

Н.І. Мар'єнко

Харківський національний
медичний університет
Харків, Україна

Надійшла: 12.09.2024

Прийнята: 15.10.2024

DOI: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2024.3.166-173>

УДК: 611.813:57.086:517:530.191

ФРАКТАЛЬНІ РОЗМІРНОСТІ ВЕЛИКИХ ПІВКУЛЬ ГОЛОВНОГО МОЗКУ: АНА- ТОМІЧНІ КОРЕЛЯЦІЇ, ВІКОВІ ЗМІНИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ У КЛІНІЧНІЙ ПРАКТИЦІ

Maryenko N.I.   **Fractal dimensions of the cerebral hemispheres: anatomical correlations, age-related changes, and application prospects in clinical practice.**

Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT. Background. Fractal analysis is a promising image analysis method that can be used as a morphometric tool in neuromorphology, allowing for the quantitative assessment of the extent to which space is filled by structures with geometrically complex configurations. There are various types of fractal dimensions (FD) of brain structures, but data on the anatomical correlations of FD and the structural features of brain that affect FD values are lacking. **The purpose** of the study is to identify the factors that influence the FD values of the cerebral hemispheres by analyzing structural models and conducting a correlation analysis of FD values and quantitative parameters of skeletonized images. **Methods.** Structural models of tomographic sections of the cerebral hemispheres were developed with simulation of reduced gyrification and imitation of age-related changes. Fractal analysis and quantitative analysis of the skeletonized images were then conducted. A comprehensive correlation analysis of the studied parameters was also performed. **Results and conclusion.** The primary factors influencing different FD values are the structural complexity and age-related changes of the cerebral hemispheres. Structural complexity (the number and complexity of gyri) positively correlated with the FD of the cortex, digital skeleton, and contours, while showing negative correlations with the FD of the white matter. The FD of the cortex, the FD of the contour determined by contour smoothing method, and the FD of the brain tissue as a whole (FD of silhouettes) were the most sensitive to age-related changes. The most promising areas for the application of fractal analysis in clinical practice include the identification and quantitative characterization of atrophic changes, the differentiation of atrophy in normal versus pathological aging, and the diagnosis of brain malformations.

Key words: brain, cerebrum, fractals, tomography, morphometry.

Citation:

Maryenko NI. [Fractal dimensions of the cerebral hemispheres: anatomical correlations, age-related changes, and application prospects in clinical practice]. Morphologia. 2024;18(3):166-73. Ukrainian.

DOI: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2024.3.166-173>

 Maryenko N.I. 0000-0002-7980-7039

 maryenko.n@gmail.com; ni.marienko@knmu.edu.ua

© Dnipro State Medical University, «Morphologia»

Вступ

Великі півкулі головного мозку належать до структур організму людини, які мають одну з найскладніших просторових конфігурацій, що відображає складність морфофункціональної організації нервової системи. Складність просторової конфігурації, у свою чергу, зумовлює труднощі в морфометричній оцінці структур великих півкуль на макроскопічному рівні організації. Перспективним методом аналізу зображень, що може бути використаний як морфометричний метод у нейроморфології, є фрактальний аналіз [1]. Основним кількісним параметром, визначеним за допомо-

гою фрактального аналізу, є фрактальна розмірність (ФР) – міра заповнення простору певною структурою [2]. ФР, визначена шляхом фрактального аналізу двовимірних зображень, зазвичай має дробові значення від 1 до 2. Чим більше доступного простору заповнює досліджувана фігура, тим більшою є її ФР [2].

Фрактальний аналіз традиційно вважається найбільш інформативним для дослідження біологічних структур, що мають фрактальні властивості – самоподібність (самоафінність) і самоповторюваність (структура складається з частин, які повністю або частково, точно або приблизно повторюють структуру в цілому), що відображається у

масштабній інваріантності (структура має подібну будову на різних масштабах) [2].

Структури головного мозку, включно з корою великих півкуль, розглядаються деякими авторами як природні фрактали [1-3]. У ряді робіт фрактальний аналіз застосовувався для дослідження різних структурних елементів великих півкуль, включаючи визначення ФР тканини великих півкуль у цілому [4], їх кори в цілому (cortical ribbon) [4, 5], білої речовини [6, 7], скелетонованих зображень білої речовини [6, 7], піальної поверхні кори [4, 8, 9] та зовнішньої поверхні білої речовини (межі з корою – gray-white matter interface) [6, 7]. Однак більшість цих досліджень зосереджувалися на визначенні одного або кількох видів ФР, тому відсутні систематизовані дані щодо взаємозв'язків та анатомічних кореляцій різних значень ФР, отриманих на одній вибірці.

Крім фрактального аналізу, ще одним перспективним методом кількісного аналізу структур зі складною конфігурацією є аналіз скелетонованих зображень. Скелетонування дозволяє створити цифровий скелет всередині силуету досліджуваної структури. Кількісний аналіз цифрових скелетів включає визначення кількості гілок, їхніх з'єднань та кінцевих точок (у випадку дослідження головного мозку вони відповідають кількості вершин звивин на зрізі). Цей метод кількісного аналізу зображень був розроблений для дослідження нейронів та гліальних клітин [10]. На макроскопічному рівні організації великих півкуль головного мозку скелетонування використовували як спосіб попередньої підготовки зображень до фрактального аналізу [6, 7], однак кількісний аналіз цифрових скелетів може бути інформативним і для характеристики структурної складності великих півкуль.

У наших попередніх роботах, проведених на одній вибірці, були визначені значення ФР тканини великих півкуль головного мозку в цілому [11], кори та білої речовини [12], контурів піальної поверхні [13], скелетонованих зображень [14], а також був проведений кількісний аналіз скелетонованих зображень великих півкуль [14]. У цій заключній роботі проведено кореляційний аналіз зазначених параметрів і моделювання структурних змін великих півкуль головного мозку для визначення особливостей їхньої будови, які найбільше впливають на різні значення ФР.

Мета даного дослідження – визначити фактори, що впливають на значення ФР великих півкуль головного мозку шляхом аналізу структурних моделей та кореляційного аналізу значень ФР і кількісних параметрів скелетонованих зображень.

Матеріали та методи

Дане дослідження включало два етапи: проведення моделювання із аналізом отриманих структурних моделей та проведення кореляційного аналізу даних попередніх досліджень [11-14].

На першому етапі були створені структурні моделі великих півкуль головного мозку (Рис. 1, Рис. 2). У якості основи для створення моделі було використане цифрове T1-зважене зображення магнітно-резонансної (МР) томограми здорового добровольця (жінка 28 років), отримане із відкритої бази «A paired dataset of T1- and T2-weighted MRI at 3 Tesla and 7 Tesla» [15]. Томографія була проведена за допомогою томографа Siemens Magnetom Terra зі значенням магнітної індукції 7 Тл. Для аналізу було використане корональне зображення, розташоване на рівні сосочкових тіл (Рис. 1А).



Рис. 1. Створення структурної моделі на основі томографічного зрізу великих півкуль головного мозку.

Для створення моделі піальна поверхня кори та поверхні білої речовини були окреслені за допомогою інструменту «полілінія» програми Microsoft PowerPoint (Рис. 1 В), у результаті чого були утворені векторні маски (Рис. 1 С). Масштаб зображень складав 1 мм = 3 пікселі. Отримане вихідне зображення (модель 1, Рис. 2А, Рис. 3А) було модифіковане двома шляхами: для створення моделі 2 зі зменшеною структурною складністю (Рис. 2В, Рис. 3В) деякі суміжні звивини

були попарно об'єднані, у результаті чого кількість звивин на зображенні зменшилась; для створення моделі 3 з імітацією вікових змін (Рис. 2С, Рис. 3С) зображення було масштабоване (95% від вихідного зображення за висотою та шириною), а контур кори був звужений на 3 пікселі, у результаті чого борозни були розширені та поглиблені. Після створення моделей були утворені бінарні (чорно-білі) маски, що відповідали тканині великих півкуль в цілому (силует), кори в цілому, білій

речовині в цілому (Рис. 3). У якості додаткової обробки, силуети були скелетоновані за допомогою інструменту «skeletonize» програми ImageJ [16], у результаті чого були отримані цифрові скелети великих півкуль. Також силуети були окреслені за допомогою інструменту «outline» цієї ж програми. Товщина ліній скелету та контуру складала 1 піксель. Після попередньої обробки був проведений фрактальний аналіз: за допомогою методу

підрахунку квадратів були визначені значення ФР силуетів, кори, білої речовини, цифрового скелету та контуру (ФР (контур) 1). Для цього методу фрактального аналізу був використаний інструмент «fractal box count» програми ImageJ. Також було визначено значення ФР контуру за допомогою оригінального методу згладжування контуру [13] (ФР (контур) 2).

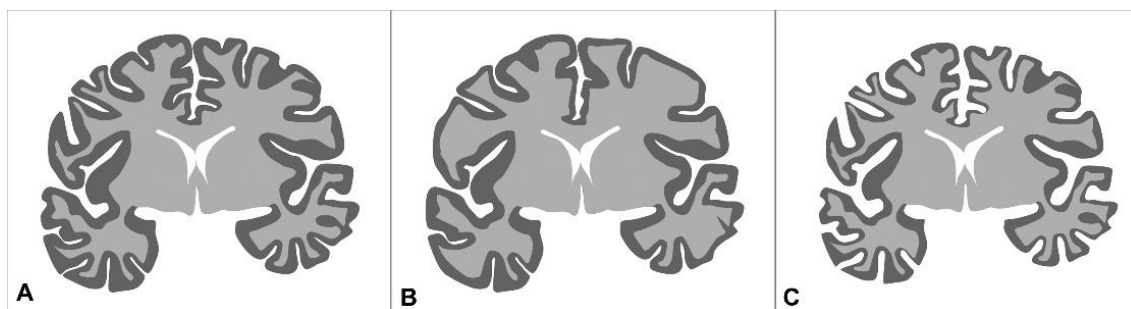


Рис. 2. Структурні моделі великих півкуль головного мозку: А – вихідне зображення, В – зменшення кількості звивин на зрізі, С – імітація вікових змін.

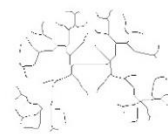
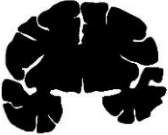
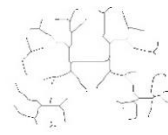
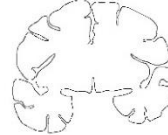
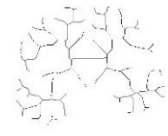
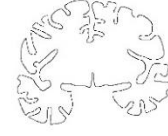
	Силует	Кора	Біла речовина	Скелет	Контур
A	 ФР (силует) = 1,843	 ФР (кора) = 1,632	 ФР (біла речовина) = 1,720	 ФР (скелет) = 1,176	 ФР (контур) 1 = 1,230 ФР (контур) 2 = 1,408
B	 ФР (силует) = 1,844	 ФР (кора) = 1,590	 ФР (біла речовина) = 1,763	 ФР (скелет) = 1,133	 ФР (контур) 1 = 1,200 ФР (контур) 2 = 1,382
C	 ФР (силует) = 1,805	 ФР (кора) = 1,547	 ФР (біла речовина) = 1,705	 ФР (скелет) = 1,173	 ФР (контур) 1 = 1,231 ФР (контур) 2 = 1,170

Рис. 3. Структурні моделі великих півкуль головного мозку (А – вихідне зображення, В – зменшення кількості звивин на зрізі, С – імітація вікових змін) з різними варіантами попередньої обробки зображень та відповідні значення фрактальних розмірностей (ФР).

Після визначення шести значень фрактальної розмірності, був проведений кількісний аналіз скелетонованих зображень за допомогою інструменту «analyze skeleton» програми ImageJ. Були визначені наступні параметри: Branches (кількість гілок), Junctions (кількість з'єднань), End-point voxels (кількість кінцевих точок), Junction voxels (кількість точок, що відповідають з'єднанням), Slab voxels (кількість точок, що формують гілки), Average branch length (середня довжина гілки),

Triple points (з'єднання трьох гілок), Quadruple points (з'єднання чотирьох гілок), Maximum branch length (максимальна довжина гілки), Longest shortest path (найдовша серед мінімальних відстаней між двома кінцевими точками).

Для з'ясування взаємозв'язків між визначеними фрактальними розмірностями та кількісними параметрами скелетонованих зображень був проведений кореляційний аналіз даних, отриманих у попередніх дослідженнях [11-14]. У цих

роботах для дослідження були використані МР зображення головного мозку 100 умовно здорових осіб (які не мали структурних змін головного мозку) обох статей (жінок 56, чоловіків 44) віком 18-86 років (середній вік $41,72 \pm 1,58$ років). МР зображення були отримані у режимах T2 та FLAIR за допомогою магнітно-резонансного томографа Siemens Magnetom Symphony зі значенням магнітної індукції 1,5 Тл. Для дослідження кожного головного мозку було відібрано 5 томографічних зрізів, у тому числі чотири зрізи у корональній (фронтальній) проекції та один зріз у аксіальній (горизонтальній) проекції. 1-й корональний томографічний зріз (C1) був розташований на рівні найбільш передніх точок скроневих часток, 2-й (C2) – на рівні сосочкових тіл, 3-й (C3) – на рівні чотиригорбкової пластинки, 4-й (C4) – на рівні валка мозолистого тіла. Аксіальний томографічний зріз (A) був розташований на рівні таламуса. Абсолютний масштаб зображень був ідентичний такому у створених структурних моделях: 1 мм = 3 пікселі. Після проведення попередньої обробки, були визначені 6 значень ФР та 10 параметрів скелетонованих зображень аналогічні тим, що були визначені на структурних моделях.

Статистична обробка даних проводилась за допомогою програми Microsoft Excel 2016. Для визначення взаємозв'язків отриманих значень був розрахований коефіцієнт кореляції Спірмена (R_s), значущість якого оцінювалась за допомогою критерію Стюдента (Student t test).

Дослідження проведено з дотриманням основних біоетичних положень Конвенції Ради Європи про права людини та біомедицину (від 04.04.1997 р.), Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації про етичні принципи проведення наукових медичних досліджень за участю людини (1964–2008 рр.), а також наказу МОЗ

України № 690 від 23. 09. 2009 р., що підтверджується висновком комісії з питань етики та біоетики Харківського національного медичного університету (протоколи засідань комісії з питань етики та біоетики ХНМУ №10 від 07.11.2018 та №5 від 01.02.2023).

Результати дослідження

За результатами фрактального аналізу структурних моделей (Рис. 3) з'ясувалось, що значення ФР тканини великих півкуль в цілому (ФР (силует)) вихідного зображення та моделі зі зменшеною кількістю звивин практично не відрізнялись. Однак моделювання вікових змін призвело до зменшення значення ФР (силует). ФР кори зменшилась при зменшенні кількості звивин, однак більш вираженим зниження ФР кори було при моделюванні вікових змін. ФР білої речовини при зменшенні кількості звивин, навпаки, збільшилась. ФР цифрових скелетів (ФР (скелет)) залишилась практично незмінною при моделюванні вікових змін, однак зменшення кількості звивин призвело до зниження цього параметру. ФР контуру, визначена за допомогою методу підрахунку квадратів (ФР (контур) 1) продемонструвала подібну тенденцію, залишаючись практично незмінною при старінні та зменшуючись при моделюванні зменшення кількості звивин. На відміну від цього значення ФР, інше значення ФР контуру, визначене за допомогою методу згладжування контуру (ФР (контур) 2), продемонструвало значне зниження при старінні та менш значне зниження при зменшенні кількості звивин.

Кількісні параметри скелетонованих зображень при моделюванні вікових змін змінювались незначно, що свідчить про майже незмінну структурну складність протягом життя (Таблиця 1). Однак зменшення кількості звивин призвело до зменшення кількості гілок, їх з'єднань, кінцевих точок та до зростання середньої довжини гілки.

Таблиця 1
Значення кількісних параметрів скелетонованих зображень структурних моделей великих півкуль головного мозку

Параметр скелетонованого зображення	Модель 1 (вихідне зображення)	Модель 2 (зменшення кількості звивин)	Модель 3 (імітація вікових змін)
Branches	80	58	80
Junctions	39	28	39
End-point voxels	40	31	40
Junction voxels	121	83	115
Slab voxels	2154	1870	2064
Average branch length (pixels)	34.20	39.21	31.94
Triple points	36	27	38
Quadruple points	2	1	1
Maximum branch length (pixels)	96.14	91.73	85.07
Longest shortest path (pixels)	599.78	601.45	560.75

Кореляційний аналіз (Рис. 4) продемонстрував різну силу та спрямованість кореляційних зв'язків між дослідженими параметрами. Так, ФР

(силует) мала найбільш сильні зв'язки із ФР кори, ФР білої речовини та ФР (контур) 2. ФР кори мала позитивні кореляційні зв'язки середньої сили із

рештою значень ФР, за винятком ФР білої речовини, із якою були визначені слабкі негативні кореляційні зв'язки. ФР білої речовини мала негативні кореляційні зв'язки із більшістю значень ФР,

за винятком ФР (силует). ФР (скелет) найбільше корелювала зі значеннями ФР контурів та ФР кори.

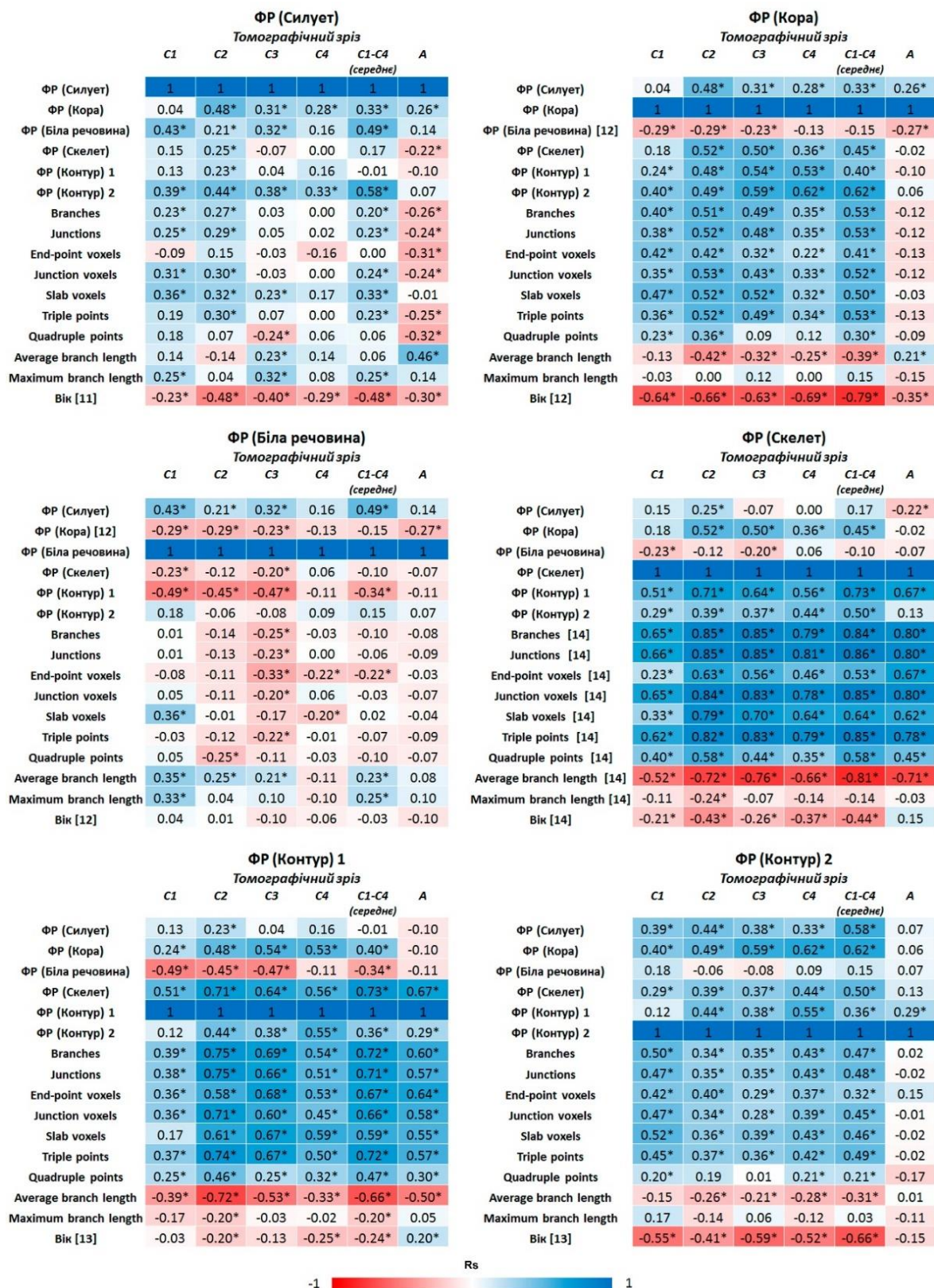


Рис. 4. Кореляційний аналіз фрактальних розмірностей: взаємозв'язки фрактальних розмірностей, зв'язки з кількісними параметрами скелетонованих зображень та кореляції з віком; * - $P < 0,05$.

Обидві ФР контурів мали позитивні кореляційні зв'язки з рештою значень ФР, за винятком ФР білої речовини. Більшість значень ФР (за винятком ФР білої речовини) мали позитивні кореляційні зв'язки з показниками структурної складності великих півкуль – кількістю гілок, з'єднань і кінцевих точок цифрових скелетів, тоді як ФР білої речовини мала негативні зв'язки із цими параметрами. Практично всі значення ФР мали негативні кореляційні зв'язки з віком, проте сила кореляційних зв'язків відрізнялась. Найбільшу силу кореляційних зв'язків з віком мали ФР кори та ФР ФР (контур) 2.

Обговорення результатів дослідження

Фрактальний аналіз є методом математичного аналізу, що походить із фрактальної геометрії [2], яка набула значного розвитку протягом кількох останніх десятиліть, у тому числі й у нейронауках та морфології [1]. На відміну від «класичної» Евклідової геометрії, на основі якої розроблені загальноприйняті морфометричні методи (визначення лінійних розмірів, площі та об'єму), фрактальна геометрія визначає альтернативну величину – фрактальну розмірність (ФР). У контексті морфологічного дослідження великих півкуль головного мозку можуть бути визначені різні варіанти ФР, що потребують використання різних варіантів попередньої підготовки зображень та різних методів фрактального аналізу [3-9, 11-14]. У даній роботі були проаналізовані особливості шести значень ФР: тканини головного мозку в цілому (силуетів), кори, білої речовини, цифрових скелетів та два значення ФР контурів, отримані за допомогою різних методів фрактального аналізу.

Враховуючи отримані дані, можна визначити два основні фактори, що впливають на значення ФР: структурна складність та вікові зміни великих півкуль головного мозку. Структурна складність, яка зумовлена кількістю звивин та складністю їх конфігурації, може бути кількісно охарактеризована за допомогою аналізу скелетонизованих зображень. Серед багатьох параметрів, що визначаються цим методом, найбільш інформативними є кількість гілок, їх з'єднань, а особливо – кількість кінцевих точок, що відповідають кількості вершин звивин на томографічному зрізі. Вікові зміни великих півкуль включають зменшення абсолютних розмірів, згладжування поверхні півкуль, спрощення форми звивин, розширення та поглиблення борозн, що є насамперед результатом стоншення кори та атрофічних змін білої речовини.

ФР (силует) характеризує ступінь заповнення доступного (інтракраніального) простору тканиною мозку в цілому. Серед досліджених значень ФР, це значення найменше залежало від структурної складності. Однак ФР (силует) продемонструвала значуще зниження з віком, що можна пояснити наступним: зміна кількості звивин мало впливає на ступінь заповнення силуетом

простору, проте розширення борозн та зменшення абсолютних розмірів мозку призводить до збільшення «вільного» простору та, відповідно, зменшення простору, заповненого тканиною мозку.

ФР кори продемонструвала сильні зв'язки як зі структурною складністю, так і з віковими змінами. Чим більше звивин має мозок на томографічному зрізі, тим більшою буде «протяжність» контуру кори на зображенні, і тим більшим буде значення ФР. Вікове стоншення кори та згладжування її поверхні призводить до зменшення ступеня заповнення простору корою, і, відповідно, до вираженого зменшення ФР кори з віком.

ФР білої речовини мала відносно слабкі взаємозв'язки з віком, що свідчить про менш виражені зміни просторової конфігурації білої речовини порівняно з корою. Однак цікавими є виявлені негативні взаємозв'язки між цим значенням ФР та параметрами, що характеризують структурну складність, а також значеннями ФР кори, цифрових скелетів та контурів. Цю закономірність можна пояснити таким чином: при зменшенні кількості звивин на зрізі (і, відповідно, зменшенні кількості кінцевих точок, що супроводжується зменшенням ФР кори, скелетів та контурів), біла речовина на двовимірному зображенні (томографічному зрізі) формує ширшу основу звивин і займає більше простору, ніж на зображенні з більшою кількістю звивин. Якщо на зрізі звивини більш численні, біла речовина зазвичай представлена у вигляді вузького стрижня. Тому при збільшенні кількості звивин на зрізі можна спостерігати зменшення ступеня заповнення простору білою речовиною та відповідне зменшення її ФР.

ФР цифрових скелетів (ФР (скелет)), маючи слабкі взаємозв'язки з віком, очікувано сильно корелювала з параметрами, що характеризують структурну складність.

Дуже подібний характер кореляційних взаємозв'язків з іншими параметрами продемонструвала ФР (контур) 1, визначена за допомогою підрахунку квадратів. Зростання кількості звивин призводить до збільшення довжини контуру та ступеня заповнення ним простору (подібно до ФР кори). Однак цей параметр не залежить від товщини кори, тому вікові зміни набагато менше впливають на це значення ФР.

ФР (контур) 2, визначена за допомогою оригінального методу згладжування контуру [13], маючи значущі зв'язки зі структурною складністю, показала більш сильні зв'язки з віком. Це значення ФР є чутливим до розширення борозн, що робить його цінним для визначення вікових змін великих півкуль.

Основною перспективною сферою застосування фрактального аналізу в клінічній практиці є визначення та кількісне характеризування вікових атрофічних змін при нормальному та патологічному старінні головного мозку, зокрема при

нейродегенеративних захворюваннях (наприклад, хворобі Альцгеймера) [5]. Серед досліджених значень ФР найбільш чутливими до вікових змін виявились ФР кори та ФР (контур) 2; також досить чутливою до старіння є ФР (силует).

Чутливість деяких видів ФР до структурної складності великих півкуль мозку може мати практичну цінність для діагностики мальформацій та диференціювання їх із набутими змінами мозку. У цьому контексті найбільш застосовними можуть стати ФР (скелет), ФР (контур) 1 та ФР кори.

Крім цих сфер застосування, фрактальний аналіз може бути використаний для комплексної морфометричної оцінки структур мозку при інших патологіях. Незважаючи на чутливість різних варіантів ФР до різних аспектів будови та морфологічних змін структур головного мозку, доцільно проводити комплексне дослідження з визначенням кількох значень ФР, що дозволить отримати більш повну характеристику досліджуваних структур.

Висновки

Фрактальний аналіз є перспективним та ін-

формативним морфометричним методом, що дозволяє кількісно охарактеризувати структури головного мозку із геометрично складною конфігурацією. Основними факторами, що визначають значення ФР, є структурна складність та вікові зміни. Основними сферами можливого застосування фрактального аналізу в клінічній практиці є діагностика та диференціювання атрофічних змін і мальформацій головного мозку.

Перспективи подальших розробок

Важливим напрямком подальших досліджень є проведення фрактального аналізу структур головного мозку при різних патологіях, зокрема при хворобі Альцгеймера та при мальформаціях головного мозку.

Інформація про конфлікт інтересів

Потенційних або явних конфліктів інтересів, що пов'язані з цим рукописом, на момент публікації не існує та не передбачається.

Джерела фінансування

Дана робота є фрагментом науково-дослідної теми «Розробка клініко-морфологічних методів дослідження структур організму людини» (номер державної реєстрації 0123U100367).

Літературні джерела References

1. Di Ieva A. Fractal Analysis in Clinical Neurosciences: An Overview. *Adv Neurobiol.* 2024;36:261-271. doi: 10.1007/978-3-031-47606-8_13. PMID: 38468037.
2. Mandelbrot BB, author. The fractal geometry of nature. San Francisco: W.H. Freeman and Company; 1982.
3. Kiselev VG, Hahn KR, Auer DP. Is the brain cortex a fractal? *Neuroimage.* 2003;20(3):1765-1774. doi: 10.1016/s1053-8119(03)00380-x. PMID: 14642486.
4. Madan CR, Kensinger EA. Cortical complexity as a measure of age-related brain atrophy. *Neuroimage.* 2016;134:617-629. doi: 10.1016/j.neuroimage.2016.04.029.
5. King RD, George AT, Jeon T, Hynan LS, Youn TS, Kennedy DN, Dickerson B. The Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. Characterization of Atrophic Changes in the Cerebral Cortex Using Fractal Dimensional Analysis. *Brain Imaging Behav.* 2009;3(2):154-166. doi: 10.1007/s11682-008-9057-9.
6. Farahibozorg S, Hashemi-Golpayegani SM, Ashburner J. Age- and sex-related variations in the brain white matter fractal dimension throughout adulthood: an MRI study. *Clin Neuroradiol.* 2015;25(1):19-32. doi:10.1007/s00062-013-0273-3.
7. Zhang L, Dean D, Liu JZ, Sahgal V, Wang X, Yue GH. Quantifying degeneration of white matter in normal aging using fractal dimension. *Neurobiol Aging.* 2007;28(10):1543-1555. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2006.06.020.
8. Im K, Lee JM, Yoon U, Shin YW, Hong SB, Kim IY, Kwon JS, Kim SI. Fractal dimension in human cortical surface: multiple regression analysis with cortical thickness, sulcal depth, and folding area. *Hum Brain Mapp.* 2006;27(12):994-1003. doi: 10.1002/hbm.20238.
9. Kalmanti E, Maris TG. Fractal dimension as an index of brain cortical changes throughout life. *In Vivo.* 2007;21(4):641-646.
10. Young K, Morrison H. Quantifying Microglia Morphology from Photomicrographs of Immunohistochemistry Prepared Tissue Using ImageJ. *J Vis Exp.* 2018;136:57648. doi: 10.3791/57648.
11. Maryenko N, Stepanenko O. Fractal Dimension of Silhouette Magnetic Resonance Brain Images as a Measure of Age-Associated Changes in Cerebral Hemispheres. *Duzce Medical Journal.* 2023;25(1):27-37. doi: 10.18678/dtfd.1180625
12. Maryenko N, Stepanenko O. Cortex and White Matter of the Cerebral Hemispheres: Anatomical Correlations and Age-Related Changes Measured with Fractal Analysis. *Galician med. j.* 2024;31(2):e-GMJ2024-A11. doi: 10.21802/e-GMJ2024-A11
13. Maryenko N, Stepanenko O. Quantitative characterization of age-related atrophic changes in cerebral hemispheres: A novel "contour smoothing" fractal analysis method. *Translational Research in Anatomy.* 2023;33:100263. doi: 10.1016/j.tria.2023.100263
14. Maryenko NI, Stepanenko OY. Shape of

cerebral hemispheres: structural and spatial complexity. Quantitative analysis of skeletonized MR images. Rep. of Morph. 2022;28(3):62-63. doi: 10.31393/morphology-journal-2022-28(3)-10

15. Chen X, Qu L, Xie Y, Ahmad S, Yap PT. A paired dataset of T1- and T2-weighted MRI at 3 Tesla

and 7 Tesla. Sci Data. 2023;10(1):489. doi:10.1038/s41597-023-02400-y

16. Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat Methods. 2012;9(7):671-675. doi: 10.1038/nmeth.2089

Мар'єнко Н.І. Фрактальні розмірності великих півкуль головного мозку: анатомічні кореляції, вікові зміни та перспективи застосування у клінічній практиці.

РЕФЕРАТ. Актуальність. Фрактальний аналіз є перспективним методом аналізу зображень, що може бути використаний у якості морфометричного методу в нейроморфології. Цей метод дозволяє кількісно оцінювати ступінь заповнення простору структурами з геометрично складною конфігурацією. Існують різні варіанти фрактальних розмірностей (ФР) структур головного мозку, однак бракує даних щодо анатомічних кореляцій ФР та особливостей будови структур головного мозку, що впливають на значення ФР. **Мета** даного дослідження – визначити фактори, що впливають на значення ФР великих півкуль головного мозку шляхом аналізу структурних моделей та кореляційного аналізу значень ФР і кількісних параметрів скелетонованих зображень. **Методи.** Були розроблені структурні моделі томографічного зрізу великих півкуль головного мозку із моделюванням зменшення кількості звивин та імітацією вікових змін. Після цього був проведений фрактальний аналіз та кількісний аналіз скелетонованих зображень. Також був проведений комплексний кореляційний аналіз досліджуваних параметрів. **Результати та підсумок.** Основними факторами, що впливають на різні значення фрактальної розмірності, є структурна складність та вікові зміни великих півкуль головного мозку. Структурна складність (кількість та складність конфігурації звивин) позитивно корелювала із ФР кори, цифрового скелету та контурів і мала негативні зв'язки із ФР білої речовини. До вікових змін найбільш чутливими виявились ФР кори, ФР контуру, визначена за допомогою методу згладжування контуру, та ФР тканини мозку в цілому (ФР силуетів). Основними перспективними сферами застосування фрактального аналізу в клінічній практиці є визначення та кількісне характеризування атрофічних змін, диференціювання атрофії при нормальному та патологічному старінні, а також діагностика мальформацій головного мозку.

Ключові слова: головний мозок, великі півкулі, фрактали, томографія, морфометрія.