прорастанию на питательной среде (1% агар-агар и 20% сахароза). При этом необходимо учитывать влияние факторов внешней среды в год сбора пыльцы.

1. Исачкин А.В., Ханбабаева О.Е. Влияние факторов среды на завязываемость семян у линий высокорослого львиного зева (*Antirrhinum majus* L.). Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2012. № 2. С. 87-93.
2. Исачкин А.В., Соловьев А.А., Ханбабаева О.Е., Богданова В.Д., Заренкова Е.Г. Изучение влияния обработок водным раствором колхицина на изменение признаков у двух садовых групп львиного зева (*Antirrhinum majus* L.). Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2014. № 4. С. 5-17.
3. Косенко М.А., Леунов В.И., Ховрин А.Н. Оценка исходного материала редьки европейской для создания инбредных самонесовместимых линий. Плодоводство и ягодоводство России. 2012. Т. 34. № 1. С. 401-406.
4. Семеноводство цветочных культур /Сост. Л.А. Китаева. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 190 с. ил.
5. Ханбабаева О.Е. Гаметофитная самонесовместимость львиного зева (*Antirrhinum majus* L.): Монография/О.Е. Ханбабаева. М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2011. 143 с.
6. Ханбабаева О.Е. Мультимедийное учебное пособие «Размножение декоративных растений». Свидетельство о регистрации базы данных RU 2013620650. Заявка № 2013620364 от 17.04.2013.
7. Ханбабаева О.Е., Богданова В.Д., Заренкова Е.Г. Изучение биологии цветения и опыления сортов и линий карликового львиного зева (*Antirrhinum majus* L.)/ Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2013. № 5. С. 92-100.
8. Ханбабаева О.Е., Иванова И.В., Тазина С.В. Цветоводство с основами ландшафтного дизайна. Москва, 2019.

Молчатский С.Л.

Проблема структурной организации нейронных комплексов мозга человека

*Самарский государственный социально-педагогический университет
(Россия, Самара)*

doi: 10.18411/lj-05-2021-31

Аннотация

Целью исследования было нахождение функции распределения структурных элементов в кластерах вентромедиального (ВМЯ) и латерального гипоталамического ядра (ЛГЯ). Метод исследования – расчета фрактального коэффициента D («box counting method»). Научная новизна – впервые был проведен компьютерный фрактальный анализ ядер ВМЯ и ЛГЯ. В результате исследованы функции распределения структурных элементов в кластерах, определены их фрактальные коэффициенты.

Ключевые слова: фрактал; фрактальная размерность; фрактальный анализ; вентромедиальное ядро; латеральное гипоталамическое ядро.

Abstract

The aim of the study was to find the function of the distribution of structural elements in the clusters of ventromedial and lateral hypothalamic nucleus. The research method is the calculation of the fractal coefficient D ("box counting method"). Scientific novelty - for the first time, a computer fractal analysis of both nuclei was carried out. As a result, the functions of the distribution of structural elements in clusters were investigated, their fractal coefficients were determined.

Keywords: fractal; fractal dimension; fractal analysis; ventromedial nucleus; lateral hypothalamic nucleus.

Многие биологические структуры и процессы обладают фрактальными свойствами и характеризуются масштабной инвариантностью и дробной размерностью [1, 2]. Их сложная структура не поддается строгому описанию в традиционных рамках.

В этих целях все шире используются теория фракталов и мультифракталов [2] с позиций, которых можно охарактеризовать свойства самоподобия и сложного скейлинга самых разных биологических объектов и систем на кластерном уровне их организации.

Мозг человека представляет собой сложную, неравновесную динамическую систему. Структуру его составляют нейроны, морфофункциональные особенности которых достаточно хорошо изучены. Есть данные и об их фрактальной организации [5]. Но до сих пор нет четкого представления о том, какова геометрия структур, которые образуются в процессе агрегации нейронов в местах их постоянного пребывания, и какова геометрия самих ядер мозга.

В течение длительного времени строение и функции мозга изучали на двух уровнях: нейронном и ядерном. Хотя идея о том, что нервные центры состоят не из отдельных цепочек нейронов, работающих независимо друг от друга, а организованы в блоки или модули, функционирующие как единое целое, была выдвинута С. Рамон-и-Кахалем еще в начале 20 века.

В последние десятилетия модули были обнаружены и описаны в различных отделах центральной нервной системы позвоночных животных [3], которые могут объединять от нескольких клеток до нескольких тысяч нейронов. Но геометрия этих структур оставалась неизвестной до недавнего времени, хотя мнение о кластерной организации нейронных сетей высказывалось в некоторых работах [5].

Задачи исследования

Все выше сказанное и определило направление наших исследований. В качестве объекта изучения были выбраны ядра гипоталамуса. Сложность морфофункциональной организации гипоталамуса отмечается всеми авторами, изучающими мозг позвоночных: огромное количество ядер, не четко очерченные границы между ядрами, черты сходства в строении и функции с ретикулярной формацией мозга, признание его интегрирующим и координирующим отделом мозга и многое другое. Различаются они по количественным характеристикам, определяемым по величине фрактальной размерности, которая в разных ядрах варьируется в достаточно широком диапазоне. В этой связи возникает вопрос о том, как же организованы ядра гипоталамуса человека, какова геометрия их структур. Что и определило цель данной работы – исследовать геометрию и фрактальные свойства структур отдельных ядер гипоталамуса человека, и геометрию ядер в целом, сопоставить их с морфофункциональными характеристиками.

Методы исследования

В качестве материала компьютерного исследования использованы микрофотографии фронтальных срезов вентромедиального (ВМЯ) и латерального гипоталамического ядра (ЛГЯ) среднего гипоталамуса мозга человека, выполненные в работе [4]. В основу фрактального анализа структур этих ядер положена процедура представления их плоских электронных изображений в виде конечного дискретного множества с числом элементов порядка $10^4 - 10^5$. Линейный размер элемента определялся разрешающей способностью компьютера. Анализ и обработка изображений проводились в автоматическом режиме по методике и специально разработанной программе, в основу которых положен клеточный метод расчета фрактального коэффициента D («box counting method»).

Согласно общей теории фрактальных кластеров [6, 7] распределение элементарных объектов в кластере дается функцией вида:

$$N(L) = (L/l)^D, \quad (1)$$

где: N – число элементов кластера, находящихся внутри области линейного размера L ; l – линейный размер элементарного объекта. Если показатель степени D в формуле (1) универсален в интервале $l \ll L \ll Rg$, (где Rg – так называемый радиус гирации кластера – величина, определяющая линейные размеры всего кластера), то кластер называется монофрактальным, а показатель D есть фрактальная размерность кластера.

В общем случае D является дробным положительным числом. Клеточная фрактальная размерность определяется формулой:

$$D = (\log N) / \log (L/l), \quad (2)$$

где: N – число элементов изображения, принадлежащих кластеру и заключенных внутри квадрата со стороной L , l – линейный размер элементов.

Результаты и их обсуждение

Путем использования уже описанной методики компьютерного анализа установлена кластерная структура ВМЯ и ЛГЯ и исследованы функции распределения структурных элементов в кластерах. Эти функции представлены (в дважды логарифмической шкале) в виде графиков на рисунке 1.

Рисунок 1. Графики распределения элементов в кластерах (а) – в ВМЯ ($D=1.870\pm0.001$) и (б) – в ЛГЯ ($D=1.890\pm0.001$) гипоталамуса человека.

На графиках видно, что расположение экспериментальных точек на плоскости $(\log L, \log N)$ с высокой точностью аппроксимируется прямой линией. Единственной особенностью распределения, связанной с конкретным ядром, является разный наклон прямой. Линейность функций распределения элементов свидетельствует о монофрактальности исследуемых кластеров в обоих ядрах. Этот вывод основан на

исследовании распределения $10^4 - 10^5$ структурных единиц, а графики, как показано на рисунке 1, построены путем аппроксимации большого числа экспериментальных точек (около 20) – вывод сделан на основе компьютерного анализа большого объема экспериментального материала.

Путем использования формулы (2) для всех кластеров были определены их фрактальные коэффициенты, которые в обоих ядрах различаются по величине. Разные значения D в обоих ядрах свидетельствуют о сложном скейлинге кластеров, что служит показателем мультифрактальной их организации.

В ВМЯ значения D лежат в диапазоне между $D = 1.848 \pm 0.004$ и

$D = 1.903 \pm 0.001$, а в ЛГЯ между $D = 1.874 \pm 0.001$ и $D = 1.890 \pm 0.001$. Отсюда следует, что в ЛГЯ разница в значениях D составляет 0.016, в то время как в ВМЯ диапазон колебания величины D значительно больше и составляет 0.055. Характерно, что высокие показатели D в обоих ядрах присущи кластерам, расположенным в дорсальной области ядер, где, по данным [4], расположены крупные клетки. Низкие величины D обнаруживаются у кластеров вентральных областей этих ядер. Примечательно, что средние значения фрактальной размерности кластеров обоих ядер совпадают (в ВМЯ $D = 1.879 \pm 0.001$, в ЛГЯ $D = 1.878 \pm 0.002$).

Таким образом, кластеры исследованных ядер обладают свойствами, присущими фракталам: нерегулярность как свойство недифференцируемости; самоподобие, т.е. они инвариантны и являются монофракталами; их фрактальная размерность дробная, отличная от Евклидовой. Разная величина их фрактальной размерности, отражающая заполнение двумерного пространства черно-белыми изображениями агрегированных клеток, демонстрирует разную сложность морфологической организации кластеров в разных областях исследуемых ядер. Подобная пространственная структура ядер позволяет отнести их к классу мультифракталов.

При всей схожести геометрии кластеров обоих ядер обнаружены и некоторые различия в их структуре. Так в ВМЯ целые области состоят из кластеров с одинаковой фрактальной размерностью ($D = 1.870 \pm 0.001$). Они идентичны по геометрической структуре и разница величин фрактального коэффициента значительно больше, чем в ЛГЯ, что служит показателем более выраженного локального скейлинга. Оба исследуемые ядра филогенетически являются молодыми, но ЛГЯ как самостоятельное ядро обособляется от латеральных структур гипоталамуса позже, чем формируется ВМЯ, и в онтогенезе оно закладывается и созревает позже [4]. Возможно, этим обстоятельством и обусловлены особенности геометрии его кластеров, большинство которых, по-видимому, построено по принципу динамических нейронных сетей, вовлекаемых в системные реакции в зависимости от текущих условий. В ВМЯ фрактальная организация одних кластеров, вероятно, изначально детерминирована на выполнение определенных функций по типу нервных центров, других – по принципу динамических нейронных сетей, обладающих менее выраженной специализацией их нейронов. Создается впечатление, что в крупноклеточных областях ВМЯ и ЛГЯ располагаются кластеры с более высокими показателями фрактальной размерности.

1. Goldberger A. L. Fractal variability versus pathological periodicity: complexity and stereotypy in disease // *Perspect. Biol. Med.*, 1997. – V. 40. – № 4. – P. 543-561.
2. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman: New York, 1983. 468 p. (Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 655 с.
3. Андреева Н.Г., Обухов Д.К. Эволюционная морфология нервной системы позвоночных. СПб.: Лань, 1999. – С. 51-58.
4. Боголепова И.Н. Строение и развитие гипоталамуса человека. Л.: Мед., 1968. – 176 с.
5. Исаева В.В., Каретин Ю.А., Чернышов А.В., Шкуратов Ю.Ю. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе. Изд.: Инст. биол. моря ДВО РАН, 2004, – 128 с.
6. Смирнов Б.И. Физика фрактальных кластеров. М.: Мир, 1991. 134 с.
7. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. – 260 с.