

Степаненко А.Ю., кандидат медических наук,
доцент, заведуючий кафедрой гистологии, цитологии и эмбриологии

Харьковский национальный медицинский университет

г. Харьков, Украина

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МОЗЖЕЧКА ЧЕЛОВЕКА

В современной морфологии применяется множество методов морфометрии, которые позволяют получить объективные, статистически проверяемые данные. Морфометрия используется для исследования разных биологических объектов: клеток, тканей, органов, которые имеют очень разнообразную геометрическую форму: от окружности, эллипса до сложно организованных древовидных структур. Такую сложную разветвленную древовидную форму имеют многие структуры человеческого организма: кровеносное русло, бронхиальное дерево, дендритное дерево нейронов, «дерево жизни» мозжечка. Особенностью таких структур является то, что при относительно малой площади поперечного сечения эти структуры занимают значительно больше пространства. Известные морфометрические методы позволяют достаточно точно исследовать свойства биологических объектов, которые имеют форму, приближенную к простым геометрическим фигурам, однако эти методы не могут комплексно описать свойства сложных геометрических фигур. Например, древовидная структура и круг могут иметь равную площадь, но по-разному заполнять пространство. Если же сравнить древовидную структуру и линию с равной длиной, то окажется, что древовидная структура так же, как и при сравнении с кругом, заполняет намного больше пространства. Поэтому для комплексного морфометрического исследования биологических объектов со сложной геометрической формой применяется фрактальный анализ [1].

Фрактал (лат. fractus – дробленный, сломанный, разбитый) - математическое множество, обладающее свойством самоподобия (объект, в точности или приближенно совпадающий с частью себя самого, то есть целое имеет ту же форму, что и одна или более частей). Слово «фрактал» употребляется не только в качестве математического термина. Фракталом может называться предмет, обладающий одним из следующих свойств: обладает сложной структурой на всех масштабах. Для фрактала увеличение масштаба не ведет к упрощению структуры, то есть на всех шкалах можно увидеть одинаково сложную картину; фрактал является самоподобным или приближенно самоподобным; фрактал обладает дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую [1, 6].

Многие биологические объекты обладают свойствами фракталов и обладают фрактальной (дробной) размерностью и масштабной инвариантностью или самоподобием. К таким структурам можно отнести бронхиальное дерево, разветвленные протоки экзокринных желез, сосудистое русло, нервы, ножки пучка Гиса, «дерево жизни» мозжечка, дендритное дерево нейронов и другие. Такие природные структуры с фрактальными свойствами, но не имеющие математически точной закономерности, характеризующей свойства их формы, т.е. не являющиеся истинными фракталами, называют квазифрактальными [6].

Квазифрактальные биологические структуры, не поддающиеся строгому описанию в традиционных рамках с помощью морфометрии, могут быть описаны с помощью фрактального индекса – показателя заполнения пространства фрактальной структурой и меры сложности пространственной организации этой структуры. Большинство квазифрактальных биологических структур имеют разветвленную древовидную форму. Чем сильнее разветвляются эти структуры, тем больше пространства они занимают, тем выше фрактальный индекс этих структур. Таким образом, фрактальный индекс можно использовать также как показатель степени разветвленности разных

структур: сосудистого русла, дендритного дерева нейронов и т.д. Это позволяет оценить свойства формы и изучить особенности фрактальной геометрии органов, тканей, клеток и структур на разных уровнях их организации. Раньше для изучения особенностей строения квазифрактальных структур (в т.ч. оценки степени разветвленности древовидных структур) применялась преимущественно субъективная оценка, а фрактальный индекс позволяет получить точное и объективное описание их свойств.

Все теоретически возможные значения фрактального индекса (ФИ) лежат в диапазоне от 1,0 до 2,0: объект с фрактальным индексом, равным 1,0, является прямой или кривой линией, которая практически не заполняет пространство; объект с фрактальным индексом, равным 2,0 заполняет все доступное пространство [1, 6].

Для определения фрактального индекса используется несколько методов: box-подсчет, метод дилатации пикселей, метод caliper, метод радиального энергетического спектра и другие [1, 4, 5, 7]. Наиболее простым в применении и удобным для исследования анатомических объектов является метод box-подсчета или метод разбиения на квадраты (box-counting).

В современной морфологии существуют исследования фрактального индекса нейронов, субклеточных структур, макромолекул [1, 7]. Исследования мозжечка как фрактального объекта до настоящего времени единичны [4, 5].

Цель исследования – исследовать фрактальную размерность поверхностной сосудистой сети и белого вещества мозжечка человека.

Материал и методы. 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. Мозжечок фиксировали в течение месяца в 10 %-м растворе формалина. Затем фотографировали с помощью зеркального цифрового фотоаппарата верхнюю и нижнюю поверхности мозжечка и вид мозжечка на разрезе, проведенном по срединной сагиттальной плоскости, после чего проводили анализ оцифрованных изображений.

Определение фрактального индекса производилось методом разбиения на квадраты (box-counting) по оригинальной методике, описанной ранее [2, 3].

Фрактальный индекс сосудистой сети поверхности мозжечка в целом изменяется от 1,31 (мин) до 1,86 (макс); его среднее значение – $(1,521 \pm 0,01)$, среднее квадратическое отклонение – $(0,01)$. Его значения распределены по нормальному закону (подтверждается с помощью критерия Колмогорова-Смирнова), что позволяет охарактеризовать три типа ветвления сосудов с помощью параметров распределения: среднего значения и среднего квадратического отклонения. Промежуточному типу соответствуют значения $(M \pm \sigma)$, магистральному – от $(M - 2\sigma)$ до $(M - \sigma)$, рассыпному – от $(M + \sigma)$ до $(M + 2\sigma)$. Значения фрактального индекса поверхностной сосудистой сети составили для магистрального типа строения $-(1,39 \pm 0,004)$ (диапазон – от 1,360 до 1,420), при рассыпном – $(1,72 \pm 0,016)$ (диапазон – от 1,620 до 1,816) и при промежуточном – $(1,52 \pm 0,007)$ (диапазон от 1,421 до 1,619).

Значения ФИ белого вещества мозжечка человека распределены в относительно небольшом диапазоне значений – от 1,20 до 1,50, среднее значение равно $(1,372 \pm 0,006)$.

Вариабельность фрактального индекса очень низкая, как и видимые морфологические различия у объектов, имеющих разные, даже сильно отличающиеся, значения фрактального индекса. Значения ФИ белого вещества мозжечка распределены по нормальному закону. Разница значений ФИ белого вещества червя и полушарий, парасагиттальных сечений полушарий, расположенных на разном расстоянии от срединной сагиттальной плоскости, а также симметричных срезов правого и левого полушарий незначительна и статистически не достоверна. Значения фрактального индекса белого вещества червя и полушарий связаны между собой сильной корреляционной связью ($r=0,804 \div 0,953$; $P < 0,001$), близкой к функциональной, наиболее сильная связь обнаружена между значениями фрактального индекса симметричных срезов. Равенство значений фрактального индекса червя и полушарий позволяет ограничиться определением ФИ на центральном сагиттальном срезе, что

облегчает стандартизацию морфометрических исследований, в частности, при проведении нейровизуализационных исследований.

Выводы. Структура поверхностной сосудистой сети и белого вещества мозжечка могут быть объективно оценены с помощью количественного морфометрического критерия – фрактального индекса. Применение фрактального анализа может быть использовано как объективный морфометрический критерий для диагностики различных заболеваний мозжечка и других структур центральной нервной системы.

Литература:

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. Степаненко А.Ю. Фрактальный анализ как метод морфометрического исследования поверхностной сосудистой сети мозжечка человека / А.Ю. Степаненко, Н.И. Марьенко // Медицина сегодня и завтра. – 2015. №4. – С. 50–55.
3. Степаненко А.Ю. Фрактальный анализ как метод морфометрического исследования белого вещества мозжечка человека / А.Ю. Степаненко, Н.И. Марьенко // Світ медицини та біології. – 2016. №4(58). – С. 127–130.
4. 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. – С. 179-186.
5. 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. – 85(6). – С. 4041-4046.
6. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature /B. B. Mandelbrot. – N.Y.: Freeman, 1983. – 468 с.
7. Ristanovic D. Fractal analysis of dendrite morphology using modified box-counting method / D. Ristanovic, B. D. Stefanovic, N. Puskas. – Neurosci Res. – 2014. – Jul. – V. 84. – P. 64–67.