

УДК 613.495:621.375.826

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ В ЛАЗЕРНІЙ КОСМЕТОЛОГІЇ

Жук Є.Ю.

E-mail: yevheniia.zhuk@nure.ua

Науковий керівник – к. ф.-м. н., доц. Онищенко А.А.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

This work is devoted to the possible use of fractal analysis in laser cosmetology. The aim is to understand how the structure of the skin changes after exposure to laser radiation, how these changes can be quantitatively described and how those changes can be measured. The research tries to see if fractal methods could serve as a kind of morphometric tool, giving a numerical way to describe the messy, uneven patterns of biological tissues which are never really regular. There's a focus on how the fractal dimension helps to look at skin aging, to track how well fractional laser treatments work and to see the state of blood vessels in different skin diseases. Also, it touches on multifractal ideas in photopolymerization and even in laser stereolithography for making artificial skin, which sounds complicated but promising and a bit confusing actually.

Сучасна лазерна косметологія активно використовує високотехнологічні методи для омолодження шкіри, лікування пігментації, рубців, судинних патологій та інших дерматологічних проблем. Ефективність таких процедур залежить від точності оцінки змін у шкірі до та після лікування. Саме тому в сучасних морфологічних та клінічних дослідженнях важливу роль відіграють методи морфометричного аналізу, які дають змогу кількісно описувати структуру біологічних об'єктів.

Морфометрія наразі є невід'ємним інструментом більшості сучасних морфологічних досліджень. Традиційний набір інструментів цієї дисципліни базується на принципах евклідової геометрії, що, в свою чергу, дозволяє кількісно описувати анатомічні структури правильної форми через лінійні розміри, площу, об'єм та їх похідні. Однак біологічні тканини, зокрема шкіра людини, мають складну нерегулярну структуру, яку складно адекватно описати лише за допомогою класичних геометричних методів. Разом із тим, у класичній морфології та різних сферах клінічної медицини як ефективний морфометричний метод дедалі частіше використовується фрактальний аналіз. Застосування цього підходу передбачає використання різноманітних способів обробки зображень та специфічних алгоритмів попередньої підготовки даних, оскільки ці методики мають як спільні концептуальні риси, так і принципові розбіжності. Нинішня медична практика оперує великою кількістю модифікацій цього методу, які, попри єдиний принцип дії, суттєво відрізняються за типом аналізованих зображень, способами ідентифікації структур, алгоритмами попередньої

цифрової обробки, а також методами підрахунку та вибором конкретної фрактальної міри.

У загальному вигляді фрактальний аналіз – це метод підрахування різними способами та алгоритмами фрактальних мір. Фрактальними мірами можуть бути лінійні відрізки, квадрати, куби чи інші геометричні фігури. Тип фрактальної міри визначається особливостями методики та характеристик досліджуваного об'єкту.

У морфології використовуються різні методи та алгоритми фрактального аналізу. Найпоширенішим є спосіб підрахунку квадратів (box counting method або grid method). Значно рідше використовують способи caliper, спосіб дилатації (dilatation method), спосіб «масарадіус» (mass-radius method), спосіб накопичувальних перетинів (cumulative intersection method), grid intercept method. Існують й інші методи фрактального аналізу, що у медицині та морфології використовуються відносно рідко.

У лазерній косметології фрактальний аналіз має застосування, як метод для:

1. Оцінки та діагностування старіння шкіри (через втрату еластичності та появу глибоких зморшок структура стає більш "лінійною" або хаотичною в негативному сенсі, що змінює показники аналізу).

2. Контролю абляції та шліфування – при використанні фракційних лазерів (CO₂ або ербієвих) важливо розуміти, як тканина відновлюється. Фрактальний аналіз зображень шкіри після процедури дозволяє: оцінити рівномірність розподілу "мікротермальних зон лікування" (MTZs); погнозувати швидкість регенерації на основі динаміки зміни структурної складності.

3. Аналізу судинних патологій. При видаленні куперозу або винних плям лазером, фрактальний аналіз допомагає оцінити архітектуру капілярної сітки. Здоровий ангіогенез має чітку фрактальну структуру, тоді як патологічні стани характеризуються відхиленнями, які лазерна терапія має "нормалізувати".

Також у лазерній косметології використовують мультифрактальні методи фотополімеризації, які дозволяють не тільки застосовувати «руйнування шкіри» а й використовувати методи регенерації та біодруку.

Одним із напрямів є використання лазерної стереолітографії та 3D-моделювання шкіри. Фотополімеризація під дією лазера дозволяє створювати штучні еквіваленти шкіри (скафолди). Для того, щоб штучна шкіра прижилася, її пористість повинна бути фрактальною (копіювати структуру справжньої дерми). Фрактальний аналіз тут виступає «контролером якості» надрукованої структури. Іншим прикладом є використання фотополімеризації, як моделі «зшивання» колагену (крослінкінгу). В естетичній медицині лазер викликає процеси, схожі на полімеризацію всередині самої шкіри. Процес «зшивання» змінює оптичну

щільність тканини. Мультифрактальний аналіз дозволяє виміряти, наскільки «густою» та впорядкованою стала ця нова молекулярна мережа.

Завдяки поєднанню фрактального аналізу з програмним забезпеченням сучасних лазерів, медицина отримує додаткові інструменти підтримки для лікаря. Замість того, щоб налаштовувати апарат «на око», спеціаліст може покладатися на штучний інтелект, який миттєво зчитує індивідуальний «цифровий відбиток» шкіри пацієнта. Аналізуючи ці унікальні структури, система сама підказує ідеальну глибину променя та потужність енергії для кожного конкретного випадку. Такий персоналізований підхід не просто покращує результат, а робить процедуру безпечною: він до мінімуму знижує ризик небажаних плям (гіперпігментації) та допомагає шкірі відновитися значно швидше.

Таким чином, лазерна косметологія охоплює багато методів використання фрактального аналізу як і в самих різноманітних процедурах, так і в аналізі тканин людського тіла.

Список використаних джерел:

1. 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.

2. Transcriptomic analysis of human skin wound healing and rejuvenation following ablative fractional laser treatment / J. D. Sherrill et al. // *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16, No. 11. Art. e0260095. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0260095>

3. Бутолін К. Д. Застосування методу мультифрактального аналізу під час дослідження процесів фотополімеризації : кваліфікаційна робота / наук. керівник В. М. Соловйов. Кривий Ріг, 2024. 85 с. URL: <https://elibrary.kdpu.edu.ua/handle/123456789/11125>

4. Мар'єнко Н. І., Степаненко О. Ю. Фрактальний аналіз зображень у медицині та морфології: базові принципи та основні методики // *Morphologia*. 2021. Т. 15, № 3. С. 196-206. URL: <https://repo.knmu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/0690c5bc-be6a-4844-87da-c9289d3663b0/content>