. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7996072/>
8. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Antyufeyev AV, Fan Haotsze. Application of GPR for identification of subsurface defects in road surfaces. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. "Radiophysics and Electronics"*. 2017;26:17-23. [In Russian].
9. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, He Ylun, Batrakova AG, Chen Dongbo. Detection of cylindrical inhomogeneity in a layered medium. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. "Radiophysics and Electronics"*. 2017;27:17-23. [In Russian].

10. Batrakova AG, Urdzik SM, Batrakov DO. Modeling and assessment of the condition of pavements with through cracks in the pavement. *HNADU Bulletin: Sb. scientific. tr.* 2019;85:48-58. ISSN: 2219-5548 [In Russian].
11. Batrakova AG, Batrakov DO, Antyufeyeva MS. Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty, [S.l.]*. 2018;17(1):55-71. ISSN 2449-769X. Available at: <>. Date accessed: 19 Apr. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.004>
12. Batrakova AG, Urdzik SM, Batrakov DO. Dynamic and econometric models for predicting the state of highways *Vestnik KhNADU: Sb. scientific. tr.* 2019;85:59-65. ISSN: 2219-5548 [In Russian].
13. Batrakova AG, Protsyuk VO. Algorithm for assessing the quality of the ground bed according to the results of georadiolocation coverage. *HNADU Bulletin: Sat. scientific. tr.* 2016;72:157-161. ISSN: 2219-5548 [In Russian].
14. Batrakov DO. Radiophysical Methods for solving problems of non-destructive testing and remote sensing in the frequency domain. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. "Radiophysics and Electronics"*. 2018;28:8-15. [In Russian]
15. Batrakov DO, U Diyun, Beloshenko KS, Antyufeyeva MS, Batrakova AG. Comparative analysis of two algorithms for thickness measurement of plane-layered media using pulsed GPR. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. "Radiophysics and Electronics"*. 2018;28:16-23. [In Russian]
16. Batrakov DO, Beloshenko KS, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Urdzik S.. COMPARATIVE STUDY OF SIGNAL PROCESSING OF TWO UWB GPR ANTENNA UNITS. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019;78:109-116. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20)
17. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Beloshenko KS, Batrakova AG, Troyanovsky VV. GPR Signals Processing for the Road Pavements Monitoring with the Weak Contrast Layers. Conference Paper, Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe; May 13-15, 2019; Prague, Czech Republic; p. 390-393.
18. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Troyanovsky VV, Pilicheva MO. UWB Signal Processing for the Road Pavements Assessment. Conference Paper, Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON); 2019. p. 1-4. <http://ukrcon.ieee.org.ua/program/> DOI: [10.1109/UKRCON.2019.8879866](https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879866)
19. Batrakova AG, Troyanovsky VV, Batrakov DO, Pilicheva MO, Skrypnyk NS. Prediction of the road pavement condition index using stochastic models. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 2020;19(3):225-242. DOI: [10.7409/rabdim.020.015](https://doi.org/10.7409/rabdim.020.015). Published: 2020-09-30
20. Benny Raphael, Smith I.F.C. *Fundamentals Computer-Aided Engineering*. John Wiley & Sons. Paperback, 2003, 328 pages, ISBN-13 : 978-0471487159.
21. Batrakov DO. Radiophysical models of remote sensing and diagnostics. Lambert Academic Publishing, Düsseldorf, Germany; 2017. 309 p. ISBN: 978-620-2-09485-6.
22. Krzhizhanovskaya VV, Sun Shuyu. Simulation of Multiphysics Multiscale Systems: Introduction to the ICCS'2007 Workshop. *Computational Science ICCS 2007*, Springer Berlin Heidelberg; 2007; p. 755-761, doi:[10.1007/978-3-540-72584-8_100](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72584-8_100), ISBN [9783540725831](https://doi.org/10.1007/978-3-540-72584-8)
23. Groen D, Zasada SJ, Coveney PV. Survey of Multiscale and Multiphysics Applications and Communities. 2012-08-31 [arXiv:1208.6444](https://arxiv.org/abs/1208.6444)
24. "[COMSOL Modeling Software](https://www.comsol.com/)". *COMSOL.com*. Comsol, Inc. Retrieved 20 November 2015.
25. Martin Courtney. Multiphysics brings the real world into simulations. *Eandt.theiet.org*, Published Monday, March 16, 2015. p. 1-5. <https://eandt.theiet.org/content/articles/2015/03/multiphysics-brings-the-real-world-into-simulations/>
26. Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics (Sixth Edition)*, Pergamon; 1980, 891 p. ISBN 9780080264820, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-026482-0.50001-3>.
27. Karan Kumar, Pradhan Snehashish. Chakraverty. *Finite Element Method. Computational Structural Mechanics, Static and Dynamic Behaviors*; 2019. p. 25-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815492-2.00010-1>
28. Chari MVK, Salon SJ. *Numerical Methods in Electromagnetism*, Electromagnetism, The finite difference method; 2000. p. 105-141.
29. Roe PL. Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *J. of Comp. Physics*. 1981;43:337-372.
30. Anderson WK, Thomas JL, van Leer B. Comparison of Finite Volume Flux Vector Splittings for the Euler Equations. *AIAA J.* 1986;24(9)1453-1460.
31. Kovenya VM, Chirkov DV. *Methods of finite differences and finite volumes for solving problems of mathematical physics* Textbook, Novosibirsk; 2013. p. 87. <http://www.ict.nsc.ru/matmod/files/textbooks/KovenyaChirkov.pdf>
32. Aleksandrov AV, Potapov VD. *Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity*. - Moscow: Higher. Shk; 1990. 400 p.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-03>

УДК 537.868.3

РАДІОФІЗИЧНІ МЕТОДИ У ДОСЛІДЖЕННІ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДИН

Є.О. Антоненко, В.О. Кожешкурт, Д.О. Штода, Г.С. Катрич, В.О. Катрич

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

E-mail: antonenko@karazin.ua

Надійшла до редакції 27 листопада 2020 р.

Актуальність. Створення нових експрес-методів якісного та кількісного аналізу розчинів, біологічних рідин і суспензій та розробка технічних засобів для їх реалізації є актуальними задачами у різних галузях науки і техніки, зокрема, у біотехнологіях та біомедицині. Також актуальність роботи обумовлена необхідністю оптимізації технологічних процесів виробництва та синтезу наноматеріалів.

Мета роботи. Теоретична та експериментальна перевірка можливості застосування радіофізичних методів для оцінки фізико-хімічних параметрів розчинів та суспензій. Оптимізація технологічного процесу лазерної абляції. Вирішення фізико-хімічної задачі синтезу наночастинок заліза у магнетитовій оболонці.

Матеріали та методи. У роботі представлено порівняльний аналіз методів обчислення ефективних параметрів системи діелектрик – металеві включення за формулами змішування Максвелла-Гарнета, Бруггемана та методу кінцевих елементів. Показано, що у випадку металевих включень, формула Бруггемана дає результат, що краще узгоджується з експериментальними результатами. Методом імпедансної спектроскопії проведено аналіз водних суспензій металевих наночастинок.

Результати. Розроблено простий метод синтезу наночастинок заліза з магнетитовою оболонкою на основі реакції контрольованого окислення наночастинок заліза озоном. Проведено мікроскопічний аналіз отриманих частинок та встановлено швидкість утворення магнітної оболонки. Апробовано метод імпедансної спектроскопії для вимірювання концентрації наночастинок металів в процесі лазерної абляції. Показано, що стану седиментаційної рівноваги суспензії відповідає конкретне значення електричної провідності.

Висновки. Показано, що метод імпедансної спектроскопії може використовуватись як непрямий метод для оцінки якісних і кількісних фізико-хімічних параметрів розчинів та суспензій. Проведено моделювання впливу розподілу металевих частинок у діелектричній матриці на електрофізичні параметри суспензії.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпедансна спектроскопія, лазерна абляція, суспензія, наночастинок.

RADIOPHYSICAL METHODS IN THE STUDY OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF LIQUIDS

Ye. Antonenko, V. Kozheshkurt, D. Shtoda, G. Katrich, V. Katrich

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

Relevance: The creation of new express methods for the qualitative and quantitative analysis of solutions and suspensions and biological liquids, as well as the development of technical means for their implementation, are urgent tasks in various fields of science and technology, in particular, in biotechnology and biomedicine. Also, the relevance of the work is due to the need to optimize technological processes for the production and synthesis of nanomaterials.

The purpose of the work is to verify theoretically and experimentally the possibility of using radiophysical methods to assess the physicochemical parameters of solutions and suspensions. Another purposes are optimization of the technological process of laser ablation and solution of the physicochemical problem of the synthesis of iron nanoparticles in magnetite shells.

Materials and methods: The paper presents a comparative analysis of methods for calculating the effective parameters of the system dielectric – metal inclusions using the mixing formulas of Maxwell–Garnett, Bruggeman and the finite element method. It is shown that in the case of metallic inclusions, the Bruggeman formula gives a more adequate result, which is consistent with the experimental results. The analysis of aqueous suspensions of metal nanoparticles was carried out by the method of impedance spectroscopy.

Results: A simple method has been developed for the synthesis of iron nanoparticles with a magnetite shell based on the reaction of controlled oxidation of iron nanoparticles by ozone. A microscopic analysis of the obtained particles was carried out and the rate of formation of the magnetic shell was determined. The method of impedance spectroscopy for measuring the concentration of metal nanoparticles in the process of laser ablation has been tested. It is shown that the state of sedimentation equilibrium of the suspension corresponds to a specific value of electrical conductivity.

Conclusion: It is shown that the method of impedance spectroscopy can be used as an indirect method for assessing the qualitative and quantitative physicochemical parameters of solutions and suspensions. The simulation of the influence of the distribution of metal particles in a dielectric matrix on the electrophysical parameters of the suspension is carried out.

KEYWORDS: impedance spectroscopy, laser ablation, suspension, nanoparticles.

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

Е.А. Антоненко, В.А. Кожешкурт, Д.А. Штода, Г.С. Катрич, В.А. Катрич

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

Актуальность. Создание новых экспресс-методов качественного и количественного анализа растворов и суспензий и биологических жидкостей, а также разработка технических средств для их реализации являются актуальными задачами в различных областях науки и техники, в частности, в биотехнологиях и биомедицине. Также актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации технологических процессов производства и синтеза наноматериалов.

Цель работы. Теоретическая и экспериментальная проверка возможности применения радиофизических методов для оценки физико-химических параметров растворов и суспензий. Оптимизация технологического процесса лазерной абляции. Решение физико-химической задачи по синтезу наночастиц железа в магнетитовых оболочке.

Материалы и методы. В работе представлен сравнительный анализ методов вычисления эффективных параметров системы диэлектрик – металлические включения по формулам смешивания Максвелла–Гарнетта, Бругемана и метода конечных элементов. Показано, что в случае металлических включений формула Бругемана дает результат, который лучше согласуется с экспериментальными результатами. Методом импедансной спектроскопии проведен анализ водных суспензий металлических наночастиц.

Результаты. Разработан простой метод синтеза наночастиц железа с магнетитовой оболочкой на основе реакции контролируемого окисления наночастиц железа озоном. Проведен микроскопический анализ полученных частиц и установлена скорость образования магнитной оболочки. Апробирован метод импедансной спектроскопии для измерения концентрации наночастиц металлов в процессе лазерной абляции. Показано, что состоянию седиментационного равновесия суспензии соответствует конкретное значение электрической проводимости.

Выводы. Показано, что метод импедансной спектроскопии может использоваться как непрямой метод для оценки качественных и количественных физико-химических параметров растворов и суспензий. Проведено моделирование влияния распределения металлических частиц в диэлектрической матрице на электрофизические параметры суспензии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импедансная спектроскопия, лазерная абляция, суспензия, наночастицы.

ВСТУП

Радіофізичні методи, зокрема імпедансна спектроскопія, широко використовуються у сучасних аналітичних приладах у біології, фармації, фізиці наночастинок і дозволяють непрямим способом оцінити якісні та кількісні фізико-хімічні властивості рідин і суспензій, в тому числі і біологічних. На основі методу імпедансної спектроскопії створюються зразки дослідницького аналітичного обладнання, [1,2]. На сучасному ринку вимірювального обладнання широко представлені аналізатори імпедансу, такі як 4294A, E4990A, E4991B (Keysight Technologies, США) [3], MFIA (Zurich Instruments AG, Швейцарія) [4], 6500B (Wayne Kerr Electronics, Великобританія) [5].

Зазвичай дослідження мають прикладний характер і мають на меті створення нових датчиків для контролю індустриальних процесів [6], методів експрес-аналізу фармацевтичних препаратів [7] і біологічних проб [8,9], оптимізації виробничих процесів у харчовій промисловості [10,11].

У даній роботі приводяться результати теоретичних досліджень впливу розподілу металевих включень у діелектричній матриці на ефективні електрофізичні параметри. Показано, що формули змішування Максвелла – Гарнета та Бругемана дають різні результати в області об'ємних концентрацій металевих включень, більших за 0,2. Також проведено моделювання електрохімічної комірки методом кінцевих елементів на предмет залежності імпедансу від розподілу металевих включень. Досліджується залежність електричної провідності суспензії від концентрації наночастинок заліза, що використано для оптимізації процесу лазерної абляції.

У даній роботі вирішуються дві задачі, які знаходяться на стику наукових напрямків: радіофізики та фізичної хімії. Розглядається спосіб синтезу наночастинок заліза в магнетитовій оболонці та радіофізичні методи керування процесом виробництва наночастинок і контролю їх кількісних та якісних параметрів.

ФИЗИКО-ХИМИЧНИ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримання наночастинок методом лазерної абляції потребує використання сучасних технологій різних галузей науки і техніки. Цей метод заснований на вибиванні частинок речовини з мішені лазерним променем. Фото спеціальної кювети для проведення лазерної абляції представлено на Рис. 1.

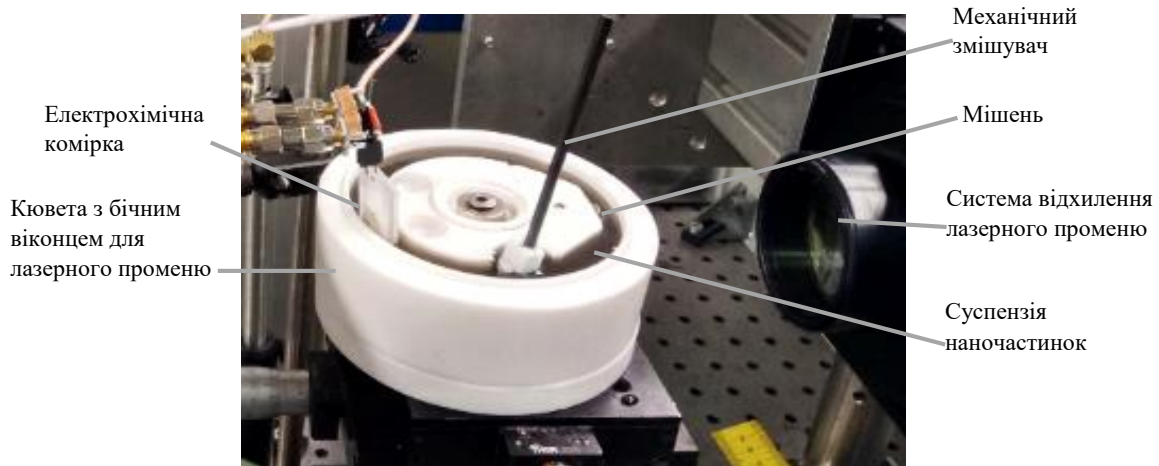


Рис. 1. Кювета для отримання наночастинок методом лазерної абляції.
 Fig. 1. Cuvette for the production of nanoparticles by laser ablation method.

Наночастинок металів використовуються в різних галузях науки та промисловості. Наприклад, наночастинок золота, які утворюють оболонку для наночастинок оксиду титану або оксиду цинку, мають каталітичну дію [12]. Наночастинок платини використовуються в мікро- та наноелектроніці для виробництва гнучких підкладок, полімерних транзисторів [13] і датчиків деформації [14]. Наночастинок дозволяють створювати нові біотехнології, наприклад, 3D-друк живими клітинами [15]. Наночастинок заліза та їх модифікації використовуються як компонент магнітних носіїв інформації, для виробництва феромагнітних рідин, у сучасній клінічній діагностиці в якості контрастної речовини для магнітно-резонансної томографії та для цілеспрямованої гіпертермії при лікуванні онкологічних захворювань. Локальний нагрів можливий, якщо накопичені пухлиною наночастинок мають магнітні властивості [16]. Однією з таких речовин є магнетит Fe_3O_4 . Фізико-хімічною частиною завдання представленої роботи є розробка методів синтезу магнітно керованих наночастинок заліза з магнетитовою оболонкою. Для синтезу наночастинок заліза у магнетитовій оболонці використано метод лазерної абляції з подальшим окисленням отриманої суспензії озonom. В процесі лазерної абляції використано мішень із хімічно чистого заліза, а у якості розчинника – деіонізовану воду.

Для формування магнетитової оболонки суспензія піддається процедурі окислення озonom. Час озонування безпосередньо впливає на товщину магнетитової оболонки. Отримана суспензія висушується, а отримані наночастинок зберігаються у вигляді порошку. Мікроскопічний аналіз наночастинок проведено на трансмісійному електронному мікроскопі. Результати мікроскопічного аналізу наночастинок неозонованої суспензії наведені на Рис. 2 а. Слід зауважити, що у наночастинок еталонної суспензії не спостерігається наявність будь-якої оболонки. Аналіз наночастинок після 10 хвилин озонування (Рис. 2 б) вказує на наявність тонкої оболонки (3-7 нм), яка має кристалічну структуру.

Приблизна швидкість росту товщини оболонки становить приблизно 0,5 нм/хв. Можна припустити, що при середньому діаметрі наночастинок 50 нм після 50 хвилин озонування частинка повністю окислюється і фрагментується.

Розглянемо випадок 60-хвилинного озонування суспензії, результати якого показані на Рис. 2в. Після тривалого часу озонування спостерігаються поодинокі елементи з кристалічною структурою та розміром близько 3-5 нм. Ці результати підтверджують припущення про швидкість утворення оболонки наночастинок, яка складає приблизно 0,5 нм / хв при виробництві озону 500 мг / год. Таким чином, озон має фрагментуючу дію і сприяє розпаду частинки на окремі молекули оксидів та гідроксидів. Це підтверджується мікроскопічним аналізом, при проведенні якого виявлено лише кристалічні залишки частинки розміром до 5 нм. Також різними є і оптичні властивості досліджуваних зразків (Рис. 2г). Неозброєним оком видно, що озонована суспензія стає більш прозорою і однорідною, з часом частинки осідають, але розміри агломератів набагато менші, ніж у контрольного зразка.

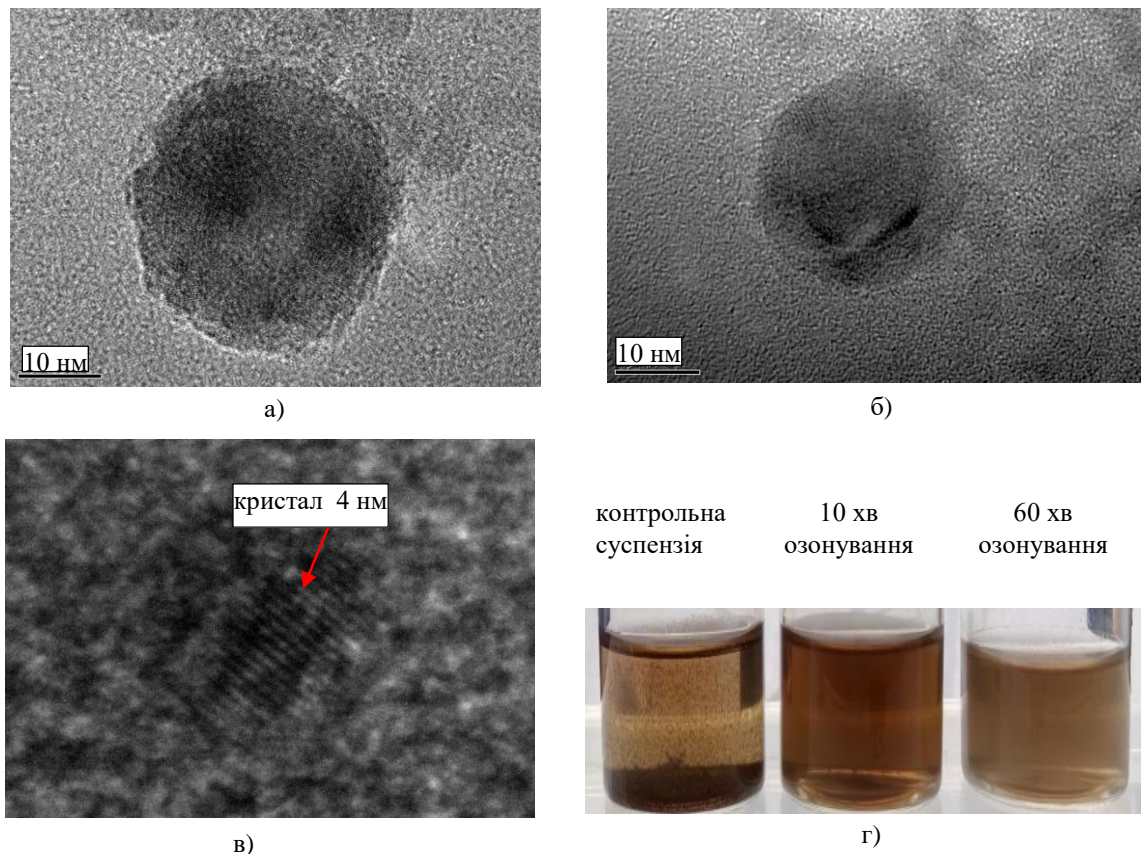
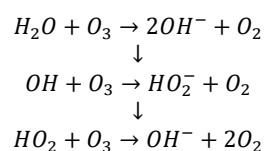


Рис. 2. Мікроскопічний аналіз наночастинок заліза без озонування (а), після 10-хвилинного озонування (б), після 60-хвилинного озонування (в) та вигляд суспензій (г).

Fig. 2. Microscopic analysis of iron nanoparticles without ozonation (a), after 10-minute ozonation (b), after 60-minute ozonation (c) and the appearance of suspensions (d).

Окремої уваги заслуговує зразок, отриманий після 10-хвилинного озонування. Суспензія знаходиться у стані седиментаційної рівноваги, що триває близько 7 діб з поступовим утворенням осаду. В інших зразках утворення осаду відбувається у перші хвилини після озонування. На стабільність суспензії впливають такі фактори як заряд оболонки наночастинок, їх розмір, іонний склад розчинника. Залежно від часу озонування у воді утворюються різні гідроксильні та гідропероксильні радикали (OH^- , HO_2^-), а також перекис водню (H_2O_2). Ефект стабілізації суспензії можна пояснити утворенням у воді гідропероксильних радикалів HO_2^- , які взаємодіють із позитивно зарядженою оболонкою наночастинок. З великою ймовірністю відбувається наступний ланцюг реакцій:



Як видно, радикали можуть переходити з OH в HO_2 і навпаки. Нижче буде показано, що для оптимізації процесу лазерної абляції та дослідження експериментальних зразків суспензій можна застосувати метод імпедансної спектроскопії.

МОДЕЛЮВАННЯ ІМПЕДАНСУ ДИСПЕРСНОГО СЕРЕДОВИЩА

Існує декілька підходів для обчислення ефективних параметрів дисперсних середовищ. Так, наприклад, при дослідженні водної суспензії, яка містить металеві включення, діелектрична проникність може бути обчислена за формулою Максвелла-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_1}{\varepsilon_{eff} - 2\varepsilon_1} = C^v \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - 2\varepsilon_1} \quad (1)$$

або за формулою Бругемана:

$$(1 - C_2^v) \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{eff}}{\epsilon_1 + 2\epsilon_{eff}} = -C_2^v \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{eff}}{\epsilon_2 - 2\epsilon_{eff}} \quad (2)$$

де C_2^v – об’ємна концентрація металевих включень.

У випадку водної суспензії з металевими наночастинками, значення діелектричної проникності включень будемо вважати нескінченним ($\epsilon_2 \rightarrow \infty$). Таким чином, в залежності від об’ємної концентрації металевих частинок, ефективне значення діелектричної проникності суспензії ϵ_{eff} буде змінюватись від значення діелектричної проникності розчинника з ϵ_1 до нескінченності. На Рис. 3 приведено характер залежності ефективної діелектричної проникності суспензії від їх об’ємної концентрації, обчислені за формулами Максвелла – Гарнета та Бруггемана. Як видно, при збільшенні об’ємної концентрації металевих включень, до п’яти порядків збільшується розбіжність між двома підходами. Звісно, що це приведе до суттєвої розбіжності при обчисленні імпедансу комірки.

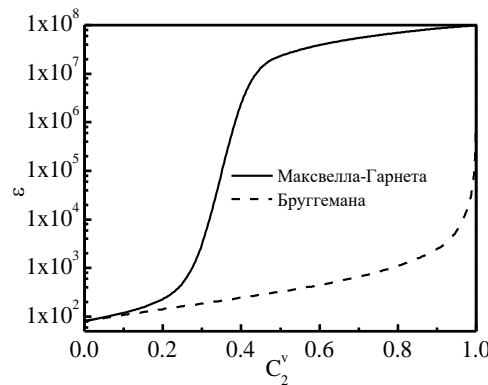


Рис. 3. Залежність ефективної діелектричної проникності водної суспензії від концентрації металевих включень.

Fig. 3. The dependence of the effective dielectric constant of the aqueous suspension on the concentration of metal inclusions.

Надалі проведемо дослідження впливу об’ємної концентрації та способу розподілу металевих включень на імпеданс комірки. Для аналізу впливу розподілу оберемо об’ємну концентрацію $C_2^v = 0,5$, при якій розбіжність обчислення діелектричної проникності за формулами (1) і (2) вже суттєва (Рис. 3). Розглянемо декілька варіантів розподілу та заповнення вимірювальної комірки об’ємом V металевими включеннями об’ємом V_2 . Металеві кульки знаходяться у вузлах кубічної решітки. На Рис. 4а представлено еволюцію збільшення об’ємної концентрації C_2^v металевих кульок, а на Рис. 4 б еволюцію розподілу об’єму металу V_2 у комірці, наповненою дистильованою водою, об’єм якої становить V_1 .

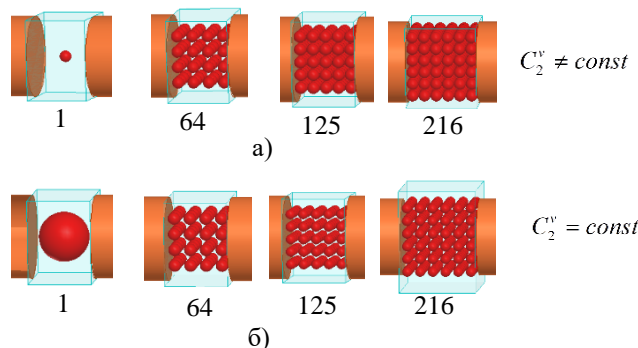


Рис. 4. Збільшення об’ємної концентрації металевих включень у комірці (а) та еволюція розподілу металевих включень при постійній об’ємній концентрації (б).

Fig. 4. The increase in the volume concentration of metal inclusions in the cell (a) and the evolution of the distribution of metal inclusions at a constant volume concentration (b).

Обчислення електродинамічних параметрів електрохімічної комірки здійснюється методом кінцевих елементів [17]. Завдяки симетрії структури, що розглядається, можна при аналізі обмежитися половиною

досліджуваної області. Таким чином, виникають два типи граничних умов: умови Діріхле на провідних металевих поверхнях і рівність нулю значення нормальної похідної потенціалу на площинах симетрії. Дані граничні умови використовуються при знаходженні потенціалу, який задовольняє рівнянню Лапласа.

Аналогічно знаходять розподіл магнітного скалярного потенціалу всередині діелектрика з ϵ_1 , який також описується рівнянням Лапласа. Граничні умови при цьому подібні до граничних умов для електричного потенціалу: скалярний магнітний потенціал має фіксоване значення на металевих поверхнях, а його нормальна похідна обертається в нуль на площинах симетрії.

Незважаючи на технічну неможливість обчислення великої кількості нанорозмірних включень внаслідок непомірного збільшення необхідних обчислювальних ресурсів, метод кінцевих елементів дозволяє проаналізувати залежність імпедансу від концентрації і способу розподілу включень у об'ємі та врахувати крайові ефекти, які виникають на елементах конструкції вимірювальної комірки. Прийнятна кількість кульок, для якої вдалося провести обчислення, становить 216 (6^3).

Враховуючи необхідність проведення експериментальних досліджень, зручним параметром для аналізу є модуль імпедансу вимірювальної комірки, без переходу до електродинамічних параметрів досліджуваного середовища \mathcal{E} і \mathcal{O} . Як було показано вище на Рис. 3, з ростом об'ємної концентрації металевих включень, збільшується розбіжність між формулами Максвелла – Гарнета та Бругемана, що приведе і до різних значень імпедансу при більших концентраціях.

При проведенні моделювання встановлено, що для фіксованої об'ємної концентрації металевих включень $C_2^v = const$ і способу розподілу, що відповідає Рис. 4б, модуль імпедансу вимірювальної комірки змінюється несуттєво і не може використовуватися для непрямого вимірювання параметрів суспензій. Залежність модуля імпедансу вимірювальної комірки для різних значень об'ємної концентрації $C_2^v \neq const$ (Рис. 4а) від частоти представлена у напівлогарифмічному масштабі на Рис. 5. Як видно з графіка, імпеданс комірки зменшується при збільшенні об'ємної концентрації металевих включень, що є закономірним.

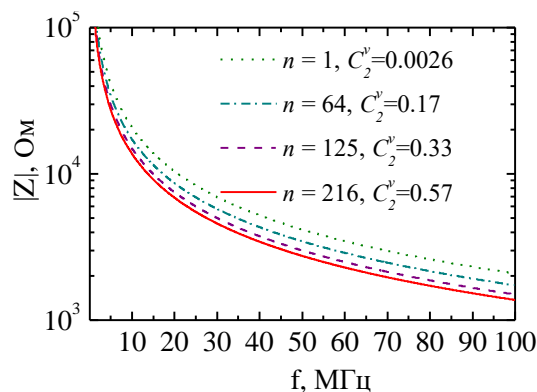


Рис. 5. Частотні залежності модуля імпедансу вимірювальної комірки для різних значень об'ємної концентрації металевих включень.

Fig. 5. Frequency dependences of the modulus of the impedance of the measuring cell for different values of the volume concentration of metal inclusions.

Таким чином, для різних значень об'ємної концентрації дисперсної компоненти, стає можливим оцінити її концентрацію за даними модуля імпедансу вимірювальної комірки. Дане моделювання підтверджує практичні результати, отримані у роботі [6].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУСПЕНЗІЙ НАНОЧАСТИНОК

Структурна схема та фото системи вимірювання електрофізичних властивостей рідин представлено на Рис. 6. Практично всі методи вимірювання електрофізичних властивостей матеріалів засновані на вимірюванні різниці амплітуд та зсуву фаз між опорним і вимірювальним каналами. Оскільки амплітуди на входах детекторів можуть істотно відрізнятися внаслідок різних електрофізичних параметрів досліджуваних матеріалів, то особливою вимогою до амплітудно-фазового детектора є мінімальна залежність точності вимірювання різниці фаз від амплітуди сигналу (АФД). Варіант АФД, що базується на методі трьох амплітуд, був запропонований авторами у роботі [18]. Основним керуючим елементом пристрою є мікроконтролер (STM32F103RET6), який забезпечує спряження пристрою з персональним комп'ютером та функціонування інших модулів: синтезаторів частоти AD9851, ADF4351; амплітудно-фазових детекторів; інтегрального аналізатора імпедансу AD9833 та багатоканального 24-бітного аналого-

цифрового перетворювача AD7739. Вимірювальна схема може являти собою резистивний міст, зонди, що включені у схему зі спрямованими відгалужувачами, котушки, резонансне коло або будь-який резонатор на діапазон до 4,4 ГГц. Модульний підхід до розробки апаратної частини комплексу дозволяє оперативно модернізувати та адаптувати систему до вимог використання.

Основні сфери застосування аналізаторів – це електрохімічний аналіз, аналіз біоелектричного імпедансу, імпедансна спектроскопія, біомедичні та автомобільні датчики, неруйнівний контроль, аналіз властивостей матеріалів, аналіз електролітів для паливних елементів та акумуляторів.

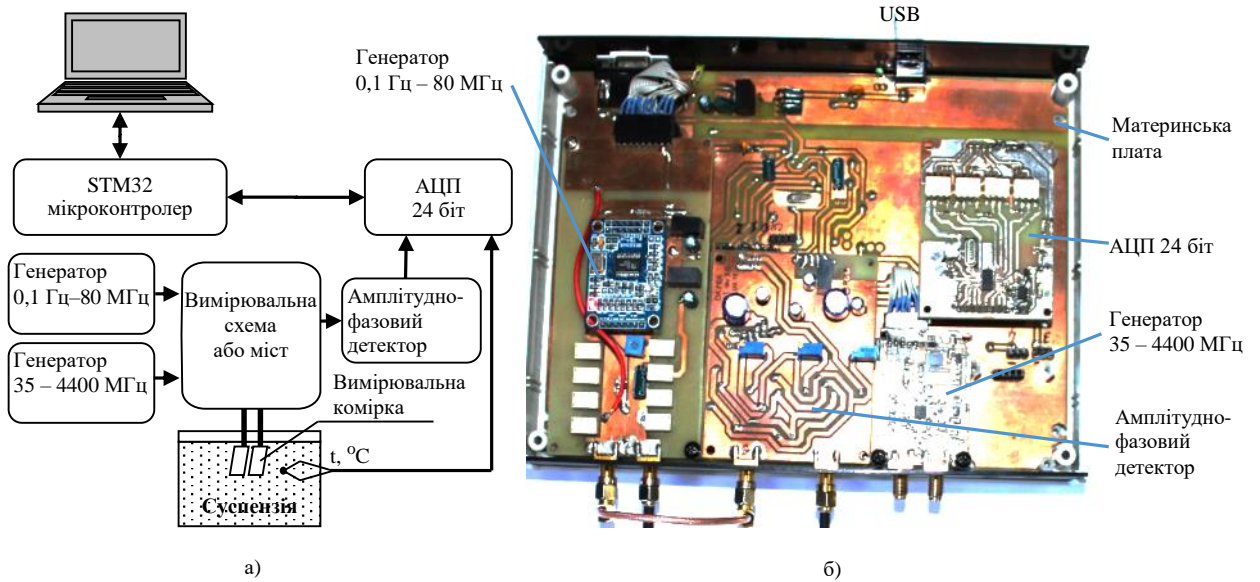


Рис. 6. Структурна схема вимірювача імпедансу (а) та його фото (б).
Fig. 6. Block diagram of the impedance meter (a) and its photo (b).

Первинні виміряні параметри – це зсув фази $\Delta\varphi$ та модуль опору $|Z|$ вимірювальної комірки, за якими обчислюються дійсна Z_{re} та уявна Z_{im} частини імпедансу:

$$Z_{re} = \frac{|Z|}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\Delta\varphi)}}, \quad Z_{im} = \pm \frac{|Z|}{\sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2(\Delta\varphi)}}}. \quad (3)$$

Для обчислення провідності та діелектричної проникності матеріалів, у тому числі біологічних рідин, можна здійснити перехід до еквівалентних параметрів електричного кола електрохімічної комірки. Еквівалентна ємність C і еквівалентний опір R кола можуть бути обчислені через дійсну та уявну частини імпедансу:

$$C = -\frac{1}{\omega \cdot \left(\frac{Z_{re}^2 + Z_{im}^2}{Z_{im}} \right)}, \quad R = Z_{re} + \frac{Z_{im}^2}{Z_{re}}. \quad (4)$$

Наступний крок – це перехід до діелектричної проникності ϵ і провідності σ :

$$\epsilon = k \cdot \frac{C}{\epsilon_0}, \quad \sigma = k \cdot \frac{1}{R}, \quad (5)$$

де k – стала вимірювальної комірки, ϵ_0 – електрична постійна.

У роботі досліджено водні суспензії з двома видами металевих наночастинок: заліза та платини. Не зважаючи на різні електрофізичні властивості цих металів, при вимірюванні провідності суспензій суттєвих відмінностей не спостерігається. Відомі дослідження, в яких зафіксовано втрату магнітних властивостей у нанорозмірному стані [19], і навпаки, магнітні властивості з'являються при наближенні розмірів до однодомного стану [20, 21].

В ході досліджень було відзначено, що суспензії наночастинок металів змінюють свої

електропровідні властивості залежно від концентрації та ступеня агломерації наночастинок. Вимірювання провідності здійснювалися конденсаторним методом із застосуванням вимірювальної комірки у діапазоні частот від 1 кГц до 10 ГГц. Експериментально встановлено, що найбільш інформативним для якісного та кількісного аналізу водних розчинів, суспензій, біологічних рідин і фармацевтичних препаратів є діапазон від 1 кГц до 100 МГц. Саме на низьких частотах відстежується залежність електрофізичних властивостей від таких параметрів як іонний склад, концентрація складових розчину, наявність хімічних комплексів. До того ж, частотний діапазон проведення досліджень обмежується типом та розмірами вимірювальної комірки. Для здійснення вимірювань електрофізичних властивостей на частотах більше 100 МГц доцільно використовувати метод відкритого кінця коаксіального хвилеводу.

Вимірювання концентрації наночастинок у воді в реальному масштабі часу є можливим завдяки частотному вікну, приблизно, від 1 кГц до 100 кГц, де чітко відстежується зміна провідності в залежності від концентрації наночастинок.

На Рис. 7 показано дві частотні залежності модуля імпедансу для дистильованої води та водної суспензії наночастинок платини.

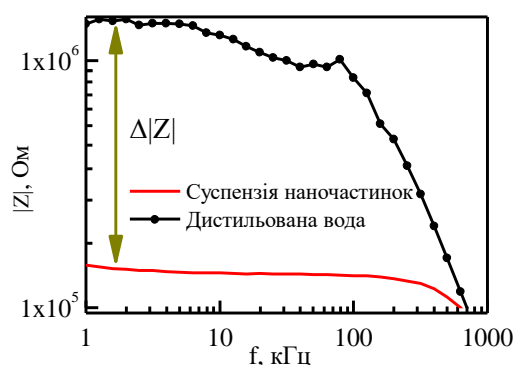


Рис. 7. Частотні залежності провідності дистильованої води та суспензії наночастинок платини.
Fig. 7. Frequency dependences of conductivity of distilled water and suspension of platinum nanoparticles.

Ефект зміни провідності суспензії використано для оптимізації виробництва наночастинок методом лазерної абляції. У цій процедурі важливим є зупинити процес в момент, коли приріст маси сповільнюється. В цей час процес фрагментації наночастинок, які вже містяться у розчиннику, починає вносити вагомий внесок порівняно з процесом утворення нових. Фрагментація є небажаною, бо призводить до збільшення дисперсії розмірів наночастинок.

На Рис. 8 показані залежності маси наночастинок у суспензії від часу абляції. Масу було виміряно двома методами: прямим методом (вимірювання зменшення маси мішені за допомогою вагів) та непрямим (обчислення маси частинок у суспензії за даними модуля імпедансу вимірювальної комірки).

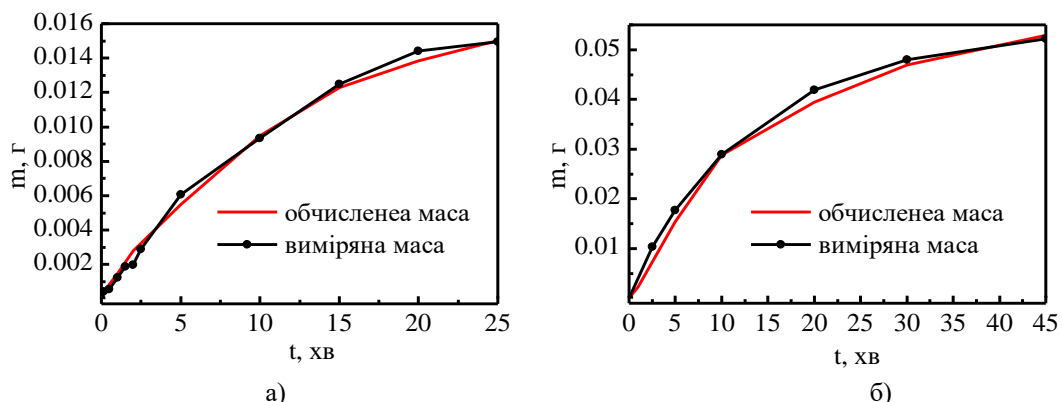


Рис. 8. Залежність маси залізних (а) та платинових (б) наночастинок у воді від часу абляції.
Fig. 8. Dependence of mass of iron (a) and platinum (b) nanoparticles in water on ablation time.

Немарковані криві відповідають значенням маси, яку обчислено за даними імпедансу вимірювальної комірки, марковані криві відповідають масі наночастинок, яку виміряно прямим методом.

Маса частинок m у суспензії обчислюється за емпіричною формулою:

$$m = k \left(\frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_{\text{pure}}} \right), \quad (6)$$

де Z_{pure} – модуль імпедансу вимірювальної комірки, що містить чистий розчинник, Z – значення модуля імпедансу вимірювальної комірки, що містить суспензію, k – емпіричний коефіцієнт. Даний коефіцієнт визначається експериментально для окремого типу суспензії та геометрії комірки. Наприклад, для суспензії наночастинок платини, комірки з площею електродів 110 мм^2 і відстанню між ними 2 мм $k = 8960 \text{ г} \cdot \text{Ом}$.

Наступним вагомим результатом є розробка методу оцінки стабільності сполук і суспензій. Для цього проведено дослідження імпедансу суспензії наночастинок заліза при різних умовах. Водні суспензії наночастинок металів зазвичай є нестабільними. Наночастинки агломерують та випадають в осад, і лише незначна їх частина утримується розчинником у стані седиментаційної рівноваги. У зважений стан частинки можна привести, наприклад, ультразвуковим диспергуванням. Після чого знову відбувається процес агломерації та утворення осаду. Якщо у міжелектродному просторі вимірювальної комірки присутня велика кількість агломератів, наприклад, після простого збовтування, то імпеданс комірки зростає. Даний експеримент було проведено з частинками заліза. На Рис. 9 представлено характер поведінки імпедансу суспензії для двох типів перемішування: ультразвукове диспергування та просте збовтування. Методом ультразвукової диспергації наночастинки переводяться у стан седиментаційної рівноваги, який з часом порушується внаслідок агломерації наночастинок.

Як видно з Рис. 9, з часом імпеданс встановлюється на рівні, який відповідає стану седиментаційної рівноваги.

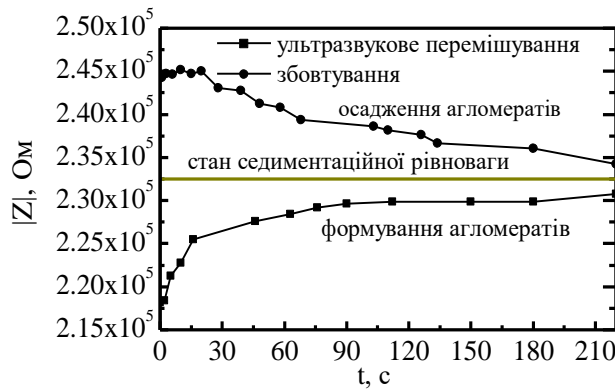


Рис. 9. Динаміка зміни імпедансу суспензії після ультразвукового диспергування та простого збовтування суспензії наночастинок.

Fig. 9. Changes in impedance of the suspension after the ultrasonic dispersion and simple stirring suspension of nanoparticles.

Таким чином, метод імпедансної спектроскопії можна використовувати для оцінки ступеня агломерації наночастинок у суспензії. Контроль стану суспензії є актуальною задачею у біотехнологіях та біомедицині.

ВИСНОВКИ

Дана робота є прикладом зв'язку таких наукових напрямків, як фізика наночастинок, квантова фізика, фізична хімія та радіофізика. Дослідження електрофізичних властивостей суспензій наночастинок проведено у кооперації з Ганноверським університетом імені Готфріда Вільгельма Лейбніца (Німеччина) на базі Ганноверського лазерного центру.

Для вирішення задач фізичної хімії по створенню нових експрес-методів якісного та кількісного аналізу розчинів, біологічних рідин і суспензій проведено моделювання імпедансу вимірювальної комірки, що містить водну суспензію наночастинок металів. Показано, що формула змішування Бруггемана у випадку композиції метал-діелектрик є асимптотичним наближенням при наближенні розмірів металевих включень до нуля. Проведено дослідження впливу розподілу металевих включень у об'ємі вимірювальної комірки на її імпеданс. Показано, що на основі даних імпедансу можна визначити розмір включень при постійній концентрації або концентрацію при постійному розмірі наночастинок.

Запропоновано простий метод синтезу наночастинок заліза в магнетитовій оболонці, заснований на реакції контрольованого окислення заліза озоном.

Удосконалено технологічний процес отримання наночастинок металів методом лазерної абляції. Метод імпедансної спектроскопії використано у якості непрямого методу реального часу для вимірювання масової частки металу у суспензії. Представлено просту емпіричну формулу для обчислення маси металу у суспензії за даними модуля імпедансу електрохімічної комірки.






За даними імпедансу суспензії вдалось оцінити її стабільність. Встановлено, що стану седиментаційної рівноваги суспензії відповідає конкретне значення імпедансу. У випадку перенасиченого розчину імпеданс суспензії суттєво зменшується.

Проведені дослідження знаходяться на межі різних наукових напрямків, але є актуальними у різних галузях науки і техніки, зокрема, у біотехнологіях та біомедицині. Показано, що метод імпедансної спектроскопії є непрямим методом для оцінки якісних і кількісних фізико-хімічних параметрів розчинів та суспензій.

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
G. Katrich		https://orcid.org/0000-0002-9600-7092
V. Katrich		https://orcid.org/0000-0001-5429-6124

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Faerber R, Franck C. Modular high-precision dielectric spectrometer for quantifying the aging dynamics in (Sub-)picofarad polymeric specimens. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018;25(3):1056-1063.
2. Cornelis P, Wackers G, Thomas I, Brand M, Putzeys T, Gennaro A et al. A Novel Modular Device for Biological Impedance Measurements: The Differential Impedimetric Sensor Cell (DISC). *physica status solidi (a)*. 2018;215(15):1701029.
3. Impedance Analyzers | Keysight [Internet]. Keysight.com. 2020 [cited 19 December 2020] Available from: <https://www.keysight.com/en/pc-1000000382%3Aeapsg%3Aapgr/impedance-analyzers?nid=-33831.0.00&cc=UA&lc=eng>
4. Impedance Products | Zurich Instruments [Internet]. Zhinst.com. 2020 [cited 19 December 2020]. Available from: <https://www.zhinst.com/others/en/impedance-products>
5. Wayne Kerr Electronics Products - 6500B Series Impedance Analyzer [Internet]. Waynekerrtest.com. 2020 [cited 19 December 2020]. Available from: http://www.waynekerrtest.com/products_detail.php?indexs=4&brand=Wayne%20Kerr
6. Kozheshkurt V, Antonenko Y, Shtoda D, Slipchenko O, Katrych V. Possibilities of Impedance Spectroscopy for the Study of Bioliquids. 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). 2018:280-284.
7. Fernandes C, Mello M, dos Santos N, Souza A, Lanznaster M, Ponzio E. Theoretical and experimental studies of a new aniline derivative corrosion inhibitor for mild steel in acid medium. *Materials and Corrosion*. 2019;71(2):280-291.
8. Cheng X, Liu Y, Irimia D, Demirci U, Yang L, Zamir L et al. Cell detection and counting through cell lysate impedance spectroscopy in microfluidic devices. *Lab Chip*. 2007;7(6):746-755.
9. Bao X, Ocket I, Bao J, Doijen J, Zheng J, Kil D et al. Broadband Dielectric Spectroscopy of Cell Cultures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018;66(12):5750-5759.
10. Masot R, Alcañiz M, Fuentes A, Schmidt F, Barat J, Gil L et al. Design of a low-cost non-destructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010;158(2):217-223.
11. Yang S, Hallett I, Oh H, Woolf A, Wong M. Application of electrical impedance spectroscopy and rheology to monitor changes in olive (*Olea europaea* L.) pulp during cold-pressed oil extraction. *Journal of Food Engineering*. 2019;245:96-103.
12. Lau M, Ziefuss A, Komossa T, Barcikowski S. Inclusion of supported gold nanoparticles into their semiconductor support. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015;17(43):29311-29318.
13. Tran H, Matsumoto K, Moriya M, Shimada H, Kimura Y, Hirano-Iwata A et al. Fabrication of high temperature capacitively- and resistively-coupled single electron transistors using gold nanoparticles. 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO). 2016:131-134.
14. Skotadis E, Mousadakos D, Tanner J, Tsoukalas D, Broutas P. Flexible platinum nanoparticle strain sensors. 2013 Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). 2013:354-357.
15. Koch L, Sajti L, Schwenke A, Klein S, Unger C, Gruene M et al. Laser-based micro- and nanofabrication for applications in biomedicine. 2012;1464(1).
16. Kobayashi T. Cancer hyperthermia using magnetic nanoparticles. *Biotechnology Journal*. 2011;6(11):1342-1347.
17. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков.

М: Мир; 1986;229.

18. Антоненко Є.О., Кожешкurt В.О., Штода Д.О., Катрич В.О. Амплітудно-фазовий детектор для систем діелектричної спектроскопії. *Прикладна Радіофізика*. 2020;25(3):68-77.
19. Liu F, Laurent S, Roch A, Vander Elst L, Muller R. Size-Controlled Synthesis of CoFe₂O₄ Nanoparticles Potential Contrast Agent for MRI and Investigation on Their Size-Dependent Magnetic Properties. *Journal of Nanomaterials*. 2013;2013:1-9.
20. Proenca M, Sousa C, Pereira A, Tavares P, Ventura J, Vazquez M et al. Size and surface effects on the magnetic properties of NiO nanoparticles. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011;13(20):9561-9567.
21. Lacroix L, Malaki R, Carrey J, Lachaize S, Respaud M, Goya G et al. Magnetic hyperthermia in single-domain monodisperse FeCo nanoparticles: Evidences for Stoner–Wohlfarth behavior and large losses. *Journal of Applied Physics*. 2009;105(2):023911.

REFERENCES

1. Faerber R, Franck C. Modular high-precision dielectric spectrometer for quantifying the aging dynamics in (Sub-)picofarad polymeric specimens. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018;25(3):1056-1063.
2. Cornelis P, Wackers G, Thomas I, Brand M, Putzeys T, Gennaro A et al. A Novel Modular Device for Biological Impedance Measurements: The Differential Impedimetric Sensor Cell (DISC). *physica status solidi (a)*. 2018;215(15):1701029.
3. Impedance Analyzers | Keysight [Internet]. Keysight.com. 2020 [cited 19 December 2020] Available from: <https://www.keysight.com/en/pc-1000000382%3Aeapsg%3Aapgr/impedance-analyzers?nid=-33831.0.00&cc=UA&lc=eng>
4. Impedance Products | Zurich Instruments [Internet]. Zhinst.com. 2020 [cited 19 December 2020]. Available from: <https://www.zhinst.com/others/en/impedance-products>
5. Wayne Kerr Electronics Products - 6500B Series Impedance Analyzer [Internet]. Waynekerrtest.com. 2020 [cited 19 December 2020]. Available from: http://www.waynekerrtest.com/products_detail.php?indexs=4&brand=Wayne%20Kerr
6. Kozheshkurt V, Antonenko Y, Shtoda D, Slipchenko O, Katrych V. Possibilities of Impedance Spectroscopy for the Study of Bioliquids. 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). 2018:280-284.
7. Fernandes C, Mello M, dos Santos N, Souza A, Lanznaster M, Ponzio E. Theoretical and experimental studies of a new aniline derivative corrosion inhibitor for mild steel in acid medium. *Materials and Corrosion*. 2019;71(2):280-291.
8. Cheng X, Liu Y, Irimia D, Demirci U, Yang L, Zamir L et al. Cell detection and counting through cell lysate impedance spectroscopy in microfluidic devices. *Lab Chip*. 2007;7(6):746-755.
9. Bao X, Ocket I, Bao J, Doijen J, Zheng J, Kil D et al. Broadband Dielectric Spectroscopy of Cell Cultures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018;66(12):5750-5759.
10. Masot R, Alcañiz M, Fuentes A, Schmidt F, Barat J, Gil L et al. Design of a low-cost non-destructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010;158(2):217-223.
11. Yang S, Hallett I, Oh H, Woolf A, Wong M. Application of electrical impedance spectroscopy and rheology to monitor changes in olive (*Olea europaea* L.) pulp during cold-pressed oil extraction. *Journal of Food Engineering*. 2019;245:96-103.
12. Lau M, Ziefuss A, Komossa T, Barcikowski S. Inclusion of supported gold nanoparticles into their semiconductor support. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015;17(43):29311-29318.
13. Tran H, Matsumoto K, Moriya M, Shimada H, Kimura Y, Hirano-Iwata A et al. Fabrication of high temperature capacitively- and resistively-coupled single electron transistors using gold nanoparticles. 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO). 2016:131-134.
14. Skotadis E, Mousadakos D, Tanner J, Tsoukalas D, Broutas P. Flexible platinum nanoparticle strain sensors. 2013 Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). 2013:354-357.
15. Koch L, Sajti L, Schwenke A, Klein S, Unger C, Gruene M et al. Laser-based micro- and nanofabrication for applications in biomedicine. 2012;1464(1).
16. Kobayashi T. Cancer hyperthermia using magnetic nanoparticles. *Biotechnology Journal*. 2011;6(11):1342-1347.
17. Silvestr P, Ferrari R. Finite elements for electrical engineers. М: Мир; 1986;229. [In Russian].
18. Antonenko Y, Kozheshkurt V, Shtoda D, Katrich V. An amplitude and phase detector for dielectric spectroscopy systems. *Radiophysics and Electronics*. 2020;25(3):68-77. [In Ukrainian].
19. Liu F, Laurent S, Roch A, Vander Elst L, Muller R. Size-Controlled Synthesis of CoFe₂O₄ Nanoparticles Potential Contrast Agent for MRI and Investigation on Their Size-Dependent Magnetic Properties. *Journal of Nanomaterials*. 2013;2013:1-9.
20. Proenca M, Sousa C, Pereira A, Tavares P, Ventura J, Vazquez M et al. Size and surface effects on the magnetic properties of NiO nanoparticles. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011;13(20):9561-9567.
21. Lacroix L, Malaki R, Carrey J, Lachaize S, Respaud M, Goya G et al. Magnetic hyperthermia in single-domain monodisperse FeCo nanoparticles: Evidences for Stoner–Wohlfarth behavior and large losses. *Journal of Applied Physics*. 2009;105(2):023911.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04>

УДК 550.385.37: 550.388

**ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС БАГАТОЧАСТОТНОГО
ПОХИЛОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ****Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Є. Г. Жданко, С. Г. Леус, В. А. Поднос***Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна**E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com*

Поступила до редакції 30 листопада 2020 р.

Актуальність. Іоносфера була і буде основним каналом поширення радіохвиль різних діапазонів (від вкрай низьких до надвисоких частот). Особливістю цього каналу є залежність його параметрів від стану космічної погоди. Космічна погода формується, перш за все, процесами на Сонці та, в меншій мірі, процесами на Землі. Певний внесок у стан космічної погоди можуть давати і високоенергетичні процеси техногенного походження. Значними можливостями для дослідження в галузі радіофізики геокосмоса, вивчення каналу поширення радіохвиль і динамічних процесів у геокосмосі мають засоби похилого зондування (ПЗ). В цьому випадку можуть використовуватися як власні радіопередавальні пристрої, так і мережа радіомовних станцій. За допомогою ПЗ вдається охопити значні регіони Земної кулі (аж до глобальних), і тим самим вивчати динамічні процеси в геокосмосі над цими регіонами.

Метою цієї роботи є короткий опис когерентного багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу ПЗ іоносфери й ілюстрація його працездатності на прикладі вивчення динамічних процесів у геокосмосі.

Методи і методологія. Описано когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, який призначено для радіофізичного моніторингу динамічних процесів у геокосмосі, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження. Комплекс здатний приймати радіосигнали в низькочастотному (НЧ) і високочастотному (ВЧ) діапазонах частот. Розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке визначається колом розв'язуваних задач. Кількість радіотрас та їх орієнтація залежать від специфіки розв'язуваних задач. В основі функціонування комплексу лежать вимірювання амплітуди сигналу та його доплерівського зміщення частоти (для ВЧ і НЧ) чи фази (для НЧ діапазону). За допомогою авторегресійного алгоритму забезпечується роздільна здатність за доплерівською частотою до 0.02 Гц та за часом не більше 1 хв. Після отримання часових залежностей доплерівських спектрів, фаз і амплітуд для різних трас проводиться подальша обробка цих часових рядів.

Результати. У ХНУ імені В. Н. Каразіна тривалий час функціонує та модернізується багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, призначений для радіофізичного моніторингу динамічних процесів у геокосмосі, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного і земного походження.

Висновки. Успішне функціонування комплексу продемонстровано на прикладах дослідження динамічних процесів у геокосмосі, викликаних дією різноманітних джерел енерговиділення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: радіофізичний моніторинг, похиле зондування іоносфери, когерентний комплекс, радіотраси, доплерівські спектри, фаза сигналу, амплітуда сигналу

**SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM
OF MULTI-FREQUENCY OBLIQUE SOUNDING THE IONOSPHERE****L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Y. H. Zhdanko, S. G. Leus, V. A. Podnos***V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine*

Background. The ionosphere was and will be the main channel for the propagation of radio waves of various bands (from extremely low to super-high frequencies). A feature of this channel is the dependence of its parameters on the state of space weather. Space weather is formed primarily by processes on the Sun and by processes on Earth (to a lesser extent). High-energy processes of man-made origin can also make a certain contribution to the state of space weather. Means of oblique sounding (OS) have significant opportunities for research in the field of geospace radiophysics, study of the channel of propagation of radio waves and dynamic processes in the geospace. In this case, both own radio transmitting devices and a network of broadcasting stations can be used. With the help of OS, it is possible to cover significant regions of the globe (up to global ones), and thereby study the dynamic processes in the geospace over these regions.

The purpose of this work is to briefly describe the multi-frequency multiple-path radio system of the OS ionosphere and to illustrate its performance using the example of studying dynamic processes in the geospace.

Techniques and Methodology. A coherent multi-frequency multiple-path oblique sounding radio system of the ionosphere is described. It is intended for radiophysical monitoring of dynamic processes in the geospace caused by variations in space weather, the impact on the ionosphere of high-energy sources of space and terrestrial origin. The

complex is capable of receiving radio signals in the low-frequency (LF) and high-frequency (HF) ranges. Original software has been developed, depending on the range of tasks to be solved. The number of radio paths and their orientation depend on the specifics of the tasks being solved. The operation of the complex is based on measurements of the Doppler shift of frequency and amplitude or phase and amplitude of the signal. The autoregressive algorithm provides a Doppler frequency resolution of up to 0.02 Hz and a time resolution of 1 min. After obtaining the time dependences of the Doppler spectra, phases and amplitudes for various radio propagation paths, further processing of the time series is performed.

Results. At V. N. Karazin Kharkiv National University, a multi-frequency multi-path radio engineering complex for oblique sounding of the ionosphere has been developed and is operating, designed for radiophysical monitoring of dynamic processes in the geospace caused by variations in space weather, the impact on the ionosphere of high-energy sources of space and terrestrial origin.

Conclusions. The successful functioning of the complex is demonstrated by the example of studying the dynamic processes in the geospace caused by the action of various sources of energy release.

KEY WORDS: radio monitoring, oblique incidence probing the ionosphere, coherent system, radio propagation paths, Doppler spectra, signal phase, signal amplitude

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МНОГОЧАСТОТНОГО НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Е. Г. Жданко, С. Г. Леус, В. А. Поднос

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

Актуальность. Ионосфера была и будет основным каналом распространения радиоволн различных диапазонов (от крайне низких до сверхвысоких частот). Особенностью этого канала является зависимость его параметров от состояния космической погоды. Космическая погода формируется, прежде всего, процессами на Солнце и, в меньшей степени, процессами на Земле. Определенный вклад в состояние космической погоды могут давать и высокоэнергетические процессы техногенного происхождения. Значительными возможностями для исследования в области радиофизики геокосмоса, изучения канала распространения радиоволн и динамических процессов в геокосмосе обладают средства наклонного зондирования (НЗ). В этом случае могут использоваться как собственные радиопередающие устройства, так и сеть радиовещательных станций. При помощи НЗ удается охватить значительные регионы земного шара (вплоть до глобальных), и тем самым изучать динамические процессы в геокосмосе над этими регионами.

Целью настоящей работы является краткое описание когерентного многочастотного многотрассового радиотехнического комплекса НЗ ионосферы и иллюстрация его работоспособности на примере изучения динамических процессов в геокосмосе.

Методы и методология. Описан когерентный многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, предназначенный для радиофизического мониторинга динамических процессов в геокосмосе, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения. Комплекс способен принимать радиосигналы в низкочастотном (НЧ) и высокочастотном (ВЧ) диапазонах частот. Разработано оригинальное программное обеспечение, зависящее от круга решаемых задач. Количество радиотрасс и их ориентация зависят от специфики решаемых задач. В основе функционирования комплекса лежат измерения амплитуды сигнала и его доплеровского смещения частоты (для ВЧ и НЧ), или фазы (для НЧ диапазона). При помощи авторегрессионного алгоритма обеспечивается разрешающая способность по доплеровской частоте до 0.02 Гц и по времени не более 1 мин. После получения временных зависимостей доплеровских спектров, фаз и амплитуд для различных трасс производится дальнейшая обработка этих временных рядов.

Результаты. В ХНУ имени В. Н. Каразина продолжительное время функционирует и модернизируется многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы, предназначенный для радиофизического мониторинга динамических процессов в геокосмосе, вызванных вариациями космической погоды, воздействием на ионосферу высокоэнергетических источников космического и земного происхождения.

Выводы. Успешное функционирование комплекса продемонстрировано на примерах исследования динамических процессов в геокосмосе, вызванных действием различных источников энерговыделения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиофизический мониторинг, наклонное зондирование ионосферы, когерентный комплекс, радиотрассы, доплеровские спектры, фаза сигнала, амплитуда сигнала

ВСТУП

Ионосфера дотепер залишається основним каналом поширення радіохвиль різних діапазонів (від вкрай низьких до надвисоких частот). Особливістю цього каналу є залежність його параметрів від стану космічної погоди. Космічна погода формується, перш за все, процесами на Сонці та, в меншій мірі, процесами на Землі. Певний внесок у стан космічної погоди можуть давати й високоенергетичні процеси техногенного походження [1, 2].

Вплив джерел енерговиділення різної фізичної природи на іоносферу зумовлює її динаміку. Вивчення динамічних процесів у іоносфері є важливим, як для радіофізики геокосмоса, прогнозування параметрів каналу поширення, так і для отримання відомостей про джерела енерговиділення.

Динамічні процеси в іоносфері досліджуються багатьма наземними та супутниковими методами. Супутникові методи проводять вимірювання як *in situ*, так і шляхом просвічування іоносфери. Останнім часом набула значного розвитку GPS-технологія вивчення динаміки іоносфери [3, 4].

Серед наземних методів найбільш інформативним є метод некогерентного розсіяння (див., наприклад, [5]). На жаль, у світі є всього близько десяти радарів некогерентного розсіяння, більшість з них розташована у Західній півкулі. Тільки по два радари є в Європі (м. Tromsø, Норвегія; м. Харків, Україна) й Азії (поблизу м. Иркутськ, Росія; Qijiang, КНР). Через високу вартість радари некогерентного розсіяння не можуть вести безперервний моніторинг іоносфери.

Найбільший обсяг інформації про іоносферу (принаймні до максимуму шару F2) отримано за допомогою мережі іонозондів, які використовують вертикальне зондування іоносфери [6–9]. Іонозонди чисельністю понад 230 штук розташовані на Земній кулі вкрай нерівномірно. Крім того, вони дають інформацію про динамічні процеси в іоносфері переважно над місцем розташування іонозонда.

Більшими можливостями для дослідження в галузі радіофізики геокосмоса, вивчення каналу поширення радіохвиль і динамічних процесів в іоносфері мають засоби похилого зондування (ПЗ) [8, 10–20]. В цьому випадку можуть використовуватися як власні радіопередавальні пристрої [16–18, 20], так і мережа радіомовних станцій [8, 11, 14, 20]. За допомогою ПЗ вдається охопити значні регіони Земної кулі (аж до глобальних), і тим самим вивчати динамічні процеси в геокосмосі над цими регіонами. Для диференціації цих процесів за висотою доцільно застосовувати різні частоти радіохвиль при незмінному розташуванні радіопередавального та радіоприймального пристроїв. Безперервний моніторинг динамічних процесів в іоносфері стає значно дешевшим при використанні світової мережі радіомовних станцій. Відсутність мережі власних радіопередавальних пристроїв при ПЗ іоносфери дозволяє зберегти заводську обстановку на попередньому рівні. Цими міркуваннями й керувалися розробники багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу для ПЗ іоносфери, описаного нижче.

Засоби ПЗ іоносфери досить давно й успішно використовуються для вивчення динамічних процесів [20–26].

Для моніторингу динамічних процесів в іоносфері в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна створено когерентний багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс високочастотного (ВЧ) та низькочастотного (НЧ) діапазонів радіохвиль [21–23, 25, 26]. Комплекс розташований в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

На відміну від авторів [20], нами використовуються як надкороткі (~44 км), так і більш протяжні траси (до 2 тис. км).

Метою цієї роботи є короткий опис когерентного багаточастотного багатотрасового радіотехнічного комплексу ПЗ іоносфери, розташованого в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, й ілюстрація його працездатності на прикладі вивчення динамічних процесів в іоносфері.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Загальні відомості. В основу радіофізичного моніторингу динамічних процесів в іоносфері покладені вимірювання доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) f_d , або в загальному випадку – доплерівських спектрів (ДС), а також амплітуди відбитого сигналу ВЧ діапазону або фази й амплітуди відбитого сигналу НЧ діапазону.

Метод доплерівського зондування має високу чутливість до змін параметрів середовища.

Розглянемо найпростішу ситуацію, коли шуми відсутні, сигнал одномодовий і інтервал його стаціонарності більше інтервалу обробки (період хвилі значно більше інтервалу обробки). Такі можливості методу діагностики назвемо потенційними.

Експериментально вдається виділити відносно доплерівське зміщення частоти $\delta_{fd} = f_d/f$ не менше відносної нестабільності частоти, яка для рубідієвого стандарту частоти складає $\delta_f \approx 10^{-10}$. Покладемо $\delta_{fd\min} \approx \delta_f$.

При використанні ВЧ радіохвиль і похилого зондування відносна зміна концентрації електронів N у полі акустико-гравітаційної хвилі (АГХ) з періодом T дається співвідношенням [27–31]:

$$\delta_N = \frac{K}{4\pi} \frac{cT}{L} \delta_{fd}, \quad (1)$$

де K – множник, який залежить від траєкторії хвилі та враховує кривизну Землі, c – швидкість світла, L – характерний масштаб зміни N поблизу висоти відбиття радіохвилі.

При використовуваній нами довжині радіотрас $R \approx 675$ км значення $K \approx 5.1-2.3$ при висоті відбиття радіохвилі $z_r \approx 100-300$ км відповідно. За середнього значення $K = 3.7 \pm 1.4$, $L \approx 30$ км і $\delta_{fd\min} \approx 10^{-10}$, із (1) отримаємо, що

$$\delta_{N\min} \approx 3 \cdot 10^{-5} T, \quad (2)$$

де період T дається в с. Результати оцінок $\delta_{N\min}$ за співвідношенням (2) наведені в Табл. 1 (середній рядок).

ДЗЧ пов'язано зі швидкістю вертикального руху плазми в іоносфері наступним співвідношенням:

$$\delta_{fd} = -2 \frac{v}{c} \cos \theta,$$

де θ – кут між траєкторією хвилі і вертикаллю. При зазначених R і z_r маємо $\cos \theta \approx 0.3-0.7$. Тоді при $\delta_{fd} \approx 10^{-10}$ маємо $v_{\min} \approx 0.02-0.05$ м/с.

Таблиця 1. Залежність $\delta_{N\min}$ від періода АГХ

$T, \text{с}$	10^2	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	10^3	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	10^4
$\delta_{N\min}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	0.15	0.3
$\delta_{N\min}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$

При використанні НЧ радіохвиль, що відбиваються в нижній іоносфері, співвідношення для δ_N має інший вигляд. Фазовий зсув $\Delta\phi$ при зміні висоти відбиття на Δz_r дається наступним виразом [32]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi f}{c} \Delta z_r \cos \theta \approx \frac{8\pi f}{c} \frac{z_r}{R} \Delta z_r. \quad (3)$$

При поширенні АГХ Δz_r і $\Delta\phi$ змінюються за періодичним законом з періодом T . Амплітуда $\Delta\phi_a$ пов'язана з амплітудою ДЗЧ наступним співвідношенням:

$$f_{da} = \frac{\Delta\phi_a}{T} \approx \frac{8\pi f}{T} \frac{z_r}{c R} \Delta z_{ra}. \quad (4)$$

Тут z_{ra} – амплітуда коливань висоти відбиття. Врахуємо, що

$$\delta_{N\min} \approx \frac{\Delta z_{ra\min}}{L}. \quad (5)$$

Тоді з (4) та (5) маємо

$$\delta_{N\min} \approx \frac{cT}{8\pi L} \frac{R}{z_r} \delta_{fd\min}.$$

При $R \approx 2000$ км, $z_r \approx 80$ км, $L \approx 5$ км і $\delta_{fd\min} \approx 10^{-10}$ отримаємо, що

$$\delta_{N\min} \approx 6 \cdot 10^{-6} T.$$

Залежність $\delta_{N\min}$ від T також наведена в Табл. 1 (нижній рядок).

При фазових вимірюваннях у НЧ діапазоні похибка $\Delta\phi \approx 0.1^\circ$. Тоді

$$\delta_{N\min} = \frac{\lambda}{8\pi L} \frac{R}{z_r} \Delta\phi_{a\min}.$$

При $\lambda = 3.75$ км, $L \approx 5$ км, $z_r \approx 80$ км, $R \approx 2000$ км і $\Delta\phi_{a\min} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ отримаємо, що $\delta_{N\min} \approx 0.15\%$.

У реальній ситуації чутливість розглянутих методів погіршується в порівнянні з потенційною чутливістю.

При $f_{d\min} = 0.01$ Гц і застосуванні при спектральному аналізі перетворення Фур'є часове розрізнення методу становить 100 с. Використання сучасних методів спектрального оцінювання (наприклад,

авторегресійного аналізу [33]), дозволяє на порядок підвищити роздільну здатність за часом (наприклад, до $\delta t \approx 10$ с). За цей час область відбиття зміщується за висотою на $\Delta z_{\min} = v_{\min} \delta t \approx 1.5\text{--}15$ м. Отримані оцінки $\delta_{N_{\min}}$, v_{\min} і Δz_{\min} свідчать про високу чутливість методів доплерівського та фазового зондувань.

КОМПЛЕКС ПОХИЛОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

Загальні відомості. Комплекс призначено для моніторингу динамічних процесів в іоносфері над територією України та за її межами, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження. Приймальна частина комплексу дислокована в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (поблизу с. Гракове, Харківська обл., 49.65° пн. ш., 36.9° сх. д.).

Дослідження варіацій характеристик ВЧ радіохвиль, відбитих від іоносфери, здійснюється за допомогою системи доплерівського радіозондування з використанням радіосигналів, що поширюються на похилих трасах. Джерелом ВЧ сигналів є станції радіомовлення, радіонавігації, служби точного часу, або ж радіовипромінювання спеціалізованого радіопередавального пристрою. Дослідження характеристик НЧ радіохвиль можливе як із застосуванням доплерівських вимірювань, так і за результатами вимірювань фази радіосигналу. Для такого моніторингу придатні сигнали неспеціалізованих для іоносферних досліджень систем навігації та служб еталонних частот і часу, які працюють в НЧ та дуже низькочастотному (ДНЧ) діапазонах (частоти 10–100 кГц). Зокрема, ми використовуємо вимірювання фазових і амплітудних варіацій сигналу станції РБУ служби еталонних сигналів частоти та часу ($f = 66.6$ кГц), розташованої поблизу м. Москва (Російська Федерація), а також варіацій доплерівського зміщення частоти і амплітуди сигналу станції DCF77 з частотою 77.5 кГц. Радіопередавальний пристрій знаходиться в ФРН. Значення $|f_d|$ порядку 10^{-4} – 10^{-3} Гц.

Апаратну частину ВЧ діапазону ($f = 1.5\text{--}30$ МГц) складають широкодіапазонні радіоприймальні пристрої типу Р-399А, до яких підключені активні рамкові антени. В НЧ діапазоні ($f = 50$ кГц – 2 МГц) працюють радіоприймачі типу Р-391В2 і ПК-66 із підключеними до них рамковими антенами.

Для функціонування комплексу в режимі безперервного моніторингу розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке залежить від кола розв'язуваних задач. Програмне забезпечення системи пасивного похилого радіозондування іоносфери включає набір тестових програм для перевірки та ремонту окремих вузлів плат керування радіоприймальними пристроями й антенами, вимірювальні програми, а також програми для обробки й аналізу експериментальних даних.

Система доплерівського радіозондування. Конструктивно система реалізована на базі персонального комп'ютера з підключеним до нього блоком, який забезпечує керування радіоприймачами синтезаторного типу Р-399А (для прийому радіосигналів у діапазоні 1–32 МГц) та Р-391В2 (для прийому радіосигналів у діапазоні частот 50 кГц – 2 МГц), отримання цифрових відліків комплексної амплітуди прийнятих сигналів і передачу їх до персонального комп'ютера. В цьому блоці знаходяться треті змішувачі частоти з фільтрами нижніх частот і генератор прямого цифрового синтезу у якості загального 3-го гетеродину. Сигнал частотою 10 МГц від рубідієвого стандарту частоти FE-5680 є загальним опорним сигналом для всіх приймачів, а також для програмованого дільника частоти генератора прямого цифрового синтезу. Використання рубідієвого стандарту частоти забезпечує сумарну довготривалу відносну нестабільність частотно-часових параметрів приймальної системи не гірше 10^{-10} . Для інтервалів часу близько 10^3 с її значення майже на порядок менше.

Структурна схема системи наведена на Рис. 1. Мікроконтролер (МК) приймає від комп'ютера через USB-інтерфейс і зберігає у внутрішніх реєстрах плат керування приймачем (ПКП) бінарні коди інформації, які визначають частоту налаштування відповідного радіоприймального пристрою, рід його роботи, ширину смуги пропускання підсилювача проміжної частоти (ППЧ), коефіцієнт підсилення ППЧ та значення ослаблення вхідного атенюатора.

Радіоприймальні пристрої Р-399А і Р-391В2 працюють у режимі повного дистанційного керування, що дозволило нам за допомогою одного радіоприймального пристрою циклічно проводити вимірювання на декількох (до чотирьох) радіотрасах зі своїми унікальними значеннями підсилення для кожної траси. При цьому вдалось зберегти задану роздільну здатність як за частотою, так і за часом.

На антенні входи радіоприймальних пристроїв Р-399А сигнал надходить із активних рамкових антен (АРА), які настроюються МК на частоту радіосигналу в діапазоні $f = 1.5\text{--}30$ МГц через плату керування антенами (ПКА). На антенний вхід приймача Р-391В2 сигнал надходить з рамкової антени (РА). З виходів підсилювачів 2-ої проміжної частоти приймачів радіосигнали частотою 215 кГц і шириною смуги 300 Гц надходять до блоку третіх змішувачів частоти та фільтрів нижніх частот (3-ій ЗМ і ФНЧ). На виході фільтрів нижніх частот присутні аналогові сигнали в смузі частот 0–300 Гц. Вони перетворюються за допомогою 12-розрядного АЦП, інтегрованого до МК, в цифровий вигляд із частотою дискретизації 600 Гц. Потік цифрових даних із АЦП передається по USB-шині до комп'ютера, що працює під керуванням вимірювальної програми, та проводиться його подальша

програмна обробка в реальному масштабі часу. В процесі цієї обробки послідовно проводиться фільтрація даних вузькосмуговим цифровим фільтром і децимація з коефіцієнтом 15.

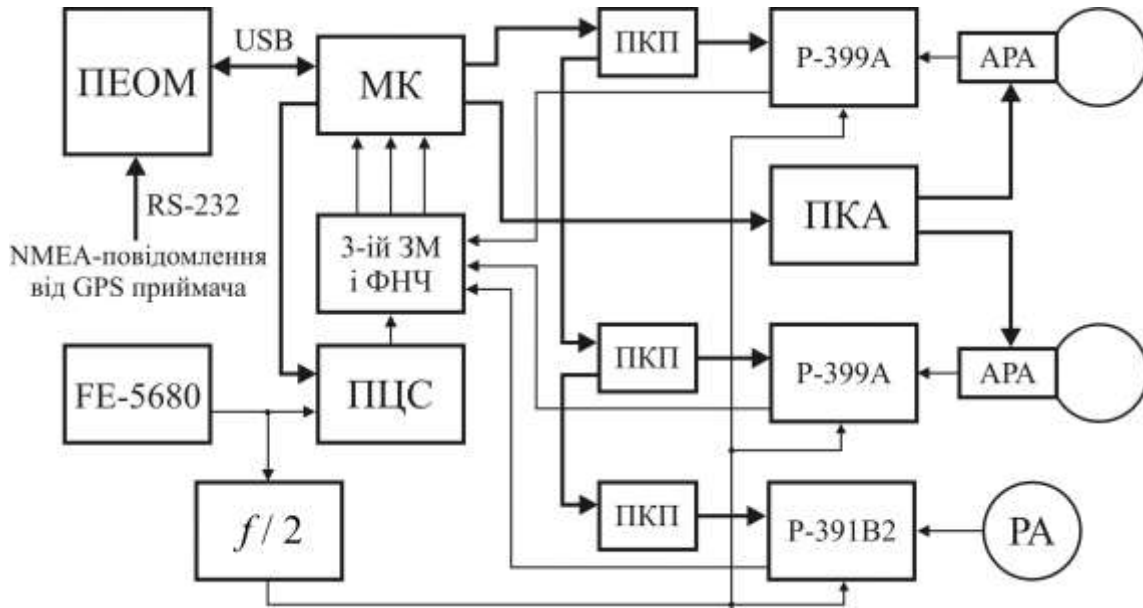


Рис. 1. Структурна схема програмно-апаратної системи пасивного зондування іоносфери. ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина, P-399A – приймач радіосигналів декаметрового діапазону, P-391B2 – приймач радіосигналів гектометрового діапазону, 3-й ЗМ і ФНЧ – блок 3-їх змішувачів частоти та фільтрів нижніх частот, FE-5680 – рубідієвий стандарт частоти, ПЦС – генератор прямого цифрового синтезу, МК – мікроконтролер, ПКП – плата керування приймачем, АРА – активна рамкова антена, РА – рамкова антена, ПКА – плата керування антенами, $f/2$ – подільник частоти навіпл

Fig. 1. Block diagram of the software defined system. ПЕОМ is the personal computer, P-399A is HF radio receivers, P-391B2 is the hectometer radio wave range radio receiver, 3rd ЗМ and ФНЧ is the 3rd mixer and low pass filter, FE-5680 is the rubidium frequency standard, ПЦС is the direct digital synthesizer, МК is the microcontroller, ПКП is the receiver control board, АРА is an active loop antenna, РА is the loop antenna, ПКА is the antenna control board, $f/2$ is the frequency divider.

Для цифрової фільтрації синтезований оптимальний смуговий фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою. Цьому типу фільтрів властива абсолютна стійкість до різного роду похибок даних, вони мають лінійну фазову характеристику та досить просто синтезуються за таких заданих параметрів, як довжина фільтру, ширина смуги на рівнях пропускання та затримки, а також співвідношення нерівномірностей амплітудно-частотних характеристик у смугах пропускання та затримки. Тут оптимальність смугового фільтра розуміється в сенсі максимального придушення в смузі затримання при заданих параметрах. Синтезований цифровий фільтр довжиною 120 точок має ширину смуги пропускання $0.04f_N$ на рівні 0.1 (тут f_N – частота дискретизації), центральна частота дорівнює $0.25f_N$, а коефіцієнт придушення позасмугових складових перевищує 40 дБ. У нашому випадку $f_N = 600$ Гц, тому на виході такого фільтра залишається сигнал з центральною частотою 150 Гц і шириною смуги приблизно 20 Гц. Наступна децимація з коефіцієнтом 15 перетворює його в сигнал зі смугою від 0 до 20 Гц при частоті дискретизації 40 Гц. Власне, ці дані, блоками по 512 точок (тривалістю 12.8 с по часу вимірювання) з описовим заголовком, зберігаються в єдиному добовому файлі експериментальних даних на комп'ютері. У заголовку кожного блоку даних фіксується час початку реєстрації даного блоку та частота прийнятого при цьому радіосигналу.

Основна прив'язка блоків даних по часу здійснюється за допомогою NMEA-повідомлень від GPS-приймача, які надходять до основного комп'ютера через інтерфейс RS-232.

Система фазових вимірювань. З метою безперервного моніторингу нижньої іоносфери реалізовано пасивний метод вимірювання варіацій амплітуди та фази НЧ радіосигналу, який поширюється в природному хвилеводі, утвореному земною поверхнею та нижньою іоносферою. Тому вивчення варіацій амплітудно-фазових параметрів радіосигналів НЧ діапазону дозволяє отримати відомості про процеси, які протікають саме в нижній іоносфері. Похибка вимірювання фази не перевищує 0.1° , а амплітуди – 2–3 %.

Блок-схема системи, створеної для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ, наведена на Рис. 2, а її зовнішній вигляд – на Рис. 3.

Система створена на базі допрацьованого приймача-компаратора ПК-66. Його вихідні сигнали радіочастоти (66.(6) кГц) та кола автоматичного регулювання підсилення (АРП) надходять до розробленого вимірювально-реєструючого блоку, в якому здійснюється первинна обробка та реєстрація фазо-амплітудних даних. Відліки фази радіочастоти, усереднені на секундних інтервалах часу, раз на секунду зберігаються в файлах на зовнішньому USB флеш-накопичувачі. Сигнал із виходу схеми АРП приймача ПК-66, який несе інформацію про амплітуду сигналу, також перетворюється в цифровий вигляд і зберігається на зовнішньому носії разом з відліками фази.

Рис. 2. Блок-схема системи для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ. МА – рамкова магнітна антена; 1 – допрацьований приймач-компаратор ПК-66; 2 – вимірювально-реєструючий блок; 3 – рубідієвий стандарт частоти Ч1-69; 4 – USB флеш-накопичувач

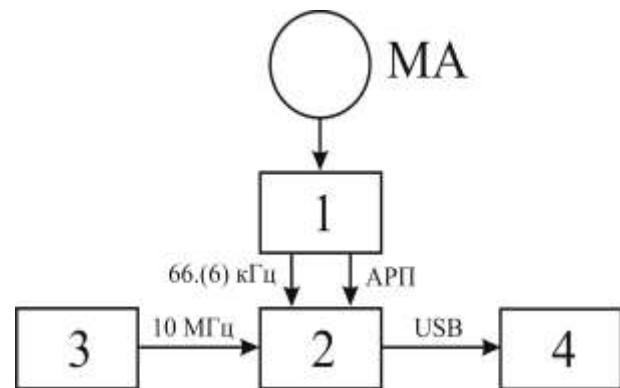


Fig. 2. Block diagram of the system for studying variations in the phase and amplitude of the signals transmitted by the RBU radio station. MA is a loop magnetic antenna; 1 is the upgraded PK-66 radio receiver; 2 is the block developed for making measurements and acquiring the data; 3 is the Ch1-69 rubidium frequency standard; 4 is the USB flash memory.



Рис. 3. Зовнішній вигляд системи для дослідження іоносферних варіацій фази й амплітуди сигналу станції РБУ служби еталонних сигналів частоти та часу. Верхній прилад – приймач ПК-66 з магнітною антеною (зліва) та мікроконтролерним вимірювачем фази; нижній – рубідієвий стандарт частоти Ч1-69

Fig. 3. Photo of the system for studying ionospheric variations in the phase and amplitude of the RBU station signals of the Standard Frequency and Time Signal Service. Receiver PK-66 (top) with magnetic antenna and microcontroller phase meter (left); Ch1-69 rubidium frequency standard (bottom)

Якісні характеристики частотно-часових параметрів системи (значення відносної нестабільності частоти зразкового сигналу порядку $(1-2) \cdot 10^{-11}$ та відносна похибка установки його частоти не гірше 10^{-10}) забезпечує внутрішній (FE-5680A) для вимірювально-реєструючого блоку, або зовнішній (Ч1-69) рубідієвий стандарт частот.

Характеристики використаних радіотрас. Кількість радіотрас та їх орієнтація залежать від специфіки розв'язуваних задач. У цих дослідженнях використовувалися 7 радіотрас різної орієнтації та протяжності (див. Рис. 4 та Табл. 2).

Для дослідження висотної залежності проявів динамічних процесів у іоносфері для приблизно одного і того ж географічного розташування радіостанцій застосовувалися чотири різні частоти радіохвилі. При цьому одна радіохвиля відбивалася в D-області, друга – в E-області, а дві інші – в F-області іоносфери.



Рис. 4. Радіотраси, які використовуються для похилого зондування іоносфери

Fig. 4. Radio paths used for sounding the ionosphere at oblique incidence

МЕТОДИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Обробка даних доплерівського зондування полягає у виділенні з добового файлу блоків даних вимірювання на конкретній радіочастоті, отриманні спектральних оцінок з заданою точністю та частотним розрізненням, виявленні на них основних мод радіосигналу (цими модами можуть бути як різні магнітні компоненти, так і промені, які відбиваються від різних іоносферних шарів), а також дослідженні динаміки цих мод.

Застосований у комплексі метод спектрального аналізу ґрунтується на параметричному описі випадкового процесу, який породжується сумою відбитих від іоносфери та прийнятих приймачем радіосигналів, а конкретніше – на моделі авторегресійного (АР) процесу [34]. Ця модель добре описує дані вимірювань при обмеженій кількості сильних мод і відношенні сигнал/завада порядку та більше 10 дБ.

Для розрахунку коефіцієнтів АР моделі реалізовано метод спільної мінімізації квадратичних похибок прямого та зворотного лінійного передбачення (модифікований коваріаційний метод). Обчислені за цими коефіцієнтами АР спектри дозволяють для блоку даних тривалістю 12.8 с визначати частоту моди з точністю до 10–20 мГц, а розрізнення за частотою досягає 60–80 мГц.

У разі обробки більш низькочастотних (менше 150–200 кГц) радіосигналів перед АР аналізом необхідна додаткова цифрова обробка когерентної послідовності фрагментів із загальною тривалістю 192 с. Вона включає вузькосмугову (зі смугою ~ 1.33 Гц відносно центральної частоти 10 Гц) фільтрацію даних і перенесення виділеного фрагмента спектра в область 0–1.33 Гц. В результаті вдається визначати частоту моди радіосигналу з точністю не гірше 0.1 мГц, а розрізнення за частотою може досягати 3 мГц. Результати числового моделювання свідчать, що варіації частот гармонік з урахуванням точності методики відновлюються практично без помилок, а варіації амплітуд можуть набути паразитної інтермодуляції в межах 5–10%, синфазної з девіацією частоти гармонік. Однак співвідношення між амплітудами відновлених гармонік близьке до істинного.

Для цілей автоматизованого вимірювання варіацій характеристик фази сигналів при їх поширенні в природному хвилеводі «Земля – іоносфера» обрано апаратний метод синхронного детектування усереднених на чвертьперіодних інтервалах часу квадратурних компонент сигналу з мікропрограмною реалізацією визначення за ними фази й усунення неоднозначності зворотних тригонометричних функцій

в інтервалі кутів 0–360°. Цей метод задовільно працює з зашумленими сигналами та має порівняно просту апаратну реалізацію на сучасних мікроелектронних елементах.

Таблиця 2. Відомості про радіотраси, які використовуються для ПЗ іоносфери

Частота, кГц	Місце розташування	Відстань від приймача, км	Азимут відносно приймача	Потужність, кВт	Час роботи, УТ
66.(6)	Росія, Московська обл., м. Талдом 56.7333° пн. ш. 37.6633° сх. д.	782	4°	10	00:00–24:00
77.5	Німеччина, Mainflingen, 50.0156° пн. ш. 9.0108° сх. д.	1981	282°	50	00:00–24:00
3200	Україна, Харківська обл., с. Гайдари 49.6327° пн. ш. 36.3238° сх. д.	44	267°	1	Епізодично
4201	Те ж саме	44	267°	1	Епізодично
4996	Росія, Московська обл., м. Електроуглі 55.7378° пн. ш. 38.1539° сх. д.	675	7°	5	00:00–24:00
9996	Те ж саме	675	7°	8	00:00–24:00
14996	Те ж саме	675	7°	8	00:00–24:00

ПРИКЛАДИ РЕЄСТРАЦІЙ

Реакція на рух сонячного термінатора. Приклад результатів спостережень варіацій ДЗЧ представлений на Рис. 5. Із Рис. 5 видно, що рух термінатора призвів до появи аперіодичних збурень ДЗЧ на частотах 3.2, 4.2, 4.996 і 9.996 МГц та генерації квазіперіодичних збурень ДЗЧ з амплітудою від 0.05 до 0.25 Гц та періодом від 5 до 30 хв.

Розглянемо це докладніше. Перед заходом Сонця на поверхні Землі спостерігалось від'ємне зміщення доплерівської частоти. Найбільш добре це спостерігалось на частоті 4.2 МГц. За час близько 60 хв постійна складова f_d зменшилася від 0 до -0.3 Гц. Це означає, що швидкість руху області відбиття поступово збільшувалася від 0 до 14 м/с. За 60 хв вона змістилася на 25 км вгору.

Квазіперіодичні варіації ДЗЧ спостерігалися протягом усього часу вимірювання.

Радіохвиля з частотою 3.2 МГц днем відбивалася в Е-області іоносфери. При цьому спостерігалися квазіперіодичні варіації ДЗЧ з періодами T від 5 до 10 хв. Приблизно такі ж періоди відзначалися і з 15:30 до 17:30, тобто протягом руху сонячного термінатора в іоносфері. Приблизно з 18:00 до 19:00 $T \approx 15$ хв, а амплітуда $f_{da} \approx 0.1-0.2$ Гц. В інтервалі часу 19:00–22:00 $T \approx 30$ хв, а $f_{da} \approx 0.15-0.25$ Гц. Далі спостерігалися коливання з T від 20 до 40 хв.

Варіації f_d на частоті 4.2 МГц були схожими на варіації ДЗЧ на частоті 3.2 МГц. Відмінність частот у тому, що в денний час $T \approx 9-15$ хв.

Радіохвиля з частотою 4.996 МГц, довжина радіотраси якої значно більше довжини радіотраси для радіохвиль з частотами 3.2 і 4.2 МГц, вдень відбивалася на висоті близько 100 км, а вночі – трохи вище (~110–120 км). Після заходу Сонця відзначалися варіації з $T \approx 15$ хв. Доплерівські спектри були більш розмитими, ніж спектри на частотах 3.2 і 4.2 МГц.

На частоті 9.996 МГц у денний час реєструвались квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 15-20$ хв і $f_{da} \approx 0.2$ Гц, а перед заходом Сонця – варіації ДЗЧ з $T \approx 30$ хв і $f_{da} \approx 0.15-0.20$ Гц.

Вимірювання на частоті 14.996 МГц протягом 2015 р. були неефективними.

Цікаво, що в інтервалі часу 19:00–21:00 на всіх трасах мало місце зменшення f_d від 0 до $-(0.4-0.6)$ Гц, а потім його збільшення від $-(0.4-0.6)$ до 0 Гц. При цьому область відбиття радіохвиль змістилася вгору приблизно на 70 км.

Знаючи f_{da} і T , можна за співвідношенням (1) оцінити δ_N . Результати оцінок для радіохвилі з $f = 3.2$ МГц наведено в Табл. 3. З Табл. 3 видно, що значення δ_N змінювались від 0.45 до 13.5 % при збільшенні періоду від 5 до 30 хв.

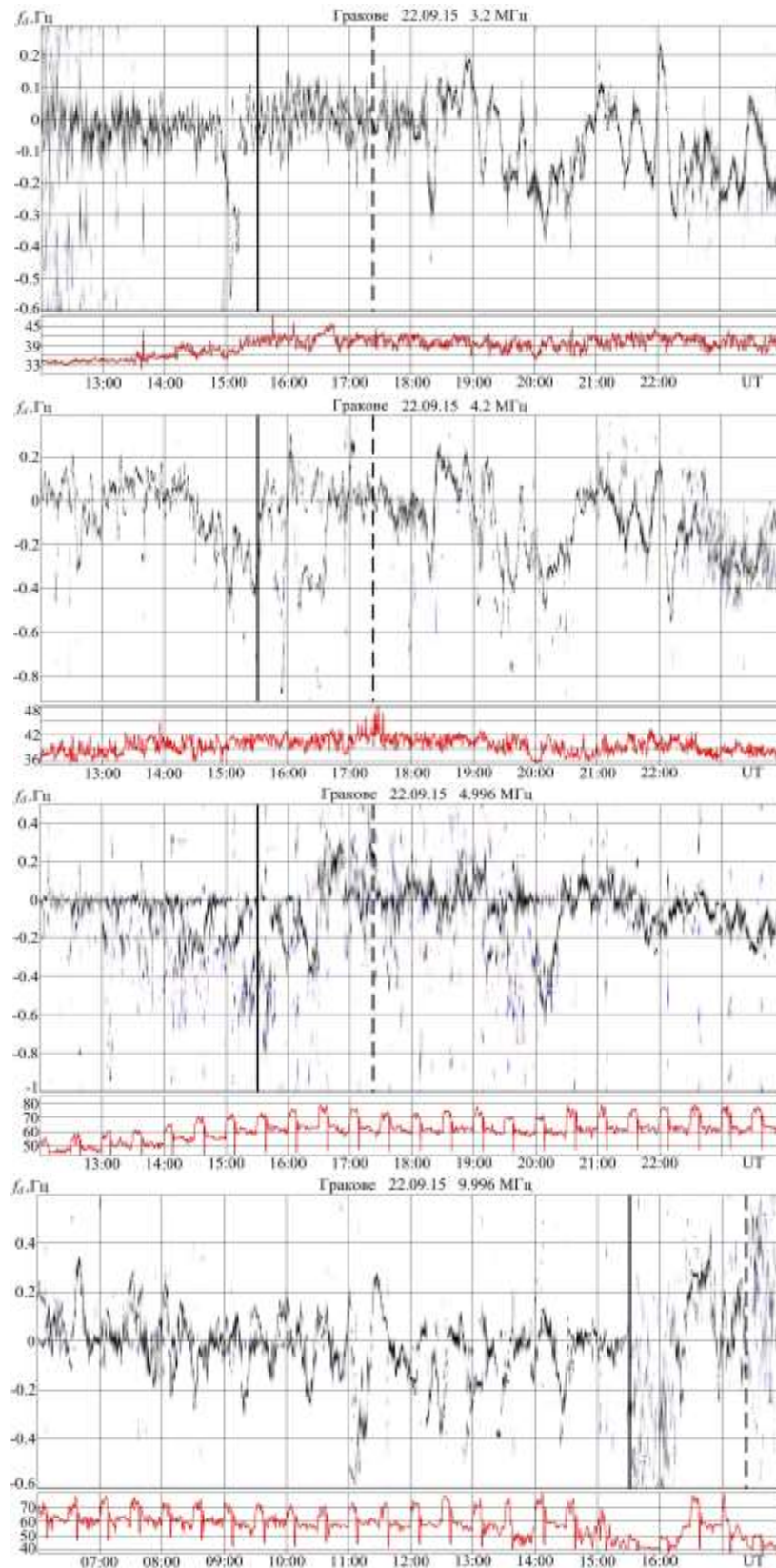


Рис. 5. Варіації доплерівського зміщення частоти 22 вересня 2015 р. на частотах 3.2, 4.2, 4.996 та 9.996 МГц. Суцільною та пунктирною лініями позначено захід Сонця на висотах 0 та 300 км відповідно

Fig. 5. UT variations in the Doppler frequency shift on September 22, 2015 at 3.2 MHz, 4.2 MHz, 4.996 MHz, and 9.996 MHz. Solid and dashed lines indicate the sunset at altitudes of 0 and 300 km, respectively

Таблиця 3. Параметри спостережуваних квазіперіодичних збурень

T , хв	5	10	15	30	30
f_{da} , Гц	0.05	0.07	0.10	0.15	0.25
δ_N , %	0.45	1.2	2.7	8.1	13.5

Реакція на сонячні спалахи. Приклад результатів моніторингу космічної погоди представлено на Рис. 6. Тут наведено варіації середньої фази й амплітуди відбитого від іоносфери радіосигналу станції РБУ, зареєстровані в м. Харків (відстань до пункту випромінювання близько 675 км в північному напрямку) в період 11–14 січня 2013 р. у час доби поблизу опівдня з 08:00 LT до 16:00 LT. Геомагнітне поле характеризувалося як спокійне з середньодобовим індексом $K_{pmax} = 1$ для 11–12 січня і $K_{pmax} = 3$ для 13–14 січня. В інтервали реєстрацій потрапили два сонячні рентгенівські спалахи класу M1, які мали місце о 09:11 UT 11 січня і 08:38 UT 13 січня 2013 р. На Рис. 6 також наведено записи варіацій потоку сонячного рентгенівського випромінювання в смугах 0.05–0.4 нм (суцільні лінії) та 0.1–0.8 нм (штрих-пунктир), зареєстровані супутником GOES-15 у цей же час.

З Рис. 6 поряд із добовим ходом фази й амплітуди радіохвилі видно чітку реакцію сигнальних параметрів на спалахи: короточасні зменшення фази на 100–150° та збільшення амплітуди до двох разів. Висока чутливість даного засобу моніторингу демонструється реакцією й на більш слабкий спалах С класу, який мав місце 13 січня 2013 р. перед основним. Така поведінка параметрів радіохвилі характерна при утворенні шару іонізації з різким градієнтом електронної концентрації нижче висоти відбиття в незбуреній іоносфері.

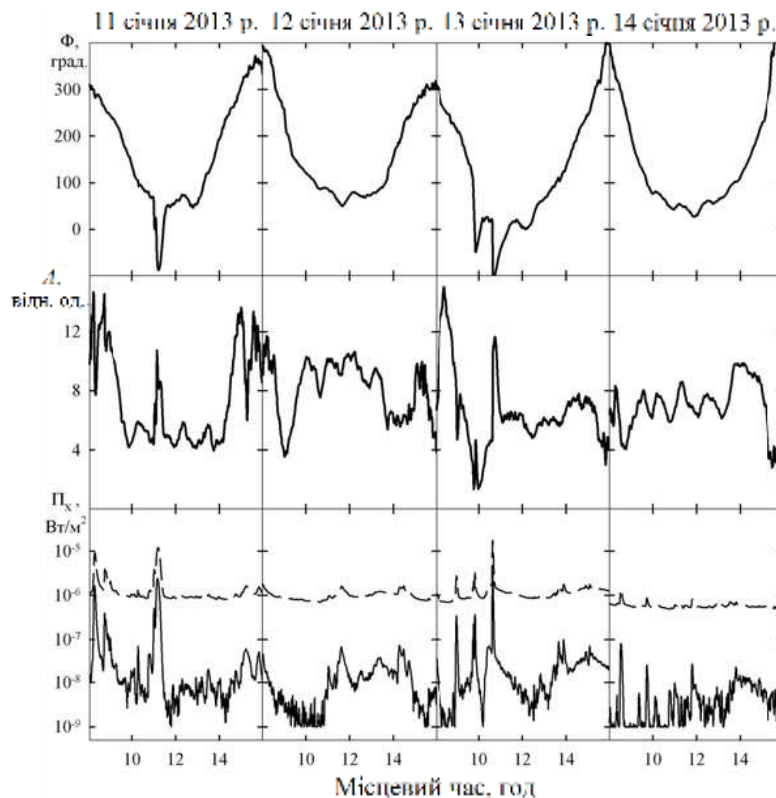


Рис. 6. Варіації середньої фази й амплітуди відбитого від іоносфери сигналу станції РБУ (м. Москва), зареєстровані в м. Харків у час доби поблизу опівдня з 11 до 14 січня 2013 р., а також реєстрації потоку сонячного рентгенівського випромінювання в діапазонах 0.05–0.4 нм (суцільні лінії) і 0.1–0.8 нм (штрихові) на супутнику GOES-15

Fig. 6. Local time variations in the averaged phase and amplitude of the RBU (Moscow) station signal, reflected from the ionosphere and registered in Kharkiv around the local noon from 11 to 14 January 2013, as well as X-ray flux in the 0.05–0.4 nm (solid lines) and 0.1–0.8 nm (dashed lines) ranges measured on the GOES-15 spacecraft

Опишемо коротко добові варіації $f_d(t)$ і $A(t)$ (Рис. 7). До сходу Сонця мали місце квазіперіодичні варіації ДЗЧ з $T \approx 10$ хв і $f_{da} \approx 0.5$ мГц, а $\delta_N \approx 3\%$. При цьому $A(t)$ змінювалася в 2–3 рази. У денний час варіації ДЗЧ були близько ± 0.1 мГц, а амплітуда сигналу була менше нічних значень у 4–6 разів.

Після заходу Сонця ДЗЧ збільшилася до 10–20 мГц, а амплітуда збільшилася в 5–7 разів у порівнянні з денними значеннями.

Відмінність денних значень f_d і A від нічних пояснюється головним чином тим, що в нічний час радіохвиля відбивається на більших висотах.

Розглянемо вплив спалаху С класу на доплерівське зміщення частоти й амплітуду сигналу на частоті 77.5 кГц (див. Рис. 7). Збільшення сонячного випромінювання приблизно о 09:00 і 11:00 призвело до максимального значення ДЗЧ f_{dm} , рівному 0.61 і 0.35 мГц і тривалості ΔT близько 34 і 20 хв відповідно. Зсув фази сигналу

$$\Delta\varphi = 2\pi \int_0^{\Delta T} f_d(t) dt \approx \pi f_{dm} \Delta T .$$

Для цих випадків значення $\Delta\varphi$ дорівнюють 3.9 і 1.3. Зі співвідношення (3) знаходимо, що зміщення області відбиття становило близько 15 і 5 км. При цьому для $L \approx 5$ км з (5) маємо $\delta_N \approx 3$ і 1, тобто за рахунок спалахів у D-області N збільшилася на 300 і 100% відповідно.

Перший спалах призвів до зменшення амплітуди A сигналу, а другий – до її збільшення. Ці ефекти пояснюються зміною зсуву фази між інтерферуючими модами.

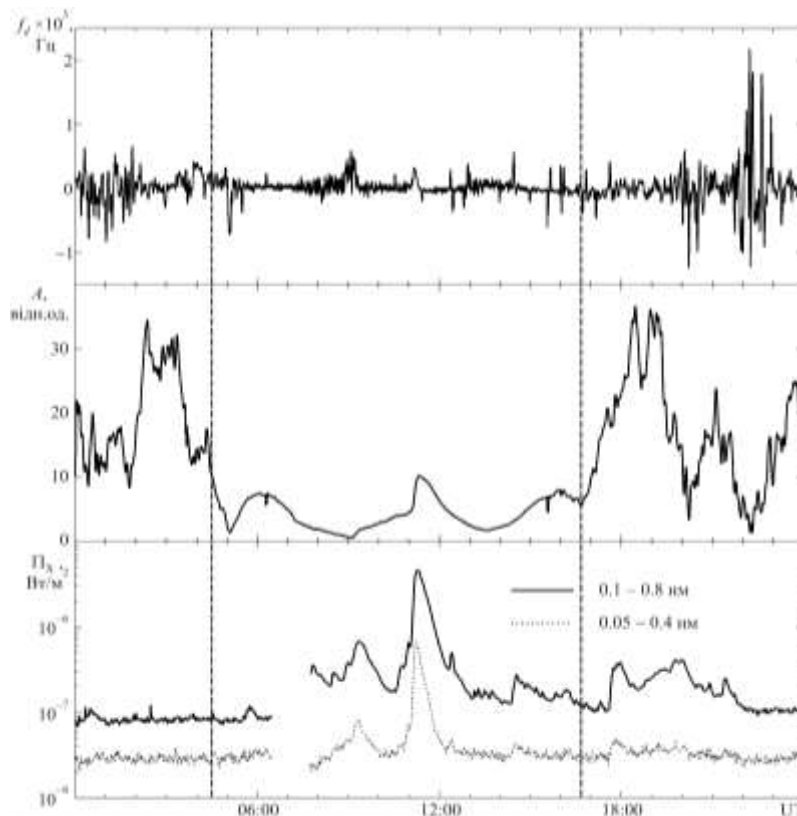


Рис. 7. Часові варіації доплерівського зміщення частоти й амплітуди сигналу станції DCF77 (траса Mainflingen, ФРН – Гракове, 77.5 кГц) і потоку енергії 20 березня 2019 р. під час рентгенівського спалаху С класу на Сонці. Вертикальними лініями показані моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі в точці з координатами 50°пн. ш., 23°сх. д., які відповідають середині радіотраси

Fig. 7. UT variations in the Doppler shift of frequency and in the amplitude of the signal from the DCF77 station (Mainflingen (Germany, 77.5 kHz) to Grakove propagation path) as well as the X-ray energy flux on March 20, 2019 during a class C solar flare event. The vertical lines indicate sunrise and sunset times at the ground at (50°N, 23°E) geographic coordinates, which correspond to the middle of the radio path

Реакція на слабку магнітну бурю. У ранковий час 19 грудня 2019 р. спостерігалася слабка магнітна буря з $K_{p\max} = 4$. Часові варіації ДЗЧ й амплітуда сигналу наведені на Рис. 8. Приблизно через $\Delta t \approx 5$ год після сплеску K_p -індексу спостерігалися квазіперіодичні варіації як ДЗЧ, так і амплітуди. Для ДЗЧ $f_{da} \approx 1.4$ мГц, а $T \approx 20$ хв, для амплітуди $T \approx 40$ хв. Зі співвідношення (1) маємо $\delta_N \approx 2\%$. При $\Delta t \approx 5$ год і відстані від авроральної області до середини радіотраси $R_1 \approx 2400$ км маємо вдавану швидкість поширення $v \approx 133$ м/с. Таку швидкість і відносну амплітуду мають атмосферні гравітаційні хвилі, які генеруються під час геокосмічних бур у полярній області [35].

Після заходу Сонця мало місце спочатку зменшення амплітуди сигналу в 2–3 рази, а потім її збільшення в 3–4 рази. Оскільки згадане зменшення не спостерігалось в сусідні дні, можна припустити, що воно пов'язане з іоносферною бурєю і, зокрема, зі збільшенням поглинання радіохвилі в результаті збільшення N за рахунок висипання в нижню іоносферу високоенергійних (з енергією ~ 10 кеВ) електронів з магнітосфери.

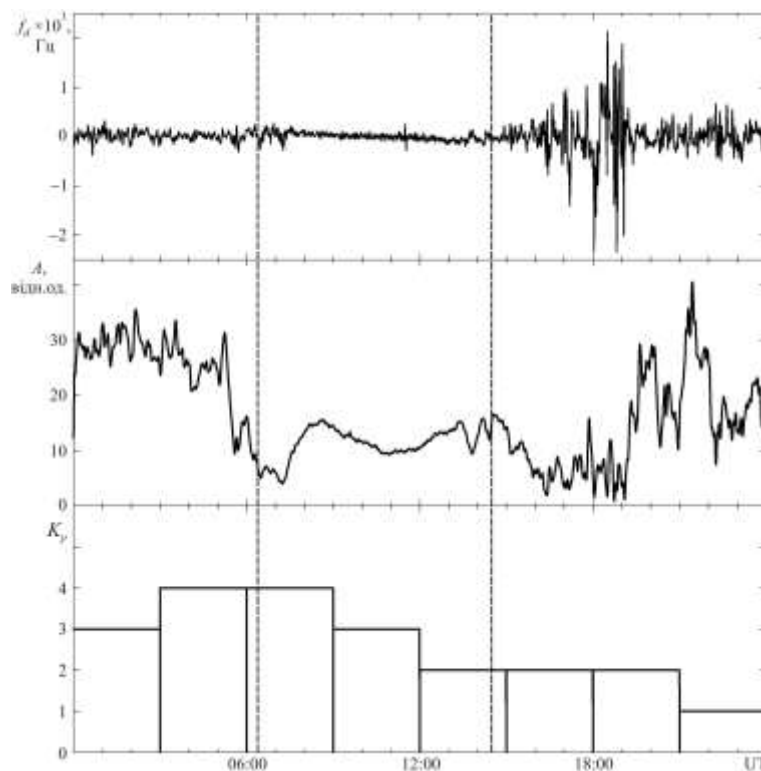


Рис. 8. Часові варіації доплерівського зміщення частоти й амплітуди сигналу станції DCF77 (траса Mainflingen, ФРН – Гракове, 77.5 кГц) і K_p -індексу 19 грудня 2019 р. після геомагнітного збурення. Вертикальними лініями показані моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі в точці з координатами 50° пн. ш., 23° сх. д., які відповідають середині радіотраси

Fig. 8. UT variations in the Doppler shift of frequency and in the amplitude of the signal from the DCF77 station (Mainflingen (Germany, 77.5 kHz) to Grakove propagation path) after the geomagnetic perturbation, as well as the K_p -index for December 19, 2019. The vertical lines indicate sunrise and sunset times at the ground at $(50^\circ\text{N}, 23^\circ\text{E})$ geographic coordinates, which correspond to the middle of the radio path

ОБГОВОРЕННЯ

Комплекс багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери протягом багатьох років забезпечував експериментальними даними про динамічні процеси в геокосмосі, викликані джерелами різної фізичної природи [21–23, 25, 26]. Було продемонстровано його ефективність і інформативність. Комплекс безперервно модернізується, оновлюється програмне забезпечення.

Цінність вимірювань на комплексі підвищилася після введення фахівцями Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та Харбінського інженерного університету (КНР) комплексу з аналогічним призначенням [27–31, 34, 36, 37]. З'явилася можливість синхронних вимірювань на двох подібних комплексах.

У цій статті працездатність комплексу продемонстрована на прикладі ефектів сонячного термінатора (у середній іоносфері), сонячного спалаху та магнітного збурення (в нижній іоносфері).

Підтверджено, що рух сонячного термінатора супроводжується як аперіодичними, так і квазіперіодичними процесами в іоносфері. У нижній іоносфері (висота ~ 100 км) спостерігаються процеси з T від 5 хв і більше, а вище – з T від ~ 10 хв і більше. Очевидно, що квазіперіодичні коливання викликані атмосферними гравітаційними хвилями, для яких $T_{\min} \approx 5$ хв в нижній іоносфері, а вище $T_{\min} \approx 10\text{--}15$ хв [35].

Доведено, що комплекс дозволяє реєструвати реакцію іоносфери навіть на слабкі спалахи на Сонці та невеликі магнітні збурення.

ВИСНОВКИ

1. У ХНУ імені В. Н. Каразіна розроблено та функціонує багаточастотний багатотрасовий радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери, призначений для радіофізичного моніторингу динамічних процесів у геокосмосі, викликаних варіаціями космічної погоди, впливом на іоносферу високоенергетичних джерел космічного та земного походження.

2. Комплекс потенційно здатний виявляти відносне ДЗЧ $\sim 10^{-10}$, зсув фази в НЧ діапазоні $\sim 0.1^\circ$, варіації амплітуди сигналу не менше 2–3%, збурення концентрації електронів з відносною амплітудою не менше, ніж $\sim 10^{-2}$ % та динамічні процеси, які супроводжуються вертикальним рухом зі швидкістю не меншою $\sim 0.02\text{--}0.05$ м/с.

3. Успішне функціонування комплексу продемонстровано на прикладі дослідження динамічних процесів у геокосмосі, викликаних дією різних джерел енерговиділення.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ


Дослідження Черногора Л. Ф. виконано в рамках проекту 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. частково підтримана в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 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>

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Черногор ЛФ, Домнин ИФ. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
2. Черногор Л Ф. Фізика геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2021;27(1(128)):3-77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>
3. Афраймович ЭЛ, Перевалова НП. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
4. Ясюкевич ЮВ, Едемский ИК, Перевалова НП, Полякова АС. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: Монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 259 с.
5. Пуляев ВА, Дзюбанов ДА, Домнин ИФ. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: Монография. Харьков: НТУ “ХПИ”; 2011. 240 с.
6. Reinisch BW, Galkin IA, Khmyrov GM, Kozlov AV, Bibl K., Lisysyan IA, Cheney GP, Huang X, Kitrosser DF, Paznukhov VV, Luo Y, Jones W, Stelmash S, Hamel R, Grochmal J. New Digisonde for research and monitoring applications. Radio Science. 2009 Feb 19;44(1):RS0A24. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
7. Reinisch BW, Galkin IA. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO). Earth, Planets and Space. 2011 Apr 01;63(4):377–381. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001>
8. Verhulst T, Altadill D, Mielich J, Reinisch B, Galkin I, Mouzakis A, Belehaki A, Burešová D, Stankov S, Blanch E, Kouba D. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. Advances in Space Research. 2017 Oct 15;60(8):1644–1656. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>

9. Зализовский АВ, Кашеев АС, Кашеев СБ, Колосков АВ, Лисаченко ВН, Пазнухов ВВ, Пикулик ИИ, Сопин АА, Ямпольский ЮМ. Макет портативного когерентного ионозонда. *Космічна наука і технологія*. 2018;24(3(112)):10–22. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010>
10. Ivanov VA, Kurkin VI, Nosov VE, Uryadov VP, Shumaev VV. Chirp Ionosonde and its Application in the Ionospheric Research. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003 Nov;46(11):821–851. <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c>
11. Galushko VG, Kascheev AS, Paznukhov VV, Yampolski YuM, Reinisch BW. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. *Radio Science*. 2008 Aug;43(4): RS4013. <https://doi.org/10.1029/2007RS003735>
12. Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander L, Belehaki A, Tzagouri I, Kouris S, Vallianatos F, Makris J, Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*. 2009 Jun 02;43(11):1611–1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
13. Mlynarczyk J, Koperski P, Kulak A. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting. *Advances in Space Research*. 2012 Jan;49(1):83–88. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.031>
14. Paznukhov VV, Galushko VG, Reinisch BW. Digisonde observations of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Advances in Space Research*. 2012;49(4):700–710. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.012>
15. Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG, Vertogradov VG, Kubatko SV. Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013 Nov 14;56(5):259-275. <https://doi.org/10.1007/s11141-013-9431-3>
16. Shi SZ, Zhao ZY, Liu JN, Liu Y, Chen G, Li T, Yao M. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF skywave-multistatic radar. *IEEE Geosci. Remote Sens*. 2014;11(7):1270-1274. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2291831>
17. Shi SZ, Chen G, Yang G-B, Li T, Zhao Z-Y, Liu J-N. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015 Apr;53(4):2185-2194. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2357443>
18. Shi S-Z, Yang G-B, Zhao Z-Y, Liu J-N. A novel ionospheric oblique-incidence sounding network consisting of the ionospheric oblique backscatter sounder and the parasitic oblique-incidence sounder. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015 Jul 08;12(10):2070-2074. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2447524>
19. Heitmann AJ, Cervera MA, Gardiner-Garden RS, Holdsworth DA, MacKinnon AD, Reid IM, Ward BD. Observations and modeling of traveling ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle-of-arrival sounder. 32nd URSI GASS; 2017 Aug 19–26; Montreal, QC, Canada. pp. 1-4. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105329>
20. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017 Oct 15;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
21. Гармаш КП, Гоков АМ, Костров ЛС, Розуменко ВТ, Тырнов ОФ, Федоренко ЮП, Цымбал АМ, Черногор ЛФ. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере. Вестник Харьковского университета. Серия «Радиофизика и электроника». Харьков: ХГУ; 1998;405:157-177.
22. Гармаш КП, Розуменко ВТ, Тырнов ОФ, Цымбал АМ, Черногор ЛФ. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1. Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1999;7:3-15.
23. Garmash KP, Gokov AM, Kostrov LS, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Fedorenko YuP, Tsymbal AM, Chernogor LF. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. *Telecommunications and Radio Engineering*. 1999;53(4-5):6-20. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20>
24. Благовещенская НФ. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат; 2001. 287 с.
25. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Rozumenko VT, Tsymbal AM, Tyrnov OF. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun and Geosphere*. 2012 Nov;7(2):133-139.
26. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Поднос ВА, Тырнов ОФ. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. Космический проект «Ионосат-Микро». Киев: Академперіодика; 2013:160-182.

27. 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 May;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
28. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020 Feb;55(2):e2019RS006866 <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
29. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Advances in Space Research*. 2020 Jul 15;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
30. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Shulga SN, Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020 Oct;207:Paper No. 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
31. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021;61(1):73-91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
32. Черногор ЛФ. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомagnetизм и аэрoномия*. 2015; 55(3):370-385. <https://doi.org/10.1134/S0016793215030044>
33. Marple SL, Jr. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.; 1987. 492 p.
34. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Guo Q, Zheng Y, Поднос ВА, Розуменко ВТ, Тырнов ОФ, Цимбал АМ. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2018;28:88-93.
35. 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.
36. Guo Q, Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019;30:3-15.
37. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СН. Вариации характеристик радиоволн ВЧ диапазона над Китаем, сопровождавшие умеренное землетрясение в Японии 5 сентября 2018 г. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2019;30:16–26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>

REFERENCES

1. Chernogor LF, Domnin IF. *Physics of geospace storms: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine; 2014. 408 p. (Russian).
2. Chernogor LF. *Physics of Geospace Storms*. *Space Science and Technology*. 2021;27(1(128)):3-77. (Ukrainian).
3. Afraimovich EL, Perevalova NP. *GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere*. Irkutsk: Solar–Terrestrial Physics Institute SD RAS: SI SC RRS ESSC SD RAMS; 2006. 479 p. (Russian).
4. Yasyukevich YuV, Edemskiy IK, Perevalova NP, Polyakova AS. *Ionosphere Response on Helio- and Geophysical Disturbances according to GPS Data*. *Solar–Terrestrial Physics Series*. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2013. p. 259. (Russian).
5. *Pulyaev V. A., Dzyubanov D. A., Domnin I. F.* Determination of the ionospheric parameters using the incoherent scattering technique: *Monograph*. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2011. 240 p. (in Russian).
6. Reinisch BW, Galkin IA, Khmyrov GM, Kozlov AV, Bibl K, Lisysyan IA, et al. New Digisonde for research and monitoring applications. *Radio Science*. 2009 Feb 19;44(1):1-15. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
7. Reinisch BW, Galkin IA. *Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO)*. *Earth, Planets and Space*. 2011 Jun 14;63(4):377-381. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001>
8. Verhulst T, Altadill D, Mielich J, Reinisch B, Galkin I, Mouzakis A, Belehaki A, Burešová D, Stankov S, Blanch E, Kouba D. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes. *Advances in Space Research*. 2017 Oct 15;60(8):1644-1656. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>
9. Zalizovski AV, Kashcheyev AS, Kashcheyev SB, Koloskov AV, Lisachenko VN, Paznukhov VV, Pikulik II, Sopin AA, Yampolski YuM. A prototype of a portable coherent ionosonde mode. *Space Science and Technology*. 2018;24(3)(112):10-22. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.010> (Russian).
10. Ivanov VA, Kurkin VI, Nosov VE, Uryadov VP, Shumaev VV. Chirp Ionosonde and its Application in the Ionospheric Research. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003 Nov;46(11):821-851. <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c>

11. Galushko VG, Kascheev AS, Paznukhov VV, Yampolski YM, Reinisch BW. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. *Radio Science*. 2008;43(4):1-10. <https://doi.org/10.1029/2007RS003735>
12. Pietrella M, Perrone L, Fontana G, Romano V, Malagnini A, Tutone G, Zolesi B, Cander LjR, Belehaki A, Tsagouri I, Kouris SS, Vallianatos F, Makris J, Angling M. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*. 2009 Jun 02;43(11):1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.01.022>
13. Mlynarczyk J, Koperski P, Kulak A. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting. *Advances in Space Research*. 2012 Jan 01;49(1):83-88. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.031>
14. Paznukhov VV, Galushko VG, Reinisch BW. Digisonde observation of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Advances in Space Research*. 2012;49(4):700-710. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.012>
15. Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG, Vertogradov VG, Kubatko SV. Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2013 Nov 14;56(5):259-275. <https://doi.org/10.1007/s11141-013-9431-3>
16. Shi SZ, Zhao ZY, Liu JN, Liu Y, Chen G, Li T, Yao M. Experimental demonstration for ionospheric sensing and aircraft detection with a HF sky-wave-multistatic radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 2014 Jul;11(7):1270-1274. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2291831>
17. Shi SZ, Chen G, Yang GB, Li T, Zhao ZY, Liu JN. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015 Apr;53(4):2185-2194. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2357443>
18. Shi SZ, Yang GB, Zhao ZY, Liu JN. A novel ionospheric oblique-incidence sounding network consisting of the ionospheric oblique backscatter sounder and parasitic oblique-incidence sounder. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015 Oct;12(10):2070-2074. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2447524>
19. Heitmann J, Cervera MA, Gardiner-Garden RS, Holdsworth DA, MacKinnon AD, Reid IM, Ward BD. Observations and modeling of ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle of arrival sounders. 32nd URSI GASS; 2017 Aug 19 – 26; Montreal, QC, Canada. pp. 1-4. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105329>
20. Laštovička J, Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network. *Advances in Space Research*. 2017 Oct 15;60(8):1629-1643. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
21. Garmash KP, Gokov AM, Kostrov LS, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Fedorenko YP, Tsymbal AM, Chernogor LF. Radio Wave Investigations and Modeling the Processes in the Ionosphere Disturbed by Sources of Various Nature. 1. Instrumentation and Processes in the Naturally Disturbed Ionosphere. *Bulletin of Kharkiv State University Radio Physics and Electronics*. 1998;(405):157-177. (Russian).
22. Garmash KP, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Tsymbal AM, Chernogor LF. Radio Wave Investigations the Processes in the Near-Earth Plasma Disturbed by Sources of Various Nature. 1. *Foreign Radio Electronics. Progress in Modern Radio Electronics*. 1999;7:3-15. (Russian).
23. Garmash KP, Gokov AM, Kostrov LS, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Fedorenko YP, Tsymbal AM, Chernogor LF. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities. *Telecommunications and Radio Engineering*. 1999;53(4-5):6-20. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v53.i4-5.20>
24. Blagoveshchenskaya NF. Geophysical Effects of Active Impacts in Near-Earth Space. Saint-Petersberg: Gidrometeoizdat, 2001. 287 p. (Russian).
25. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Rozumenko VT, Tsymbal AM, Tyrnov OF. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory. *Sun and Geosphere*. 2012 Nov;7(2):133-139.
26. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Tyrnov OF. The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio physical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. *Space Project “Ionosat-Micro”*, Academperiodika, Kyiv, 2013:160-182. (Russian).
27. 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 May;186:88–103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
28. Guo Q, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Science*. 2020 Feb;55(2):e2019RS006866 <https://doi.org/10.1029/2019RS006866>
29. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Luo Y, Rozumenko VT, Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People’s Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Advances in Space Research*. 2020 Jul 15;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>

30. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Shulga SN, Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020;207: Paper No. 105336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105336>
31. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021;61(1):73-91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
32. Chernogor LF. Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015;55(3):353–368. <https://doi.org/10.1134/S0016793215030044>
33. Marple SL, Jr. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.; 1987 Jan 01. 492 p.
34. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Y, Podnos VA, Rozumenko VT, Tyrnov OF, Tsymbal AM. The coherent multi-frequency multipath system for radiophysical monitoring of dynamic processes in the ionosphere. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”*. 2018;28:88–93 (Russian).
35. 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.
36. Guo Q, Zheng Y, Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”*. 2019;30:3–15. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-01>
37. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SN. HF radio-wave characteristic variations over China during 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. (Russian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-05>

УДК 551.558, 551.596, 534.221

**КОМБІНАЦІЙНІ ЧАСТОТИ СИГНАЛУ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ВЧ РАДАРУ
В ДІАПАЗОНІ ГЕОМАГНІТНИХ ПУЛЬСАЦІЙ РС1****В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор***Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна**E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com*

Поступила до редакції 17 листопада 2020 р.

Актуальність. Актуальність роботи обумовлена необхідністю вивчення МГД хвиль різної природи на іоносферних висотах, джерела генерації яких знаходяться в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

Об'єктом дослідження даної роботи були іоносферні збурення, що супроводжували геомагнітні пульсації протягом проходження ранкового сонячного термінатора 23–24 березня 2010 р.

Метою цієї роботи було виявлення доплерівським ВЧ радаром короткоперіодних іоносферних збурень у діапазоні геомагнітних мікропульсацій типу РС1 (1–5 Гц) та дослідження їх спектрального складу.

Методи і методологія. За допомогою доплерівського ВЧ радара отримано динамічні спектри варіацій, які спостерігалися.

Результати. Показано, що іоносферні збурення виникають головним чином на комбінаційних частотах. Оцінено тривалості подібних збурень – близько хвилини. Частоти збурень становили 0.7, 1.5 і 2.5 Гц. Виявлені квазіперіодичні биття з частотою 1–5 Гц, тривалість яких може становити від півгодини до декількох годин. Дано обґрунтування появ максимумів биття на комбінаційних частотах на основі моделі сигналу, модульованого в іоносфері УНЧ хвилями. Проведено порівняльний аналіз варіацій, отриманих за допомогою спектрограм, з відомими раніше моделями фазово-модульованих сигналів. Розроблено модель відбитого від іоносфери амплітудно-фазового модульованого сигналу, визначені його основні параметри.

Висновки. Доплерівське ВЧ радіозондування може бути ефективним інструментом для дослідження іоносферних збурень у діапазоні геомагнітних пульсацій РС1. Під час дослідження часових варіацій доплерівського зміщення частоти в період весіннього рівнодення встановлено наступне. Період іоносферних збурень сягав 0.2–1 с, їх тривалість варіювала від 1 до більше, ніж 10 хв. Виявлено помітне збільшення амплітуди биття, яке може бути ознакою появи в доплерівських спектрах бічних максимумів. Установлено наявність коливань у діапазоні частот першої гармоніки спектральної резонансної системи іоносферного альвенівського резонатору. Підтверджено, що тривалі іоносферні збурення мають лінійно зростаючу частоту заповнення хвильового пакета, швидкість зміни частоти якого близька до 10^{-3} Гц/с.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: термінатор, спектрограма, доплерівський ВЧ радар, УНЧ хвилі, комбінаційні частоти

**COMBINATIONAL FREQUENCIES OF HF DOPPLER RADAR SIGNALS
IN THE PC1 GEOMAGNETIC PULSATION RANGE****V. F. Pushin, L. F. Chernogor***V. N. Karazin Kharkiv National University, 61022, Kharkiv, Svobody square, 4, Ukraine*

Urgency. The urgency of this work is determined by the necessity of studying MHD waves originating from various sources within the Earth–atmosphere–ionosphere– magnetosphere system and arriving at ionospheric heights.

The object of research. A matter of this study is ionospheric disturbances that accompanied geomagnetic pulsations during the dawn terminator on 23–24 March 2010.

Purpose of Work. The present work was aimed at revealing short-period ionospheric disturbances in the Pc1 micropulsation frequency range (1–5-Hz) and at investigating their spectral content.

Techniques and Methodology. The dynamic spectra of the variations under study were obtained with the HF Doppler radar.

Results. The ionospheric disturbances have been shown to arise mainly at combinational frequencies. The durations of such disturbances have been estimated to be of the order of one minute, and the disturbance frequencies 0.7 Hz, 1.5 Hz, and 2.5 Hz. The quasi-periodic interference in the 1–5-Hz frequency band has been detected to persist for over one-half hour to a few hours. Based on the model of the signal modulated by ULF waves in the ionosphere, the appearance of constructive interference at combinational frequencies has been validated. The intercomparisons of the variations obtained using the spectrograms and the known models for the phase-modulated signals have been made. A model for the amplitude- and phase-modulated signal reflected from the ionosphere has been developed, and the signal basic parameters have been determined.

Conclusions. The HF Doppler sounding can be a means for studying ionospheric disturbances in the Pc1 geomagnetic pulsation range. During the study of time variations of the Doppler frequency shift during the spring equinox, the following results were found. The period of ionospheric perturbations reached 0.2–1 s, their duration

varied from 1 min to more than 10 min. A noticeable increase in the amplitude of the beat is detected, which may be a sign of the appearance of lateral maxima in the Doppler spectra. The presence of oscillations in the frequency range of the first harmonic of the spectral resonance system of the ionospheric Alfvén resonator is established. Long-term ionospheric perturbations have a linearly increasing frequency of filling the wave packet. The rate of frequency change is close to 10^{-3} Hz/s.

KEY WORDS: terminator, spectrogram, HF Doppler radar, ULF waves, combinational frequencies

КОМБИНАЦИОННЫЕ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ДОПЛЕРОВСКОГО ВЧ РАДАРА В ДИАПАЗОНЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1

В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения МГД волн различной природы на ионосферных высотах, источники генерации которых находятся в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

Объектом исследования данной работы были ионосферные возмущения, сопровождавшие геомагнитные пульсации в течение прохождения утреннего солнечного терминатора 23 – 24 марта 2010 г.

Целью настоящей работы являлось обнаружение доплеровским ВЧ радаром короткопериодных ионосферных возмущений в диапазоне геомагнитных микропульсаций типа Pc1 (1–5 Гц) и исследование их спектрального состава.

Методы и методология. С помощью доплеровского ВЧ радара получены динамические спектры наблюдаемых вариаций.

Результаты. Показано, что ионосферные возмущения возникают главным образом на комбинационных частотах. Оценены длительности подобных возмущений – порядка минуты. Частоты возмущений составляли 0,7, 1,5 и 2,5 Гц. Обнаружены квазипериодические биения с частотой 1 – 5 Гц, длительность которых может составлять от получаса до нескольких часов. Дано обоснование появлений максимумов биений на комбинационных частотах на основе модели сигнала, модулированного в ионосфере УНЧ волнами. Проведен сравнительный анализ вариаций, полученных с помощью спектрограмм, с известными ранее моделями фазово-модулированных сигналов. Разработана модель отраженного от ионосферы амплитудно-фазового модулированного сигнала, определены его основные параметры.

Выводы. Доплеровское ВЧ радиозондирование может быть эффективным инструментом для исследования ионосферных возмущений в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc1. Во время исследования временных вариаций доплеровского смещения частоты в период весеннего равноденствия установлено следующее. Период ионосферных возмущений достигал 0,2–1 с, их длительность варьировала от 1 до более 10 мин. Обнаружено заметное увеличение амплитуды биений, которое может быть признаком появления в доплеровских спектрах боковых максимумов. Установлено наличие колебаний в диапазоне частот первой гармоники спектральной резонансной системы ионосферного альвеновского резонатора. Подтверждено, что длительные ионосферные возмущения имеют линейно возрастающую частоту заполнения волнового пакета, скорость изменения частоты которого близка к 10^{-3} Гц/с.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: терминатор, спектрограмма, доплеровский ВЧ радар, УНЧ волны, комбинационные частоты

ВСТУП

Міжпланетний простір і магнітосфера є джерелами різних типів гідромагнітних хвиль. Поширюючись через іоносферу, магнітогідродинамічні (МГД) хвилі трансформуються в інші типи хвиль [1]. Одним із основних типів геомагнітних мікропульсаций, які спостерігаються на поверхні Землі, є тривалі та досить регулярні коливання Pc1. Геомагнітні пульсації Pc1 являють собою квазисинусоїдальні коливання з періодом 0,2–5 с, що мають характерну модуляцію амплітуди у вигляді окремих хвильових пакетів, які створюють складну картину биття. Тривалість серій змінюється від півгодини до декількох годин, максимум появи відзначається в ранні години місцевого часу [2].

Останнім часом були передбачені та виявлені іоносферний і магнітосферний МГД резонатори [3]. В [2] показано, що геомагнітні пульсації на Землі, як правило, пов'язані зі збуреннями в іоносфері. Ці збурення реєструються, наприклад, наземним доплерівським ВЧ радаром. У даний час ясно, що пояснення геомагнітних пульсаций Pc1 неможливо без уявлення про МГД хвилі в магнітосфері. Так, для пояснення пульсаций Pc1 залучається механізм гірорезонансної нестійкості [4], яка є однією з найважливіших нестабільностей, існуючих у плазмі магнітосфери.

Іоносферний альвєнівський резонатор (ІАР) є одним з основних структурних елементів магнітосферно-іоносферної електродинамічної системи і грає ключову роль в електромагнітних геофізичних процесах з характерними часами $T \approx 0,1–10$ с. На Рис. 1 наведено схему хвилеводного поширення МГД хвиль в області іоносфера – магнітосфера. Альвєнівська хвиля циркулює між верхньою та нижньою межами іоносферного альвєнівського резонатора уздовж геомагнітного поля. Межі ІАР розташовані на висотах E-області й у верхній іоносфері. У магнітосферному альвєнівському мазері іоносфера грає роль селективного та нелінійного елемента, що призводить до появи зворотного зв'язку

в системі хвилі-частинки за рахунок висипань протонів в іоносферу та модуляції її параметрів. Перша резонансна частота ІАР змінюється з плином часу в межах 0.5–3 Гц. На межах ІАР альвенівські хвилі частково відбиваються та трансформуються в інші типи хвиль. Ці хвилі викликають дрейф у схрещених полях іоносферної плазми або змінюють її концентрацію [5].

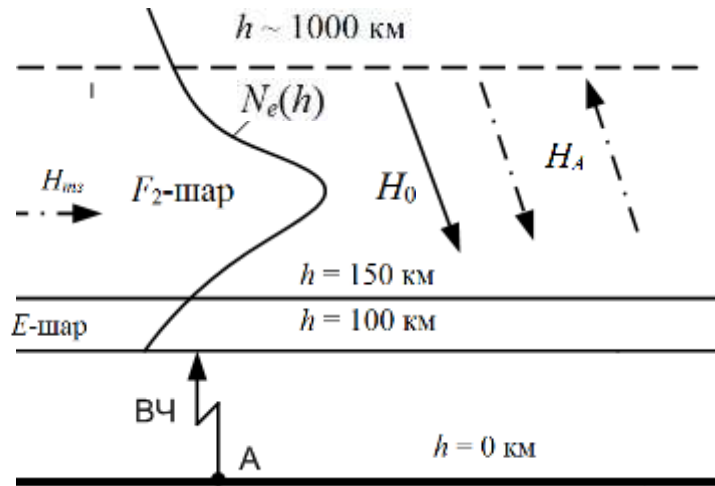


Fig. 1. Sketch showing HF sounding of the MHD waves in the ionosphere: H_0 is the geomagnetic field, H_A is the magnetic field component of the Alfvén wave, H_{ms} is the magnetic field component of the magnetosonic wave, A is the observation point.

Рис. 1. Схема ВЧ зондування МГД хвиль у іоносфері: H_0 – вектор геомагнітного поля, H_A – магнітна компонента альвенівської хвилі, H_{ms} – магнітна компонента магнітного звуку, А – точка спостереження.

Сучасні уявлення про структуру та динаміку навколосезного космічного простору базуються, зокрема, на експериментальних даних, отриманих в результаті цілеспрямованих наземних спостережень низки геофізичних параметрів. Одним з ефективних методів наземного спостереження коливань, які виникли в магнітосфері, є зондування іоносфери доплерівським ВЧ радаром. Доплерівське зондування, в принципі, дозволяє визначити взаємодію магнітосферних ультранизькочастотних (УНЧ) збурень з іоносферою. Поширюючись до земної поверхні, ці коливання зазнають ряд змін, що дозволяє, припускаючи механізм їх генерації, отримувати регулярну інформацію про середовище, наприклад, таку як розподіл плазми в магнітосфері та його варіації.

При доплерівському зондуванні іоносфери, як правило, досліджуються варіації головного максимуму спектра биття відбитого від іоносфери сигналу з сигналом опорного гетеродину [6, 7]. Головний максимум за амплітудою значно перевершує бічні максимуми, що ускладнює їх спостереження. Бічні максимуми пов'язані з тонкими ефектами й їх спостереження помітно розширює можливості зондування доплерівським радаром. Бічні максимуми часто спостерігаються на рівні шумів. Крім того, для пояснення ефектів необхідно розширення традиційної моделі сигналу [8, 9].

Збурення, викликані альвенівськими хвилями, можуть бути зареєстровані доплерівським радаром. На частоті зондування ВЧ радара 4.2 МГц нижня межа ІАР знаходиться в області його досяжності. Перпендикулярно геомагнітному полю в шарі F2 поширюється магнітний звук, який супроводжується зміною концентрації плазми і може бути результатом трансформації альвенівської хвилі. Такі МГД хвилі є предметом дослідження доплерівським ВЧ радаром. Спостереження доплерівських спектрів (ДС) дозволяє виявити спектральну резонансну систему спектрів швидких коливань фази сигналу радара, зокрема, за рахунок МГД хвиль. Коливання Pc1 найлегше розпізнати за обвідною несучого сигналу. Зміни частоти появи цих коливань в залежності від місцевого часу в значній мірі визначається широтою точки спостереження. Наприклад, в середніх широтах Pc1 найбільш часто спостерігаються в ранні ранкові години. Численні роботи вказують на одночасну появу коливань Pc1 в магнітоспрямлених точках [10].

У цій роботі проведено спектральний аналіз биття сигналу, відбитого від іоносфери, з сигналом опорного гетеродину. Для аналізу спектру поза головного максимуму спектр в околі головного максимуму придушується. Аналізуються динамічні спектри биття, так звані спектрограми.

Мета роботи – описання результатів спостереження доплерівським ВЧ радаром короткоперіодних іоносферних збурень у діапазоні геомагнітних мікропульсацій типу Pc1 (1–5 Гц) та дослідження їх спектрального складу.

ВИДІЛЕННЯ КОМБІНАЦІЙНИХ ЧАСТОТ

Будемо вважати, що є вихідний часовий ряд биття сигналу доплерівського ВЧ радару, відбитого від іоносфери

$$x(i), i = 0, \dots, N-1,$$

де N – розмір часового ряду. Виділимо комбінаційні частоти (КЧ) ВЧ сигналу на тлі шумів. Дискретне перетворення Фур'є (ПФ) часової послідовності має вигляд:

$$X(k) = F_k[x(i)], k = 0, \dots, N/2.$$

Координата головного максимуму спектру биття дорівнює I^* . Введемо приріст

$$\Delta X(i) = X(i+1) - X(i), i = 0, \dots, N/2-1.$$

Задамо умову локального максимуму в вигляді

$$\Delta X(i) > 0; \Delta X(i+1) > 0; \Delta X(i+2) < 0; \Delta X(i+3) < 0. \quad (1)$$

З умови (1) знаходимо вектор розв'язку

$$\{q_i\}, i = 0, \dots, r.$$

Тоді координата максимуму буде

$$I_i = q_i + 2.$$

Введемо низку максимумів спектру

$$Y(i) = X(I_i), i = 0, \dots, r. \quad (2)$$

Розділимо ряд (2) на дві частини з координатами більшими та меншими за I^*

$$Y_1(i) = Y(i), i = 0, \dots, n_1, Y_2(i) = Y(i), i = n_1+1, \dots, r.$$

Перенесемо початок відліку в точку I^* . Відобразимо Y_1 симетрично відносно точки I^* і для Y_2 перенесемо початок координат в точку I^* .

Умова для комбінаційних частот

$$I^* - I(i) = I(n_1 + j + 1) - I^*; i = 0, \dots, n_1, j = 0, \dots, r - n_1. \quad (3)$$

Розв'язок рівняння (3)

$$i = \{g_n\}, n = 1, \dots, m.$$

де на інтервалі аналізу кількість КЧ дорівнює m . Тоді частоти гармонійної модуляції фази ВЧ сигналу, відбитого від іоносфери рівні

$$F_{fd} = (I^* - I(i))/\tau,$$

де τ – інтервал аналізу.

МОДЕЛІ МОДУЛЬОВАНОГО ІОНОСФЕРОЮ СИГНАЛУ

Для інтерпретації результатів експерименту розглянемо деякі моделі модульованого іоносферою відбитого сигналу при вертикальному доплерівському зондуванні. В [6] розглядалася модель двотонального фазомодульованого (ФМ) сигналу, де одну з модулюючих функцій можна вважати лінійною на інтервалі аналізу. Різномаяття хвильових процесів в іоносфері вимагає використання різних моделей сигналу для пояснення експериментальних даних. Розглянемо одномодовий амплітудно-фазомодульований (АФМ) сигнал у вигляді

$$A(t) = A_m [1 + M \cos(\Omega_0 t + \Phi_0)] \cos((\omega + \omega_d)t + \varphi_0 + \varphi(t)). \quad (4)$$

Фазова модуляція описується функцією

$$\varphi(t) = m_1 \cos(\Omega_1 t + \Phi_1).$$

Тут m_1 – індекс модуляції. Будемо вважати, що частота тону квазістаціонарна, тобто постійна на інтервалі аналізу. Складемо іоносферний сигнал з сигналом опорного гетеродину

$$u(t) = U_m \cos(\omega - \omega_s)t,$$

де ω_s – мале зміщення частоти.

Будемо вважати, що

$$m_1 \Omega_1, m_1 (\omega_s + \omega_d) \gg M \Omega_0,$$

тобто амплітуда повільно змінюється в часі у порівнянні з фазою. Тоді, вважаючи, що індекс m_1 малий, отримаємо для биття опорного сигналу з іоносферним сигналом наступне співвідношення:

$$A(t) = A_m U_m [1 + M \cos(\Omega_0 t + \Phi_0)] \{ \cos(\omega' t + \varphi_0) - m_1 \sin((\omega' + \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_1) - m_1 \sin((\omega' - \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_1) \}, \quad (5)$$

де

$$\omega' = \omega_s + \omega_d.$$

З (5) випливає, що биття є суперпозицією амплітудно-модульованих коливань з частотами

$$\omega', \omega' + \Omega_1, \omega' - \Omega_1.$$

Умова (5) краще виконується для верхньої бічної частоти. Формула для спектру АФМ сигналу (4) в більш загальному вигляді:

$$\begin{aligned} A(t) = & A_m U_m \{ \cos(\omega' t + \varphi_0) + \frac{M}{2} [\cos((\omega' + \Omega_0)t + \varphi_0 + \Phi_0) + \\ & + \cos((\omega' - \Omega_0)t + \varphi_0 - \Phi_0)] - \frac{m_1}{2} [\sin((\omega' + \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_1) + \\ & + \sin((\omega' - \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_1)] - \frac{m_1 M}{4} [\sin((\omega' + \Omega_0 - \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_0 - \Phi_1) + \\ & + \sin((\omega' - \Omega_0 - \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_0 - \Phi_1) + \sin((\omega' - \Omega_0 + \Omega_1)t + \varphi_0 - \Phi_0 + \Phi_1) + \\ & + \sin((\omega' + \Omega_0 + \Omega_1)t + \varphi_0 + \Phi_0 + \Phi_1)] \}. \end{aligned}$$

Розглянемо ФМ сигнал з однотональною фазовою модуляцією. Виходячи з загальної формули [3], отримаємо

$$A(t) = A_m \sum_{k=-1}^{k=1} J_k(m_1) \cos(\omega' + k \Omega_1)t,$$

де J_k – функція Бесселя k -ого порядку та $m_1 < 1.2$.

Спектр сигналу має три максимуми на частотах

$$\omega', \omega' + \Omega, \omega' - \Omega.$$

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

У роботі, в якості прикладу, проведено детальний аналіз результатів доплерівського зондування іоносфери 23 березня та 24 березня 2010 р. під час проходження ранкового сонячного термінатора. Динамічні спектри досліджувалися по всій смузі частот системи обробки ВЧ радару 0–10 Гц при частоті квантування 10 Гц. Для спостереження складових спектрів далеко від головного максимуму спектр в його околі придушувався ковзним вікном із центральною частотою, рівною частоті головного максимуму спектра. Розглянуто послідовність динамічних спектрів (спектрограми). Спектри розподілено на дві частини: в околі головного максимуму та поза ним. Ширина смуги придушення дорівнює 1.2 Гц. Частота випромінюваного сигналу дорівнює 4.2 МГц, зміщення частоти випромінюваного сигналу в порівнянні з опорною частотою дорівнює 2.4 Гц. Інтервал аналізу ДС – 40 с. Система обробки дозволяє стробувати сигнал за часом. Частота сигналу – 4.2 МГц. Проведено пошук локальних ДС, у яких спостерігаються короткоперіодні варіації з частотою в діапазоні геомагнітних пульсацій Pc1 (1–5 Гц). Виділимо для дослідження часовий інтервал в околі моменту максимуму ДЗЧ.

Аналіз ДС показав, що для окремих спектрів бічні максимуми розташовані симетрично щодо головного максимуму. У цьому випадку поява бічних максимумів можна пояснити комбінаційними частотами [1], викликаними іоносферними збуреннями. На панелях 2a–2d показано нормовані спектри потужності биття з комбінаційними частотами, які відповідають частоті збурення 1.5 Гц, де цифрами 1 та 2 позначено амплітуди максимумів спектрів у зоні та поза зоною придушення. Іоносферні збурення з такою частотою спостерігаються поза зоною придушення протягом 12 хв. Можливо, що це одне й те ж тривале збурення. Збурення такої тривалості та частоти спостерігаються в геомагнітних пульсаціях Pc1 [2]. На панелях 2e та 2f наведено локальні спектри, в яких чітко проглядаються комбінаційні частоти. На панелі 2e наведено локальний спектр поза зоною придушення для 24 березня 2010 р., де комбінаційні частоти відповідають збуренню з частотою 2.5 Гц. На панелі 2f наведено спектр поза зоною придушення для того ж дня. Час обрано при максимумі доплерівського зсуву частоти (ДЗЧ). Комбінаційні частоти відповідають частоті збурення 0.7 Гц. Послідовність ДС дозволяє оцінити тривалість збурення. В даному випадку тривалість збурення близько 1 хв. Спостерігалися і більш тривалі збурення. На Рис. 3 наведено спектрограму биття для експерименту 23 березня при проходженні ранкового сонячного термінатора. Розраховано динамічні спектри для інтервалу часу з нуля годин за місцевим часом до 7 годин. Наведено спектри поза зоною придушення, варіації частоти головного максимуму (суцільна крива) та нормовані варіації максимуму поза зоною придушення (вертикальні стовпчики вгору). Максимальне зміщення частоти досягається в зоні придушення о 05:20 LT, тобто значно пізніше часу сходу Сонця на іоносферних висотах. У Таблиці наведені часи сходу та заходу Сонця на різних висотах для м. Харків. Поза зоною придушення спостерігається тонка структура сигналу з лінійною зміною частоти. За часом появи такі збурення збігаються з максимумом варіацій ДЗЧ повного спектра. Поява таких максимумів може бути викликана виникненням багатопробності або нелінійністю фази сигналу на інтервалі аналізу. При цьому можуть спостерігатися максимуми на двох частотах симетричних щодо частоти головного максимуму. Варіації ДЗЧ головного максимуму відбуваються майже синхронно як 23 березня, так і 24 березня. Для обох днів максимум ДЗЧ спостерігається о 05:20 LT. На Рис. 3 поза зоною придушення спостерігаються варіації частоти максимумів. Характерною рисою цих варіацій є те, що вони зміщені за частотою та розташовані по обидва боки від варіацій ДЗЧ. Аналіз ДС показав, що для окремих спектрів бічні максимуми розташовані симетрично щодо головного максимуму. У цьому випадку появу бічних максимумів можна пояснити комбінаційними частотами [6], викликаними іоносферними збуреннями в діапазоні частот геомагнітних пульсацій Pc1. Зі спектрограми видно, що верхня гілка частково виходить за частоту Найквіста та проявляється у вигляді накладання частот.

При інтерпретації результатів слід відзначити, що геомагнітна обстановка під час проведення експерименту була спокійною.

Таблиця. Дані про схід та захід Сонця протягом проходження ранкового сонячного термінатора

Table. Sunrise and sunset data during the passage of the dawn terminator

Дата	Схід Сонця (час LT)		Захід Сонця (час LT)	
	0 км	150 км	150 км	0 км
23 березня 2010 р.	05:28	04:07	19:13	17:53
24 березня 2010 р.	05:26	04:05	19:15	17:55

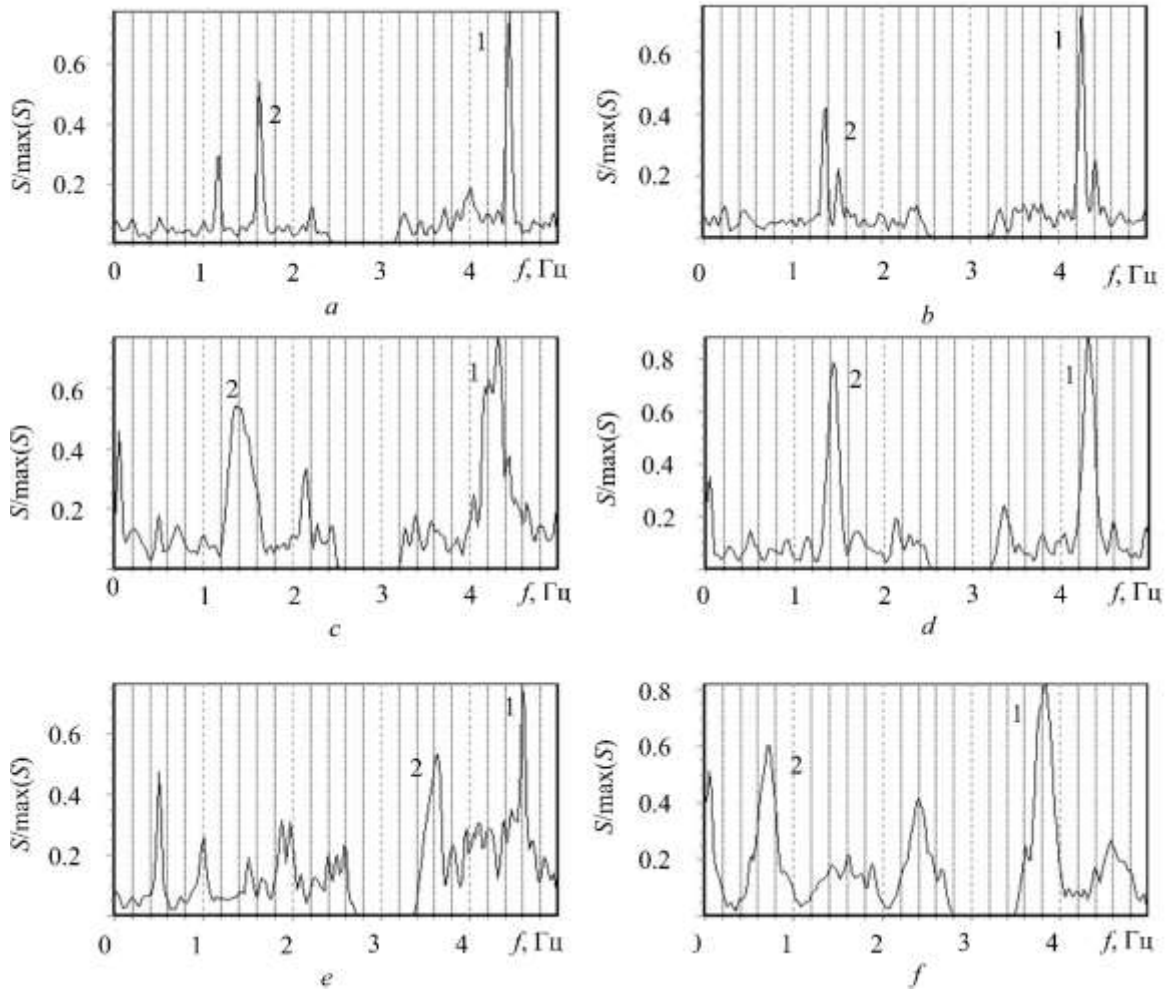


Рис. 2. Локальні динамічні нормовані спектри ВЧ сигналу за 24 березня 2010 року; інтервал аналізу – 40 с.

Fig. 2. Local normalized dynamic spectra of HF signals on March 24, 2010 determined for 40-s intervals of data

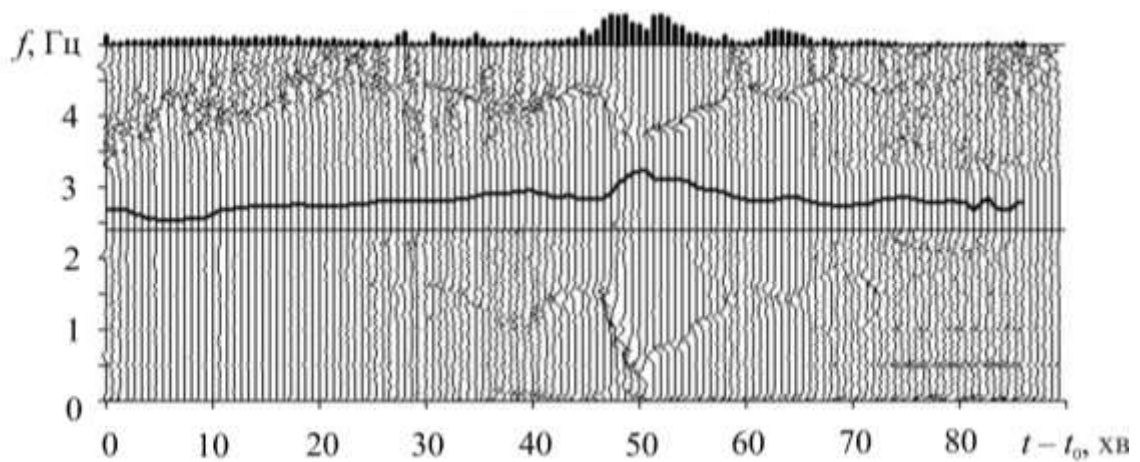


Рис. 3. Приклад спектрограми биття зонduючого сигналу, 23 березня 2010 р.

Fig. 3. Spectra of the beat signal between the reference signal and the probing signal modulated by ULF waves in the ionosphere for March 23, 2010.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У ході експерименту виявлено короткі збурення тривалістю близькою до інтервалу аналізу ~ 1 хв та довші ~ 10 хв. Тривалі збурення представляються спектрограмами, короткі – окремими спектрами. Короткі та тривалі збурення викликані, ймовірно, різними джерелами. Іоносферні збурення тривалістю порядку інтервалу аналізу спектра мають частоти 0.7, 1.5 і 2.5 Гц. Такі частоти лежать в діапазоні частот першої гармоніки спектральної резонансної системи ІАР. Тривалі збурення, ймовірно, пов'язані з модами магнітосферного резонатора. Частота заповнення хвильового пакета наростає лінійно, що спостерігається також в магнітограмах [11]. Швидкість зміни частоти складає близько 10^{-3} Гц/с.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Розроблено методику виявлення короткоперіодних іоносферних збурень у діапазоні 1–5 Гц за допомогою доплерівського ВЧ радару.
2. Виявлено короткі (~ 1 хв) та тривалі (більше 10 хв) іоносферні збурення в діапазоні 1–5 Гц. Для аналізу використовувалися окремі спектри та спектрограми биття ВЧ сигналу.
3. Виявлено тривалі короткоперіодні варіації спектру биття під час максимуму ДЗЧ. При цьому спостерігається помітне збільшення амплітуди биття, що може бути ознакою появи в ДС бічних максимумів.
4. Іоносферні збурення тривалістю близько інтервалу аналізу спектру ~ 40 с мають частоти 0.7, 1.5 і 2.5 Гц. Такі частоти лежать у діапазоні частот першої гармоніки спектральної резонансної системи ІАР.
5. Тривалі іоносферні збурення мають лінійно зростаючу частоту заповнення хвильового пакета. Швидкість зміни частоти близька до 10^{-3} Гц/с.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф. виконано в рамках проекту 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. та Пушина В. Ф. частково підтримана в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0119U002538).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alperovich LS, Fedorov EN. Hydromagnetic Waves in the Magnetosphere and the Ionosphere, Series: Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer, 2007. XXIV+426 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6637-5>
2. Модель космоса. Том I. Физические условия в космическом пространстве. М.: Книжный дом Университет (КДУ), 2007. 872 с.
3. Пилипенко ВА. Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых полей в околоземном пространстве, Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. ИФЗ им. О. Ю. Шмидта, ИКИ РАН, 2007. 241 с.
4. Гершман БН., Ерухимов ЛМ., Яшин ЮЯ Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
5. Pilipenko VA, Fedorov EN, Teramoto M, Yumoto K. The mechanism of mid-latitude Pi2 waves in the upper ionosphere as revealed by combined Doppler and magnetometer observations. Ann. Geophys. 2013;31:689–695. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-689-2013>
6. Пушин ВФ., Черногор ЛФ. Спектральный анализ биений опорного сигнала и отраженного от ионосферы ВЧ сигнала. Радиофизика и радиоастрономия. 2014;19(2):160–169. <https://doi.org/10.15407/rpra19.02.160>
7. Пушин ВФ., Черногор ЛФ. Обнаружение квазипериодических процессов в ионосфере в диапазоне акустико-гравитационных волн. Радиофизика и радиоастрономия. 2012;17(4):333–344. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/627>
8. Басаков СИ. Радиотехнические цепи и сигналы. Москва: Высшая школа, 2000. 462 с.
9. Афраймович ЭЛ. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.
10. Obayashi T. Hydromagnetic whistlers. J. Geophys. Res. 1965;70(5):1069–1078.

<https://doi.org/10.1029/JZ070i005p01069>

11. Akasofu S.-I., Chapman S. Solar–Terrestrial Physics. London: Oxford U.P., 1972. XXIII, 901 p.

REFERENCES

1. Alperovich LS, Fedorov EN. Hydromagnetic Waves in the Magnetosphere and the Ionosphere, Series: Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer, 2007. XXIV+426 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6637-5>
2. The Space Model. Volume 1. Physical Conditions in Space. Moscow, Russia: KDU, 2007. 872 p. [In Russian].
3. Pilipenko VA. Resonance Effects of ULF Wave Fields in the Near-Earth Space, Extended Abstract of Doctoral (Phys.–Math.) Dissertation. Moscow: Schmidt IPhE, IRS RAN, 2007, 241 p. [In Russian].
4. Gershman BN, Eruhimov LM, Yashin YuYa. Wave of the phenomenon in an ionosphere and space plasma. Moscow: Science, 1984. 392 p. [In Russian].
5. Pilipenko VA, Fedorov EN, Teramoto M, Yumoto K. The mechanism of mid-latitude Pi2 waves in the upper ionosphere as revealed by combined Doppler and magnetometer observations. Ann. Geophys. 2013;31:689–695. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-689-2013>
6. Pushin VF, Chernogor LF. Spectral Analysis of Reference Signal and of HF Signal Reflected from the Ionosphere Beats. Radio Phys. Radio Astron. 2014;19(2):160–169 [In Russian]. <https://doi.org/10.15407/rpra19.02.160>
7. Pushin VF, Chernogor LF. Detecting of Quasi-Periodic Oscillations in the Ionosphere within the Acoustic Gravity Waves Range. Radio Phys. Radio Astron. 2012;17(4):333–343 [In Russian]. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/627>
8. Baskakov SI. Radiotechnical Circuits and Signals. Moscow, Russia: Vysshaya shkola, 2000. 462 p. [In Russian].
9. Afraimovich EL. Interferential Methods of Ionosphere Sounding. Moscow: Nauka; 1982. 198 p. [In Russian].
10. Obayashi T. Hydromagnetic whistlers. J. Geophys. Res. 1965;70(5):1069–1078. <https://doi.org/10.1029/JZ070i005p01069>
11. Akasofu S.-I., Chapman S. Solar–Terrestrial Physics. London: Oxford U.P., 1972. XXIII, 901 p.

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06>

УДК 550.385.37: 550.388

СТАТИСТИКА ГЕОМАГНІТНИХ БУР ПРОТЯГОМ ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ (2009 – 2020 рр.)

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб, 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 17 листопада 2020 р.

Актуальність. Атмосфера та геокосмос широко використовується в якості радіоканалу при розв'язанні задач радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування навколоземного середовища з поверхні планети або Землі з космосу. Параметри атмосферно-космічного радіоканалу визначаються станом атмосферно-космічної погоди, яка формується, в основному, нестационарними процесами на Сонці (сонячними бурями) та частково високоенергетичними процесами на Землі та в атмосфері. До найбільш сильних збурень атмосферно-космічного радіоканалу призводять геокосмічні бурі. Важливо, що ці бурі відрізняються великою різноманітністю, немає двох однакових бур. У бур є спільні риси, також є індивідуальні особливості. Ті та інші у теперішній час вивчені недостатньо. Їх вивчення є актуальним завданням космічної геофізики та космічної радіофізики. Для виявлення загальних закономірностей, доцільним є статистичний підхід до аналізу великої кількості бур.

Метою цієї роботи є статистичний аналіз параметрів сонячного вітру та геомагнітного поля протягом 24-го циклу сонячної активності (2009 – 2020 рр.).

Методи і методологія. В якості вихідних даних обрані параметри збуреного сонячного вітру (концентрація n_{sw} , швидкість V_{sw} та температура T_{sw} частинок), збурені значення B_y - та B_z -компонент міжпланетного магнітного поля, що є причиною магнітних бур на Землі, а також індекси геомагнітної активності (AE , D_{st} та K_p). У даній роботі розглянуті геомагнітні бурі з $K_p \geq 5$ або $G1$, $G2$, $G3$ та $G4$. Всього було 153 бурі з $K_p \geq 5$. Проаналізовані статистичні ряди максимальних значень n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y та B_z , індексів AE , D_{st} та K_p , а також мінімальні значення B_z -компоненти та індексу D_{st} .

Результати. Визначені основні статистичні характеристики параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля для 153 подій, що мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності.

Висновки. Геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж протягом 23-го циклу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: геокосмічна буря, магнітна буря, параметри сонячного вітру, параметри міжпланетного магнітного поля, індекси геомагнітної активності, статистичні характеристики.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF GEOMAGNETIC STORM ACTIVITY DURING SOLAR CYCLE 24, 2009–2020

L. F. Chernogor, M. Yu. Holub, Y. Luo

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

Urgency. The atmosphere and geospace are widely used as a radio channel in solving problems of radar, radio navigation, direction finding, radio communication, radio astronomy, and the remote sensing of the Earth from space or the near-earth environment from the surface of the planet. The parameters of the atmospheric-space radio channel are determined by the state of tropospheric and space weather, which is formed mainly by non-stationary processes on the Sun (solar storms) and partly by high-energy processes on the Earth and in the atmosphere. Geospace storms give rise to the strongest disturbances of the atmospheric-space radio channel, and it is important to note that these storms are diverse, so that no two storms are alike. At the same time, storms have both similar and individual features. Currently, there is insufficient knowledge about both of these features, and their study remains an urgent task of space geophysics and space radio physics. In particular, the identification of general patterns is advisable by performing a statistical analysis of a large number of storms.

The aim of this work is to statistically analyze the parameters of the solar wind and geomagnetic field during the Solar Cycle 24 activity (2009–2020).

Methods and Methodology. The parameters of the disturbed solar wind (number density n_{sw} , velocity V_{sw} , and temperature T_{sw}), the disturbed values of the B_y - and B_z -components of the interplanetary magnetic field, which is the cause of magnetic storms on Earth, as well as the indices of geomagnetic activity (AE , D_{st} and K_p) are selected as source input to the study. In this paper, geomagnetic storms with $K_p \geq 5$ or $G1$, $G2$, $G3$, and $G4$ geomagnetic storms are considered. In total, there were 153 storms with $K_p \geq 5$. The time series of the n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} maximum values, of the B_y - and B_z -components, and of the AE , D_{st} and K_p indices, as well as of the B_z -component and the D_{st} index minimum values have been analyzed.

Results. The main statistical characteristics of the parameters of the solar wind, interplanetary magnetic field, and of the geomagnetic field have been determined for 153 events that took place during Solar Cycle 24.

Conclusions. The geomagnetic situation during Solar Cycle 24 was calmer than during Solar Cycle 23.

KEY WORDS: geospace storm, magnetic storm, solar wind parameters, interplanetary magnetic field parameters, geomagnetic activity indices, statistical characteristics.

СТАТИСТИКА ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (2009 – 2020 гг.)

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб, Y. Luo

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

Актуальность. Атмосфера и геокосмос широко используется в качестве радиоканала при решении задач радиосвязи, радионавигации, радиолокации, радиопеленгации, радиоастрономии и дистанционного радиозондирования околоземной среды из поверхности планеты либо Земли из космоса. Параметры атмосферно-космического радиоканала определяются состоянием атмосферно-космической погоды, которая формируется, в основном, нестационарными процессами на Солнце (солнечными бурями) и частично высокоэнергетическими процессами на Земле и в атмосфере. К наиболее сильным возмущениям атмосферно-космического радиоканала приводят геокосмические бури. Важно, что эти бури отличаются большим разнообразием, нет двух одинаковых бурь. У бурь есть общие черты и есть индивидуальные особенности. И те, и другие в настоящее время изучены недостаточно. Их изучение является актуальной задачей космической геофизики и космической радиофизики. Для выявления общих закономерностей целесообразен статистический подход к анализу большого количества бурь.

Целью настоящей работы является статистический анализ параметров солнечного ветра и геомагнитного поля в течение 24 цикла солнечной активности (2009 – 2020 гг.).

Методы и методология. В качестве исходных данных выбраны параметры возмущенного солнечного ветра (концентрация n_{sw} , скорость V_{sw} и температура T_{sw} частиц), возмущенные значения B_y - и B_z -компонент межпланетного магнитного поля, являющегося причиной магнитных бурь на Земле, а также индексы геомагнитной активности (AE , D_{st} и K_p). В данной работе рассмотрены геомагнитные бури с $K_p \geq 5$ или $G1$, $G2$, $G3$ и $G4$. Всего было 153 бури с $K_p \geq 5$. Проанализированы статистические ряды максимальных значений n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y - и B_z -индексов AE , D_{st} и K_p , а также минимальные значения B_z -компоненты и индекса D_{st} .

Результаты. Определены основные статистические характеристики параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля для 153 событий, имевших место в течение 24-го цикла солнечной активности.

Выводы. Геомагнитная обстановка в течение 24-го цикла солнечной активности была более спокойной, чем в течение 23-го цикла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геокосмическая буря, магнитная буря, параметры солнечного ветра, параметры межпланетного магнитного поля, индексы геомагнитной активности, статистические характеристики.

ВСТУП

Атмосфера та геокосмос широко використовується в якості радіоканалу при розв'язанні задач радіозв'язку, радіоастрономії, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування навколоземного середовища з поверхні планети або Землі з космосу (див., наприклад [1 – 7]).

Параметри атмосферно-космічного радіоканалу визначаються станом атмосферно-космічної погоди, яка формується, в основному, нестационарними процесами на Сонці (сонячними бурями) та частково високоенергетичними процесами на Землі та в атмосфері [8 – 15]. До найбільш сильних збурень атмосферно-космічного радіоканалу призводять геокосмічні бурі. Геокосмічні бурі зачіпають всі підсистеми в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля. При цьому виникають сильні збурення геомагнітного поля (магнітна буря), атмосфери (атмосферна буря), іоносфери (іоносферна буря) та електричного поля атмосферно – іоносферного – магнітосферного походження (електрична буря) [16]. На поширення радіохвиль різних діапазонів найсильніше впливають іоносферні бурі та в меншій мірі, атмосферні бурі. Протягом іоносферних збурень концентрація електронів може збільшитися в 2 – 3 рази на F-області іоносфери або на 2 – 3 порядки в D-області іоносфери [17 – 21]. Все це призводить до значного ослаблення радіохвиль.

Під час негативних іоносферних збурень концентрація електронів у F-області іоносфери, навпаки, може зменшитися в 5 – 10 разів [17 – 21]. При цьому частотна ємність іоносферного радіоканалу значно зменшується аж до повної втрати для ВЧ діапазону (3 – 30 МГц). Крім зміни регулярних параметрів, в іоносфері під час бур може істотно змінитися її неоднорідна структура, яка веде до розсіяння і ослаблення радіохвиль в широкому діапазоні частот. Іоносферні бурі супроводжуються магнітними бурями та навпаки, магнітні бурі супроводжуються іоносферними бурями. Важливо, що ці бурі відрізняються великою різноманітністю, немає двох однакових бур [16]. У бур є спільні риси, також є

індивідуальні особливості. Ці риси у теперішній час вивчені недостатньо [22 – 27]. Їх вивчення є актуальним завданням космічної геофізики та космічної радіофізики. Для виявлення загальних закономірностей доцільним є статистичний підхід до аналізу великої кількості бур.

Морфологія іоносферних збурень вивчалася у [28].

Статистичний аналіз іоносферних збурень за два цикли сонячної активності виконаний у роботі [29], а магнітних бур – у роботах [29 – 31].

У роботі [30] виконано аналіз найбільш сильних геомагнітних бур за період з 1844 по 1993 рр. Робота [31] присвячена аналізу геомагнітних бур, що мали місце в 1932 – 2009 рр. Статистика магнітних та іоносферних бур обговорюється в [32]. В цій роботі введено нові індекси, що описують інтенсивність геокосмічних, магнітних та іоносферних бур.

Цікавим є статистичний аналіз варіацій параметрів сонячного вітру та їх наслідків – геомагнітних бур – за останній цикл сонячної активності.

Метою цієї роботи є статистичний аналіз параметрів сонячного вітру та геомагнітного поля протягом 24-го циклу сонячної активності (2009 – 2020 рр.).

ВИХІДНІ ДАНІ

В якості вихідних даних обрані параметри збуреного сонячного вітру (концентрація n_{sw} , швидкість V_{sw} та температура T_{sw} частинок), збурені значення B_y - та B_z -компонент міжпланетного магнітного поля, що є причиною магнітних бур на Землі, а також індекси геомагнітної активності (AE , D_{st} та K_p). [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Як відомо, індекс AE характеризує магнітну активність у полюсів планети (у авроральній області). Індекс D_{st} описує посилення кільцевого струму, що свідчить про геомагнітну активність у екваторіальній області. Індекс K_p , інакше планетарний індекс, який має логарифмічну шкалу, описує геомагнітну активність, усереднену у межах планети за даними 13 магнітних обсерваторій, розміщених між $\pm 44^\circ$ та $\pm 60^\circ$ геомагнітної широти. Іноді сила магнітних бур характеризується G -індексом, де $G = K_p - 4$. При $K_p = 5$ індекс $G1$ відповідає слабкій бурі, при $K_p = K_{pmax} = 9$ маємо $G5$, що відповідає екстремально сильній бурі.

У даній роботі розглянуті геомагнітні бурі з $K_p \geq 5$ або $G1$, $G2$, $G3$ та $G4$. Всього було 153 бурі з $K_p \geq 5$. Проаналізовані статистичні ряди максимальних значень n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y - та B_z -індексів AE , D_{st} та K_p , а також мінімальні значення B_z -компоненти та індексу D_{st} . Наявність негативних значень B_z -компоненти свідчить про настання геомагнітної бурі. Початку бурі відповідають значення $D_{stmax} > 0$. Мінімальні негативні значення D_{st} , точніше їх скориговані значення D_{st} , описують силу магнітної бурі [16]. При D_{st} , рівним 11 – 20, 21 – 40, 41 – 70, 71 – 120, 121 – 200, 201 – 300, 301 – 500, 501 – 1000, 1001 – 2000 нТл слід очікувати бур, які є слабкою, дуже слабкою, досить помірною, помірною, сильною, дуже сильною, надсильною, вкрай сильною, виключно сильною та екстремальною відповідно.

Стан космічної погоди протягом двох надсильних геомагнітних бур, що мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності, ілюструє Рис. 1 та Рис. 2. Для першої бурі $n_{swmax} = 41.7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$; $V_{swmax} = 742 \text{ км/с}$; $T_{swmax} = 11.2 \cdot 10^5 \text{ К}$; $p_{swmax} = 30.61 \text{ нТл}$; $B_{zmin} = -26.3 \text{ нТл}$; $B_{zmax} = 16.1 \text{ нТл}$; $B_{ymin} = -11.4 \text{ нТл}$; $B_{ymax} = 23.5 \text{ нТл}$; $\epsilon_{Amax} = 285.71 \text{ ГДж/с}$; $AE_{max} = 1636 \text{ нТл}$; $K_{pmax} = 8.3$; $D_{stmin} = -204 \text{ нТл}$; $D_{stmax} = 35 \text{ нТл}$. Для другої бурі $n_{swmax} = 13.9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$; $V_{swmax} = 817 \text{ км/с}$; $T_{swmax} = 33.8 \cdot 10^5 \text{ К}$; $p_{swmax} = 7.3 \text{ нТл}$; $B_{zmin} = -24.2 \text{ нТл}$; $B_{zmax} = 10.4 \text{ нТл}$; $B_{ymin} = -10.7 \text{ нТл}$; $B_{ymax} = 9.5 \text{ нТл}$; $\epsilon_{Amax} = 191.82 \text{ ГДж/с}$; $AE_{max} = 1442 \text{ нТл}$; $K_{pmax} = 8.3$; $D_{stmin} = -142 \text{ нТл}$; $D_{stmax} = 32 \text{ нТл}$.

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Спочатку за період 2009 – 2020 рр. будувалися статистичні ряди для максимальних значень кожного параметра p (p_{min} до p_{max}). На підставі цих рядів створювалися гістограми, які в тих випадках, де це доцільно, доповнювалися аналітичними законами розподілу випадкових значень p . Далі обчислювалися середні значення \bar{p} та середньоквадратичне відхилення σ , а також середньоквадратичне відхилення середнього значення $\sigma_p = \sigma / \sqrt{N}$, де N – число відліків.

Результати обчислень статистичних характеристик наведені в Таблиці 3. Таблиці видно, що найбільш ймовірні значення параметрів наступні: $n_{swmax} = (32.0 \pm 1.4) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, $V_{swmax} = 617.3 \pm 7.3 \text{ км/с}$, $T_{swmax} = (4.8 \pm 0.3) \cdot 10^5 \text{ К}$, $B_{ymax} = 10.42 \pm 0.41$, $B_{zmin} = -10.7 \pm 0.4 \text{ нТл}$, $AE_{max} = 1095.0 \pm 21.5 \text{ нТл}$, $D_{stmin} = -(69.5 \pm 2.8) \text{ нТл}$, $D_{stmax} = 20.7 \pm 1.1 \text{ нТл}$ і $K_{pmax} = 5.76 \pm 0.06$. Як видно, похибка оцінки \bar{p} зазвичай не перевищує 1–6 %.

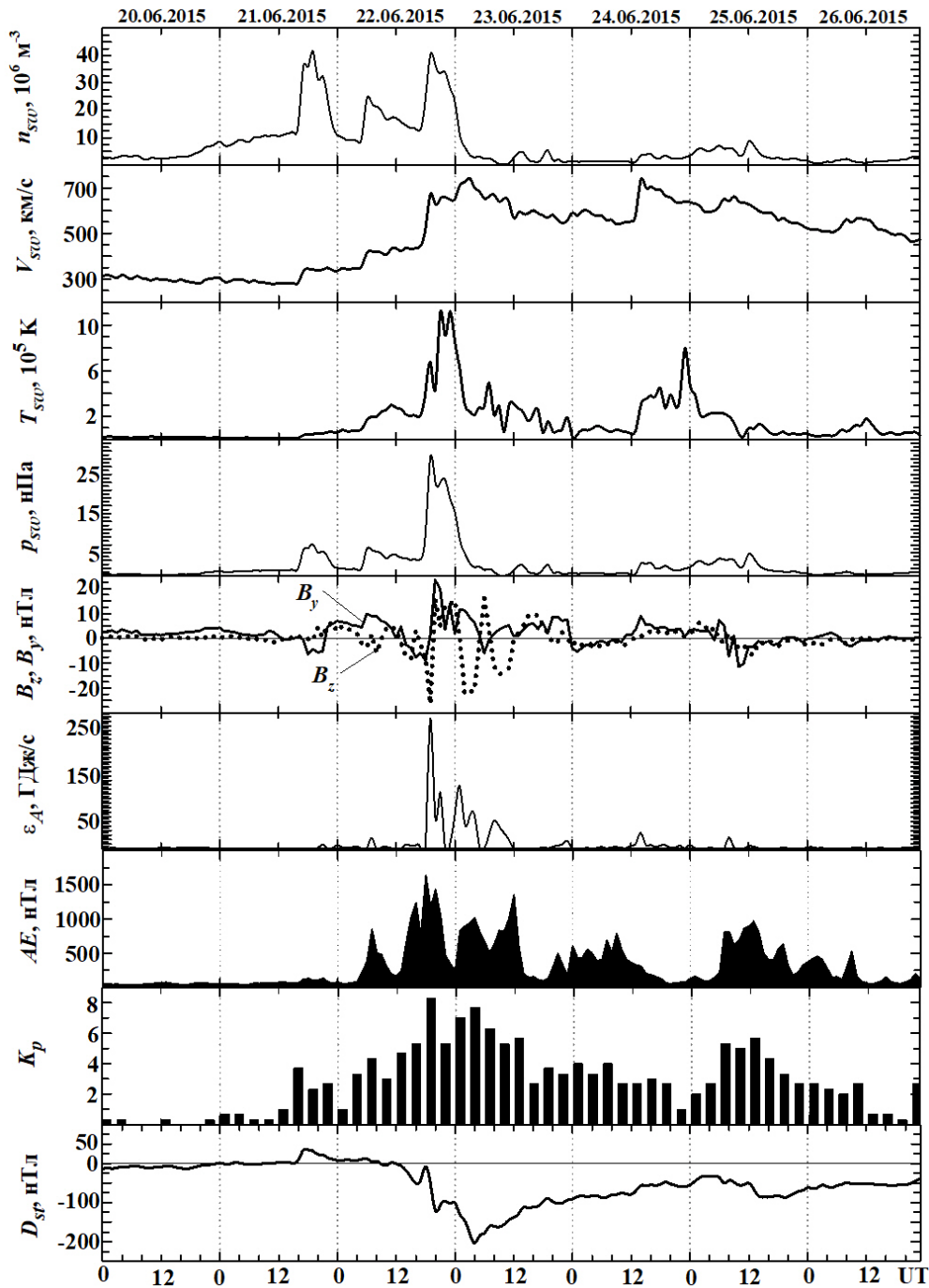


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряних компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE -індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 20 – 26 червень 2015 р. Дати вказані уздовж осі абсцис.

Fig. 1. UT variations in the solar wind parameters: measured concentration, n_{sw} , of particles, temperature T_{sw} , radial velocity V_{sw} , calculated dynamic pressure p_{sw} , measured B_z and B_y components of the interplanetary magnetic field; calculated values of the energy, ϵ_A , transferred from the solar wind into the Earth's magnetosphere per unit time, AE -index, K_p -index, and D_{st} -index (retrieved from <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) for June 20 – 26, 2015 period. Dates are indicated along the upper abscissa.

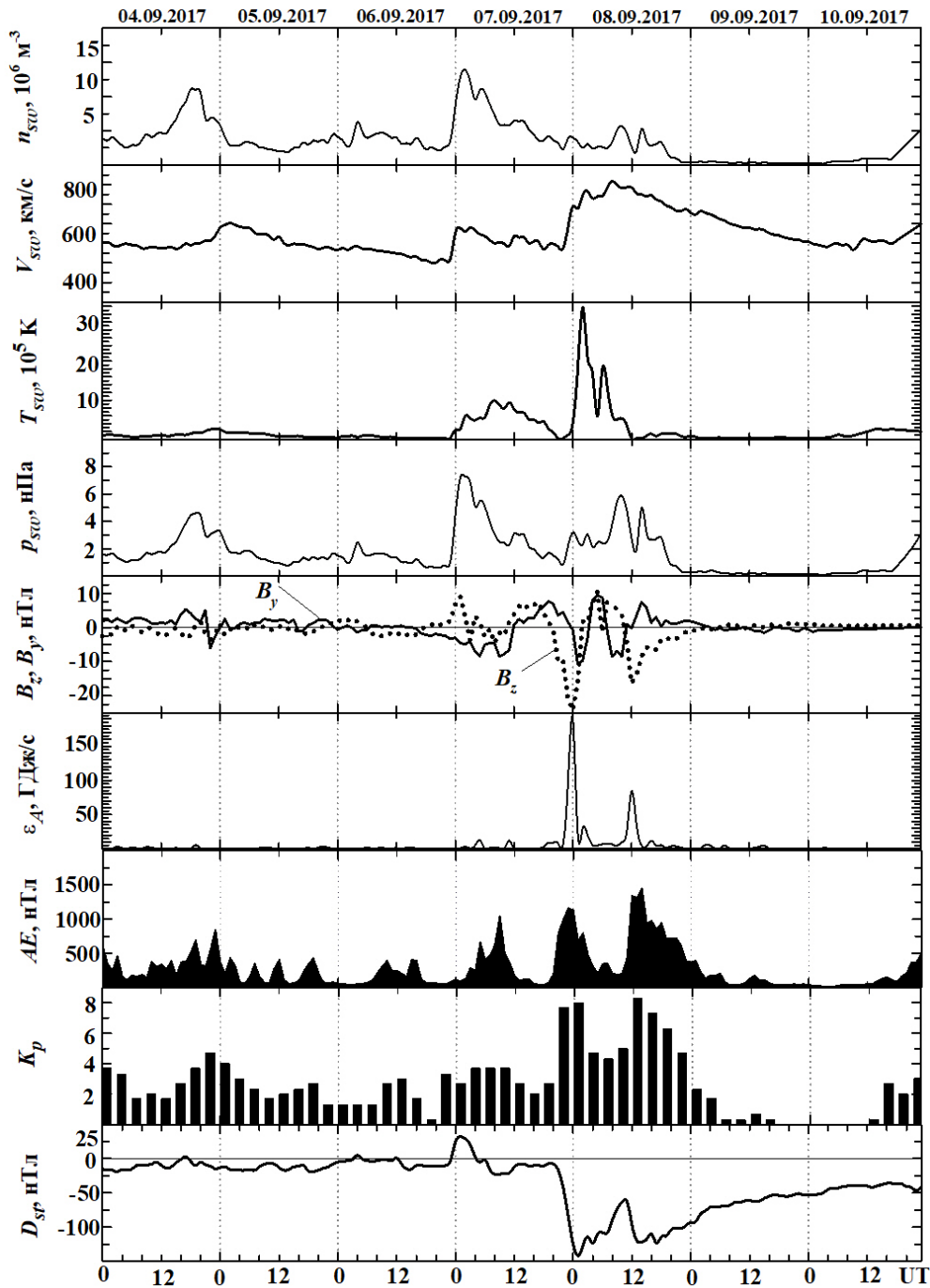
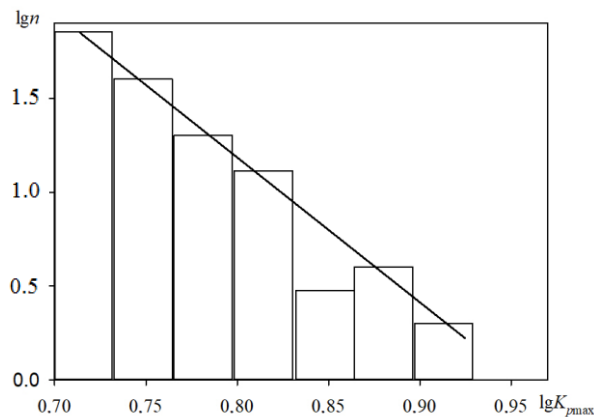


Рис. 2. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряних компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE -індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 4 – 10 вересня 2017 р. Дати вказані уздовж осі абсцис.

Fig. 2. UT variations in the solar wind parameters: measured concentration, n_{sw} , of particles, temperature T_{sw} , radial velocity V_{sw} , calculated dynamic pressure p_{sw} , measured B_z and B_y components of the interplanetary magnetic field; calculated values of the energy, ϵ_A , transferred from the solar wind into the Earth's magnetosphere per unit time, AE -index, K_p -index, and D_{st} -index (retrieved from <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) for September 4 – 10, 2017 period. Dates are indicated along the upper abscissa.

Таблиця. Статистичні характеристики основних параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітного поля

	n_{swmax}	V_{swmax}	T_{swmax}	B_{ymax}	B_{zmin}	D_{smin}	D_{smax}	AE_{max}	K_{pmax}
N	153	153	153	153	153	153	142	136	153
\bar{p}	31.99	617.25	4.81	10.42	-10.73	-69.52	20.68	1094.89	5.76
σ	17.70	89.95	3.58	5.13	4.29	34.57	12.59	250.63	0.75
$\sigma_{\bar{p}}$	1.43	7.27	0.29	0.41	0.35	2.79	1.06	21.49	0.06
$\sigma_{\bar{p}} / \bar{p}$	0.04	0.01	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.01	0.01

Рис. 3. Гістограма для $\lg K_{pmax}$. Прямая лінія – регресія (1).Fig. 3. Histogram for $\lg K_{pmax}$. Straight line is a regression (1).

Приклад гістограми для $\lg K_{pmax}$ наведено на Рис. 3. З Рис. 3 видно, що при збільшенні $\lg K_{pmax}$ логарифм числа подій досить швидко убуває. Отримана наступна регресія:

$$\lg n \approx -8.13 \lg K_{pmax} + 7.65 \quad (1)$$

Якщо ця регресія справедлива також для $K_{pmax} > 8.3$, то при K_{pmax} , рівному 9, 10 и 11 маємо число подій за цикл сонячної активності, що дорівнює 0.78, 0.33 и 0.15. Тоді середній інтервал часу Δt між магнітними бурями з цими K_{pmax} становить близько 15, 36 та 80 років. Очевидно, що значення Δt сильно занижені. Це означає, що співвідношення (1) можна застосувати при $K_{pmax} < 9$.

Гістограма для $\lg K_{pmax}$ може бути апроксимована лінійним законом, а для K_{pmax} – степеневим. Гістограма для V_{sw} апроксимована нормальним законом з $\overline{V_{sw}} \approx 617$ км/с та $\sigma \approx 90$ км/с. Інші гістограми можуть бути апроксимовані законом Релея.

ОБГОВОРЕННЯ

У роботі проведено статистичний аналіз параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітної активності протягом 24-го циклу сонячної активності. Загальна кількість бур з $K_{pmax} \geq 5$ склало 153. Досить велика статистика дозволила надійно оцінити значення \bar{p} , σ та σ_p .

Число бур при збільшенні K_{pmax} , як і слід було очікувати, швидко зменшувалося. Тільки для двох бур $K_{pmax} = 8.3$. Значення $D_{smin} \approx -223$ нТл 17 березня 2015 р. та $D_{smin} = -204$ нТл 23 червня 2015 р. У той самий час протягом 23-го циклу сонячної активності спостерігалось три бурі зі значно меншими значеннями D_{smin} , а саме -383 нТл (30 жовтня 2003 р.), -471 нТл (20 листопада 2003 р.) та -383 нТл (8 листопада 2004 р.).

Таким чином, геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж в 23-му циклі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Визначено основні статистичні характеристики параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля для 153 подій магнітних бур з $K_{pmax} \geq 5$ мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності.
2. Геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж в 23-му циклі.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф., Голуб М. Ю. та Yiyang Luo виконано в рамках проекту 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. частково підтримана в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0119U002538).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

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

M. Yu. Holub  <https://orcid.org/0000-0001-7900-1484>

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Goodman JM. Space Weather and Telecommunications. Springer, 2005: XX, 382 p.
2. Благовещенский ДВ. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Ч. 1. (обзор). Геомагнетизм и аэрономия, 2013, 53 (3): 291–307.
3. Благовещенский ДВ. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на распространение КВ (обзор). Геомагнетизм и аэрономия, 2013, 53 (4): 435–450.
4. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. Impact of geomagnetic storm of September 7 – 8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. Advances in Space Research, 2019, 63 (1): 239 – 256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
5. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. Geomagnetism and Aeronomy. 2021;61(1):73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
6. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Luo Y., Rozumenko VT., Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. Advances in Space Research. 2020;66(2): 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
7. Guo Q., Chernogor LF. Polar Communications. In book: Cui W., Fu S., Hu Z. (eds) Encyclopedia of Ocean Engineering. Springer, Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6963-5_112-1
8. Freeman JW. Storms in Space. Cambridge University Press, London, New York, 2001.
9. Space Weather (Geophysical Monograph). In ed. Song P., Singer H., Siscoe G. Union, Washington D.C., 2001. ISBN 0-87590-984-1.
10. Benestad RE. Solar activity and Earth's climate. Springer-Praxis. 2002: 287
11. Carlowicz MJ., Lopez RE. Storms from the Sun. – Joseph Henry Press, Washington DC, 2002. ISBN 0-309-07642-0.
12. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella SM. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. Annales Geophys. 2002;20(7):1081–1104.
13. Владимирский БМ., Темурьянц НА., Мартынюк ВС. Космическая погода и наша жизнь. Фрязино: Век 2, 2004:224 с.
14. Bothmer V., Daglis I. Space Weather: Physics and Effects. Springer-Verlag New York, 2006. ISBN 3-642-06289-X.
15. Lilensten J., Bornarel J. Space Weather. Environment and Societies. Springer, 2006. ISBN 978-1-4020-4331-4.
16. Черногор ЛФ., Домнин ИФ. Физика геокосмических бурь: Монография. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014;408 с.
17. Данилов АД., Морозова ЛД. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор). Геомагнетизм и аэрономия. 1985;25(5):705–721.

18. Prölss GW. Ionospheric F-region storms. Handbook of atmospheric electrodynamics 2,1995;2:195–248.
19. Buonsanto M. Ionospheric storms – A review. Space Science Reviews, 1999;88(3–4):563–601. <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
20. Danilov AD., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. Int. J. Geomag. Aeron, 2001;2(3):209–224.
21. Данилов АД. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор). Гелиогеофизические исследования. 2013;5:1–33.
22. Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešová D., Hernández-Pajares M. November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. In: Annales Geophys. 2005;23:3027–3034.
23. Pirog OM., Polekh NM., Zhrebtsov GA., Smirnov VF., Shi J., Wang X. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. Adv. Space Res, 2006;37(5):1075–1080.
24. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. J. Geophys. Res. 2016;121(1):727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
25. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zhrebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. Advances in Space Research. 2017;60(11):2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
26. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2015 Apr;120(4):3175–3186. <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>
27. Кацко СВ., Смельянов ЛЯ., Черногор ЛФ. Особливості іоносферної бурі 21–24 грудня 2016 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021;37(2):57–74. <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/kfnt/2021-37/kfnt-2021-37-2-04-katsko.pdf>
28. Matsushita SA study of the morphology of ionospheric storms. Journal of Geophysical Research. 1959;64(3):305–321. <https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305>
29. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu JY. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. J. Geophys. Res. 2011;116(A11328). <https://doi.org/10.1029/2011JA017042>
30. Willis DM., Stevens PR., Crothers SR. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 – 1993). Ann. Geophys. 1997;15(6):719–728. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0719-5>
31. Yakovchouk OS., Mursula K., Holappa L., Veselovsky IS., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932–2009. Geophys. Res. 2012;117(A3). <https://doi.org/10.1029/2011JA017093>
32. Черногор ЛФ. Фізика геокоsmічних бур. Космічна наука і технологія. 2021;27(1(128)):3–77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>

REFERENCES

1. Goodman JM. Space Weather and Telecommunications. Springer, 2005.
2. Blagoveshchenskii DV. Effect of Geomagnetic Storms (Substorms) on the Ionosphere: 1. A Review. Geomagnetism and Aeronomy. 2013;53(3):275–290. <https://doi.org/10.1134/S0016793213030031>
3. Blagoveshchenskii DV. Effect of magnetic storms (substorms) on HF propagation: A review. Geomagn. Aeron. 2013;53(4):409–423. <https://doi.org/10.1134/S0016793213040038>
4. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. Impact of geomagnetic storm of September 7 – 8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. Advances in Space Research. 2019;63(1):239–256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
5. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. Geomagnetism and Aeronomy. 2021;61(1):73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
6. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Luo Y., Rozumenko VT., Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. Advances in Space Research. 2020;66(2):226–242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
7. Guo Q., Chernogor LF. Polar Communications. In book: Cui W., Fu S., Hu Z. (eds) Encyclopedia of Ocean Engineering. Springer, Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6963-5_112-1
8. Freeman JW. Storms in Space. Cambridge University Press, London, New York, 2001.
9. Space Weather (Geophysical Monograph). In ed. Song P., Singer H., Siscoe G. Union, Washington D.C., 2001. ISBN 0-87590-984-1.
10. Benestad RE. Solar activity and Earth's climate. Springer-Praxis. 2002: 287 p.

11. Carlowicz MJ., Lopez RE. Storms from the Sun. – Joseph Henry Press, Washington DC, 2002. ISBN 0-309-07642-0.
12. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella SM. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Annales Geophys.* 2002;20(7):1081–1104.
13. Vladimirovsky BM., Temuryants NA., Martynuk VS. Cosmic Weather and our life. Fryazino, 2004; 224 p. [in Russian].
14. Bothmer V., Daglis I. Space Weather: Physics and Effects. Springer-Verlag New York, 2006. ISBN 3-642-06289-X.
15. Lilensten J., Bornarel J. Space Weather. Environment and Societies. Springer, 2006. ISBN 978-1-4020-4331-4.
16. Chernogor LF., Domnin IF. Physics of Geospace Storms: monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 2014;408 p. (Russian).
17. Danilov AD., Morozova LD. Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). *Geomagnetism and Aeronomy.* 1985;25(5):705–721 (Russian).
18. Prölss GW. Ionospheric F-region storms. *Handbook of atmospheric electrodynamics* 2, 1995;(2):195–248.
19. Buonsanto M. Ionospheric storms – A review. *Space Science Reviews.* 1999;88(3–4):563–601. <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
20. Danilov AD., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomag. Aeron.* 2001;2(3):209–224. <http://ijga.agu.org/v02/gai99312/gai99312.htm>
21. Danilov AD. F-region influence on geomagnetic disturbances – A Review. *Heliogeophysical research.* 2013;5:1–33 (Russian). <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=189>
22. Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešová D., Hernández-Pajares M. November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. In: *Annales Geophys.* 2005;23:3027–3034. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3027-2005>
23. Pirog OM., Polekh NM., Zherebtsov GA., Smirnov VF., Shi J., Wang X. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. *Adv. Space Res.* 2006;37(5):1075–1080. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.007>
24. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.* 2016;121(1):727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
25. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zherebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Advances in Space Research.* 2017;60(11):2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
26. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2015;120(4):3175–3186. <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>
27. Katsko SV., Emelyanov LYa., Chernogor LF. Features of the ionosphere storm on December 21–24, 2016. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2021;37(2):57–74 (Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.057>
28. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *Journal of Geophysical Research.* 1959;64(3):305–321. <https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305>
29. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu JY. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011;116(A11328). <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA017042>
30. Willis DM., Stevens PR., Crothers SR. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 – 1993). *Ann. Geophys.* 1997;15(6):719–728. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0719-5>
31. Yakovchouk OS., Mursula K., Holappa L., Veselovsky IS., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932–2009. *J. Geophys. Res.* 2012 Mar;117(A3). <https://doi.org/10.1029/2011JA017093>
32. Chernogor LF. Physics of geospace storms. *Space Science and Technology.* 2021;27(1(128)):3–77 (Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>

Наукове видання

ВІСНИК ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В.Н. Каразіна

Серія
“Радіофізика та електроніка”

Випуск 33

Збірник наукових праць

Українською, російською та англійською мовами

Підписано до друку 29.12. 2019. Формат 60x84/8.

Папір офсетний. Друк цифровий.

Ум. друк. арк. 7,41. Обл.-вид. арк. 9,26. Наклад 50 пр. Зам.№ 101/19.

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.