

УДК 612.16:517

ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ЭЭГ В РАЗЛИЧНЫХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУППАХ

Койчубеков Б.К., Сорокина М.А., Пашев В.И.

Карагандинский государственный медицинский университет, Караганда, e-mail: adija@list.ru

Проведен сравнительный анализ нелинейной динамики ЭЭГ в возрастных группах 10–12 лет и 18–21 год. Исследование сложности организации ЭЭГ различных отделов мозга показало большую вариабельность показателя корреляционной размерности в возрасте, когда процессы формирования ЭЭГ уже закончены, при этом нейродинамика отделов правого полушария организована сложнее, чем левого. Повышение уровня функциональной активности мозга приводит к усложнению динамики ЭЭГ и, соответственно, увеличению корреляционной размерности и энтропии.

Ключевые слова: математический анализ ЭЭГ, нелинейная динамика, возрастные особенности ЭЭГ

FEATURES OF EEG NONLINEAR DYNAMICS IN DIFFERENT AGE GROUPS

Koichubekov B.K., Sorokina M.A., Pashev V.I.

Karaganda state medical university, Karaganda, e-mail: adija@list.ru

Realized a comparative analysis of EEG nonlinear dynamics in the age groups 10–12 years and 18–21 years. Study of the EEG complexity organization in the various parts of brain showed greater variability of the correlation dimension index in age, when the processes of EEG formation have been completed, in this case neurodynamics of right hemisphere departments organized more complicated than the left one. Enhancement of brain functional activity leads to complication of the dynamics EEG and, accordingly, increase the correlation dimension and entropy

Keywords: mathematical analysis of the EEG, nonlinear dynamics, age features of EEG

Известно, что ЭЭГ представляет собой совокупность результатов деятельности большого количества отдельных нейронов, связанных между собой [3]. Однако нейроны по своей природе нелинейны, и взаимодействие между ними происходит по нелинейным законам. Необходимо рассматривать мозг (или его часть) как нелинейную стохастическую динамическую систему, чувствительную к начальным условиям, а ЭЭГ как траекторию этой динамической системы в фазовом пространстве.

Поведение сложных нелинейных систем рассматривается с позиций «теории детерминированного хаоса» и для их описания используется математический аппарат нелинейной динамики, который оперирует, в том числе, такими показателями как корреляционная размерность и корреляционная энтропия. Особенности нелинейной динамики биоэлектрической активности мозга показаны при различных функциональных состояниях и при ряде заболеваний: эпилепсии, шизофрении, септической энцефалопатии и др. [1, 4].

Однако проведенные исследования ограничиваются констатацией самого факта изменения сложности ЭЭГ при различных функциональных состояниях ЦНС и при некоторых патологических процессах и не выдвинуты никакие гипотезы относительно механизмов.

Поскольку известно, что окончательное формирование ЭЭГ происходит в возрасте 16–18 лет, нами проведен сравнительный анализ нелинейных показателей биоэлектрической активности мозга у детей

10–12 лет и юношей в возрасте 18–21 год, а также исследовались изменения этих показателей при функциональных пробах.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие дети 10–12 лет ($n = 32$) и юноши 18–21 лет ($n = 56$). Запись электроэнцефалограммы осуществлялась в звуко- и светонепроницаемой камере в состоянии покоя (глаза закрыты) и при функциональных нагрузках с помощью 16-канального электроэнцефалографа ЭЭГ-16S «Медикор» (Венгрия). Электроды накладывались на симметричные лобные зоны (Fp_1, Fp_2), теменные зоны (C_3, C_4), затылочные зоны (O_1, O_2) по Международной системе «10–20».

Аналоговый сигнал ЭЭГ, получаемый с выхода электроэнцефалографа, преобразовывался в цифровой посредством установленной в компьютере измерительной платы АЦП. Последующий анализ ЭЭГ реализован программно.

Для оценки нелинейной динамики ЭЭГ рассчитывались:

корреляционная размерность (D_2) – этот показатель позволяет измерить сложность динамики системы. При $D_2 = 1$ система демонстрирует простые периодические колебания (маятник), в случае абсолютно случайной динамики D_2 равна бесконечности.

корреляционная энтропия (K_2) – является количественной характеристикой степени организованности системы. Если энтропия достигает нуля, то система становится полностью предсказуемой. Так будет в случае регулярных процессов. Для истинно случайных процессов энтропия неограниченно велика. Энтропия системы в режиме детерминированного хаоса положительна, но имеет конечное значение.

В настоящей работе для расчета корреляционной размерности и корреляционной энтропии использовался алгоритм, предложенный Grassberger P. и Procaccia I. [5].

Результаты и их обсуждение

Нелинейно-динамический анализ паттернов ЭЭГ у детей и юношей свидетельствует, что с возрастом происходит усложнение организации центральной нервной системы. Динамика изменений ЭЭГ в процессе созревания находится в соответствии с концепцией связи характера ритмики ЭЭГ с организацией церебральных систем. По нашим данным корреляционная размерность ЭЭГ во всех регистрируемых

отведениях у детей достоверно ниже, чем у юношей (рис. 1). Исследование сложности организации ЭЭГ различных отделов мозга показало большую вариабельность показателя D_2 в юношеском возрасте, когда процессы формирования ЭЭГ уже закончены. Как видно из рис. 1 в данной группе, по сравнению с детской, выражены как внутрислоушарные, так и межполушарные особенности. Наибольшие значения корреляционной размерности выявлены в лобных отведениях, наименьшие – в теменных.

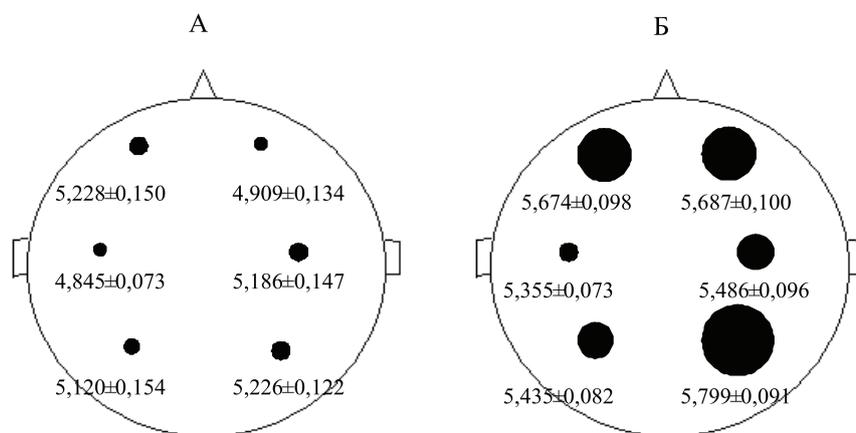


Рис. 1. Внутрислоушарные и межполушарные особенности корреляционной размерности ($M \pm m$) у детей 10–12 лет (А) и юношей 18–21 лет (Б)

Сопоставление симметричных точек правого и левого полушарий показал, что большее сходство симметричных точек имеется в лобных отведениях. Это может быть связано с тем, что лобные отведения выполняют ассоциативные функции и имеют высокую степень функциональной взаимосвязанности. Сенсорные области коры более специфичны, а потому затылочные и теменные области ассиметричны, при этом отделы правого полушария организованы сложнее, чем левого.

Корреляционная энтропия (K_2) не имела ни внутрислоушарных, ни межполушарных особенностей в обеих группах. Об этом свидетельствует трехфакторный дисперсионный анализ, в котором в качестве независимых факторов были использованы возраст, пол и отведение. Согласно результатам с уровнем значимости $p < 0,001$ можно утверждать, что на корреляционную энтропию влияет только фактор возраста (табл. 1). В связи с этим исследовались только возрастные особенности этого показателя.

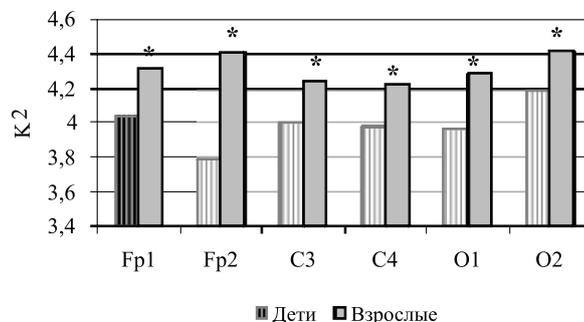
Таблица 1

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа

	Число ст. св.	Дисперсия	Критерий Фишера, F	Уровень p
Фактор «Отведение»	5	0,68	1,86	0,098
Фактор «Возраст»	1	15,45	42,19	0,000
Фактор «пол»	1	0,61	1,66	0,072
Неучтенный фактор	784	0,37		

В детской группе этот показатель ЭЭГ статистически значимо ниже во всех отведениях, по сравнению с аналогичными ЭЭГ юношеской группы (рис. 2). Если рассматривать энтропию как меру организованности, то полученные данные указывают на более пе-

риодический характер электроэнцефалограммы у детей. На это указывают и изменения нелинейных показателей при функциональной пробе в виде открывания глаз. Реакция ЦНС зависела от исходного уровня «хаотичности» нейродинамических процессов.



Примечание. * – статистически значимые отличия ($p < 0.05$)

Рис. 2. Возрастные особенности корреляционной энтропии

Открытие глаз сопровождалось общей тенденцией увеличения корреляционной размерности во всех исследуемых зонах коры головного мозга. Приток афферентной информации усложняет организацию мозговых структур, задействованных в приеме и переработке ее. Но статистически значимый рост корреляционной размерности ЭЭГ в группе детей отмечался только

в отведениях Fp_1 , C_3 , C_4 , в то время как в юношеской группе этот показатель изменялся в отведениях Fp_1 , Fp_2 , C_3 , C_4 , O_1 (табл. 2, 3), т.е. во второй группе происходит синхронизация всех исследуемых мозговых структур. Однако, если судить по проценту приращения D_2 , то изменения в группе детей более интенсивны, чем в юношеской.

Таблица 2

Внутриполушарные и межполушарные особенности корреляционной размерности и корреляционной энтропии ($M \pm m$) у детей 10–12 лет.

Отвед.	Fp_1	Fp_2	C_3	C_4	O_1	O_2
D_2	$n = 32$					
ГЗ	$5,228 \pm 0,150$	$4,909 \pm 0,134$	$4,845 \pm 0,111$	$5,186 \pm 0,147$	$5,120 \pm 0,154$	$5,226 \pm 0,122$
ГО	$6,153 \pm 0,181^*$	$5,243 \pm 0,137$	$5,529 \pm 0,162^*$	$6,121 \pm 0,181^*$	$5,248 \pm 0,171$	$5,624 \pm 0,160$
K_2	$n = 32$					
ГЗ	$4,047 \pm 0,105$	$3,789 \pm 0,085$	$3,997 \pm 0,095$	$3,974 \pm 0,109$	$3,959 \pm 0,089$	$4,190 \pm 0,110$
ГО	$4,544 \pm 0,116^*$	$4,030 \pm 0,116$	$4,103 \pm 0,110$	$4,376 \pm 0,116^*$	$4,060 \pm 0,110$	$4,257 \pm 0,110$

Примечание. ГЗ – ЭЭГ при закрытых глазах, ГО – ЭЭГ при открытых глазах.

* – статистически значимые отличия по сравнению с состоянием «глаза закрыты», $p < 0,05$

Таблица 3

Внутриполушарные и межполушарные особенности корреляционной размерности и корреляционной энтропии ($M \pm m$) у юношей 18–21 лет

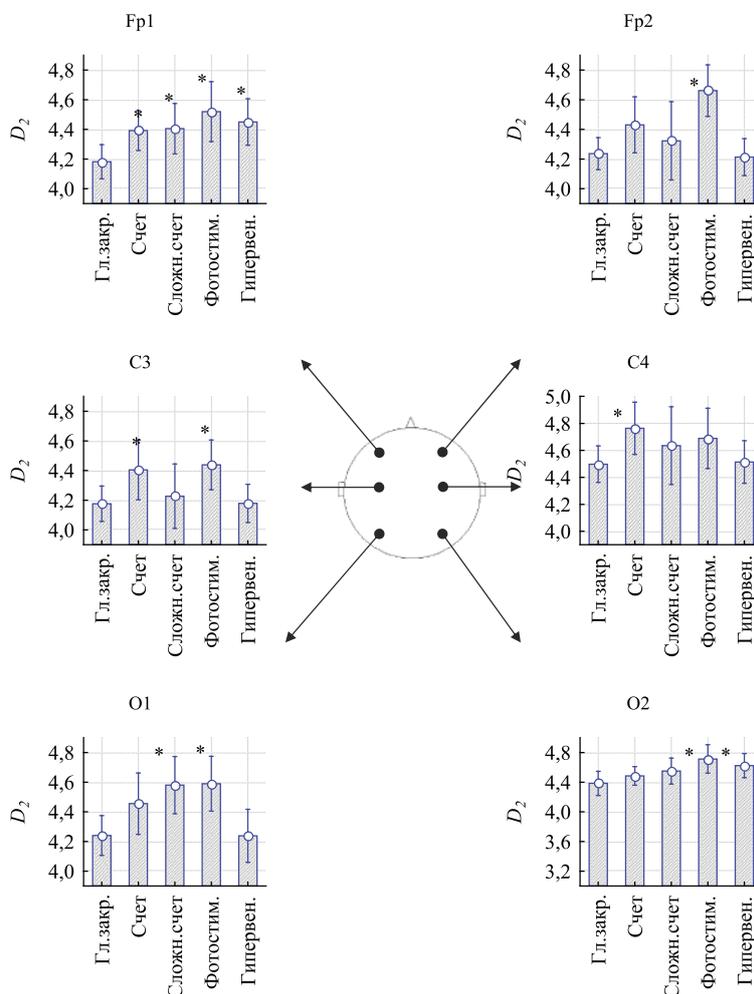
Отвед.	Fp_1	Fp_2	C_3	C_4	O_1	O_2
D_2	$n = 56$					
ГЗ	$5,674 \pm 0,098$	$5,687 \pm 0,100$	$5,355 \pm 0,073$	$5,486 \pm 0,096$	$5,435 \pm 0,082$	$5,799 \pm 0,091$
ГО	$6,355 \pm 0,086^*$	$6,394 \pm 0,094^*$	$5,605 \pm 0,082^*$	$5,702 \pm 0,091^*$	$5,827 \pm 0,092^*$	$5,807 \pm 0,111$
K_2	$n = 56$					
ГЗ	$4,322 \pm 0,061$	$4,414 \pm 0,068$	$4,242 \pm 0,065$	$4,226 \pm 0,057$	$4,289 \pm 0,059$	$4,419 \pm 0,059$
ГО	$4,526 \pm 0,047$	$4,585 \pm 0,057$	$4,344 \pm 0,057$	$4,374 \pm 0,059$	$4,337 \pm 0,051$	$4,488 \pm 0,062$

Примечание. ГЗ – ЭЭГ при закрытых глазах, ГО – ЭЭГ при открытых глазах.

* – статистически значимые отличия по сравнению с состоянием «глаза закрыты», $p < 0,05$.

Корреляционная энтропия значительных изменений не претерпевала. У юношей этот показатель при открывании глаз статистически значимо не изменялся. У детей степень регулярности ЭЭГ понизилась в отведениях Fp_1 , O_2 , Fp_1

Нами исследовалась нелинейная динамика ЭЭГ при умственной нагрузке (простой и сложный счет в уме), в начальной фазе реакции ЦНС на фотостимуляцию и при гипервентиляции (рис. 3).



* – статистически значимые отличия по сравнению с состоянием «глаза закрыты», $p < 0,05$

Рис. 3. Изменения корреляционной размерности при различных функциональных состояниях

Тесты различной модальности сопровождались многообразием межполушарных и внутриполушарных реакций. Наибольшее количество статистически значимых изменений корреляционной размерности произошло в левом (доминантном) полушарии. При арифметическом счете и фотостимуляции в отведениях Fp_1 и O_1 корреляционная размерность возрастает, а при гипервентиляции уменьшается.

Известно, что при повышении уровня функциональной активности мозга (напряженное внимание, интенсивная психическая работа, чувство страха, беспокойство) амплитуда α -ритма уменьшается, и часто он полностью исчезает.

На ЭЭГ появляется высокочастотная нерегулярная активность. Автоматический

анализ показывает, что в спектре мощности ЭЭГ исчезает доминантный пик в области α -ритма и спектр уплощается с равномерным распределением мощности по всем основным частотам, что подтверждает физиологическую интерпретацию этого феномена как десинхронизацию активности нейронов. С этим и связано повышение сложности динамики ЭЭГ, которое выразилось в увеличении корреляционной размерности. Наоборот, гипервентиляция приводит к синхронизации, появлению регулярного альфа-ритма, с чем, по-видимому, связано снижение D_2 .

Несколько иные изменения корреляционной размерности регистрировались в отведении в C_3 . Если при простом счете в уме показатель D_2 увеличился, то при ус-

ложненном тесте произошло его снижение. В то же время реакция на другие тестовые нагрузки соответствовала уже изложенным относительно Fp_1 и O_1 , т.е. при фотостимуляции динамика ЭЭГ усложняется, при гипервентиляции – упрощается.

Особенности нелинейной динамики выявлены в зонах правого полушария. Необходимо отметить, что исходные значения корреляционной размерности в отведениях Fp_2 , C_4 , O_2 выше, чем в отведениях левого полу-

шария. По-видимому, системы с исходно высокой сложностью нейродинамических процессов реагируют на нагрузку умеренно, не увеличивая числа степеней свободы. Об этом свидетельствуют незначительные изменения D_2 в отведениях правого полушария.

Корреляционная энтропия оказалась менее информативным, чем корреляционная размерность, показателем для оценки нелинейной динамики ЭЭГ при функциональных пробах (табл. 4).

Таблица 4

Корреляционная энтропия при различных функциональных состояниях ЦНС ($M \pm m$)

Состояние					
	Глаза закр.	Простой счет в уме	Сложный счет в уме	Фотостимул.	Гипервентил.
Отвед.	$n = 46$	$n = 32$	$n = 31$	$n = 31$	$n = 31$
Fp_1	$3,448 \pm 0,054$	$3,484 \pm 0,073$	$3,562 \pm 0,070$	$3,653 \pm 0,099$	$3,618 \pm 0,087$
Fp_2	$3,373 \pm 0,042$	$3,454 \pm 0,176$	$3,605 \pm 0,096^*$	$3,615 \pm 0,062^*$	$3,459 \pm 0,075$
C_3	$3,297 \pm 0,044$	$3,708 \pm 0,110^*$	$3,424 \pm 0,080$	$3,609 \pm 0,106^*$	$3,427 \pm 0,071$
C_4	$3,738 \pm 0,071$	$3,885 \pm 0,089$	$3,859 \pm 0,154$	$3,604 \pm 0,067$	$3,820 \pm 0,101$
O_1	$3,576 \pm 0,066$	$3,534 \pm 0,064$	$3,706 \pm 0,097$	$3,520 \pm 0,061$	$3,633 \pm 0,071$
O_2	$3,597 \pm 0,076$	$3,563 \pm 0,081$	$3,654 \pm 0,094$	$3,835 \pm 0,109$	$3,724 \pm 0,089$

* – статистически значимые отличия по сравнению с состоянием «глаза закрыты», $p < 0,05$

Закключение

Таким образом, в структуре ЭЭГ кроме регулярных составляющих в виде известных ритмов, можно выявить хаотическую составляющую, которая не является шумом, а отражением нелинейной динамики функционального состояния мозговых структур, то есть этот хаос детерминирован. Исследование сложности организации ЭЭГ различных отделов мозга показало большую вариабельность показателя D_2 в возрасте, когда процессы формирования ЭЭГ уже закончены. Сопоставление симметричных точек правого и левого полушарий свидетельствует, что большее сходство симметричных точек имеется в лобных отведениях. Это может быть связано с тем, что лобные отведения выполняют ассоциативные функции и имеют высокую степень функциональной взаимосвязанности. Сенсорные области коры более специфичны, а потому затылочные и теменные области ассиметричны, при этом нейродинамика отделов правого полушария организована сложнее, чем левого.

Головной мозг человека можно представить как очень сложную нейронную сеть, в которой существует динамика изменений связей между отдельными её элементами [2]. При этом каждый набор связей рассматривается как функциональное состояние сети. Различные функциональные нагрузки приводят к перестройке этих связей, усложнению или упрощению нейродинамических процессов.

По нашим данным повышение уровня функциональной активности мозга приводит к усложнению динамики ЭЭГ и, соответственно, увеличению корреляционной размерности и энтропии. Это связано, по-видимому, с исчезновением доминантного пика в области α -ритма и с равномерным распределением мощности спектра по всем основным частотам, что подтверждает физиологическую интерпретацию этого феномена как десинхронизацию активности нейронов. Процессы синхронизации, появления регулярного альфа-ритма, наоборот, приводят к снижению корреляционной размерности.

Список литературы

1. Меклер А.А. Зависимость нелинейных характеристик ЭЭГ от эмоционального состояния испытуемого // Тезисы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Психология XXI века». – СПб.: Изд-во СПбГУ. – 2004. – С. 86–87.
2. Шеповальников А.Н., Цицерошин М.Н., Апанасиенок В.С. Формирование биопотенциального поля мозга человека. – Л., 1979. – 163 с.
3. Шульгина Г.И. Генез ритмики биопотенциалов и ее роль в обработке информации // Физиология человека. – 2005. – Т. 31, № 3. – С.59–71.
4. Dynamical chaos determines the variability of transcranial Doppler signals / R. W. Keunen, H. C Pijlman, H. F. Visee et al. // Stam. Neurol. – 1994. – Vol. 16, № 5. – P. 353–358.
5. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors // In: Physical Review Letters. – 1983. – Vol. 50. – P. 346–349.
6. Jeong J., Kim S. Y., Han S. H. Nonlinear dynamical analysis of the EEG in Alzheimer's disease with optimal embedding dimension // Electroenceph. Clin. Neurophys. – 1998. – Vol. 106, № 3. – P. 220–228.
7. Rschke J., Fell J., Beckmann P. Nonlinear analysis of sleep {EEG} in depression: calculation of the largest Lyapunov exponent // Eur. Arch. Psychiat. Clin. Neuros. – 1995. – Vol. 245, № 1. – P. 27–35.