

ВИЗНАЧЕННЯ ОНКОЛОГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Лупіка Е.Г.

e-mail: elvira.lupika@nure.ua

Науковий керівник – канд. фіз.-мат. наук, доц. Онищенко А.А.
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

Fractal analysis is an emerging quantitative method in oncology that enables objective characterization of tumor morphology through the calculation of fractal dimension (FD). Unlike traditional qualitative histopathological assessment, fractal-based approaches provide reproducible numerical metrics that correlate with malignancy grade, tissue heterogeneity, and treatment response. This paper reviews the application of fractal geometry in cancer diagnostics, including histopathology, MRI-based radiomics, and automated classification systems enhanced by machine learning. Studies demonstrate that FD can differentiate benign from malignant lesions with high specificity, predict pathological complete response to neoadjuvant chemotherapy, and reflect tumor immune microenvironment characteristics. The integration of fractal analysis with modern imaging modalities represents a promising direction for non-invasive, data-driven oncological diagnostics.

Попри значний прогрес у молекулярній онкології, більшість діагностичних рішень досі ґрунтується на суб'єктивній візуальній оцінці гістологічних препаратів і радіологічних зображень. Такий підхід є якісним, а не кількісним – клініцисти класифікують аномальні ознаки на основі навченого сприйняття, а не об'єктивних вимірювань. Це породжує варіабельність між спостерігачами та ризик діагностичних помилок, особливо на ранніх стадіях хвороби. Виникнення раку можна розглядати як відхилення від рівноважних структур, що спричиняє хаос і підвищення складності, як на рівні морфології пухлини, так і на рівні внутрішньоклітинних компонентів, що корелює з агресивністю пухлини.

Біологічні тканини мають фрактальну структуру, і зміна самоподібності в процесі прогресування раку відображається у змінах фрактальних розмірностей [1]. Термін «фрактал» вперше використав Бенуа Мандельброт у 1960-х роках. Фрактальні структури – це самоподібні в геометричному або статистичному сенсі на різних масштабах структури. Під фрактальною розмірністю (FD) розуміють числовий показник ступеня складності та нерегулярності структури, що може набувати нецілих значень: чим нерегулярніший об'єкт, тим вища його FD [1]. Для того щоб зменшити суб'єктивність при діагностиці захворювань доцільно використовувати кількісні характеристики які можна отримати при фрактальному аналізі зображення тканин. Фрактальний аналіз дозволяє кількісно оцінити

складність тканинної архітектури. Під час канцерогенезу архітектура тканини зазнає достатніх змін, яких достатньо для їх виявлення фрактальним методом. Дослідження показали статистично значущі відмінності між нормальною тканиною та злоякісними пухлинами; специфічні порогові значення FD забезпечують ~99% специфічність при діагностиці раку молочної залози [1]. Перспективність цього напрямку підтверджується й українськими дослідниками: на конференції молодих вчених з онкології (Київ, 2021) було представлено роботи, присвячені кількісній оцінці морфологічних змін пухлинних тканин, зокрема із застосуванням МРТ для диференційної діагностики уражень [4].

Були досліди, при яких фрактальна розмірність та фрактальна насиченість розраховувались на основі МРТ-сканувань до і на початку лікування пацієнтів у трьох установах. Номограма, що інтегрує дельта-фрактальні ознаки та клінікопатологічні змінні, досягла AUC від 0.781 до 0.807 у трьох когортах. Транскриптомний аналіз виявив зв'язок між фрактальними ознаками та імунною інфільтрацією, зокрема активованими натуральними кілерами та наївними CD4+ Т-клітинами [2].

Також застосування фрактального аналізу для визначення ступеня злоякісності вузлових уражень легень є актуальним напрямком сучасної медичної технології [3]. Математична характеристика форми та текстури вузлів дозволяє автоматизувати диференціацію між доброякісними та злоякісними ураженнями і знизити залежність від суб'єктивної оцінки рентгенолога. Розрахунок FD гістопатологічних зображень при збільшеннях 40×, 100×, 200× і 400× у поєднанні з методом SVM дозволив досягти показника класифікаційної точності 0.979 для препаратів при збільшенні 40×. Такий підхід відкриває перспективи для повністю автоматизованих систем онкологічного скринінгу [1].

Фрактальний аналіз є об'єктивним, відтворюваним і масштабованим доповненням до існуючих методів онкологічної діагностики. Здатність кількісно описувати нерегулярні структури пухлин допомагає розрізнити доброякісні та злоякісні новоутворення, оцінити ступінь злоякісності, а також спрогнозувати відповідь на лікування. Поєднання фрактального аналізу з МРТ та методами машинного навчання є перспективним напрямом персоналізованої онкологічної діагностики [2; 3].

Діагностичний потенціал фрактального аналізу продемонстровано при різних захворюваннях. Проте більшість досліджень обмежувалися двовимірним аналізом або не розглядали біологічну значущість отриманих результатів. Фрактальний аналіз, що ґрунтується на принципі масштабної інваріантності, дедалі ширше застосовується в медичній візуалізації. Фрактальна розмірність відображає морфологічну складність пухлини, тоді як фрактальна насиченість характеризує ступінь просторового охоплення тканини в різних масштабах, відображаючи її щільність і динаміку росту. Встановлено, що фрактальна розмірність негативно корелює зі сферичністю

та позитивно з об'ємом пухлини, що свідчить про її потенціал у характеристиці складності пухлини та прогнозуванні повної патологічної відповіді [5]. Водночас біологічне підґрунтя цих взаємозв'язків залишається недостатньо вивченим. Окрім того, наявні дані вказують на важливість динамічного поздовжнього моніторингу візуалізаційних біомаркерів для раннього прогнозування відповіді на лікування.

Проведені експерименти охоплюють три основні етапи: розробку наукової гіпотези про значення фрактального аналізу в оцінці кровопостачання тканин, підтвердження його практичної здійсненності за допомогою комп'ютерного моделювання, а також успішне застосування цього методу на живих організмах при різних патологічних станах. Найбільшими обмеженнями є досі не досліджена проспективна доказова база та низька поширеність фрактального аналізу. Однак отримані результати мають великий потенціал не лише для покращення розуміння патофізіології, пов'язаної з перфузією, при широкому спектрі захворювань, але й для трансляції в клінічне застосування у сфері неінвазивної характеристики тканин.

Список використаних джерел:

1. Dey P. Fractal dimension and lacunarity analysis of breast masses in 2D sonography. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2012. Vol. 31, No 4. P. 549–555. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3148285/> (дата звернення: 05.03.2026).
2. Huang Y. та ін. Fractal analysis of longitudinal MRI for predicting response to neoadjuvant chemotherapy in breast cancer. *npj Precision Oncology*. 2026. Vol. 10. P. 25. URL: <https://doi.org/10.1038/s41698-025-01220-0> (дата звернення: 05.03.2026).
3. Amador-Legon N. V., Perez-Diaz M. Use of fractals in determining the malignancy degree of lung nodules. *Frontiers in Medical Technology*. 2024. Vol. 6. URL: <https://doi.org/10.3389/fmedt.2024.1362688> (дата звернення: 05.03.2026).
4. Сучасна онкологія: від фундаментальних досліджень до нових терапевтичних підходів: матеріали наук.-практ. конф. молодих вчених (12-13 жовт. 2021 р., Київ). *Онкологія*. 2021. Т. 23, № 4. URL: <https://doi.org/10.32471/oncology.2663-7928.t-23-3-2021-g.9881> (дата звернення: 06.03.2026).
5. Лазоренко О. В., Онищенко А. А., Чорногор Л. Ф. Мультифрактальний аналіз модельних фрактальних і мультифрактальних сигналів. *Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* 2022. № 211. С. 74–85. URL: <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.05> (дата звернення: 06.03.2026).