

## ВІДГУК

*офіційного опонента на дисертацію Опищенка Андрія Анатолійовича «Фрактальний аналіз в методах дистанційного радіозондування геокосмоса», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика*

### **Актуальність теми дисертації.**

Історично класична математика, на якій збудовано сучасні природничі науки, до останнього часу базувалася на Евклідовій геометрії. Використання інших цілком можливих підходів (наприклад, геометрії Лобачевського) спостерігалось досить рідко, до того ж це відбувалося здебільшого у «чистій» математиці, не торкаючись її прикладних аспектів, що зазвичай використовуються у природничих науках. Таке становище було докорінним чином змінено у 1975 р. видатним американським вченим Бенуа Мандельбротом, коли він ввів у обіг принципово нове поняття – «фрактал». Вдало поєднавши у струнку та завершену систему маловідомі роботи видатних математиків минулого із власними спостереженнями навколишнього світу, Б. Мандельброт створив альтернативу геометрії Евкліда – фрактальну геометрію.

Застосування фрактального підходу призвело до «фракталізації» найрізноманітніших галузей науки, техніки та технологій.

На сьогодні однією з найважливіших проблем, що стоїть перед сучасною людською цивілізацією, є проблема створення та вдосконалення глобальної міжнародної системи оперативного моніторингу стану геокосмосу. Успішне розв'язання даної проблеми є неможливим без побудови фізичної моделі великомасштабних і глобальних процесів у геокосмосі, що виникають під впливом потужного нестационарного джерела енерговиділення. У рамках нелінійної та системної парадигм у багатьох випадках ці процеси виявляються короткотерміновими, надширококутовими, нелінійними та фрактальними. І якщо властивості часо-частотної структури таких процесів останніми роками досить ефективно вивчаються із використанням таких сучасних методів аналізу, як, вейвлет-аналіз, нелінійні перетворення класу Коена, системний спектральний аналіз тощо, то фрактальні властивості залишалися поза увагою.

Саме тому запропонована автором дисертації ідея підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування, що використовуються для радіофізичних досліджень геокосмосу, через отримання із застосуванням методів фрактального та мультифрактального аналізів низки кількісних параметрів фрактальної структури сигналів, що ресструються, є корисною та **актуальною**.

*Метою* роботи є підвищення інформативності методів дистанційного радіозондування для радіофізичних досліджень геокосмосу із використанням методів фрактального та мультифрактального аналізів.

Досягненню поставленої мети сприяє розв'язання низки *задач*, що

полягають у:

- ✓ розробці нового комплексного методу фрактального аналізу (універсального фрактального аналізу), що забезпечує різнобічний розгляд досліджуваного сигналу або процесу на базі вивчення низки числових фрактальних характеристик, отриманих незалежними методами;
- ✓ створенні нового методу фрактального аналізу, що дозволяє вивчати динаміку змін фрактальних особливостей досліджуваного сигналу з урахуваннями його часо-частотної структури;
- ✓ конструюванні нових ефективних алгоритмів фрактального та мультифрактального аналізів експериментальних даних, що можна рекомендувати до використання дослідникам, та перевірка їх ефективності з використанням створених модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів;
- ✓ отриманні нової інформації про фрактальні властивості сигналів і процесів в задачах дистанційного радіозондування геокосмосу з використанням запропонованих алгоритмів фрактального та мультифрактального аналізів;
- ✓ оцінці дисперсійних спотворень високочастотних фрактальних надширококутних сигналів, що виникають під час їх поширення у іоносфері Землі.

Тема дисертації пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки, визначеними Верховною Радою України. Результати дисертації отримано у 2014 – 2022 рр., зокрема, у 2015 – 2020 рр. – в рамках виконання 5 науково-дослідних робіт, де автор обіймав посаду *виконавця*.

Низка задач, розв'язаних автором дисертації, у сукупності утворює важливу задачу сучасної радіофізики, що полягає у підвищенні інформативності методів дистанційного радіозондування для радіофізичних досліджень геокосмосу із використанням методів фрактального та мультифрактального аналізів. Отже, **актуальність** теми досліджень, проведених у дисертації А. А. Онищенка, не викликає сумнівів.

### **Структура і зміст 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.

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 стисло 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 обгрунтовано постановку задач досліджень автора.

**Другий розділ** присвячено фрактальному аналізу модельних сигналів. Запропоновано та розглянуто: методи узагальненого фрактального аналізу та динамічного фрактального аналізу, фрактального аналізу фрактальних надширококутних сигналів, метод коригуючої функції та проведено фрактальний аналіз фрактальних і мультифрактальних сигналів.

У **третьому розділі** розглянуто мультифрактальний аналіз модельних сигналів, його методи та проведено мультифрактальний аналіз різноманітних модельних фрактальних сигналів.

У **четвертому розділі** проведено аналіз сигналів у задачах радіофізики геокосмосу: фрактальних характеристик гравітаційної хвилі, виникаючої при злитті двох чорних дір; інфразвукових хвиль, сгенерованих Челябінським метеороїдом; варіацій електромагнітного поля Землі протягом надпотужної магнітної бурі 7 – 8 вересня 2017 р. та електромагнітного поля Землі під час землетрусу 24 січня 2020 р. у Туреччині.

У **п'ятому розділі** досліджено дисперсійні спотворення високочастотних фрактальних надширококутних сигналів (ФІШС) сигналів, які виникають при їх поширенні в навколосемному космічному просторі.

**Оцінка обгрунтованості наукових положень дисертації, їхньої достовірності та новизни.**

Наукові результати, висновки та рекомендації, що отримано в роботі, не суперечать загальноповідомим положенням сучасної радіофізики. Достовірність отриманих результатів зумовлена застосуванням комплексу сучасних методів дослідження та методики обробки результатів. Вона підтверджується математичною коректністю постановки та розв'язання задач, результатами математичного моделювання й експериментальних досліджень, узгодженістю отриманих результатів у граничних випадках із результатами інших авторів.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному.

- ✓ Вперше створено комплексний метод фрактального аналізу сигналів і процесів – узагальнений фрактальний аналіз, що має велику інформативність. Достатня кількість інформації про фрактальні властивості досліджуваного сигналу та їх часова динаміка отримується шляхом вивчення набору з шістнадцяти різноманітних числових характеристик та їх порівняння між собою, тоді як у традиційних методах фрактального аналізу їх кількість обмежується лише двома – трьома.
- ✓ Розроблено метод динамічного фрактального аналізу, який дозволяє оцінювати фрактальні характеристики сигналу з урахуванням його часо-частотної структури. На прикладі модельних і реальних сигналів і процесів продемонстровано ефективність створеного методу.
- ✓ Вперше запропоновано метод покращення точності числових характеристик

тик, отримуваних у методах фрактального та мультифрактального аналізів – метод коригуючої функції. Із використанням набору розроблених модельних сигналів встановлено, що новий підхід дозволяє зменшити похибку оцінювання для низки фрактальних розмірностей (з 24 – 50 % до 5 – 7 %) в методах монофрактального аналізу та для узагальненого показника Херста (з 5 – 90 % до 3 – 8 %) в методах мультифрактального аналізу. Також для низки фрактальних розмірностей вперше отримано обґрунтовану оцінку мінімально необхідної кількості точок дискретного вектору даних.

- ✓ У рамках мультифрактального аналізу запропоновано набір нових числових характеристик, корисність застосування яких доведено на прикладі дослідження нестационарних (у сенсі фрактальних властивостей) модельних і реальних сигналів і процесів.
- ✓ Вперше з використанням створених нових методів фрактального та мультифрактального аналізів отримано унікальну інформацію про особливості часової динаміки фрактальної структури низки процесів геокосмосі, які є його реакцією на дію потужних, нестационарних джерел енерговиділення, а саме, гравітаційної хвилі, падіння Челябінського метеороїда, надпотужної геокосмічної бурі, потужного землетрусу. Встановлено, що досліджені процеси належать до класу фрактальних надширококутових.
- ✓ Вперше виявлено характер дисперсійних спотворень високочастотних фрактальних надширококутових сигналів, що виникають під час їх поширення у іоносфері Землі.

**Практична цінність** результатів дисертації А. А. Онищенка полягає у наступному.

- ✓ Створений метод узагальненого фрактального аналізу є потужним інструментом детального дослідження фрактальних властивостей сигналів і процесів, а тому може успішно застосовуватися у найрізноманітніших галузях науки та техніки.
- ✓ Метод динамічного фрактального аналізу вдало поєднує між собою можливості методів фрактального та часо-частотного аналізів є вкрай корисним для вивчення нестационарної фрактальної структури сигналу або процесу. Дослідник може одночасно, з одного боку, виявляти цікаві йому збурення у часо-частотній структурі й отримувати оцінки їх параметрів, а з іншого боку, на основі цих оцінок проводити оптимальне дослідження фрактальних характеристик виявлених збурень.
- ✓ Набір нових моделей фрактальних і мультифрактальних, а також фрактальних надширококутових сигналів, а також запропоновані нові мультифрактальні характеристики можуть бути корисними під час 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, фінансах тощо.

- ✓ Метод коригуючої функції є універсальним та ефективним засобом підвищення точності оцінок характеристик досліджуваних сигналів і процесів при практичному застосуванні методів фрактального та мультифрактального аналізів. Більш того, запропонований чіткий підхід до оцінювання мінімально необхідної кількості відліків дискретного вектору даних унеможлиблює отримання на практиці неадекватної інформації про фрактальні властивості досліджуваного сигналу через використання недостатньої кількості таких відліків.
- ✓ Запропоновані алгоритми проведення фрактального та мультифрактального аналізів сигналів і процесів доцільні для практичного застосування спеціалістам у різноманітних галузях науки та техніки.
- ✓ Отримана нова корисна інформація про особливості фрактальної структури низки процесів геокосмосу, які є його реакцією на дію потужних, нестационарних джерел енерговиділення (гравітаційна хвиля, падіння Челябінського метеороїда, надпотужна геокосмічна буря, потужний землетрус) потрібна для розв'язання проблеми створення глобальної міжнародної системи оперативного моніторингу стану геокосмосу.
- ✓ Оцінки характеру дисперсійних спотворень високочастотних фрактальних надширококутєвих сигналів будуть корисними під час розв'язання задач радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування, телекомунікації та зв'язку тощо з використанням таких сигналів.
- ✓ Детально розглянуто достатньо широкий перелік моделей фрактальних сигналів та показано на них можливість використання запропонованих нових підходів до аналізу як стаціонарних, так, що ще більш важливо, нестационарних сигналів та процесів.

**Повнота висвітлення результатів в опублікованих працях.** Всі результати дисертації А. А. Ониценка опубліковано в провідних фахових національних і закордонних наукових виданнях. Вони неодноразово доповідались на наукових конференціях високого рівня, де пройшли цілком достатню апробацію. Основні результати дисертації А. А. Ониценка повною мірою викладено в 20 наукових публікаціях: в 7 наукових статтях, з яких 2 – у журналах, цитованих у Scopus, 2 – в іноземних фахових наукових журналах, 3 – у спеціалізованих виданнях, що належать до Переліку МОН України за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика, 1 додатковій статті у журналі, який цитовано у Scopus, та 12 тезах доповідей наукових конференцій різного рівня (з них цитованих у Scopus та Web of Science – 3). Статті опубліковано в наступних закордонних журналах: «Eskişehir Technical Univ. J. of Sci. and Tech. A. Appl. Sci. and Eng.», «Journal of Natural Science and Technologies», а також у провідних українських журналах з Переліку, затвердженого МОН України, зокрема, «Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.», «Vestnik of V. N. Karazin Kharkiv National University» та «Problems of

**Можливі шляхи використання результатів досліджень.** Отримані в дисертаційній роботі А. А. Онищенко наукові результати можуть бути використані в установах та організаціях, які займаються радіофізичними дослідженнями, в тому числі й моніторингом стану геокосмосу, зокрема, в ІРЕ НАНУ та РІ НАНУ, Інституті іоносфери МОН і НАН України, а також у вищих навчальних закладах, зокрема, ХНУ імені В. Н. Каразіна, ХНУРЕ, НПУ «ХП», НАУ «ХАІ», НПУУ «КП», КНУ імені Т. Г. Шевченка, ДПУ і т. і.

Отримані в дисертації нові наукові результати мають широку практичну цінність для опису та аналізу нестационарних негаусових процесів та сигналів в різних галузях науки та техніки і в подальшому можуть стати основою для написання монографії.

**Оформлення дисертаційної роботи.** Дисертаційну роботу написано загальнозрозумілою науковою мовою, оформлено відповідно до існуючих вимог Міністерства освіти і науки України, зміст і стиль викладання матеріалу свідчить про високий рівень наукової кваліфікації автора. Автореферат повністю відповідає дисертації, а її основні положення є повністю ідентичними змістові автореферату. Результати досліджень повністю відображені у публікаціях. Їхня кількість та повнота відображення повністю відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України.

#### **Зауваження та помічені недоліки.**

##### **1. Оформлення роботи.**

- Інколи в тексті дисертації зустрічаються окремі технічні помилки (наприклад, стор. 3, абз. 1: «сучасною» замість «сучасної»; стор. 3, абз. 2: друге слово «відповідно» є зайвим; стор. 20, абз. 2: «довільно» замість «довільно»; стор. 36, абз. 3: «нескінченним» замість «пескінченним», стор. 31, абз. 5: друге слово «використовувати» є зайвим).
- На стор. 26, абз. 1 використовується скорочення «ДР», яке до цього у тексті не було введено.
- В тексті дисертації інколи зустрічаються описки. Так наприклад на стор. 83 операція децимацій: «Почнемо зменшувати  $N$  на кожному кроці вдвічі, використовуючи операцію децимації початкового сигналу... Але з теорії сигналів добре відомо, що така операція є еквівалентною пропусканню сигналу через фільтр високих частот  $U$  результаті цього його спектр поступово звужуватиметься», а повинно бути: фільтр нижніх частот, а далі по тексту.
- Описка, наприклад стор. 132 «Для моделі 8 з  $D = 1.2$  (рис. 3.1, і) маємо  $\alpha_{\min} = 0.54$ ,  $\alpha_{\max} = 0.94$ ,  $\Delta\alpha = 0.50 \dots$ » тоді як повинно бути -  $\Delta\alpha = 0.40$ .
- На деяких рисунках окремі елементи, на мою думку, є занадто дрібними, що ускладнює роботу з ними.

- Дуже велика кількість розрахункових таблиць ускладнює сприйняття тексту дисертації. Можливо їх можна було б винести у додатки, а в основному тексті залишити аналіз отриманих результатів.
2. Мова та стиль викладання матеріалу.
    - Інколи зустрічаються тавтологія (наприклад, «через обмежений дозволений об'єм даного аналітичного огляду обмежимось...», стор. 28, абз. 4), а також окремі синтаксичні та пунктуаційні помилки (наприклад, стор. 18, абз. 4: не «їого розмірність», а «її розмірність»; стор. 14, абз. 4: не «сгенерованих», а «згенерованих»).
    - Інколи автор вживає не зовсім коректні з точки зору української мови терміни: наприклад, «кліткова розмірність» замість «клітинна розмірність» (стор. 28, абз. 6) і т. і.
  3. Під час аналізу експериментальних даних, що наведено у Розділі 4, подекуди використовуються не всі кроки запропонованих автором у Розділах 2 і 3 алгоритмів фрактального та мультифрактального аналізів, але відсутнє пояснення яким чином потрібно вибрати з запропонованих ті чи інші кроки і яка кількість їх буде достатньою.
  4. Аналізуючи фрактальні та мультифрактальні властивості часових варіацій електромагнітного поля Землі, автор висловлює гіпотезу про можливість використання отриманих результатів для прогнозування наближення потужних землетрусів. З тексту дисертації не зрозуміло, чи проводяться аналогічні пошуки передвісників землетрусів іншими дослідниками й яким є стан цього питання на теперішній час.
  5. Оскільки землетруси супроводжуються нелінійними процесами деформації, що призводять до звільнення великої кількості енергії для виявлення передвісників їх появи цікаво було б провести мультифрактальний аналіз характеристик не тільки поведінки варіацій геомагнітного поля, а й літосферного електромагнітного випромінювання. Використання запропонованих автором фрактальних розмірностей та ДФА для аналізу літосферного випромінювання може дати цікаву інформацію необхідну для виявлення передвісників землетрусу.
  6. Неясно, чим можна пояснити істотно різний характер зміни фрактальних коефіцієнтів для прямої та оберненої акустичних хвиль при проходженні Челябінського метеороїду.
  7. Неясно з яких міркувань вибиралися характерні розміри вікон  $T_i$  (004; 0,837; 1,671; та 2.5. Їх вибір має бути пов'язаний, як мені здається, з характерними масштабами просторово-часових нестационарностей процесів, що розглядаються. Але в дисертації цей момент упущено.
  8. Аналіз фрактальних характеристик процесів бажано було б не закінчувати на оцінці параметрів, а продовжити до виявлення породжуючих процеси диференціальних рівнянь, що дало б суттєво більше інформації про фізику розвитку та існування цих процесів.

Але наведені вище недоліки не псувають загального позитивного враження

від цікавої, змістовної та корисної дисертаційної роботи А. А. Онищенка.

**Загальний висновок.**

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика.

Дисертація є одноосібним завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язано актуальну наукову задачу сучасної радіофізики, що полягає у підвищенні інформативності методів дистанційного радіозондування для радіофізичних досліджень геокосмосу із використанням методів фрактального та мультифрактального аналізів.

Дисертаційна робота в цілому за отриманими результатами, змістом та оформленням задовольняє вимогам пункту 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 зі змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів №656 від 19 серпня 2015 р., № 1159 від 30 грудня 2015 р., та № 1359 від 13 грудня 2021 р., а її автор **Онищенко Андрій Анатолійович** заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,  
завідувач лабораторії моніторингу  
і спектроскопії середовищ  
Інституту радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова ІАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор

*В.І. Луценко* В. І.

04.10.2023р.

Підпис д.ф.-м.н. професора Луценко В.І. засвідчую

ВО вченого секретаря ІРЕ ім.О.Я.Усикова ІАН України  
к.ф.-м.н.



*О.В. Кривенко* Кривенко О.В.

*Відгук оформлено 05 жовтня 2023 р.*

*Учений секретар списку*

*В.І. Луценко*