

ПСИХОЛОГИЯ

УДК 612.822.3

Вычисление сложных характеристик сигнала ЭЭГ, таких как корреляционная размерность, позволяет оценивать свойства энцефалограммы как детерминированного хаотического процесса. Обнаруженная в экспериментах значимая статистическая связь между корреляционной размерностью и такими психологическими характеристиками, как объем кратковременной памяти и невербальными интеллектуальными способностями, позволяет утверждать, что сложные характеристики ЭЭГ являются адекватными объективными показателями информационной емкости мозга и его адаптационных возможностей. Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что рассмотрение ЭЭГ с позиций теории динамического хаоса является адекватным и эффективным методическим приемом анализа мозговой активности.

К л ю ч е в ы е с л о в а : электроэнцефалограмма; корреляционная размерность; кратковременная память; невербальный интеллект.

The calculation of the complexity characteristics of the EEG signal, such as the correlation dimension, makes it possible to evaluate the properties of the encephalogram as a deterministic chaotic process. The significant statistical relationship between the correlation dimension and psychological characteristics, such as the volume of short-term memory and the non-verbal intellectual abilities, revealed in the experiments allows us to state that the complexity characteristics of the EEG are adequate objective indicators of the information capacity of the brain and its adaptive capabilities. The results obtained in the present study indicate that an examination of the EEG from the standpoint of the theory of dynamic chaos is an adequate and effective methodical method for analyzing brain activity.

К e y w o r d s : electroencephalogram, correlation dimension, short-term memory, nonverbal intellectual abilities.

Е. П. Станкова, И. Ю. Мышкин, О. А. Дунаева, А. В. Лабзин

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

E-mail: mysjkin@uniyar.ac.ru

Роль ритмической активности мозга в обеспечении когнитивной деятельности

Научная статья

E. P. Stankova, I. Yu. Myshkin, O. A. Dunaeva, A. V. Labzin

P. G. Demidov Yaroslavl State University

The Role of Rhythmic Activity of Brain in the Provision of Cognitive Activity

Scientific article

В XX столетии было показано, что деятельность многих систем человеческого организма, в том числе нервной, представляет собой детерминированно-хаотические процессы. Головной мозг человека можно рассматривать как самоорганизующуюся нелинейно-динамическую систему. Нейронные ансамбли головного мозга являются элементами системы, а ее самоорганизация проявляется в виде синхронизации или десинхронизации активности нейронных ансамблей. Возбуждения, приходящие в мозг, создают бифуркацию в системе, в ответ на это она может перейти к новой области устойчивости. Рецепцию, обработку и хранение информации

мозгом можно рассматривать как фазовые переходы и возникновение новых ступеней устойчивого состояния. Таким взглядам на механизмы функционирования мозга соответствуют методы нелинейной динамики, применимые для анализа систем динамического хаоса [1].

Применение нелинейно-динамического подхода позволяет оценить, как функционирует исследуемая система – регулярно или нет; а кроме того, насколько сложна ее временная динамика. Особенно актуально применение такого подхода в электроэнцефалографических исследованиях, так как регистрация ЭЭГ в настоящее время

© Станкова Е. П., Мышкин И. Ю., Дунаева О. А., Лабзин А. В., 2018

является наиболее доступным и распространенным методом объективного изучения деятельности мозга человека. Одно из центральных понятий терминологии теории динамического хаоса – «сложность» – используется для описания как психических явлений, так и нейрофизиологических. Исследования показывают, что существует связь сложности психического со сложностью нейрофизиологических процессов, в частности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [2].

Существует несколько подходов к оценке сложности системы. Часть методов основана на вычислении минимального количества переменных, необходимых для передачи сигнала. К таким показателям относится сложность Лемпела—Зива. Этот показатель сложности является достаточно чувствительным инструментом диагностики психических и нейродегенеративных заболеваний [3, 4]. Другим подходом к определению сложности нелинейно-динамической системы является реконструкция ее аттрактора и вычисление его характеристик, к которым можно отнести: корреляционную размерность восстановленного аттрактора системы, характеризующей ее сложность; корреляционную энтропию, показывающую степень предсказуемости и организованности системы; показатель Херста, определяющий отклонение от чисто случайного процесса; показатель Ляпунова – меру чувствительности системы к начальным условиям [5].

В работах, посвященных исследованию динамических параметров мозга в различных состояниях (бодрствование, интеллектуальная нагрузка, сон, гипноз и патологии: шизофрения, эпилепсия), было обнаружено перераспределение нелинейно-динамических параметров биоэлектрической активности, изменение степени сложности и хаотичности периодических процессов [6, 7]. Чаше всего с позиций теории динамического хаоса для анализа ЭЭГ используют корреляционную размерность восстановленного аттрактора системы [8, 9]. Показано, что величина корреляционной размерности возрастает по мере увеличения количества нейронных сетей, осциллирующей на собственной частоте. По этой величине можно судить, насколько генерализованно протекают процессы в головном мозге или насколько вариативна его деятельность [10]. Данная величина зависит от уровня бодрствования и может быть использована для определения функционального состояния мозга [11]. Метод корреляционной размерности, в отличие от частотных

методов анализа, не предполагает стационарности и периодичности ЭЭГ. Специфической чертой этого метода является интерпретация временных сигналов как многомерных геометрических объектов. Изменения состояний системы можно интерпретировать как движение некоторой точки в фазовом пространстве. Преимущество использования метода корреляционной размерности состоит в том, что он позволяет получить количественную оценку разнообразия периодических режимов мозга.

Цель настоящего исследования – оценить связь величины корреляционной размерности ЭЭГ с уровнем невербального интеллекта и когнитивными функциями, влияющими на него. Рабочая гипотеза – разнообразие периодических электрических процессов мозга не только отражает его функциональное состояние, но и определяет продуктивность и успешность познавательной деятельности.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 83 человека в возрасте от 19 до 26 лет. У всех испытуемых была зарегистрирована электроэнцефалограмма, каждый испытуемый выполнял несколько психофизиологических тестов: определение объема кратковременной и оперативной памяти, параметры внимания, коэффициент интеллекта IQ. Все испытуемые были студентами Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова. Обследование проводили после предварительного согласия на участие в исследовании в качестве испытуемых.

ЭЭГ регистрировали в стандартных условиях – в комнате, защищенной от световых и звуковых раздражителей. Испытуемый находился в удобном кресле, в положении сидя, в состоянии спокойного бодрствования. Восемь пар активных электродов располагали симметрично в соответствии с международной системой «10–20». Применяли монополярный способ отведения с ипсилатеральным референтным ушным электродом (A1, A2). Для регистрации ЭЭГ использовали комплекс «Нейрон-Спектр-4/ВПМ» (Нейрософт, Иваново). Частота квантования составляла 500 Гц, полоса пропускания – от 0,5 до 35 Гц. Межэлектродное сопротивление не превышало 20 кОм.

Корреляционную размерность (CD) рассчитывали с помощью программного обеспечения, разработанного в ЯрГУ на основе алгоритма Грассбергера–Прокаччия [12]. Для вычисления корреляционной размерности восстановленного аттрактора ЭЭГ брали 40000 отсчетов (1 мин 20 с).

На этом отрезке сигнала размещали 800 опорных паттернов по 112 мс.

Для измерения объема кратковременной и оперативной памяти использовали оригинальные компьютерные программы. Показатели внимания оценивали с помощью корректурной пробы. По результатам теста были рассчитаны показатели точности выполнения задания и коэффициент умственной продуктивности. Тест «Домино» – тест интеллекта, который предназначен для измерения невербальных интеллектуальных способностей у лиц старше 12 лет. Первичные оценки переводили в показатели IQ согласно инструкции по обработке теста [13].

Статистический анализ результатов проводился в пакете программ Statistica 10.0. Проверку нормальности распределения проводили с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Считали, что данные подчиняются закону нормального распределения при $p > 0,05$. Для изучения структуры анализируемых данных применяли факторный анализ. Связь между параметрами оценивали по коэффициенту корреляции Пирсона. Уровень значимости принимали равным 0,05.

Результаты исследования

В результате обработки реализаций ЭЭГ рассчитали величины корреляционной размерности (CD)

по 16 отведениям ЭЭГ для каждого испытуемого индивидуально. Описательная статистика полученных результатов приведена в таблице 1.

Величины корреляционной размерности, полученные в этом исследовании, в основном соответствуют средним значениям, полученным другими исследователями, хотя абсолютные величины во многом определяются заданными начальными условиями алгоритма обработки [14]. Средние значения корреляционной размерности в разных отведениях значимо не различались. Факторный анализ структуры данных показал их однородность: вся выборочная дисперсия объясняется действием одного фактора. Анализ распределения данных с использованием критерия Колмогорова–Смирнова продемонстрировал, что во всех отведениях, кроме задневисочных, значения корреляционной размерности подчиняются закону нормального распределения. В задневисочных отведениях распределение было близко к нормальному. Это подтверждается тем фактом, что медиана и среднее значение практически не отличаются.

Второй этап работы состоял в анализе связи корреляционной размерности ЭЭГ и когнитивных способностей. Для этого был оценен уровень невербального интеллекта, объем кратковременной и оперативной памяти, показатели внимания и скоростные характеристики деятельности.

Таблица 1

Выборочные значения корреляционной размерности фоновой ЭЭГ

Отведение	Минимальное значение	Максимальное значение	Медиана	Среднее значение
Fp1	3,90	5,71	4,69	4,68
Fp2	3,73	5,52	4,70	4,65
F3	4,25	5,54	4,84	4,83
F4	3,64	5,53	4,80	4,81
C3	4,30	5,46	4,84	4,85
C4	3,68	5,46	4,83	4,83
P3	4,17	5,57	4,78	4,78
P4	3,93	5,49	4,76	4,81
O1	3,86	5,61	4,80	4,79
O2	3,34	5,70	4,76	4,73
F7	2,73	5,83	4,71	4,71
F8	3,65	5,36	4,65	4,67
T3	3,66	5,45	4,89	4,85
T4	3,07	5,58	4,78	4,76
T5	3,89	5,36	4,82	4,82
T6	3,69	5,38	4,73	4,72

Анализ корреляционной размерности ЭЭГ с результативностью деятельности показал наличие положительной связи уровня интеллекта с разнообразием периодических режимов мозга в лобных отведениях. Чем выше было разнообразие периодических режимов мозга в лобных областях коры мозга, тем выше был уровень интеллекта испытуемых. Коэффициенты корреляции Пирсона между данными теста «Домино» и корреляционной размерностью ЭЭГ составили +0,23 и +0,25 соответственно.

Результаты показали, что корреляционная размерность ЭЭГ в отведениях правого полушария положительно связана со скоростью выполнения корректурной пробы и коэффициентом продуктивности (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между корреляционной размерностью и скоростью выполнения корректурной пробы

Отведение	Количество просмотренных букв	Коэффициент продуктивности
Fp2	0,20	0,19
F4	0,23*	0,19
C4	0,25*	0,21
P4	0,29*	0,22*
O2	0,29*	0,39*
F8	0,10	0,10
T4	0,16	0,18
T6	0,12	0,15

* коэффициенты корреляции, значимые при $p < 0.05$.

Коэффициенты корреляции, приведенные в табл. 2, демонстрируют, что чем выше у испытуемого была корреляционная размерность ЭЭГ в правом полушарии, тем быстрее он обрабатывал информацию и тем выше у него была продуктивность внимания.

Корреляционная размерность ЭЭГ в отведении Fp1 была положительно связана с объемом кратковременной памяти. Коэффициент корреляции составил +0,24, то есть испытуемые с более высоким значением корреляционной размерности ЭЭГ в левой префронтальной области обладали лучшей способностью запоминать цифры. Кроме того, увеличению корреляционной размерности в отведении P4 соответствовало повышение стабильности результата в 30 повторностях теста ($r = +0.23$).

В отдельной серии экспериментов была проанализирована связь величины корреляционной размерности ЭЭГ с объемом оперативной памяти.

Коэффициенты корреляции между корреляционной размерностью ЭЭГ и объемом оперативной памяти представлены на рисунке.

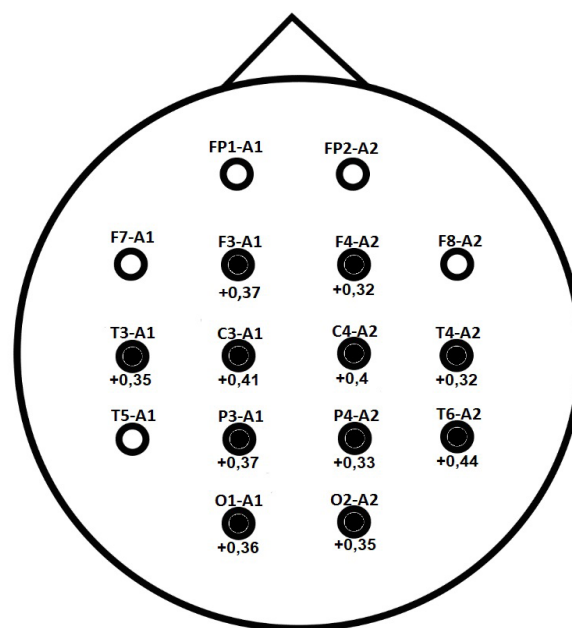


Рис. Коэффициенты корреляции, значимые при $p < 0.05$

На рисунке схематично представлены 16 стандартных отведений ЭЭГ. Те отведения, для которых была обнаружена значимая связь между изучаемыми параметрами, выделены черным цветом. Величина коэффициента корреляции указана под соответствующим отведением. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение «сложности» биоэлектрических процессов практически во всех регистрируемых отведениях отражается на увеличении объема оперативной памяти. Второй факт состоит в том, что процессы кратковременной памяти связаны лишь с локальной активацией корковых зон, а оперативное запоминание связано с увеличением «сложности» ЭЭГ более обширных корковых зон. Возрастание величины корреляционной размерности также соответствовало повышению стабильности результата теста. Отметим, что продуктивность внимания и объем памяти положительно связаны с уровнем интеллекта, коэффициенты корреляции составляют соответственно +0,26 и +0,25.

Обсуждение результатов

Айзенк (1995), рассматривая понятие интеллекта, выделил его наиболее фундаментальную

часть – биологический интеллект. Материальную базу биологического интеллекта составляют индивидуальные физиологические, нейробиологические, биохимические и гормональные процессы, являющиеся основой осмысленного поведения. Структурную основу составляет кора и обслуживающие ее мозговые образования. В природе этих компонентов важную роль играет генетический фактор [15]. При изучении биологического интеллекта важно использовать такие измеряемые величины, которые характеризуют системные процессы в головном мозге. Для этих целей предлагают использовать корреляционную размерность восстановленного аттрактора. По данным литературы величина корреляционной размерности ЭЭГ генетически обусловлена, поэтому может служить для объяснения межличностных различий в функциональной организации мозга [16]. Как было отмечено ранее, корреляционная размерность позволяет судить, насколько генерализованно протекают процессы в головном мозге и насколько вариативна его деятельность. Для сложных биологических систем показатель степени хаотичности при нормальном функционировании системы может принимать определенные значения внутри некоторого диапазона, характерного для данной системы. Отклонение этого показателя в любую сторону неблагоприятно для системы: чрезмерное уменьшение степени хаотичности приводит к потере пластичности и способности к адаптации, а увеличение – к потере системообразующего фактора. Система перестает функционировать как единое целое [17].

Результаты наших исследований указывают на существование положительной связи между величиной корреляционной размерности и уровнем интеллекта. Примечательно, что с уровнем IQ была ассоциирована корреляционная размерность ЭЭГ именно в префронтальных и нижнелобных отведениях. Этот факт согласуется с данными о роли префронтальной коры в обеспечении интеллектуальной деятельности. Клиницисты отмечают, что фрактальная размерность ЭЭГ снижается при нейродегенеративных заболеваниях. В то же время корреляционная размерность положительно связана с успешностью выполнения тестов на интеллект у пациентов, страдающих болезнью Альцгеймера. В частности, результаты теста «Прогрессивные матрицы Равена» положительно соотносились с корреляционной размерностью ЭЭГ в лобных отведениях (F3) [18]. Исследования связи фрактальной размерности с IQ на выборке здоро-

вых людей практически отсутствуют. Известные нам работы [7, 19] показали, что испытуемые, обладающие высоким интеллектом, имели достоверно большую размерность аттрактора фоновой ЭЭГ, чем испытуемые с низким интеллектом.

Важность разнообразия нейронных генераторов для обеспечения когнитивных процессов подтверждается тем фактом, что величина корреляционной размерности положительно связана с «коэффициентом продуктивности» выполнения корректурной пробы. Кроме того, показатель корреляционной размерности существенно снижается у больных с синдромом хронической усталости, у которых, как известно, часто нарушаются функции внимания.

Согласно предложенной нами модели хранения информации в нейронной сети разнообразие периодических режимов определяет ее информационную емкость [20]. Примененный нами метод расчета корреляционной размерности ЭЭГ позволяет получить количественные характеристики индивидуального разнообразия электрической активности мозга. Ранее мы выявили, что возрастание корреляционной размерности ЭЭГ положительно коррелирует с объемом кратковременной памяти [20]. Вероятно, для кодирования и удержания информации в кратковременной и оперативной памяти нужно определенное разнообразие волновых паттернов в ЭЭГ. Текущее исследование продемонстрировало, что величина корреляционной размерности ЭЭГ может служить показателем уровня интеллекта, а также отражает объем оперативной памяти и продуктивность произвольного внимания. Объем памяти и продуктивность внимания имели положительную связь с результатами теста «Домино».

Таким образом, проведенные исследования подтвердили первоначальную гипотезу о том, что разнообразие периодических электрических характеристик мозга отражает индивидуальную специфичность когнитивных процессов личности, в частности информационные и скоростные характеристики деятельности. Об этом свидетельствует также наличие связи величины корреляционной размерности ЭЭГ с интегральным показателем когнитивных процессов, рассчитанным по тесту «Домино» – коэффициентом интеллекта IQ.

В заключение отметим, что регистрация показателей биоэлектрической активности мозга и выяснение их связи с уровнем интеллекта несколько не умаляет классические психометрические методы диагностики, а лишь дополняет их в смысле полу-

чения объективных оценок. Однако мало вероятно, что между показателями интеллекта и электрофизиологическими характеристиками мозга существуют линейные связи. Зависимости между ними скорее всего не линейные, что подтверждают проведенные исследования.

Ссылки

1. Хакен Г. Принципы работы головного мозга. М.: ПЕР СЭ, 2001, 351 с.
2. Станкова Е. П., Мышкин И. Ю. О связи индивидуальных характеристик электроэнцефалограммы с уровнем интеллекта // Вестник МГУ. Сер. Биология. 2016. № 4. С. 83.
3. Потапов В. Н. Введение в теорию информации. Ижевск: Изд-во УдГУ, 2014. 152 с.
4. Analysis of brain complexity and mental disorders / A. Fernández [et al.] // Actas Esp Psiquiatr. 2010. № 38(4). С. 229–238.
5. Меклер А. А. Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ // Вестник новых медицинских технологий. 2007. Т. 14, № 1. С. 73–77.
6. Nonlinear analysis of electroencephalogram in frontotemporal lobar degeneration / E. Carlino [et al.] // Neuroreport. 2014. № 25(7). С. 496–500.
7. W., Birbaumer N; Flor H., Rockstroh B., Elbert T. Dimensional analysis of the human EEG and intelligence / Lutzenberger W. [et al.] // Neurosci Lett. 1992. Vol. 143, № 1–2. P. 10–40
8. Roschke J., Basar E. Correlation dimensions in various parts of the cat and human brain in different states // Brain Dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 1989. P. 131–148.
9. Койчубеков Б. К., Сорокина М. А., Пашев В. И. Особенности нелинейной динамики ЭЭГ в различных возрастных группах // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 4. С. 68–72.
10. Electroencephalogram characteristics in patients with chronic fatigue syndrome / Wu Tong [et al.] // Neuropsychiatric Disease and Treatment. 2016. № 12. P. 241–249.
11. Kalauzi A., Vuckovic A., Bojić T. Topographic distribution of EEG alpha attractor correlation dimension values in wake and drowsy states in humans // Int J Psychophysiol. 2015. Vol. 95, № 3. P. 278–291.
12. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1983. Vol. 9, № 1. P. 189–208.
13. Сенин И. Г., Чирков В. И. Тест «Домино»: методика. Ярославль: Психодиагностика, 2008. 48 с.
14. Babloyantz A. Chaotic Dynamics in Brain Activity // Chaos in Brain Functions / Ed. E. Basar. Berlin: Springer – Verlag, 1990. P. 42–48.
15. Айзенк Г. Ю. Понятие и определение интеллекта // Вопросы психологии. 1995. № 1. С. 111–131.
16. Anokhin A. P. Genetic Influences on Dynamic Complexity of Brain Oscillations / A. P. Anokhin, V. Müller, U. Lindenberger, A. C. Heath, E. Myers // Neurosci Lett. 2006. Vol. 397, № 1. P. 93–98.
17. Гласс Л., Мэки М. От часов к хаосу. Ритмы жизни. М.: Мир, 1991. 248 с.
18. Relationship between EEG dimensional complexity and neuropsychological findings in Alzheimer's disease / M. Ikawa [et al.] // Psychiatry and Clinical Neurosciences. 2000. Vol. 54, № 5. P. 537–541.
19. Research on the relation of EEG signal chaos characteristics with high-level intelligence activity of human brain / X. Wang [et al.] // Nonlinear Biomed Phys. 2010. Vol. 4, № 2. P. 1753–4631.
20. Мышкин И. Ю., Бороздина О. С. Нейрофизиологические предикторы объема кратковременной памяти человека // Вестник ЯрГУ. Серия Гуманитарные науки. 2012. № 2. С. 151–155.