

УДК 611.817.1

Мар'єнко Н. І., Степаненко О. Ю.

## ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІЛОЇ РЕЧОВИНИ ПІВКУЛЬ МОЗОЧКА ЛЮДИНИ

Харківський національний медичний університет

stepanenko@3g.ua

Мета дослідження – вивчити фрактальну розмірність білої речовини I–IX часточок півкуль мозочка людини на серійних парасагітальних зрізах.

Дослідження проведено на базі Харківського обласного бюро судово-медичної експертизи на 100 об'єктах – мозочках трупів людей обох статей, які померли від причин, не пов'язаних з патологією мозку, у віці 20–95 років. Фрактальний аналіз проводився за допомогою методу розбиття на квадрати (box-counting) за оригінальною методикою. Фрактальний індекс білої речовини часточок півкуль мозочка в цілому варіює від 1,202 до 1,629. Найвищий фрактальний індекс мають VI–VII часточки півкуль, які пов'язані із неocerebellарними часточками черв'яка. Найменше значення ФІ мають мигдалики мозочка (часточка IX). Міжпівкульна різниця фрактального індексу часточок варіює від 0,016% до 4,92%. Фрактальний індекс часточок I–VI, VIIAt, VIII та IX зменшується в латеральних ділянках півкуль мозочка; фрактальний індекс часточки VIIAf найменший в паравермальній ділянці та зростає в медіо-латеральному напрямку. Особливості будови часточок та різниця значень фрактального індексу пояснюється масштабною інваріантністю та закономірностями просторової організації квазіфрактальних структур: при зростанні розмірів (масштабу) структури зростає складність її організації.

Застосування фрактального аналізу може бути використано як об'єктивний морфометричний критерій для діагностики різних захворювань мозочка і інших структур центральної нервової системи.

**Ключові слова:** мозочок; біла речовина; фрактальний аналіз.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дана робота є фрагментом науково-дослідницької роботи кафедри гістології, цитології та ембріології Харківського національного медичного університету «Будова та закономірності індивідуальної анатомічної мінливості головного мозку людини», № державної реєстрації 0115U000231.

**Вступ.** В основі просторової конфігурації мозочка лежить «дерево життя» (arbor vitae cerebelli) –

складно розгалужена біла речовина мозочка, яка є структурною основою кори мозочка. Морфологічна оцінка часточок мозочка в більшості випадків проводиться за допомогою загальноприйнятих методів морфометрії, що включають вимір об'ємів сірої і білої речовини часточок мозочка, визначення лінійних розмірів мозочка. Такі методи дозволяють визначити певні морфометричні параметри часточок мозочка, однак не дають можливості комплексно оцінити особливості будови мозочка, які не піддаються чіткому опису в рамках традиційної морфометрії.

Складні деревовидні анатомічні структури, такі як біла речовина мозочка, судинна мережа органів, дендритне дерево нейронів, мають властивості фракталів і можуть бути кількісно і об'єктивно охарактеризовані за допомогою фрактального аналізу [1, 2, 6, 10–12].

Фрактальний аналіз застосовується для комплексного морфометричного дослідження об'єктів, що мають властивості фракталів – самоподібність і масштабну інваріантність: фрактал в цілому в точності або наближено збігається з частиною себе самого; збільшення масштабу зображення фрактала не веде до спрощення його структури [1, 8, 9]. Природні об'єкти, що мають фрактальні властивості, як правило, не мають математично точної закономірності, що характеризує властивості їх форми, тобто не є істинними фракталами, тому їх називають квазіфрактальними [1]. Дослідження мозочка як фрактального об'єкта до теперішнього часу поодинокі [4, 5, 7].

Фрактальні структури можуть бути описані за допомогою фрактального індексу (ФІ) – міри складності просторової організації фрактальної структури, показника заповнення нею простору. Для визначення фрактального індексу використовується кілька методів. Найбільш простим у застосуванні і зручним для дослідження анатомічних об'єктів є метод розбиття на квадрати, або box-counting [11, 13].

**Мета дослідження** – вивчити фрактальну розмірність білої речовини I–IX часточок півкуль мозочка людини на серійних парасагітальних зрізах.

**Матеріал і методи дослідження.** Дослідження проведено на базі Харківського обласного бюро

судово-медичної експертизи на 100 об'єктах – мозочках трупів людей обох статей, які померли від причин, не пов'язаних з патологією мозку, у віці 20–95 років. 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.

В ході судово-медичного розтину мозочок виділяли з черепної коробки, потім фіксували протягом місяця в 10% розчині формаліну, після чого проводили серійні парасагітальні зрізи півкуль мозочка у площинах, паралельних серединній сагітальній із покрововим інтервалом 5 мм. Вид мозочка на розрізі фотографували за допомогою дзеркального цифрового фотоапарата, після чого проводили фрактальний аналіз цифрових зображень.

Фрактальний аналіз проводився за допомогою методу розбиття на квадрати (box-counting) за оригінальною методикою, описаною раніше [3]. Визначався фрактальний індекс білої речовини часточок мозочка на парасагітальних зрізах. Окремо підраховувався ФІ для передньої частки мозочка (часточка I (frenulum lingulae), часточки II та III (ala lobuli centralis), часточки IV та V (lobulus quadrangularis, pars anterior)), часточки VI (lobulus quadrangularis, pars posterior), часточки VII Af (lobulus semilunaris superior), часточок VII At та VII B (lobulus semilunaris inferior та lobulus gracilis), часточки VIII (lobulus biventer) та часточки IX (Tonsilla) (рис. 1). Підраховувався фрактальний індекс на зрізах, розташованих на відстані 5–40 мм від серединної сагітальної площини. Обчислювався середній фрактальний індекс як середнє арифметичне ФІ часточки на всіх зрізах мозочка, на яких ця часточка присутня.

Отримані дані оброблялися за допомогою загальноприйнятих статистичних методів.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Фрактальний індекс (ФІ) в цілому коливається від 1,0 до 2,0. Об'єкт з фрактальним індексом, рівним 1,0, є простою прямою або кривою лінією, що практично не заповнює простір. Об'єкт з

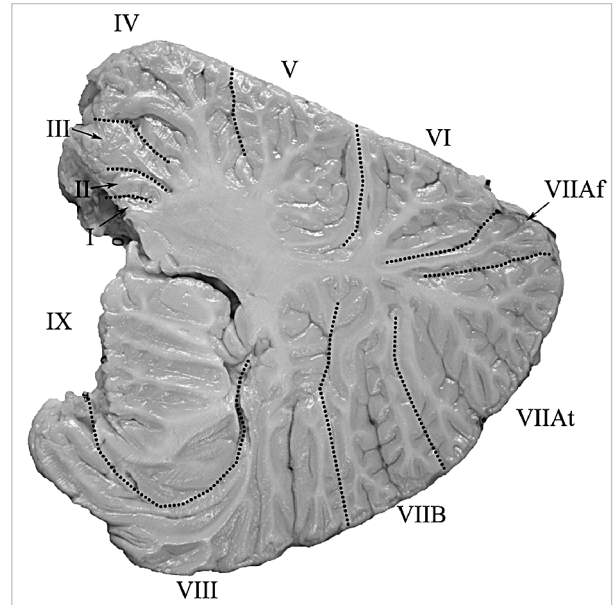


Рис. 1. Парасагітальний зріз мозочка людини, 5 мм вправо від серединної сагітальної площини.

фрактальним індексом, рівним 2,0, заповнює весь доступний простір.

Значення середнього фрактального індексу білої речовини часточок півкуль мозочка наведені в таблиці 1.

Як видно із даних табл. 1, фрактальний індекс білої речовини в цілому варіює від 1,202 до 1,629. Фрактальний індекс відповідних зрізів правої та лівої півкуль порівнювався за допомогою критерія

Таблиця 1 – Статистична оцінка середнього фрактального індексу білої речовини часточок півкуль мозочка людини

Часточки	Півкуля мозочка	<i>M</i>	<i>m<sub>m</sub></i>	<i>σ</i>	<i>C<sub>v</sub></i>	<i>min</i>	<i>max</i>
I-V	Ліва півкуля	1,339	0,021	0,208	15,53	1,204	1,612
	Права півкуля	1,342	0,020	0,198	14,75	1,202	1,619
	середній ФІ	1,341	0,014	0,203	15,14	1,203	1,616
VI	Ліва півкуля	1,435	0,033	0,331	23,07	1,209	1,629
	Права півкуля	1,468	0,032	0,324	22,07	1,223	1,623
	середній ФІ	1,452	0,023	0,3275	22,56	1,216	1,626
VII Af	Ліва півкуля	1,392	0,019	0,191	13,72	1,207	1,429
	Права півкуля	1,397	0,019	0,193	13,82	1,211	1,433
	середній ФІ	1,395	0,014	0,192	13,77	1,209	1,431
VII At та VII B	Ліва півкуля	1,328	0,024	0,242	18,22	1,212	1,598
	Права півкуля	1,326	0,024	0,239	18,02	1,209	1,589
	середній ФІ	1,327	0,017	0,2405	18,12	1,211	1,594
VIII	Ліва півкуля	1,314	0,020	0,197	14,99	1,211	1,507
	Права півкуля	1,308	0,020	0,199	15,21	1,313	1,501
	середній ФІ	1,311	0,014	0,198	15,10	1,262	1,504
IX	Ліва півкуля	1,212	0,012	0,117	9,65	1,104	1,332
	Права півкуля	1,217	0,011	0,112	9,20	1,102	1,337
	середній ФІ	1,215	0,008	0,1145	9,43	1,103	1,335

Стьюдента, різниця між симетричними зрізами статистично не значима.

Найвищий фрактальний індекс мають VI–VII часточки півкуль, які пов'язані із неocerebellарними часточками черв'яка. Найменше значення ФІ мають мигдалики мозочка (часточка IX).

Також досліджувалась міжпівкульна асиметрія фрактального індексу: підраховувалась різниця середнього ФІ симетричних часточок півкуль, обчислювався модуль отриманого значення та його відношення до середнього фрактального індексу у відсотках (табл. 2).

**Таблиця 2** – Статистична оцінка міжпівкульної асиметрії фрактального індексу білої речовини часточок півкуль мозочка людини (відношення модуля різниці між півклями до середнього ФІ, %)

Часточка	<i>M</i>	<i>m<sub>m</sub></i>	<i>σ</i>	<i>Cv, %</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
I–V	1,24	0,021	0,21	16,94	0,016	4,41
VI	1,43	0,023	0,23	16,08	0,028	3,25
VII Af	1,54	0,027	0,27	17,53	0,033	4,92
VII At та VII B	1,19	0,019	0,19	15,97	0,019	3,98
VIII	1,12	0,022	0,22	19,64	0,032	3,76
IX	1,08	0,017	0,17	15,74	0,065	4,74

Як видно із даних табл. 2, міжпівкульна різниця фрактального індексу часточок варіює від 0,016% до 4,92%.

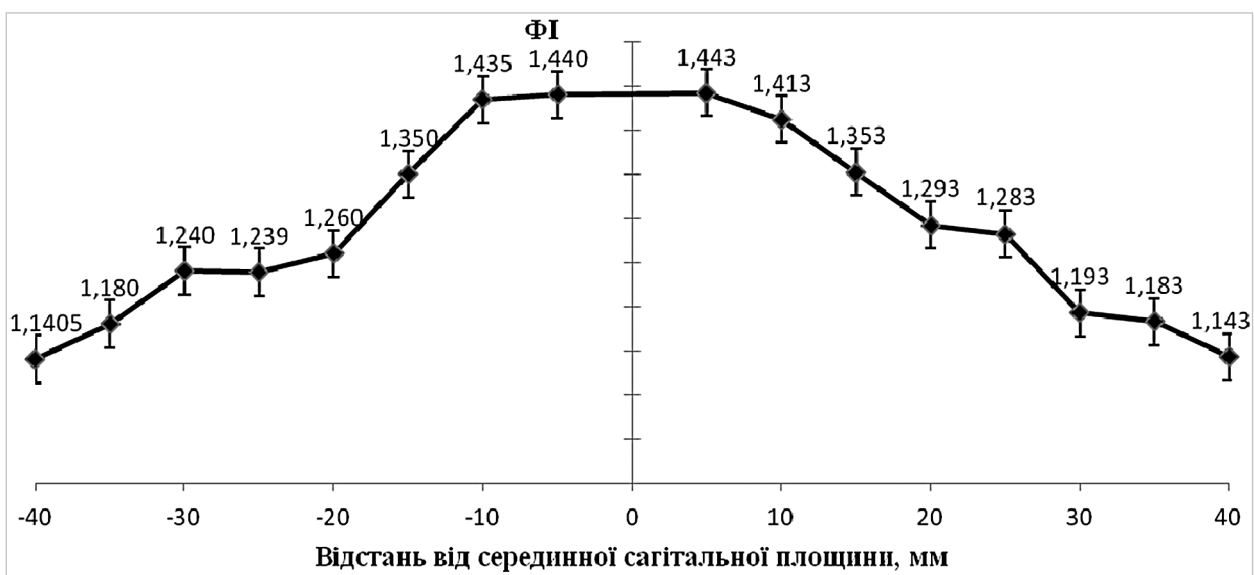
Таким чином, фрактальний індекс симетричних часточок півкуль має дуже малий діапазон мінливості та асиметрії; ФІ, обчислений в симетричних часточках одного мозочка, відрізняється не більше, ніж на 5%.

Значення ФІ часточок відрізняються на парасагітальних зрізах мозочка, що пов'язано із особливостями

будови часточок в медіальних та латеральних ділянках півкуль (рис. 2).

Як видно із даних рис. 2–4, фрактальний індекс часточок I–VI, VIIAt, VIII та IX зменшується в латеральних ділянках півкуль мозочка; фрактальний індекс часточки VIIAf найменший в паравермальній ділянці та зростає в медіо-латеральному напрямку. Така динаміка змін ФІ в різних ділянках півкуль пов'язана із особливостями будови білої речовини та часточок в цілому. Більшість часточок (крім часточки VIIAf) мають найбільш розгалужену білу речовину в паравермальних та медіальних ділянках. В латеральних ділянках півкуль зменшується площа зрізу часточки, кількість та товщина гілок білої речовини, зменшується ступінь розгалуженості білої речовини. Звивини та основні гілки білої речовини в медіальних ділянках часточок в медіальних ділянках півкуль розташовані перпендикулярно до парасагітальних зрізів. В латеральних ділянках півкуль мозочка звивини та гілки білої речовини спрямовуються назад, у зв'язку із цим парасагітальні зрізи проходять під гострим кутом відносно основних гілок білої речовини. Ці особливості будови часточок мозочка в різних ділянках півкуль відображуються на динаміці змін фрактального індексу в медіо-латеральному напрямку.

Верхня півмісяцева часточка (VIIAf), на відміну від решти, має найменші розміри та найменш розгалужену білу речовину в паравермальних та медіальних ділянках, де представлена в вигляді складного листка або мало розгалуженої гілки. Площа зрізу та ступінь розгалуженості часточки зростають в медіо-латеральному напрямку та досягають максимуму на відстані 25–35 мм від серединної сагітальної площини.



**Рис. 2.** Середні значення ( $M \pm m$ ) фрактального індексу часточок I-V півкуль мозочка; від'ємні значення осі абсцис – ліва півкуля, позитивні значення – права півкуля.

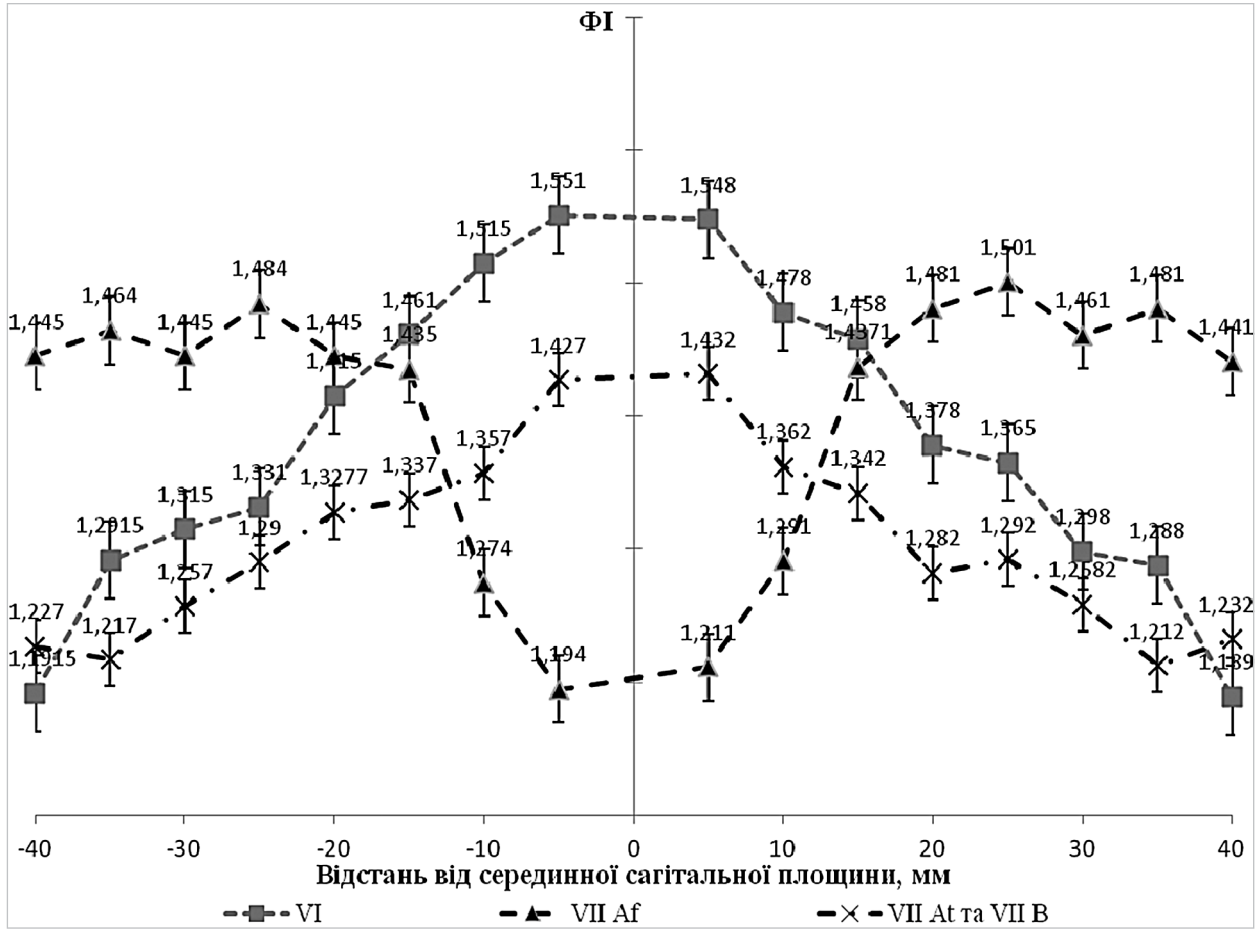


Рис. 3. Середні значення ( $M \pm m$ ) фрактального індексу часточок VI та VII півкуль мозочка; від'ємні значення осі абсцис – ліва півкуля, позитивні значення – права півкуля.

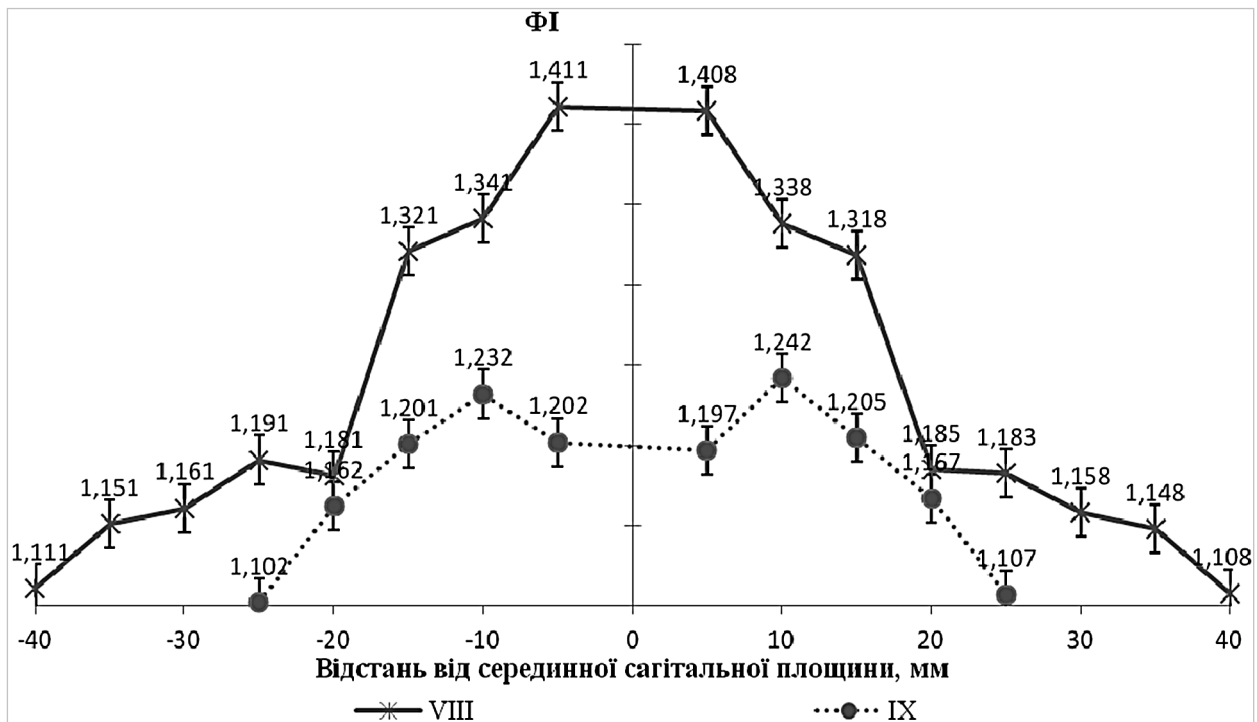


Рис. 4. Середні значення ( $M \pm m$ ) фрактального індексу часточок VIII та IX півкуль мозочка; від'ємні значення осі абсцис – ліва півкуля, позитивні значення – права півкуля.

Особливості будови часточок та різниця значень фрактального індексу пояснюється масштабною інваріантністю та закономірностями просторової організації квазіфрактальних структур: при зростанні розмірів (масштабу) структури зростає складність її організації.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** В дослідженні встановлені значення фрактального індексу білої речовини часточок півкуль мозочка людини. Фрактальний індекс характеризує ступінь складності просторової організації структу-

ри та міру заповнення простору структурою. Біла речовина мозочка є типовою квазіфрактальною структурою, яка може бути кількісно об'єктивно охарактеризована за допомогою фрактального індексу. Застосування фрактального аналізу може бути використано як об'єктивний морфометричний критерій для діагностики різних захворювань мозочка і інших структур центральної нервової системи. Фрактальний аналіз може використовуватись для морфометричного дослідження інших біологічних структур зі складною просторовою організацією.

### Література

1. Исаева В.В. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе / В. В.Исаева, Ю. А. Каретин, А. В. Чернышев, Д. Ю. Шкуратов. – Владивосток : Институт биологии моря ДВО РАН, 2004. – 128 с.
2. Молчатский С. Л. Фрактальный анализ структуры вентромедиального ядра гипоталамуса мозга человека в пре- и постнатальном онтогенезе / С. Л. Молчатский, В. Ф. Молчатская // Новые исследования. – 2010. – № 24. – С. 60–67.
3. Степаненко А. Ю. Фрактальный анализ как метод морфометрического исследования белого вещества мозжечка человека / А. Ю. Степаненко, Н. И. Мар'яненко // Світ медицини та біології. – 2016. – № 4 (58). – С. 127–130.
4. Akar E. Fractal analysis of MR images in patients with Chiari malformation: The importance of preprocessing / E. Akar, S. Kara, H. Akdemir, A. Kiris // Biomedical Signal Processing and Control. – 2017. – № 31. – P. 63–70.
5. Akar E. Fractal dimension analysis of cerebellum in Chiari Malformation type I / E. Akar, S. Kara, H. Akdemir, A. Kiris // Computers in Biology and Medicine. – 2015. – № 64. – P. 179–186.
6. Jiang C. Fractal-based image texture analysis of trabecular bone architecture / C. Jiang, R. E. Pitt, J.E. Bertram, D. J. Aneshansley // Med. Biol. Eng. Comput. – 1999 Jul. – Vol. 37 (4). – P. 413–418.
7. Liu J. Z. Fractal dimension in human cerebellum measured by magnetic resonance imaging / J. Z. Liu, L. D. Zhang, G. H. Yue // Biophys. J. – 2003 Dec. – Vol 85 (6). – P. 4041–4046.
8. Mandelbrot B. B. Form, chance and dimension / B. B. Mandelbrot. – San Francisco : W. H. Freeman, 1977. – 365 p.
9. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature / B. B. Mandelbrot. – N.Y. : Freeman, 1983. – 468 с.
10. Puskas N. Fractal dimension of apical dendritic arborization differs in the superficial and the deep pyramidal neurons of the rat cerebral neocortex / N. Puskas, I. Zaletel, B. D. Stefanovic, D. Ristanovic // Neurosci. Lett. – 2015 Mar 4. – Vol. 589. – P. 88–91.
11. Ristanovic D. Fractal analysis of dendrite morphology using modified box-counting method / D. Ristanovic, B. D. Stefanovic, N. Puskas // Neurosci Res. – 2014 Jul. – Vol. 84. – P. 64–67.
12. Talu S. Fractal analysis of normal retinal vascular network / S. Talu // Oftalmologia. – 2011. – Vol. 55 (4). – P. 11–16.
13. Zaletel I. Modified Richardson's method versus the box-counting method in neuroscience / I. Zaletel, D. Ristanovic, B. D. Stefanovic, N. Puskas // J. Neurosci Methods. – 2015 Mar 15. – Vol. 242. – P. 93–96.

### References

1. Isayeva VV, Karetin YuA, Chernyshev AV, Shkuratov DYu. Fraktaly i khaos v biologicheskome morfogeneze. Vladivostok: Institut biologii morya DVO RAN; 2004. 128 s.
2. Molchatskiy SL, Molchatskaya VF. Fraktal'nyy analiz struktury ventromedial'nogo yadra gipotalamusa mozga cheloveka v pre- i postnatal'nom ontogeneze. Novyye issledovaniya. 2010;24:60–7.
3. Stepanenko AYu, Mar'yenko NI. Fraktal'nyy analiz kak metod morfometricheskogo issledovaniya belogo veshchestva mozghechka cheloveka. Svit meditsini ta biologii. 2016;4(58):127–30.
4. Akar E, Kara S, Akdemir H, Kiris A. Fractal analysis of MR images in patients with Chiari malformation: The importance of preprocessing. Biomedical Signal Processing and Control. 2017;31:63–70.
5. Akar E, Kara S, Akdemir H, Kiris A. Fractal dimension analysis of cerebellum in Chiari Malformation type I. Computers in Biology and Medicine. 2015;64:179–86.
6. Jiang C, Pitt RE, Bertram JE, Aneshansley DJ. Fractal-based image texture analysis of trabecular bone architecture. Med Biol Eng Comput. 1999 Jul;37(4):413–8.
7. Liu JZ, Zhang LD, Yue GH. Fractal dimension in human cerebellum measured by magnetic resonance imaging. Biophys J. 2003 Dec;85(6):4041–6.
8. Mandelbrot BB. Form, chance and dimension. San Francisco: WH Freeman; 1977. 365 p.
9. Mandelbrot BB. The fractal geometry of nature. NY: Freeman, 1983. 468 с.
10. Puskas N, Zaletel I, Stefanovic BD, Ristanovic D. Fractal dimension of apical dendritic arborization differs in the superficial and the deep pyramidal neurons of the rat cerebral neocortex. Neurosci Lett. 2015 Mar 4;589:88–91.
11. Ristanovic D, Stefanovic BD, Puskas N. Fractal analysis of dendrite morphology using modified box-counting method. Neurosci Res. 2014 Jul;84:64–7.



12. Talu S. Fractal analysis of normal retinal vascular network. *Oftalmologia*. 2011;55(4):11–6.
13. Zaletel I, Ristanovic J, Stefanovic BD, Puskas N. Modified Richardson's method versus the box-counting method in neuroscience. *Neurosci Methods*. 2015 Mar 15;242:93–6.

УДК 611.817.1

### ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕЛОГО ВЕЩЕСТВА ПОЛУШАРИЙ МОЗЖЕЧКА ЧЕЛОВЕКА

*Марьенко Н. И., Степаненко А. Ю.*

**Резюме.** Цель исследования – изучить фрактальную размерность белого вещества I–IX долек полушарий мозжечка человека на серийных парасагитальных срезах.

Исследование проведено на базе Харьковского областного бюро судебно-медицинской экспертизы на 100 объектах – мозжечках трупов людей обоего пола, умерших от причин, не связанных с патологией мозга, в возрасте 20–95 лет. Фрактальный анализ проводился с помощью метода разбиения на квадраты (box-counting) по оригинальной методике. Фрактальный индекс белого вещества долек полушарий мозжечка в целом варьирует от 1,202 до 1,629. Самый высокий фрактальный индекс имеют VI–VII дольки полушарий, связанные с неocerebellарными дольками червя. Наименьшее значение ФИ имеют миндалины мозжечка (долька IX). Межполушарная разница фрактального индекса долек варьирует от 0,016% до 4,92%. Фрактальный индекс долек I–VI, VIIAt, VIII и IX уменьшается в латеральных участках полушарий мозжечка; фрактальный индекс дольки VIIAf наименьший в паравермальной области и возрастает в медиолатеральном направлении. Особенности строения долек и разница значений фрактального индекса объясняется масштабной инвариантностью и закономерностями пространственной организации квазифрактальных структур: при возрастании размеров (масштаба) структуры возрастает сложность ее организации.

Применение фрактального анализа может быть использовано как объективный морфометрический критерий для диагностики различных заболеваний мозжечка и других структур центральной нервной системы.

**Ключевые слова:** мозжечок; белое вещество; фрактальный анализ.

UDC 611.817.1

### FRactal ANALYSIS OF WHITE MATTER OF THE HUMAN CEREBELLUM HEMISPHERES

*Maryenko N. I., Stepanenko A. Yu.*

**Abstract.** Morphological investigations of cerebellar lobules are usually performed using standard methods of morphometry such as: measurement of volumes of the gray and white matters of the cerebellar lobules, which determine linear dimensions of the cerebellum. Fractal analysis is used for morphometric study of complex objects with properties of fractals such as self-similarity and scale invariance.

The *aim* of the paper is to study the fractal dimension of white matter of the human cerebellar hemispheric lobules I–IX on serial parasagittal sections.

Research was conducted in Kharkiv regional bureau of forensic medicine. The study involved 100 cerebella of people of both sexes who died without causes with pathology of brain who were 20–95 years old. Parasagittal sections of the human cerebellar hemispheres were investigated. Fractal analysis was conducted using the original box-counting method. Fractal index of white matter of the cerebellar hemispheric lobules varies from 1.202 to 1.629. The highest fractal index was found in hemispheric lobules VI–VII that are associated with neocerebellar vermal lobules. The lowest fractal index was found in cerebellar tonsils (lobule IX). The average fractal dimension of the lobules I–V was indicated as  $1.341 \pm 0.014$  ( $1.339 \pm 0.021$  in the left hemisphere, and  $1.342 \pm 0.020$  in the right hemisphere correspondingly). The average fractal dimension of the lobule VI is  $1.452 \pm 0.023$  ( $1.435 \pm 0.033$  was in the left hemisphere,  $1.468 \pm 0.032$  was in the right hemisphere). The average fractal dimension of the lobule VII Af is  $1.395 \pm 0.014$  ( $1.392 \pm 0.019$  in the left hemisphere,  $1.397 \pm 0.019$  – in the right hemisphere). The average fractal dimension of the lobules VII At and VII B is  $1.327 \pm 0.017$  ( $1.328 \pm 0.024$  in the left hemisphere,  $1.326 \pm 0.024$  in the right hemisphere). The average fractal dimension of the lobule VIII is  $1.311 \pm 0.014$  ( $1.314 \pm 0.020$  in the left hemisphere,  $1.308 \pm 0.020$  in the right hemisphere). The average fractal dimension of the lobule IX is  $1.215 \pm 0.008$  ( $1.212 \pm 0.012$  in the left hemisphere,  $1.217 \pm 0.011$  in the right hemisphere). Interhemispheric difference of fractal index of the particles varies from 0.016% to 4.92%. Fractal index of the lobules I–VI, VIIAt, VIII and IX decreases in the lateral cerebellar hemispheres areas; fractal index of the lobule VIIAf is the lowest in paravermal areas and increases in media-lateral direction. Peculiarities of the structure of the cerebellar lobules and difference of the fractal index are associated with scale invariance and patterns of spatial organization of the quasi-fractal structures. The increase of the structure size (scale) increases the complexity of its organization.

The fractal analysis can be used as an objective morphometric criterion for the diagnosis of various diseases of the cerebellum and other structures of the central nervous system.

**Keywords:** cerebellum; white matter; fractal analysis.

Стаття надійшла 15.04.2017 р.

Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування