

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СУПРАХИАЗМАТИЧЕСКОГО ЯДРА
ГИПОТАЛАМУСА КОШКИ

© 2013

С.Л. Молчатский, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Химии, географии и методики их преподавания»

Поволжская государственная социально-гуманитарная академия, Самара, (Россия)

Аннотация: Представлены результаты компьютерного анализа микрофотографий фронтальных срезов супрахиазматического ядра гипоталамуса кошки. Установлено, что исследуемые структуры ядра являются монофрактальными кластерами с фрактальной размерностью, лежащей в интервале от $D=1.688\pm 0.006$ до $D=1.909\pm 0.001$. Ядро в целом мультифрактал.

Ключевые слова: супрахиазматическое ядро, кластер, фрактальная размерность.

В настоящее время существуют различные подходы к изучению фрактальных свойств кластеров физических объектов и процессов [1]. Один из них состоит в геометрическом анализе изображений объектов, полученных с помощью электронной микроскопии. Этот подход оказался эффективным при изучении фрактальных свойств не только физических объектов, но и при исследовании биологических систем, т.к. они характеризуются неупорядоченностью и весьма далеки от термодинамического равновесия. Их изучение традиционными методами, опирающимися на математический формализм, ограничено.

Образующиеся в результате агрегации нейронов фрактальные кластеры ядер мозга животных и человека аналогичны физическим фрактальным кластерам и могут быть описаны с позиций физической кинетики. Но в отличие от них являются частью сложно организованных иерархических систем – это структурно-функциональные единицы ядер. Иерархичность организации в структурном, функциональном и информационном отношениях является одним из атрибутов всего живого [2]. Описание кластеров, их фрактальных свойств, как одного из уровней организации иерархической системы удобно в рамках компартментно-кластерной теории [3]. Нейроны-компарменты агрегируют путем слипания в кластеры, а кластеры-компарменты в совокупности образуют ядра – более крупные кластеры. Кластерная организация ядер гипоталамуса мозга животных и человека показана в исследовательских работах [4, 5]. Но геометрия кластеров каждого ядра и их фрактальные свойства требуют более глубокого анализа.

Супрахиазматическое ядро (СХЯ) по топографии относится к передней группе ядер гипоталамуса. Его нейроны – компарменты кластеров по составу мало чем отличаются от нейронов большинства других ядер гипоталамуса, разве что более плотным (тесным) расположением [6]. СХЯ – мелкоклеточное ядро, состоящее из нейронов со слабо ветвящимися дендритами. Многие соседние нейроны образуют контакты друг с другом, что не характерно в целом для мозга. Функционально СХЯ примечательно наличием нейронов со спонтанной ритмической активностью, синхронной с циркадианным ритмом сна и бодрствования, а также с ритмом других функций организма [7]. Имеются данные и о прямой проекции сетчатки глаза в это ядро [8].

Все вышесказанное выделяет СХЯ среди других ядер гипоталамуса. Поэтому закономерно возникает вопрос о том, отражается ли это на структуре его кластеров и находит ли оно отражение на их фрактальных свойствах. В работе была поставлена цель – изучить фрактальные свойства кластеров СХЯ, установить, к какой группе фракталов относится само ядро в целом и существует ли связь между фрактальными свойствами и морфо-функциональной организацией его кластеров.

Материал и методика

Исследование сводилась к фрактальному анализу структуры СХЯ по специально разработанной методике и специальной компьютерной программе, представленных в работе [9] и использованных авторами ранее

при исследовании фрактальных структур полимерных пленок. В настоящей работе в основу фрактального анализа микроструктуры СХЯ была положена процедура представления его плоского электронного изображения в виде дискретного множества простых элементов. Исследуемые электронные микрофотографии, полученные в работе [10], при помощи планшетного сканера загружались в компьютер. Обработка изображения осуществлялась в автоматическом режиме. Этапы исследования описаны в работе [9], там же обоснован критерий монофрактальности кластеров и описана методика определения фрактальной размерности и ее погрешности. Исследованы микрофотографии СХЯ на 3-х фронтальных срезах. На каждом срезе проанализированы кластеры медиальной и латеральной областей ядра.

Результаты

Установлено, что все исследованные кластеры СХЯ, как и других ядер гипоталамуса [6], имеют монофрактальную структуру. Экспериментальные точки аппроксимируются линейной функцией, т.е. они масштабно инвариантны, что видно на графиках (рис. 1).

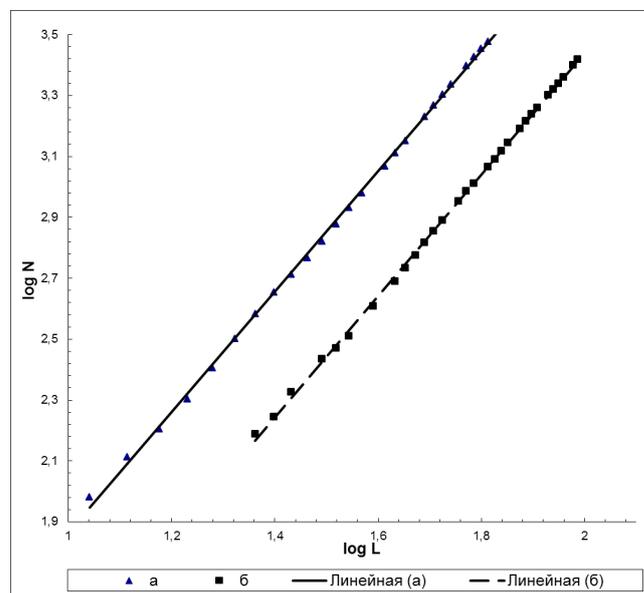


Рис. 1. График распределения элементов в кластерах СХЯ гипоталамуса кошки: а – медиальной области ядра, $D=1.703\pm 0.004$; б – латеральной области ядра, $D=1.904\pm 0.003$.

По экспериментальным точкам вычислено значение фрактальной размерности и определена погрешность ее величины, поскольку относительная погрешность D/D является количественной мерой правомерности гипотезы о линейном распределении элементов, выраженном в дважды логарифмической шкале, а значит и правомерности вывода о монофрактальности кластеров.

Значения фрактальной размерности кластеров, как количественной характеристики сложности их гео-

метрии, приведены в таблице 1. На каждом срезе ядра фрактальная размерность имеет разную величину и относительная погрешность ее во всех случаях ничтожно мала. Показатели D лежат в интервале от $D=1.703\pm 0.004$ до $D=1.883\pm 0.003$ в медиальной области ядра и в интервале от $D=1.688\pm 0.006$ до $D=1.909\pm 0.001$ в латеральной его области. Кластеры с высокой фрактальной размерностью встречаются на втором срезе, что соответствует средней части ядра, а кластеры с низкими величинами D обнаружены на 3-ем срезе, что соответствует каудальной трети его. Различающиеся по величине показатели фрактальной размерности кластеров в разных частях СХЯ свидетельствуют о неодинаковой внутренней их организации, т.е. об их локальном скейлинге. Структуры с более чем одним показателем скейлинга – это сложные фракталы – мультифракталы. Следовательно, СХЯ в целом является мультифракталом.

Таблица 1 - Фрактальная размерность кластеров СХЯ гипоталамуса кошки

Срезы ядра	Области ядра	
	Медиальная	Латеральная
1	$1,850 \pm 0,005$	$1,837 \pm 0,004$
2	$1,883 \pm 0,003$	$1,909 \pm 0,001$
3	$1,703 \pm 0,004$	$1,668 \pm 0,006$
Ср	$1,812 \pm 0,004$	$1,811 \pm 0,004$

Обнаружив мультискейлинговые свойства кластеров СХЯ в его медиальной и латеральной областях, мы сравнили их статистические характеристики. Оказалось, что средние значения фрактальной размерности кластеров обеих половин ядра на всех срезах равны в пределах погрешности измерений. Данное обстоятельство служит подтверждением тому, что структуры сложных объектов, будучи самоподобными на малых масштабах, не идентичны структуре всего объекта, а после усреднения их фрактальных характеристик в пределах подсистем сохраняют свойство самоподобия [11].

Обратимся к морфологической структуре ядра СХЯ - это мелкоклеточное ядро. Известно, что мелкие клетки предназначены для реализации функций адаптивного характера [12]. СХЯ, как и другие мелкоклеточные ядра, закладывается достаточно поздно и дифференцируется в условиях зависимости от факторов среды [6]. Их особое расположение плотными группами и существование связей между соседними клетками, по-видимому, генетически запрограммировано на выполнение определенных функций, в том числе и на ритмическую спонтанную активность. Возможно, и самоорганизация кластеров СХЯ происходит путем образования адекватных среде структур (аттракторов), являющихся промежуточ-

ными целями, к которым эволюционируют неравновесные состояния системы. Сами нейроны выступают как информационные носители процессов самоорганизации их в кластеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
2. Бронштейн И.Н. Устойчивость и сложность динамических систем // Самоорганизация в физических, химических и биологических системах. Кишинев: Штиинца, 1984. С. 14-22.
3. Eskov V.M., Kulaev S.V., Popov YU.M., Filatova O.E. Computer technologies in stability measurements on stationary states in dynamic biological systems // Measurement techniques. 2006. Vol. 49. № 1. P. 59-65.
4. Молчатский С.Л. Принципы фрактальной организации кластеров ядер мозга животного и человека. / Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции «Наука и современность – 2011». Новосибирск: Изд. НГТУ, 2011. С. 315-320.
5. Молчатский С.Л., Молчатская В.Ф. Фрактальная морфология кластеров ядер гипоталамуса мозга животных. / Нейронаука для медицины и психологии: 7-й Международный междисциплинарный конгресс. Судак. Крым. Украина. 2011. Труды конгресса. М.: МАКС Пресс, 2011. 488с. (*This work is protected under copyright by Elsevier Science.*)
6. Боголепова И.Н. Строение и развитие гипоталамуса человека. Л.: Мед., 1968. 176 с.
7. Moore-Ede M.C., Sulzman F.M., Fuller C.A. The clocks that time us: Physiology of the circadian timing system. M.A.: Harvard University Press Cambridge, 1982. 448 с.
8. Hendrickson A.E., Wagoner N., Cowan W.M. An autoradiographic and electron microscopic study of retino-hypothalamic connections. Z. Zellforsch., 1972. Bd. 135. S. 1 – 26.
9. Зынь В.И., Молчатский С.Л. Фрактальный анализ продуктов газоразрядной полимеризации. // Химическая физика. 1998. Т.17. № 5. С.130-134.
10. Нейрофармакология процессов центрального регулирования: сборник научных трудов / ред. А. В. Вальдман. -Л.: 1-й Ленингр. гос. мед. ин-т им. И.П. Павлова, 1969. 596 с.
11. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 859-876.
12. Эдельман Дж. М. Разумный мозг / Под. ред. Е. Соколов. М.: Мир, 1981. С. 68-126.

FRactal Analysis of the Suprahiasmatic Nucleus Structure in the Cat Hypothalamus

© 2013

S.L. Molchatsky, candidate physical and mathematical sciences, associate professor of the department of «Chemistry, geography and technique of their teaching»
Samara State Academy of Social Sciences and Humanities, Samara (Russia)

Annotation: The article shows the results of the computer analysis of micrographs presenting frontal sections of suprahiasmatic nucleus in the cat hypothalamus. It has been established that the nuclear structures under analysis are the monofractal clusters with different fractal dimensions in the range from $D = 1.688\pm 0.006$ to $D = 1.909\pm 0.001$. The nuclear on the whole is multifractal.

Keywords: suprahiasmatic nucleus, cluster, fractal dimension.