

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗІНА

ОНИЩЕНКО Андрій Анатолійович



УДК 621.372:550.388

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ В МЕТОДАХ  
ДИСТАНЦІЙНОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ ГЕОКОСМОСУ

01.04.03 – радіофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук, доцент **ЛАЗОРЕНКО Олег Валерійович**, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, завідувач кафедри загальної фізики.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор **ЛУЦЕНКО Владислав Іванович**, Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, завідувач лабораторії моніторингу і спектроскопії середовища.

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **СМЕЛЬЯНОВ Леонід Якович**, Інститут іоносфери НАН і МОН України, провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться «20» травня 2023 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61077, Україна, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61077, Україна, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розісланий «13» вересня 2023р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юрій АРКУША

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з найважливіших наукових проблем, що стоїть перед сучасною людською цивілізацією, є проблема створення глобальної міжнародної системи оперативного моніторингу стану геокосмосу. У першу чергу, це пояснюється тим, що деякі процеси у геокосмосі, спричинені дією потужних нестационарних джерел енерговиділення, маючи часто великомасштабний, а подекуди – й глобальний (планетарний) характер, можуть становити значну загрозу безпеці, а інколи – навіть, самому існуванню, сучасної цивілізації. Першим кроком до розв'язання даної проблеми є побудова фізичної моделі таких процесів, що саме по собі є окремою складною науковою проблемою.

Згідно з нелінійною та системною парадигмою, сформульованими відповідно в 1970-х і 1980-х рр. д.ф.-м.н., професором Л. Ф. Черногором (Харківський національний університет (ХНУ) імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна), багато процесів у складних, відкритих, нелінійних, динамічних системах, що спричинені дією потужних нестационарних джерел енерговиділення, належать до короткочасових, нелінійних, надширокосмугових (НШС) і фрактальних. Такими підсистемами у складі геокосмосу в цілому є системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ) та Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ). Потужні нестационарні джерела енерговиділення, що можуть діяти у цих системах, мають як штучне (старти та польоти ракет і важких літаків, ядерні та потужні хімічні вибухи, нестационарне електромагнітне випромінювання тощо), так і природне (падіння крупних космічних тіл, землетруси, вибухи вулканів, проходження термінатора, геокосмічні бурі тощо) походження. Часо-частотна структура відповідних процесів успішно досліджується сучасними методами, якими є, зокрема, вейвлет-аналіз, адаптивне перетворення Фур'є, системний спектральний аналіз, вігнер- і чої-вільямс-аналізи тощо.

Великий комплекс процесів у системах ЗАІМ і СМСМІАЗ має фрактальні властивості. Більш того, з огляду на фрактальну парадигму, про появу якої говорив на початку 2000-х рр. д.ф.-м.н., професор В. В. Яновський (Інститут монокристалів НАН України, м. Харків, Україна), фрактальність наряду з нелінійністю є фундаментальною властивістю навколишнього світу взагалі. Тому для ретельного вивчення таких процесів необхідно застосовувати спеціальні методи аналізу, що дозволяють отримати унікальну інформацію про фрактальні властивості досліджуваних сигналів і процесів.

Таким чином, **задача** підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування для радіофізичних досліджень геокосмосу із використанням методів фрактального та мультифрактального аналізів є *актуальною*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі фізики Харківського національного університету радіоелектроніки. Ряд результатів роботи було отримано протягом виконання в ХНУ імені В. Н. Каразіна наступних науково-дослідницьких робіт: «Глобальні збурення, стимульовані космічною діяльністю та потужним радіовипромінюванням віддалених радіосистем, й їх екологічні наслідки» (керівник Л. Ф. Черногор, № держреєстрації 0115U000463), «Моделювання динамічних процесів в іоносфері та геомагніт-

ному полі в період аномального 24-го циклу сонячної активності» (керівник Л. Ф. Черногор, № держреєстрації 0115U000467), «Дистанційний вплив потужного радіовипромінювання на канали телекомунікацій і електронну апаратуру» (керівник Л. Ф. Черногор, № держреєстрації 0116U000822), «Розробка методів аналізу короточасових та надширокосмугових процесів на основі нетрадиційних лінійних і нелінійних інтегральних перетворень» (керівник О. В. Лазоренко, № держреєстрації 0117U004872), «Глобальні та великомасштабні збурення в геокосмосі, викликані дією високоенергійних джерел, та їх екологічні наслідки» (керівник К. П. Гармаш, № держреєстрації 0118U002039), де автор обіймав посаду виконавця.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою* дисертаційної роботи є підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування під час розв'язання задач фізики та радіофізики геокосмосу за рахунок використання фрактального та мультифрактального аналізів.

Для досягнення поставленої мети необхідне розв'язання наступних задач.

1. Розробка нового комплексного методу фрактального аналізу, який забезпечує різнобічну характеристику досліджуваного багатопараметричного сигналу або процесу на базі одночасного та порівняльного вивчення комплексу фрактальних параметрів, отриманих низкою незалежних методів.

2. Створення спеціального комплексного методу фрактального аналізу, який дозволяє враховувати наявність в аналізованому сигналі часо-частотних структур і використовувати їх параметри під час оцінювання фрактальної розмірності.

3. Підвищення точності оцінки фрактальних і мультифрактальних параметрів досліджуваних сигналів і процесів у методах фрактального та мультифрактального аналізів.

4. Розробка зручних та ефективних алгоритмів фрактального та мультифрактального аналізів експериментальних даних, що можна рекомендувати до використання дослідникам, та їх перевірка з використанням модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів.

5. Отримання нової інформації про фрактальні властивості сигналів і процесів в задачах дистанційного радіозондування геокосмосу з використанням запропонованих алгоритмів фрактального та мультифрактального аналізів.

6. Оцінка дисперсійних спотворень фрактальних надширокосмугових сигналів, що виникають під час їх поширення у геокосмосі.

*Об'єкт дослідження* – фрактальні та мультифрактальні процеси в задачах фізики та радіофізики геокосмосу.

*Предмет дослідження* – параметри та характеристики фрактальних і мультифрактальних сигналів і процесів в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера як реакції на дію потужних нестационарних джерел енерговиділення.

*Методи дослідження.*

1. Апарат фрактального аналізу, що містить великий набір різноманітних методів, використовувався як для теоретичного дослідження модельних фрактальних сигналів, так і для дослідження експериментальних даних.

2. Методи мультифрактального аналізу, що застосовувалися як для теоретичного вивчення модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів, так і для вивчення сигналів, отриманих у методах дистанційного радіозондування геокосмосу.

3. Метод комп'ютерного моделювання, що забезпечував реалізацію методів фрактального та мультифрактального аналізів під час дослідження модельних сигналів і процесів.

4. Вейвлет-аналіз, оснований на застосуванні безперервного вейвлет-перетворення, який використовувався для виявлення часо-частотних структур як складової в новому комплексному методі фрактального аналізу сигналів і процесів.

5. Фур'є-аналіз, що застосовувався для оцінки дисперсійних спотворень модельних ФНШС сигналів, що виникають у процесі їх поширення у геокосмосі.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше створено комплексний метод фрактального аналізу сигналів і процесів – узагальнений фрактальний аналіз, що має унікальну інформативність. На реальних прикладах продемонстровано доцільність і корисність реалізації основної ідеї методу, що полягає у отриманні достатньої кількості інформації про фрактальну структуру та характер її змін у часі шляхом вивчення великого набору з шістнадцяти числових характеристик (прямих, спектральних, а також характеристик фазового простору) та їх порівняння між собою, тоді як у традиційних методах фрактального аналізу зазвичай використовуються максимум дві – три числові характеристики.

2. Вперше розроблено метод фрактального аналізу – динамічний фрактальний аналіз, який встановлює зв'язок між фрактальним і часо-частотним аналізами. Із використанням досліджень модельних і реальних сигналів і процесів доведено ефективність побудови часових залежностей фрактальних розмірностей із застосуванням параметрів часо-частотних структур, що існують у досліджуваному сигналі, шляхом обрання оптимальної ширини ковзаючого спектрального «вікна» у часовій області.

3. Вперше запропоновано метод підвищення точності числових характеристик, отримуваних у методах фрактального та мультифрактального аналізів – метод коригуючої функції. Із використанням набору спеціально створених модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів продемонстровано, що новий метод дозволяє для методів монофрактального аналізу зменшити похибку оцінювання низки фрактальних розмірностей з 24 – 50 % до 5 – 7 %, а для методів мультифрактального аналізу зменшити похибку оцінювання узагальненого показника Херста з 5 – 90 % до 3 – 8 %. Також для клітинної, регуляризаційної, варіаційної та херстової фрактальних розмірностей завдяки методові коригуючої функції вперше отримано значення мінімальної кількості точок дискретного вектора, за яких ці розмірності можна обчислювати.

4. У рамках мультифрактального аналізу запропоновано набір нових числових характеристик, що є корисними й ефективними для аналізу нестационарних (у сенсі фрактальних властивостей) сигналів і процесів. Корисність застосування даних характеристик доведено з використанням аналізу як модельних, так і реальних сигналів і процесів.

5. Вперше з використанням створених нових методів фрактального та мультифрактального аналізів отримано унікальну інформацію про особливості фрактальної структури низки процесів у геокосмосі, які є його реакцією на дію потужних, нестационарних джерел енерговиділення (гравітаційна хвиля, падіння Челябі-

нського метеороїда, надпотужна геокосмічна буря, потужний землетрус). Встановлено, що досліджені процеси належать до класу фрактальних надширокосмугових.

6. Вперше виявлено характер дисперсійних спотворень високочастотних фрактальних надширокосмугових сигналів, що виникають у процесі їх поширення у геокосмосі.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Отримана нова корисна інформація про особливості фрактальної структури низки процесів у геокосмосі, які є його реакцією на дію потужних, нестационарних джерел енерговиділення (гравітаційна хвиля, падіння Челябінського метеороїда, надпотужна геокосмічна буря, потужний землетрус) може бути застосована для успішного розв'язання проблеми створення глобальної міжнародної системи оперативного моніторингу стану геокосмосу, що стоїть перед людством.

2. Запропонований метод узагальненого фрактального аналізу є потужним інструментом детального дослідження фрактальних властивостей сигналів і процесів у найрізноманітніших галузях науки та техніки.

3. Метод динамічного фрактального аналізу вперше поєднує методи фрактального та часо-частотного аналізів. Оскільки у переважній більшості випадків вивчення нестационарної фрактальної структури сигналу або процесу дослідника цікавлять властивості певних збурень, то саме метод динамічного фрактального аналізу дозволяє, з одного боку, виявляти такі збурення й отримувати оцінки їх параметрів, а з іншого боку, саме на основі цих оцінок проводити оптимальне дослідження фрактальних характеристик.

4. Набір нових моделей фрактальних і мультифрактальних, та фрактальних надширокосмугових сигналів, а також запропоновані нові мультифрактальні характеристики корисні для розв'язання різноманітних задач в області фрактальної радіофізики, фрактальної радіолокації, фрактальної радіотехніки, фрактальних телекомунікації та зв'язку, а також при застосуванні засобів фрактального та мультифрактального аналізів для моделювання та дослідження процесів у біофізиці, біології, медицині, геофізиці, екології, астрономії, тощо.

5. Метод коригуючої функції є першою спробою створення універсального засобу для розв'язання задачі підвищення точності оцінок характеристик досліджуваних сигналів і процесів в методах фрактального та мультифрактального аналізів. Більш того, у рамках цього методу вперше запропоновано чіткий підхід до оцінювання мінімальної кількості відліків дискретного вектору даних досліджуваного сигналу у випадку використання завданого методу аналізу.

6. Запропоновані алгоритми проведення фрактального та мультифрактального аналізів сигналів і процесів можна рекомендувати для практичного застосування спеціалістам у різноманітних галузях науки та техніки, що бажають використовувати сучасні фрактальні ідеї у власній професійній діяльності.

7. Оцінки характеру дисперсійних спотворень фрактальних надширокосмугових сигналів корисні для досліджень доцільності й ефективності застосування таких сигналів для розв'язання задач радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування, телекомунікації та зв'язку тощо.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, що наведено в дисертаційній роботі, отримано особисто автором або за його безпосередньої участі та опубліковано у роботах [1 – 20].

У роботах, що опубліковано у співавторстві, авторові належить наступне: результати фрактального аналізу модельних фрактальних надширокосмугових сигналів [1, 9, 10], нові моделі фрактальних надширокосмугових сигналів і результати їх фрактального аналізу [11], результати фрактального та мультифрактального аналізів гравітаційної хвилі, а також участь в аналізі їх фізичного сенсу [2, 12, 13] та у створенні метода узагальненого фрактального аналізу та його комп'ютерна реалізація [13, 19, 20], результати фрактального та мультифрактального аналізів акустичних сигналів, згенерованих під час падіння Челябінського метеороїда, а також участь в аналізі їх фізичного сенсу [4, 14, 16] та розробці методу динамічного фрактального аналізу [4, 16, 19, 20], результати моделювання дисперсійних спотворень високочастотних фрактальних надширокосмугових сигналів, що виникають під час їх поширення у геокосмосі [8], результати фрактального та мультифрактального аналізів часових варіацій геомагнітного поля, що виникли під час надпотужної геокосмічної бурі 7 – 8 вересня 2017 р., а також участь в аналізі фізичного змісту цих результатів [3, 15, 17], участь у розробці методу коригуючої функції для фрактального та мультифрактального аналізів, створення набору модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів, комп'ютерна реалізація методу коригуючої функції, результати аналізу модельних сигналів [5], результати фрактального та мультифрактального аналізів часових варіацій геомагнітного поля, що виникли під час потужного землетрусу 24 січня 2020 р., а також участь в аналізі фізичного сенсу цих результатів [6, 18], участь у розробці та комп'ютерна реалізація нових числових характеристик для мультифрактального аналізу [7].

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати, що викладено у дисертаційній роботі, доповідалися на наступних 9 міжнародних, 1 національній і 1 регіональній наукових конференціях.

*Міжнародні конференції:* 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15 – 19 September, 2014, Kharkiv, Ukraine; 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 5 – 11, 2016, Odessa, Ukraine; VI Міжнародна науково-практична конференція (I Міжнародний симпозиум) «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях», 9 – 11 листопада 2017 р., Чернівці, Україна, 2017.; 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4 – 7, 2018, Odessa, Ukraine; International Conference on Natural Science and Technology (ICONAT-2019), September, 18 – 20, 2019, Kharkiv, Ukraine; International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 25 – 28, 2021, Kyiv, Ukraine; International Conference on Natural Science and Technology (ICONAT-2022), August, 24 – 26, 2022, Antalya, Turkey; International Conference “Astronomy and Space Physics”, October 18 – 20, 2022, Kyiv, Ukraine; XVIII International Conference "Electronics and Applied Physics", October 18 – 22, 2022, Kyiv, Ukraine.

*Національні конференції:* 18 Українська конференція з космічних досліджень, 17 – 20 вересня 2018 р., Київ, Україна.

*Регіональні конференції:* Підсумкова наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів і здобувачів, 23 – 24 березня 2016 р., ХНАУ імені В. В. Докучаєва, Харків, Україна.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано **20** робіт, з яких статей у журналах, цитованих у Scopus, – **2**, в іноземних фахових наукових журналах – **2**, у спеціалізованих журналах МОН України – **3**, тез доповідей на наукових конференціях – **12** (з них цитованих у Scopus та Web of Science – **3**), додаткових статей у наукових журналах – **1** (цитована у Scopus).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел на 18 сторінках, який нараховує 207 найменувань. Робота містить 254 сторінки, з них 183 сторінки основного тексту. Усього в дисертації 70 рисунків, з яких 49 рисунків на 23 сторінках повністю займають площу сторінки, та 16 таблиць, з яких 1 таблиця на 1 сторінці повністю займає площу сторінки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено його об'єкт і предмет, перелічено використані при його проведенні методи, показано наукову новизну і практичну значущість отриманих результатів, наведено відомості про їх апробацію та відповідні публікації, висвітлено особистий внесок автора в тих публікаціях, що виконано зі співавторами.

У **першому розділі** наведено стислу історію виникнення фрактального підходу, введено основні поняття та співвідношення, проаналізовано сучасний стан фрактальної радіофізики, перелічено основні методи фрактального та мультифрактального аналізів, розглянуто існуючі моделі фрактальних і мультифрактальних сигналів, наведено їх числові характеристики, сформульовано нерозв'язані задачі, виконано й обґрунтовано постановку задач досліджень автора.

*Фрактальний підхід*, розроблений видатним американським вченим Б. Мандельбротом, бере свій початок у 1975 р. У результаті його застосування відбулася «фракталізація» сучасної науки та техніки. *Фрактальна радіофізика* як принципово новий напрямок у радіофізиці з'явилася у 2002 р. Видатними вченими, завдяки яким це відбулося, є, в першу чергу, К. Акі, В. Алімов, М. Беррі, В. Болотов, Р. Бурлага, Д. Вернер, Ю. Горобець, К. Гупта, Д. Джаггард, Е. Джейкмен, А. Ді Ієва, В. Дімірі, Ю. Кім, Л. Клейн, Н. Коен, С. Куадфеул, О. Лазоренко, Дж. Леві-Вехел, Б. Мандельброт, Р. Міттра, Р. Пащенко, А. Потапов, К. Пуенте, Б. Росс, Х. Сан, Х. Такаюцу, В. Тарасов, Л. Телеска, Ю. Ткач, К. Трико, Д. Туркотт, Г. Уорнелл, А. Хаджимірі, Л. Черногор та інші.

Серед напрямків сучасної фрактальної радіофізики виділяють, зокрема, цифровий фрактальний аналіз та обробку сигналів і зображень; дослідження фрактальних поверхонь (наприклад, морської поверхні); теорію розсіяння хвиль фрактальною поверхнею; теорію поширення радіохвиль у фрактальних середовищах; вивчення фрактальних властивостей просторових структур геосистем; дослідження фрактальних структур у космічній радіофізиці та космології; вивчення фрактальних флуктуацій радіохвиль у тропосфері й іоносфері; дослідження фрактальних харак-



теристик блискавок в іоносфері; створення фрактальних радіоелементів та імпедансів в різних діапазонах частот, зокрема, аналіз і синтез фрактальних антен; використання фрактальних сигнатур у задачах статистичної радіофізики; створення фрактальних селективних і радіопоглинаючих матеріалів; проектування фрактальних радіосистем і пристроїв; синтез РС-кіл, які реалізують дробові оператори тощо.

За походженням фрактали прийнято ділити на математичні і фізичні (природні), за кількістю необхідних для описання значень фрактальної розмірності – на монофрактали та мультифрактали, за наявністю випадкових параметрів – на детерміновані (алгебраїчні, геометричні) та стохастичні.

Основними числовими характеристиками монофракталів є *фрактальні розмірності*, а мультифракталів – спектр узагальнених розмірностей, скейлінгова експонента, функція мультифрактального спектра, а також параметри на її основі.

*Фрактальний сигнал* (ФС) – це сигнал, який має з характеристик котрого має фрактальні властивості. Відповідний фізичний процес, що породжує ФС, називають *фрактальним процесом*. ФС поділяють на монофрактальні (які часто називають просто ФС) і мультифрактальні (МФС). Для оцінювання числових характеристик ФС і МФС на сьогодні використовується велика кількість різноманітних методів монофрактального (більше шести десятків) і мультифрактального (більше двадцяти) аналізів. Тим не менш, кожен з них має як безсумнівні переваги, так і недоліки. Тому існує потреба у створенні нових комплексних методів аналізу, в яких низка відібраних методів використовується одночасно. Тоді недоліки одних з них компенсуватимуться перевагами інших. Це й робиться автором у даній роботі.

**Другий розділ** присвячено фрактальному аналізу спеціально створених модельних ФС і МФС, а також фрактальних надширококутових (ФНШС) сигналів. Це здійснюється з використанням запропонованих у роботі нових комплексних методів фрактального аналізу – методу узагальненого фрактального аналізу (УФА), методу динамічного фрактального аналізу (ДинФА) и методу коригуючої функції (КФ). На їх основі створено оригінальний алгоритм монофрактального аналізу сигналів і процесів.

Метод УФА (Generalized Fractal Analysis – GFA) як новий комплексний метод монофрактального аналізу було запропоновано у 2018 р. Л. Ф. Чорногором, О. В. Лазоренком і А. А. Онищенком у роботі [13].

Основна ідея даного комплексного методу монофрактального аналізу сигналів і процесів полягає у тому, щоб отримати достатню кількість інформації про їх фрактальну структуру та характер її змінень у часі шляхом вивчення цілої низки числових характеристик та їх порівняння між собою [13, 19, 20].

Множину числових характеристик, що використовуються в УФА, розподілено на три різні групи. Перша з цих груп (прямі характеристики) пов'язана з характеристиками, що обчислюються безпосередньо з часової реалізації досліджуваного сигналу. Вона містить у собі ємнісну  $D_C$ , регуляризаційну  $D_R$ , поточкову  $D_P$ , усереднену поточкову  $D_{PA}$ , херстову  $D_H$ , гелдерову  $D_{LG}$  та усереднену гелдерову  $D_{LGA}$  розмірності, а також розмірність Фур'є  $D_F$ . Друга група (спектральні характеристики) об'єднує характеристики, які описують фрактальні властивості спектральної функції (СФ) одновимірного перетворення Фур'є (ОПФ)

$\dot{S}(\omega)$  ( $\text{Re}\dot{S}(\omega)$ ,  $\text{Im}\dot{S}(\omega)$ ,  $|\dot{S}(\omega)|$ ,  $\arg\dot{S}(\omega)$ , числові характеристики їх графіків як фрактальних зображень) та СФ безперервного вейвлет-перетворення (БВП)  $Wf(a,b)$  ( $|Wf(a,b)|$ , скелетон  $|Wf(a,b)|$ , числові характеристики скелетона як зображення з фрактальними властивостями) аналізованого сигналу або процесу. Додатковою перевагою є можливість використання не тільки різних вейвлетів, а й різних вейвлет-перетворень. Третя група (характеристики фазового простору) пов'язана з фрактальними властивостями «дивного» атрактора хаотичної нелінійної системи, яка є здатною породити досліджуваний сигнал або процес. Оцінюються фрактальна розмірність атрактора для сигналу в цілому ( $D_A$ ) та у ковзаючому вікні шириною  $T$  у часовій області ( $D_A(T,t)$ ). Дані УФА досліджуваного сигналу або процесу представляються у спеціально розробленому форматі.

Такий комплексний підхід дозволяє всебічно описати фрактальні характеристики досліджуваного сигналу або процесу. Набір числових характеристик, що використовується в УФА, може бути доповнений або змінений.

Метод ДинФА (Dynamical Fractal Analysis – DynFA) – розробили в 2019 р. А. А. Онищенко, Л. Ф. Черногор та О. В. Лазоренко у роботі [4]. Він поєднує в собі можливості фрактального та часо-частотного аналізів. Ідея метода ДинФА полягає у наступному [4, 16, 19, 20].

Під час дослідження нестационарних сигналів і процесів, фрактальні властивості яких змінюються у часі, отримуваний результат істотно залежить від ширини вікна  $T$ , що застосовується для отримання часової залежності показника Херста  $H(t)$ . Автором запропоновано ідею вибору оптимального значення  $T$ . Алгоритм метода ДинФА містить такі кроки.

1) Оцінюється херстова розмірність  $D_H = 2 - H$  для різних значень положення ( $t$ ) та ширини ( $T$ ) ковзаючого вікна, тобто отримується функція  $D_H(t, T)$ .

2) Обчислюються модуль  $|\dot{W}f(t, T)|$ , аргумент  $\arg\dot{W}f(t, T)$  і скелетон аргумента комплекснозначної СФ аналітичного вейвлет-перетворення (АВП). За ними оцінюються характерні періоди сигналу (або його частин)  $T_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

СФ АВП сигналу  $s(t)$  задається співвідношенням:

$$\dot{W}f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left( \frac{t - b}{a} \right) dt, \quad a > 0, \quad -\infty < b < +\infty,$$

де  $\dot{\psi}(t)$  – вейвлетвірна функція (аналітичний вейвлет), «\*» – операція комплексного спряження,  $a$  – параметр масштабування,  $b$  – параметр зсуву.

3) За фіксованих значень  $T_i$  отримується набір часових залежностей  $D_{H_i}(t) \equiv D_H(t, T_i)$ , які найкращим чином характеризують фрактальні властивості досліджуваного сигналу. Отримані протягом ДинФА результати аналізу представляються у спеціально створеному форматі.

Запропоновано нові аналітичні моделі ФНШС сигналів у часовій області, що базуються на безперервних, ніде не диференційовних функціях Селлер'є, Дарбу,

Такагі, Ван-дер-Вардена, Фабера, Шенберга, Маккарті, Ліу Вена та узагальненій функції Вейерштраса [1, 9, 11]. З їх використанням проведено порівняння ефективностей оцінювання фрактальних розмірностей модельних сигналів.

На прикладі досліджень клітинної  $D_B$ , варіаційної  $D_V$  та регуляризаційної  $D_R$  розмірностей встановлено, що кожна з них може використовуватись як ефективна оцінка відомої істинної фрактальної розмірності сигналу  $D$  тільки в обмеженому інтервалі значень [1, 9, 10]. Так,  $D_B$  дає найкращий результат у діапазоні  $1 \leq D \leq 1.3$ ,  $D_V$  – для  $1.3 < D \leq 1.6$ , а  $D_R$  – для  $1.6 < D < 2$ . Причиною виникнення такої ситуації є нелінійність залежностей  $D_B = f(D, N)$ ,  $D_V = f(D, N)$  і  $D_R = f(D, N)$  як функцій  $D$ , а також наявність залежності від кількості дискретних відліків аналізованого сигналу  $N$ . Така саме ситуація спостерігається і для інших існуючих фрактальних розмірностей, а її специфіка визначається індивідуальними особливостями застосованого методу монофрактального аналізу.

Для практичних цілей корисним та ефективним шляхом виходу із даної ситуації може бути метод коригуючої функції (КФ) для монофрактального аналізу, запропонований в 2022 р. А. А. Онищенком, Л. Ф. Черногором та О. В. Лазоренком у роботі [5]. Основна ідея методу – у компенсації нелінійності вказаної вище залежності для конкретного методу монофрактального аналізу з використанням спеціальної КФ. Суть методу КФ полягає у наступному [19, 20].

Нехай є конкретний окремий метод монофрактального аналізу, який дозволяє отримати оцінку  $D^*$  невідомої фрактальної розмірності  $D$  досліджуваного сигналу, що представлено дискретним вектором даних, який містить  $N$  відліків.

Отримаємо значення невідомої нелінійної функції  $D^* = f(D, N)$  на дискретній сітці:  $D_{ij}^* = f(D_i, N_j)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ . Кожна величина  $D_{ij}^*$  представляється інтервальною оцінкою:  $D_{ij}^* = \overline{D_{ij}^*} \pm \Delta D_{ij}^*$ , де точкове значення  $\overline{D_{ij}^*}$  та похибка  $\Delta D_{ij}^*$  визначаються конкретним методом монофрактального аналізу. Далі необхідно отримати оцінку невідомого значення фрактальної розмірності  $D$  аналізованого сигналу за відомим значенням  $D^*$  за відомого фіксованого значення  $N = N_{sig}$ . Для цього функція  $D^* = f(D, N_{sig})$  як функція однієї змінної на проміжку  $1 \leq D < 2$  повинна мати обернену функцію  $D = f^{-1}(D^*, N_{sig})$ , тобто функція  $D^* = f(D, N_{sig})$  повинна там бути зростаючою функцією  $D$ . За порівняно великих значень  $N_{sig}$  ніяких проблем з цим не виникає. Але по мірі зменшення  $N_{sig}$  для функції  $D_{ij}^* = f(D_i, N_j)$  знаходиться таке значення  $N_{min}$ , нижче якого ( $j = \overline{1, (min-1)}$ ) монотонність функції  $D^* = f(D, N_{sig})$  порушується. При  $N_{sig} < N_{min}$  даний метод фрактального аналізу застосовувати вже не можна. Дос-

лідження впливу зменшення величини  $N_{sig}$  відбувалося у рамках двох запропонованих стратегій: «стратегії децимації» та «стратегії звуження вікна». Встановлено, що  $N_{min}$  дорівнює 64 для  $D_H$  і  $D_R$ , 512 для  $D_B$  та 256 для  $D_V$  у рамках «стратегії децимації» та 32 для  $D_H$  і  $D_R$ , 256 для  $D_B$  та 64 для  $D_V$  у рамках «стратегії звуження вікна».

Власне сама КФ має вигляд:

$$Cf_{ij} = \frac{D_{ij}^*}{D_i} = \frac{f(D_i, N_j)}{D_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{\min, m}. \quad (1)$$

Далі на її основі будемо дискретний вектор  $Cf_i$ :

$$Cf_i = Cf_{il} + \left( Cf_{i(l+1)} - Cf_{il} \right) \frac{N_{sig} - N_l}{N_{(l+1)} - N_l}, \quad (2)$$

де величина  $l$  визначається з умови  $N_l \leq N_{sig} < N_{l+1}$ . При цьому використовується лінійна апроксимація КФ за змінною  $N$  між  $N_l$  та  $N_{l+1}$  для кожного фіксованого значення  $i = \overline{1, n}$ .

За дискретним вектором  $Cf_i$  обчислюються відповідні значення  $D_i^* = Cf_i \cdot D_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Вважаючи залежність між  $D$  і  $D^*$  лінійною на кожному відрізку  $D_p \leq D \leq D_{p+1}$ ,  $1 \leq p \leq (n-1)$ , можна сконструювати кусково-неперервну функцію  $D^* = Cf(D)$ ,  $1 \leq D < 2$ , яка й дозволяє отримати шукану величину фрактальної розмірності:

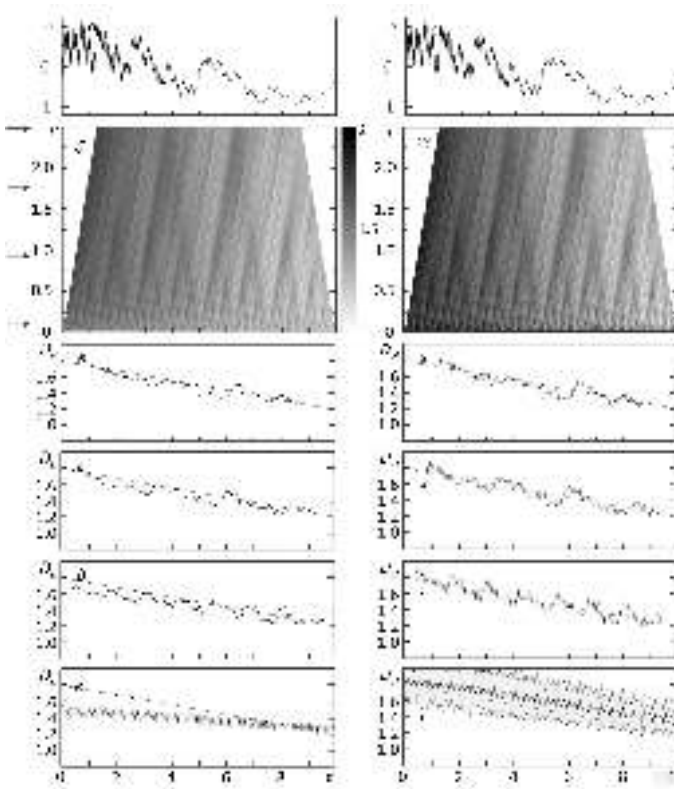
$$D = D_p + \frac{D^* - Cf_p \cdot D_p}{Cf_{p+1} \cdot D_{p+1} - Cf_p \cdot D_p} (D_{p+1} - D_p), \quad (3)$$

де величина  $p$ , яка приймає натуральні значення та задовольняє умові  $1 \leq p \leq (n-1)$ , визначається зі співвідношення:  $Cf_p \cdot D_p \leq D^* \leq Cf_{p+1} \cdot D_{p+1}$ .

Для практичних цілей нами використовуються КФ, обчислені на дискретній сітці для  $1 \leq D < 2$  з кроком 0.01 та для  $N = 2^k$ ,  $k = 5, 6, \dots, 17$ .

Створено набір з 10 модельних ФС і МФС, аналіз яких з використанням методів УФА, ДинФА та КФ демонструє основні особливості, переваги та недоліки цих нових методів. Приклад наведено на рис. 1.

**Третій розділ** присвячено застосуванню методів мультифрактального аналізу для дослідження модельних ФС і МФС [7], розглянутих у розділі 2. Використовуються методи WTMM і MF DFA, які доповнено низкою оригінальних числових характеристик, запропонованих автором [6]. Також застосовується новий метод КФ, модифікований для мультифрактального аналізу [7, 19, 20]. Створено оригінальний алгоритм мультифрактального аналізу сигналів і процесів.



**Рис. 1.** Результати застосування методу КФ при аналізі модельного ФС (модель 3) з використанням методу ДинФА: а, є – ФС у часовій області, б – херстова розмірність  $D_H(t, T)$ , в, г, д, е – херстова розмірність  $D_{H_i}(t) \equiv D_H(t, T_i)$  за фіксованих значень  $T_i$  (позначено стрілками ліворуч на панелі б); ж, з, і, ї – те ж саме, але з використанням методу КФ. Сірим кольором позначено довірчі інтервали.

ни  $f(\alpha^*)$  від 1 показує перехід мультифрактального процесу до монофрактального режиму.

Із використанням створених у розділі 2 моделей ФС і МФС проведено детальний мультифрактальний аналіз монофрактальних, мультифрактальних і нефрактальних сигналів і процесів, виявлено їх особливості, які є важливими для спеціалістів – практиків [7]. Зокрема встановлено, що на практиці режим досліджуваного процесу вже можна вважати монофрактальним, якщо  $\Delta\alpha \leq 0.2$  і  $\mu_\alpha \leq 0.25$  навіть коли  $f_\alpha = 1$ . В якості прикладу на рис. 2 наводиться застосування методу MF DFA до аналізу модельного МФС (модель 2).

Встановлено, що застосування методу КФ для мультифрактального аналізу дозволяє істотно знизити відхилення отримуваної оцінки узагальненого показника Херста  $\alpha^*$  від істинного відомого значення показника Гельдера  $\alpha$  аналізованого сигналу (наприклад при  $N_{\min} = 32$  у діапазоні  $\alpha = 0.2 - 0.8$  з  $90 \div 5$  % до лише

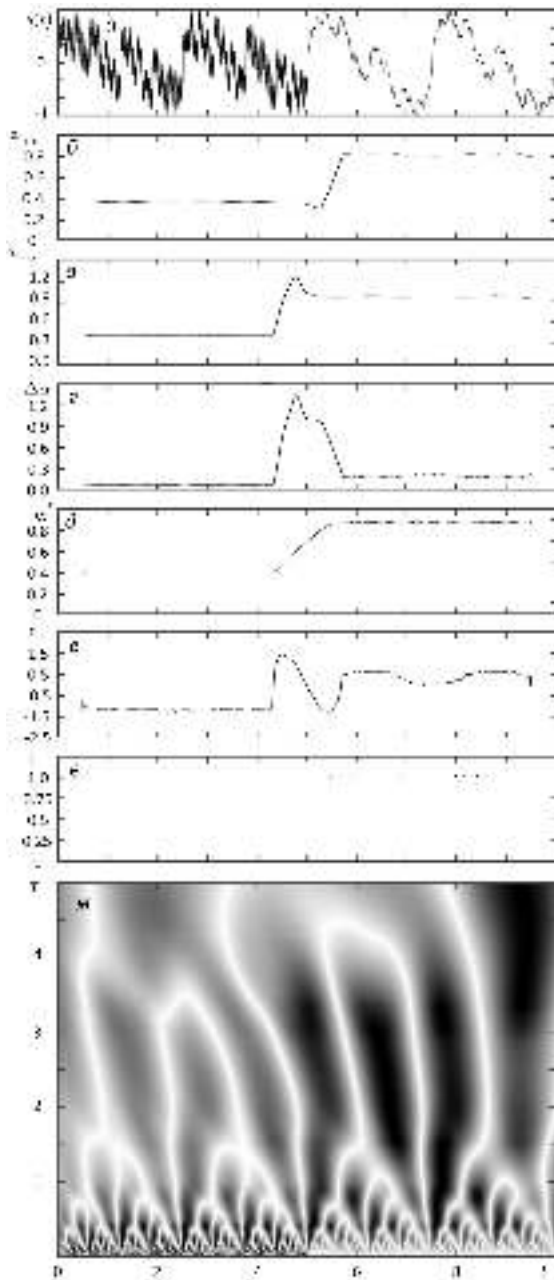
Метод WTMM використовується для аналізу сигналу в цілому, а метод MF DFA – для дослідження часових змін його фрактальних властивостей. Досліджувані числові характеристики базуються на функції мультифрактального спектра  $f(\alpha)$ : її мінімальне  $\alpha_{\min}$  та максимальне  $\alpha_{\max}$  значення показника Гельдера, її ширина  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  та узагальнений показник Херста  $\alpha^*$ , який визначається положенням максимуму  $f(\alpha)$ .

Цей набір доповнено трьома новими характеристиками: коефіцієнтом асиметрії функції мультифрактального спектру:

$$K_f = \ln[(\alpha_{\max} - \alpha^*) / (\alpha^* - \alpha_{\min})],$$

її показником відносної ширини  $\mu_\alpha = \Delta\alpha / \alpha^*$  та її значенням у максимумі  $f(\alpha^*)$ .

Величина  $K_f$  демонструє степінь асиметрії  $f(\alpha)$  (для симетричної  $f(\alpha)$   $K_f = 0$ ), а величина  $\mu_\alpha$  – степінь відхилення сигналу від монофрактальності (для монофрактального сигналу  $\mu_\alpha = 0$ ). Відхилення ж величини



**Рис. 2.** Результати мультифрактального аналізу модельного ФС (модель 2): а – сигнал у часовій області, б –  $\alpha_{\min}(t)$ , в –  $\alpha_{\max}(t)$ , г –  $\Delta\alpha(t)$ , д –  $\alpha^*(t)$ , е –  $K_f(t)$ , є –  $f_\alpha(t)$ , ж – ФСГ БВП сигнала (вейвлет db4).

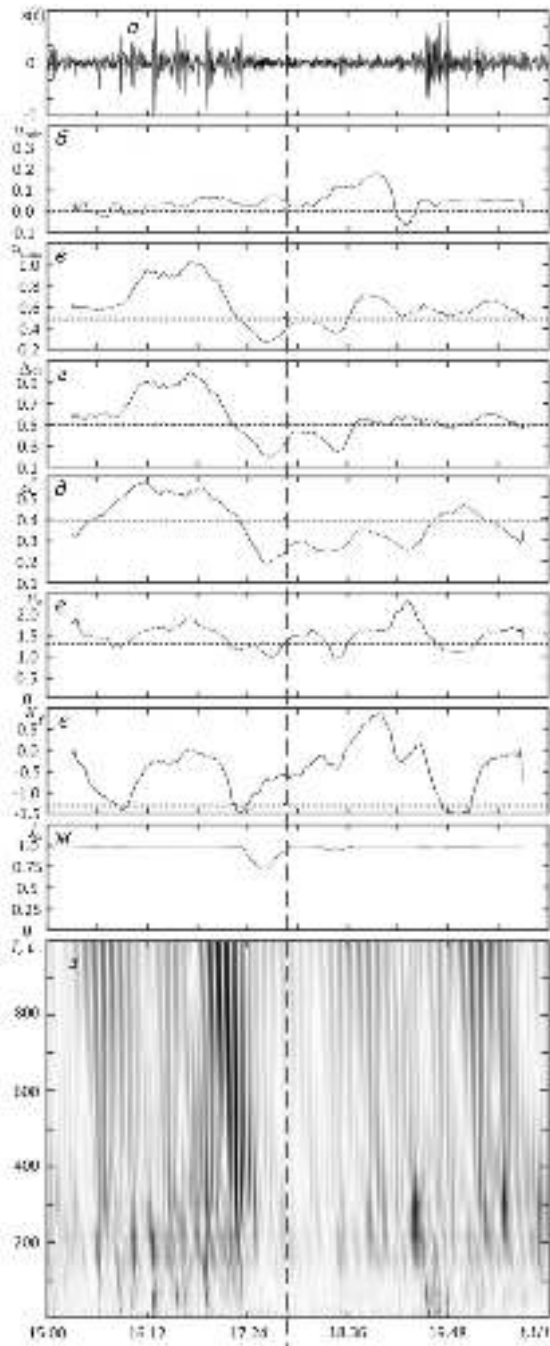
0.4) і  $K_f(t)$  (від  $-0.5$  до  $-1.5$ )  $\mu_\alpha(t)$  (від  $0.5$  до  $1.6$ ). До того ж, як показують ФСГ БВП (рис. 3, з), у ці півгодини перед землетрусом активність у діапазоні періодів  $T = 15 - 1000$  с взагалі стала дуже малою. Аналогічний «провал» виявлено і для D-компоненти.

Із фізичної точки зору отримані результати означають, що за півгодини до землетрусу за фактичної відсутності збурень відбулася істотна зміна фрактальних властивостей часових варіацій обох компонент геомагнітного поля.

$8 \div 3$  % за рівня надійності 0.9).

У четвертому розділі запропоновані у розділах 2 і 3 нові методи моно- та мультифрактального аналізів сигналів і процесів застосовано для дослідження реальних експериментальних даних, отриманих в методах дистанційного радіозондування геокосмосу. Проаналізовано унікальні реєстрації гравітаційних хвиль [2, 12, 13], інфразвукових хвиль, що виникли під час падіння Челябінського метеороїда [4, 14, 16], а також часові варіації електромагнітного поля Землі, що спостерігалися під час надпотужної геокосмічної бурі 7 – 8 вересня 2017 р. [3, 15, 17] та потужного землетрусу у Туреччині 20 січня 2020 р. [6, 18]. Один з елементів мультифрактального аналізу останньої події продемонстровано на рис. 3.

У день землетрусу (24 січня 2020 р.) для H-компоненти електромагнітного поля Землі спостерігалися незначні варіації  $\alpha_{\min}(t)$ ,  $\alpha_{\max}(t)$  і  $\Delta\alpha(t)$ , утворення часового максимуму  $\alpha^*(t)$  (в діапазоні  $0.25 - 0.45$ ), а також часового мінімуму  $K_f(t)$  (в діапазоні від  $0.0$  до  $-1.5$ ). Але найцікавішим, на нашу думку, у день землетрусу у поведінці мультифрактальних характеристик було те, що перед самим землетрусом приблизно за півгодини в реєстрації з'являється «провал» у функції  $f_\alpha(t)$  (рис. 3, ж), чого взагалі немає більше ніде у жоден з проаналізованих днів Цей «провал» супроводжується для H-компоненти формуванням мінімумів  $\alpha_{\max}(t)$  (від  $0.3$  до  $0.5$ ),  $\Delta\alpha(t)$  (від  $0.2$  до  $0.5$ ),  $\alpha^*(t)$  (від  $0.2$  до



**Рис. 3.** Результати мультифрактального аналізу (метод MF DFA) часових варіацій геомагнітного поля 24 січня 2020 р. (Н-компонента): а – сигнал у часовій області, б –  $\alpha_{\min}(t)$ , в –  $\alpha_{\max}(t)$ , г –  $\Delta\alpha(t)$ , д –  $\alpha^*(t)$ , е –  $\mu_\alpha(t)$  є –  $K_f(t)$ , ж –  $f_\alpha(t)$ , з – ФСГ БВП сигнала (вейвлет db4). Вертикальна штрихова лінія показує момент землетрусу.

Інші частини сигналу, що поступово відстають від фрактальної структури, самі є нефрактальними ( $H \geq 1$ ). Показник Херста стає функцією часу  $H(t)$  (рис. 4).

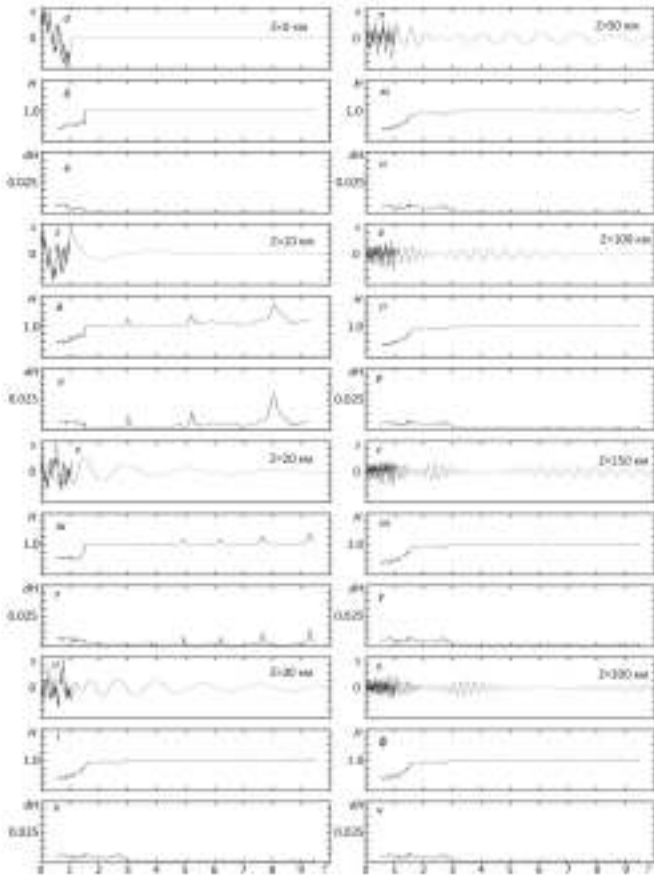
Типова мультифрактальна поведінка ( $\Delta\alpha \approx 0.5$ ,  $\alpha^* \approx 0.4$ ) різко змінюється на майже монофрактальну ( $\Delta\alpha \approx 0.2$ ,  $\alpha^* \approx 0.2$ ), до того ж сильно антиперсистентну (фрактальна розмірність  $D = 2 - \alpha^* \approx 1.8$ ). Можливо, цей перехід можна буде використовувати у якості «маркера» близького землетрусу, але для підтвердження або спростування цього потрібно провести дослідження інших землетрусів.

У п'ятому розділі досліджено дисперсійні спотворення ФНШС сигналів, що виникають під час їх поширення у навролоземному середовищі [8].

Для моделювання іоносфери нижче головного максимуму іонізації використовуватимемо дві моделі шарів – лінійного та параболічного. Моделювання поширення високочастотних (ВЧ) ФНШС сигналів, у яких  $f_{\min} > f_p$ , де  $f_{\min}$  – мінімальна частота ФСГ ОПФ сигнала,  $f_p$  – плазмова частота, здійснюється з використанням закону дисперсії  $n^2(f) = 1 - f_p^2 / f^2$ .

Встановлено, що для ФНШС сигнала дисперсійні спотворення за вказаних умов мають дещо інший характер, ніж для нефрактального ультракороткого НШС (УК НШС) сигнала. В них спостерігаються наступні істотні особливості.

1) Головна фрактальна структура ФНШС сигналу у часовій області, яка формується найбільш високочастотною частиною спектра ОПФ, майже не змінюється. Залишаючись фрактальною ( $0 < H < 1$ ), ця фрактальна структура продовжує займати свої початкове положення в сигналі, а її показник Херста  $H$  дещо зменшується із зростанням подоланого сигналом шляху  $z$  у середовищі. Ін-



**Рис. 4.** Дисперсійні спотворення ВЧ ФНШС сигналу ( $D = 1.5$ , центральна частота ФСГ ОПФ  $f_0 = 10^9$  Гц, показник широкосмуговості  $\mu = 1.84$ ), що виникають у параболічному плазмовому шарі ( $f_p(z_{\max}) = 10^7$  Гц,  $z_{\max} = 200$  км), динамічний показник Херста  $H(t)$  та його похибка  $dH(t)$  для різних величин подоланого сигналом шляху  $z$ : а, б, в –  $z = 0$  км; г, д, е –  $z = 10$  км; є, ж, з –  $z = 20$  км; и, і, к –  $z = 30$  км; л, м, н –  $z = 50$  км; о, п, р –  $z = 100$  км; с, т, у –  $z = 150$  км; х, ф, ч –  $z = 200$  км.

2) Поширюючись середовищем, ФНШС сигнал поступово набуває амплітудної модуляції. Це пояснюється складною фрактальною структурою його СФ ОПФ.

3) для ВЧ ФНШС сигналу виникаючі дисперсійні спотворення виявляються більш значними, ніж для ВЧ УК НШС сигналу з аналогічними параметрами. Такі спотворення полягають у збільшенні відносної тривалості сигналу, запізненні переднього фронту сигналу та максимуму його обвідної (яка поступово формується під час поширення) (рис. 4).

Так, для параболічного шару з  $f_p(z_{\max}) = 10^7$  Гц,  $z_{\max} = 200$  км та ФНШС сигналу з  $D = 1.5$ ,  $f_0 = 10^{10}$  Гц і  $\mu = 1.84$  у порівнянні з нефрактальним УК НШС сигналом з  $f_0 = 10^{10}$  Гц,  $\mu = 1.57$  величина відносного збільшення тривалості сигналу  $\tau_s / \tau_{s0}$  збільшується приблизно вдвічі (з 10 до 20). Цей факт можна пояснити тим, що маючи однакову  $f_0$ , сигнали відрізняються шириною спектра ОПФ, до того ж для ФНШС сигналу вона є складніша за структурою, а найголовніше – вона сама має фрактальні властивості.

Основні результати дисертаційної роботи викладено у **висновках**.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано задачу підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування для радіофізичних досліджень геокосмосу за рахунок використання методів фрактального та мультифрактального аналізу.

Основні результати дисертаційної роботи є наступними.



1. Розроблено новий комплексний метод фрактального аналізу – метод УФА який за інформативністю значно перевищує решту існуючих методів монофрактального аналізу, оскільки він пропонує дослідження шістнадцяти характеристик замість традиційних двох-трьох подібних характеристик.

2. Створено новий спеціальний комплексний метод фрактального аналізу – метод ДинФА, який вперше поєднує можливості методів фрактального та часочастотного аналізу, причому оцінки, отримані в одному з них, використовуються для покращення результатів іншого.

3. Створено набір нових моделей ФНШС сигналів. З їх використанням клітинної  $D_B$ , варіаційної  $D_V$  та регуляризаційної  $D_R$  розмірностей встановлено, що кожна з них може використовуватись як ефективна оцінка відомої істинної фрактальної розмірності сигналу  $D$  тільки в обмеженому інтервалі значень.

4. Для підвищення точності оцінки фрактальних і мультифрактальних характеристик досліджуваних сигналів і процесів у методах фрактального та мультифрактального аналізів вперше запропоновано універсальний метод – метод КФ. Він дозволяє компенсувати завжди існуючу нелінійність залежності між істинним значенням фрактальної розмірності та її оцінкою, здійсненою з використанням обраного методу фрактального аналізу за відомої кількості відліків дискретного вектору даних досліджуваного сигналу.

5. Встановлено що за умов використання методу КФ для монофрактального аналізу при мінімально дозволений кількості відліків ФС максимальне відхилення оцінюваної фрактальної розмірності від істинного відомого значення, яке складало у рамках «стратегії децимації» для  $D_B$  – 23%, для  $D_R$  – 32%, для  $D_V$  – 56%, для  $D_H$  – 27%, а у рамках «стратегії звуження вікна» для  $D_B$  – 23%, для  $D_R$  – 21%, для  $D_V$  – 12%, для  $D_H$  – 31%, не перевищує 5 – 7 % за рівня надійності 0.9.

6. Показано, що метод КФ для мультифрактального аналізу дозволяє істотно знизити відхилення отримуваної оцінки узагальненого показника Херста  $\alpha^*$  від істинного відомого значення показника Гельдера  $\alpha$  аналізованого сигналу (наприклад при  $N_{\min} = 32$  у діапазоні  $\alpha = 0.2 - 0.8$  з  $90 \div 5$  % до лише  $8 \div 3$  % за рівня надійності 0.9).

7. Із використанням методів WTMM і MF DFA, а також нових числових характеристик на основі функції мультифрактального спектру (коефіцієнт асиметрії та показник її відносної ширини, а також розмірність носія мультифракталу), проведено мультифрактальний аналіз низки модельних ФС і МФС. Розроблено зручні формати представлення результатів аналізу. Виявлено особливості мультифрактального аналізу монофрактальних, мультифрактальних і нефрактальних сигналів і процесів, сформульовано відповідні рекомендації для практиків.

8. Із застосуванням нових алгоритмів проведення фрактального та мультифрактального аналізів виявлено, що сигнали гравітаційних хвиль, будучи створеними унікальним природним НШС процесом зі змінною середньою частотою (ЗСЧ НШС процесом), мають складну нестационарну мультифрактальну структуру. Величина узагальненого показника Херста для обох реалізацій складає  $\alpha^* \approx 0.65$ , що досить добре узгоджується з оцінкою показника Херста  $H \approx 0.55 \pm 0.10$ . За-

галом обидві реалізації, що є слабо антиперсистентними, ймовірно, можуть перебувати під впливом адитивного білого гаусівського шуму ( $H = 0.5$ ). Фрактальність обох компонент проявляється приблизно в діапазоні безрозмірного часу  $t \in [0;6]$ , де перебуває приблизно половина згаданого ЗСЧ НШС процесу. Друга його половина виявилася нефрактальною. Наразі не можна однозначно стверджувати, чи є отримана фрактальна компонента частиною сигналу гравітаційних хвиль, чи вона є шумом зовсім іншого фізичного походження.

9. Встановлено, що прямий та обернений акустичні НШС сигнали, згенеровані під час падіння Челябінського метеороїда, містять по два фрактальних ЗСЧ НШС процеси зі складною, нестационарною мультифрактальною структурою. Херстова розмірність  $D_H(t)$  першої пари ФНШС процесів обох сигналів змінюється приблизно у діапазоні 1.4 – 1.6, а другої – 1.5 – 1.7. Всі чотири ЗСЧ НШС процеси є мультифрактальними та майже усюди антиперсистентними, хоча подекуди вони й наближалися до монофрактального режиму ( $\Delta\alpha \leq 0.2$ ). Скоріш за все, перший ЗСЧ НШС процес у кожній з двох аналізованих часових реалізацій є пов'язаним із генерацією та поширенням вибухової ударної хвилі, а другий – із генерацією та поширенням балістичної хвилі.

10. Встановлено, що часові варіації електромагнітного поля Землі, що виникли під час надпотужної геокосмічної бурі, яка відбулася 7 – 8 вересня 2017 р., мають у своєму складі низку УК НШС і ЗСЧ НШС процесів, що мають характерну мультифрактальну структуру, а тому можуть бути віднесені до класу ФНШС процесів. Фактично всі виявлені збурення є мультифрактальними й у переважній більшості мають антиперсистентний характер ( $D_H > 1.5$ ,  $\alpha^* < 0.5$ ).

11. Продемонстровано, що НШС процеси, виявлені в унікальних часових варіаціях електромагнітного поля Землі, які зареєстровано під час потужного землетрусу 24 січня 2020 р. у Туреччині, є ФНШС процесами. Виявлено особливості часової динаміки фрактальних і мультифрактальних характеристик, що можуть бути пов'язані із передвісниками землетрусів. Так, перед самим землетрусом мультифрактальний характер варіацій обох компонент геомагнітного поля ( $\Delta\alpha \approx 0.5$ ,  $\alpha^* \approx 0.4$ ) змінився на монофрактальний ( $\Delta\alpha \approx 0.2$ ,  $\alpha^* \approx 0.2$ ), до того ж сильно антиперсистентний ( $D = 2 - \alpha^* \approx 1.8$ ). Крім того, в обох компонентах був виявлений ще один, менш виражений, перехід до монофрактального режиму, який відбувся вже після початку землетрусу і, можливо, був пов'язаний із афтершоком. Менша степінь «монофракталізації» мультифрактального процесу у другому випадку пояснюється меншою потужністю афтершоку.

12. Вперше досліджено характер та отримано оцінки величини дисперсійних спотворень ВЧ ФНШС сигналів, що виникають під час поширення у іоносфері Землі, модельованій параболічним шаром.

Отримана у даній дисертаційній роботі інформація є важливою складовою розв'язання наукової проблеми створення глобальної міжнародної системи оперативного моніторингу стану геокосмосу.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Основні наукові статті:**

1. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Fractal Analysis of the Fractal Ultra-Wideband Signals // Problems of Atomic Science and Technology. Series ‘Plasma Electronics and New Methods of Acceleration’. 2015. No. 4(98), Iss. 9. P. 248 – 251. (Scopus)
2. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Multi-Fractal Analysis of the Gravitational Waves // Vestnik of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Physics. 2017. No. 26. P. 33 – 39.
3. Chernogor L. F., Garmach K. P., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Multi-Fractal Analysis of the Earth’s Electromagnetic Field Variations Caused by the Powerful Geospace Storm Occurred on September 7 – 8, 2017 // Problems of Atomic Science and Technology. Series ‘Plasma Electronics and New Methods of Acceleration’. 2018. No. 4(116), Iss. 10. P. 118 – 121. (Scopus)
4. Onishchenko A., Chernogor L., Lazorenko O. Dynamical Fractal Analysis of the Acoustic Ultra-Wideband Signal Caused by the Chelyabinsk Meteoroid // Eskişehir Technical Univ. J. of Sci. and Tech. A. Appl. Sci. and Eng. 2019. Vol. 20. P. 188 – 192. (Іноземний фаховий науковий журнал).
5. Лазоренко О. В., Онищенко А. А., Черногор Л. Ф. Метод коригуючої функції для фрактального аналізу // Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2022. № 210. С. 177 – 187.
6. Onishchenko A., Chernogor L., Lazorenko O. Fractal and Multi-Fractal Analyses of the Geomagnetic Field Variations Caused by the Earthquake on January 24, 2020 in Turkey // Journal of Natural Science and Technologies. 2022. Vol. 1, No. 1. P. 56 – 61. (Іноземний фаховий науковий журнал).
7. Лазоренко О. В., Онищенко А. А., Черногор Л. Ф. Мультифрактальний аналіз модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів // Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2022. № 211. С. 74 – 85.

### **Додаткові наукові статті**

8. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Dispersive Distortions of the Fractal Ultra-Wideband Signals in Plasma Media // Problems of Atomic Science and Technology. Series ‘Plasma Electronics and New Methods of Acceleration’. 2018. No. 4(116), Iss. 10. P. 135 – 138. (Scopus)

### **Основні тези доповідей на наукових конференціях:**

9. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Fractal Analysis of Model Fractal Ultra-Wideband Signals // 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals: Proceedings of 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 15 – 19 September 2014, Kharkiv, 2014, P. 112 – 115.
10. Онищенко А. А., Лазоренко О. В. Надширокосмугові сигнали і фрактальний аналіз // Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів і здобувачів: Матеріали підсумкової наукової конференції професорсь-

ко-викладацького складу, аспірантів і здобувачів, (Харків, 23 – 24 березня 2016 р.). Харків: ХНАУ імені В. В. Докучаєва, 2016. С. 112 – 113.

11. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. New Models of the Fractal Ultra-Wideband Signals // UWBUSIS'2016: Proceedings of 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5 – 11 September 2016, Odessa, 2016, P. 89 – 92. (Scopus, Web of Science)

12. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф., Онищенко А. А. Дослідження гравітаційної хвилі за допомоги фрактального та мультифрактального аналізів // Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (I Міжнародного симпозиуму) 9-11 листопада 2017 р., Чернівці, Україна, 2017. С. 136 – 137.

13. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Fractal Analysis of the Gravitational Waves as a Unique Ultra-Wideband Process // UWBUSIS'2018: Proceedings of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4–7 September 2018, Odessa, 2018, P. 34 – 39. (Scopus, Web of Science)

14. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Multi-Fractal Analysis of the Acoustic Ultra-Wideband Signal Caused by the Chelyabinsk Meteoroid // UWBUSIS'2018: Proceedings of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4 – 7 September 2018, Odessa, 2018, P. 123 – 126. (Scopus, Web of Science)

15. Лазоренко О. В., Гармаш К. П., Онищенко А. А., Черногор Л. Ф. Вариации геомагнитного поля Земли, сопровождавшие геокосмические бури 7 – 14 сентября 2017 г. // 18 Української конференції з космічних досліджень: тези 18 Української конференції з космічних досліджень 17 – 20 вересня 2018 р., Київ, 2018. С. 34

16. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Dynamical Fractal Analysis of the Acoustic Ultra-Wideband Signal Caused by the Chelyabinsk Meteoroid // ICONAT-2019: Program and Abstract Book of International Conference on Natural Science and Tecnology, 18 – 20 September 2019, Kharkiv, 2019. P. 42

17. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Time-Frequency and Fractal Analyses of the Earth's Magnetic Field Variations Appeared During Powerful Geospace Storms Took Place in September 2017 // Astronomy and Space in the Kyiv University: Book of Abstracts International Conference, (Kyiv, 25-28 May 2021). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomical Observatory, 2021. P. 90 – 91.

18. Onishchenko A., Chernogor L., Lazorenko O. Fractal and Multi-Fractal Analyses of the Geomagnetic Field Variations Caused by the Earthquake on January 24, 2020 in Turkey // ICONAT-2022: Conference Book of IV. Int. Conf. on Natural Science and Technology, 24 – 26 August 2022, Antalya, 2022. 74 p.

19. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Fractal Analysis in Space Physics // Astronomy and Space Physics: Proceedings of International Conference 18 – 20 October 2022, Kyiv, 2022. P. 77 – 78.

20. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Onishchenko A. A. Fractal Analysis in Problems of the Applied Physics // Electronics and Applied Physics: Book of Proceedings of the XVIII International Conference, 18 – 22 October 2022, Kyiv, 2022. P. 148 – 149.

## АНОТАЦІЯ

Онищенко А. А. Фрактальний аналіз в методах дистанційного радіозондування геокосмосу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет радіоелектроніки. – Харків, 2023.

Розв'язано задачу підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування для радіофізичних досліджень геокосмосу за рахунок використання методів фрактального та мультифрактального аналізів. Запропоновано нові комплексні методи фрактального аналізу сигналів і процесів – узагальнений фрактальний аналіз, динамічний фрактальний аналіз і метод коригуючої функції. Із використанням створених нових модельних монофрактальних і мультифрактальних сигналів продемонстровано особливості, переваги та недоліки нових методів. Розроблено оригінальні алгоритми моно- та мультифрактального аналізу. З їх використанням проведено дослідження фрактальних характеристик реальних експериментальних даних, отриманих в методах дистанційного радіозондування геокосмосу. Проаналізовано унікальні реєстрації гравітаційних хвиль, інфразвукових хвиль, що виникли під час падіння Челябінського метеороїда, а також часові варіації електромагнітного поля Землі, що спостерігалися під час надпотужної геокосмічної бурі 7 – 8 вересня 2017 р. та потужного землетрусу у Туреччині 20 січня 2020 р., оцінено низку фрактальних і мультифрактальних характеристик відповідних сигналів і процесів. Досліджено дисперсійні спотворення високочастотних фрактальних надширококутних сигналів, що виникають під час їх поширення у навколоземному середовищі.

**Ключові слова:** фрактальний аналіз, мультифрактальний аналіз, фрактальний сигнал, мультифрактальний процес, дистанційне радіозондування, дисперсійні спотворення, радіофізика геокосмосу.

## ABSTRACT

Onishchenko A. A. Fractal analysis in methods of remote radio sounding of geospace. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree in Physics and Mathematics by specialty 01.04.03 – radio physics. – Kharkiv National University of Radioelectronics. – Kharkiv, 2023.

The problem of increasing the informativeness of remote radio sounding methods for radiophysical investigations of the geospace by using fractal and multifractal analysis methods has been solved.

New complex methods of fractal analysis of signals and processes, namely the generalized fractal analysis (GFA), the dynamic fractal analysis (DynFA) and the corrective function (CF) method are proposed. The GFA method significantly exceeds other existing methods of monofractal analysis in terms of informativeness, as it offers the study of sixteen characteristics instead of the traditional two or three similar ones. The DynFA method for the first time combines the capabilities of the fractal and time-frequency analysis methods, and the estimates obtained in one of them are used to im-

prove the results of the other. Being a universal method, the CF method allows to increase the accuracy of the assessment of fractal and multifractal characteristics of the investigated signals and processes in the methods of fractal and multifractal analyzes. Using the created new model monofractal and multifractal signals, the features, advantages and disadvantages of the new methods are demonstrated.

Using the WTMM and MF DFA methods, as well as new numerical characteristics based on the function of the multifractal spectrum (the asymmetry coefficient and the index of its relative width, as well as the dimension of the multifractal support), a multifractal analysis of a set of original fractal and multifractal signal models was performed. New convenient formats for presenting analysis results have been developed. Features of multifractal analysis of monofractal, multifractal and non-fractal signals and processes are identified, appropriate recommendations for practitioners are formulated.

Original algorithms for mono- and multifractal analysis have been developed. With their application, a study of the fractal characteristics of experimental data obtained in the methods of remote radio sounding of the geospace was performed.

Being generated by a unique powerful natural ultra-wideband process with changing mean frequency (ChMF UWB), the gravitational wave signals were appeared to be fractal UWB (FUWB) ones with complex non-stationary multifractal structure. However, currently, it is not possible to unequivocally state whether the received fractal component is part of the gravitational wave signal or whether it is noise of a completely different physical origin.

Both the direct and the reversed signals of the infrasound waves that occurred during the fall of the Chelyabinsk meteoroid were found to contain a pair of the fractal ChMF UWB processes with complex non-stationary multifractal structure. Being multifractal, all four ChMF UWB processes were appeared to be almost anywhere antipersistent. Most likely, the first processes in each pair are related to the generation and propagation of an explosive shock wave, and the second processes are explained by the generation and propagation of a ballistic wave.

The temporal variations of the Earth's electromagnetic field that were observed during the super-powerful geospace storm on September 7-8, 2017 were found to contain several ultra-short and ChMF UWB processes with typical multifractal structure and therefore they can be classified as the FUWB processes. All disturbances detected were appeared to be multifractal and almost anywhere antipersistent.

The temporal variations of the Earth's electromagnetic field that were detected during the powerful earthquake in Turkey on January 20, 2020 were shown to be the FUWB processes. Peculiarities of the temporal dynamics of fractal and multifractal characteristics, which may be associated with the harbingers of earthquakes, have been revealed.

Dispersion distortions of high-frequency fractal ultra-wideband signals that occur during their propagation in the near-to- Earth space have been investigated.

**Key words:** fractal analysis, multi-fractal analysis, fractal signal, multi-fractal process, remote radio sounding, dispersive distortions, radiophysics of the geospace.



Фарма 00x0018 Уш. друх, дэх 3.0, Тас. 100 гаруй Зам. № 003-03.  
Цэвэрлэгдэж дуусуу 01.10.2023. Пагир оффлайн.

Индуролонго з мөхөгч замалонго ФОН Брелла Л/Л  
01022, м. Хархей, урл. Триверта, 2, нэвс.Г.Т. (066) 822-11-30