

УДК 612.821 + 612.822.3.087

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЭЭГ

© 2006 г. А. Я. Каплан¹, Дж. Г. Бьен², С. Ф. Тимашев³, Г. В. Встовский⁴, Б. У. Пак²

¹Кафедра физиологии человека и животных Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия.

²Факультет электроники и компьютерной техники Чунбукского национального университета, Республика Корея.

³Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова.

⁴Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН.

e-mail: akaplan@mail.ru

Поступила в редакцию 26.08.2005 г.

Принята в печать 12.12.2005 г.

На примере записей ЭЭГ 39 испытуемых выполнен количественный анализ изменчивости автокорреляционной структуры 1-секундных сегментов ЭЭГ на основе сравнения построенных для этих сегментов структурных функций. В сопоставлении с суррогатными ЭЭГ, в которых последовательность отсчетов была перемешана случайным образом, показано, что более чем в 30% случаев между структурными функциями 1-секундных сегментов ЭЭГ, сдвинутыми между собой на 1–3 с, наблюдались статистически значимые различия. На основе полученных данных предложен индекс изменчивости автокорреляционной структуры ЭЭГ, который может быть использован для оценки функциональных состояний мозга человека.

Ключевые слова: ЭЭГ, автокорреляция, стационарность, структурная организация ЭЭГ.

Function Variability of the Autocorrelation Structure of the Human EEG

A. Ya. Kaplan, Jong-Gil Byeon, S. F. Timashev, G. V. Vstovsky, Byoung-Woo Park

Lomonosov Moscow State University, Russia;

Chungbuk National University, School of Electronic and Computer Engineering, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea;

Karpov Institute of Physical Chemistry, Moscow, Russia;

Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

e-mail: akaplan@mail.ru

On an example of records ЭЭГ of 39 healthy subjects the quantitative analysis of variability of autocorrelation structure of one-second segments EEG segments was carried out on the basis of comparison of the structural functions constructed for these segments. It was shown that more than 30% of cases, statistically significant differences were observed between the structural functions of successive onesecond EEG segments shifted by 1–3 s, as compared to surrogate EEGs formed with the tangled random sequence of count points. On the basis of the obtained data, the index of nonstationarity of the EEG autocorrelation structure was proposed. This index can be used for the objective quantitative evaluation of the functional states of the human brain.

Key words: EEG, autocorrelation, index of nonstationarity, structural organization of EEG.

Суммарная электрическая активность мозга человека, регистрируемая со скальпа стандартными ЭЭГ-электродами, представляет собой высоколабильный сигнал, который с некоторым приближением можно рассматривать как последовательность квазистационарных сегментов, разделенных короткими переходными периодами [1, 3, 8, 10 и др.]. Отдельные квазистационарные сегменты ЭЭГ могут, таким образом, служить маркерами устойчивых микросостояний мозга, в той или иной степени отражающих функциональные блоки внутримозговых регуляций [12].

В настоящее время существуют различные методические подходы для автоматического выделения количественных характеристик сегментной структуры ЭЭГ [3, 7 и др.], описывающих структурную организацию этого сложного биологического сигнала [10]. Новые технологии компьютерного анализа ЭЭГ, разработанные в МГУ (SECT-0.1[®], SCAN-0.1[®] и JAMPSYN-0.1[®]), позволили существенно расширить характеристику функциональных состояний мозга человека в терминах структурной организации ЭЭГ при когнитивных [4] и фармакологических [9] нагрузках, на фоне

ночного сна [11] и при некоторых психопатологиях [2, 5]. Однако критерии выделения структурных элементов ЭЭГ в подобных исследованиях обычно основываются на тех или иных амплитудных показателях ЭЭГ-колебаний. Между тем хорошо известно, что изменчивость последовательных отсчетов оцифрованного ЭЭГ сигнала существенно ограничена их значительной взаимной скоррелированностью. В этой связи возникает вопрос: насколько лабильна автокорреляционная структура ЭЭГ? Можно полагать, что квазистационарная динамика мозговых процессов отражается в том числе и в функциональной изменчивости автокорреляционного “каркаса” ЭЭГ.

Задачей настоящей работы было изучить, насколько функциональной является изменчивость автокорреляционной структуры ЭЭГ, и разработать количественный показатель, характеризующий интенсивность этого процесса.

МЕТОДИКА

В исследовании были использованы 2-минутные записи ЭЭГ в отведении О1, полученные у 39 здоровых испытуемых обоого пола при открытых глазах. Все записи ЭЭГ были сделаны на стандарт-

ном биомедицинском оборудовании, в полосе пропускания от 0.5 до 30 Гц, с последующей оцифровкой с частотой выборки 128 в 1 с.

Классическим инструментом оценки взаимной скоррелированности ряда соседних значений ЭЭГ является вычисленная для этого ряда автокорреляционная функция. В настоящем сообщении для прямой оценки взаимной изменчивости соседних отсчетов ЭЭГ мы использовали родственную корреляционной функции статистику разностных моментов второго порядка или структурную функцию (СФ) [6]. С некоторым приближением можно считать, что СФ отражает степень взаимной изменчивости амплитуды соседних отсчетов ЭЭГ.

Каждую запись ЭЭГ предварительно нормировали пересчетом значений каждого 1-секундного отрезка в последовательность чисел с нулевым средним и единичной дисперсией. Далее для последовательных 1-секундных отрезков нормированной ЭЭГ вида $\{h(t_k)\}$, $t_k = k\Delta t$ (где Δt – шаг дискретизации отсчетов ЭЭГ, $h(t_k)$ – текущее значение отсчета ЭЭГ на момент времени t_k , k – последовательный номер отсчета ЭЭГ) вычислялись структурные функции второго порядка

$$\Phi^2(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [h(t_k) - h(t_k + \tau)]^2, \quad M = N - \tau/\Delta t,$$

где τ изменялось от 1 до $8\Delta t$, M – число интервалов, по которым производилось усреднение для вычисления $\Phi^2(\tau)$. Для частоты дискретизации 128 Гц ($N = 128$, $\Delta t = 1/128$ с) диапазон перебора значений τ соответствовал длительности временных интервалов от 7.8 до 62.5 мс (рис. 1).

Затем для каждого τ сравнивали значения СФ в каждой паре последовательных 1-секундных сегментов ЭЭГ, взятых со сдвигом ΔT друг относительно друга на величину от 50 до 400% длины сегментов с дискретностью 50%. Тем самым оценивали кратковременную изменчивость автокорреляционной структуры секундных отрезков ЭЭГ в пределах 3–4 с. Иными словами, ЭЭГ сканировали многократным сравнением ее 1-секундных отрезков в двух временных окнах, скользящих вдоль ЭЭГ с шагом 1 с и смещенных относительно друг друга на ΔT . Для каждого сравнения сегментов ЭЭГ фиксировали разности СФ не для всех значений τ , а только для одного из них, при котором эта разность была максимальной (рис. 1). Таким образом, каждая запись ЭЭГ для данного ΔT характеризовалась полученной для многократных сравнений совокупностью значений максимальной разности (МР) СФ. На основе значений МР вычислялся индекс изменчивости автокорреляционной структуры (ИКС) ЭЭГ (см. ниже).

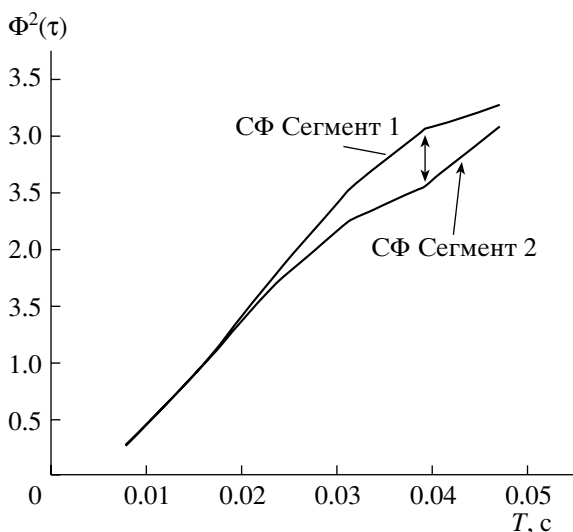


Рис. 1. Типичный пример структурных функций (СФ) для двух 1-секундных сегментов нормированной ЭЭГ, сдвинутых относительно друг друга на 2 с. Двусторонней стрелкой показано максимальное различие между двумя СФ в данном случае. По вертикали – значение структурной функции; по горизонтали – величины сдвигов между отсчетами ЭЭГ (τ), для которых вычисляются значения структурной функции.

Fig. 1. A typical example of structural functions (SF) for two 1-second segments of normalized EEG, shifted to each other on 2 s. The bilateral arrow shows the maximal distinction between two SF in this case. On a vertical line – the value of structural function; on a horizontal line – the value of shifts between EEG points (τ) for which the values of structural function are calculated.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предварительный анализ показал, что распределение величин максимальных различий между СФ для сдвигов между скользящими временными окнами от 100 до 400% длины окна примерно одинаковы. Поэтому для дальнейшего тестирования был выбран сдвиг между окнами, равный 200%, т.е. сравнивали 1-секундные отрезки ЭЭГ с промежутком между ними 1 с.

В первую очередь требовалось установить, насколько полученные оценки изменчивости автокорреляционной структуры ЭЭГ могли отражать именно функциональную нейродинамику ЭЭГ, а не закономерности стохастических флуктуаций рассматриваемых оценок, характерные для случайных временных рядов. Для этого рассчитывали значения МР для суррогатных ЭЭГ, которые получали из реальных записей путем стохастического перемешивания последовательных отсчетов. Таким образом полностью разрушалась функциональная структурированность исходной ЭЭГ.

На рис. 2 представлены распределения значений МР СФ для реальных и суррогатных ЭЭГ, полученных на основе анализа 2-минутных записей ЭЭГ 39 испытуемых.

Как видно, распределения значений МР для реальных и декоррелированных записей ЭЭГ сильно различаются: почти 99% значений МР суррогатных ЭЭГ лежат ниже уровня 0.5, тогда как более 30% значений МР реальных ЭЭГ превышают этот уровень.

Таким образом, можно утверждать, что в пределах нескольких секунд в ЭЭГ с достаточно большой вероятностью происходят неслучайные перестройки автокорреляционной структуры ЭЭГ. Это означает, что временная диаграмма и амплитуда отмеченных перестроек в ЭЭГ отражают такие особенности динамики функциональных состояний мозга, которые, возможно, не проявляются в традиционных амплитудных и спектральных характеристиках ЭЭГ.

Проведение систематических исследований функциональной изменчивости автокорреляционной структуры ЭЭГ требует разработки унитарного показателя интенсивности этой изменчивости. В настоящей работе для этих целей предлагается индекс изменчивости автокорреляционной структуры (ИКС). В основу вычисления этого индекса положена предварительная оценка стохастического порога МР для данной ЭЭГ, определяемого как среднее значение МР для суррогатного аналога этой ЭЭГ плюс одно стандартное отклонение. Индекс ИКС определяли как среднее значение надпороговых величин МР, вычисленное по всем сравнениям пар структурных функций для данной записи ЭЭГ. Очевидно, что чем больше индекс ИКС, тем более значительными могут считаться кратко-

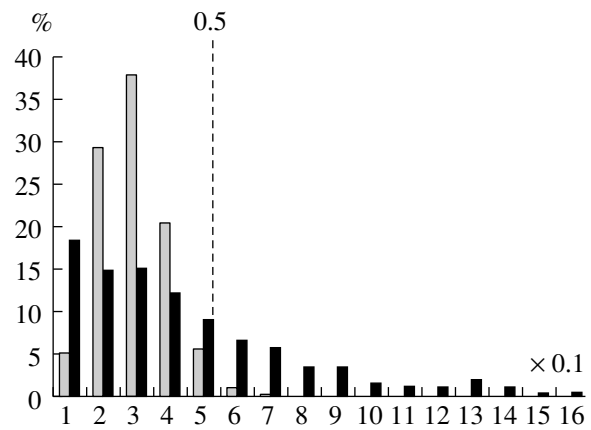


Рис. 2. Распределение значений максимальных разностей между структурными функциями 1-секундных сегментов реальных (темные столбики) записей ЭЭГ и суррогатных (светлые столбики) ЭЭГ. Данные приведены по результатам 1092 сравнений. По вертикали относительная доля значений максимальных разностей (МР) для каждого бина гистограммы, %, по горизонтали указаны правые границы бинов значений МР в интервале от 0 до 1.6. Вертикальной пунктирной линией отмечено значение МР, равное 0.5 (см. текст).
Fig. 2. Distribution of values of the maximal differences between structural functions of 1-second segments of the real EEG records (dark columns) and surrogated EEG data (light columns). The data are given by results of 1092 comparisons. On a vertical line the relative share of the values of maximal differences (MP) for each section of histograms is presented in %, on a horizontal line are specified the right borders of MP values in interval from 0 up to 1.6. The vertical dashed line marks MP values equal to 0.5 (see the text).

временные перестройки автокорреляционной структуры данной записи ЭЭГ.

На рис. 3 в качестве примера приведены индексы ИКС для ЭЭГ в отведении О1 для всех тестируемых испытуемых. Как видно, существует достаточно выраженный межиндивидуальный разброс оценок ЭЭГ по этому показателю. Можно было предположить, что этот разброс связан с индивидуальными вариациями альфа-активности как наиболее выраженной спектральной компоненты ЭЭГ. Однако корреляционный анализ показал, что межиндивидуальная изменчивость индекса ИКС практически не связана ($r = 0.21$; $p < 0.05$) с суммарной выраженностью альфа-активности в ЭЭГ тестируемых испытуемых.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможно, что различия в индексах ИКС для разных испытуемых отражают индивидуальные особенности корковой нейродинамики, по крайней мере для отведения О1 на фоне состояния спокойного бодрствования с открытыми глазами. В этой связи можно ожидать, что изучение различий между индексами ИКС позволит получить новые данные о динамике корковой активности для разных

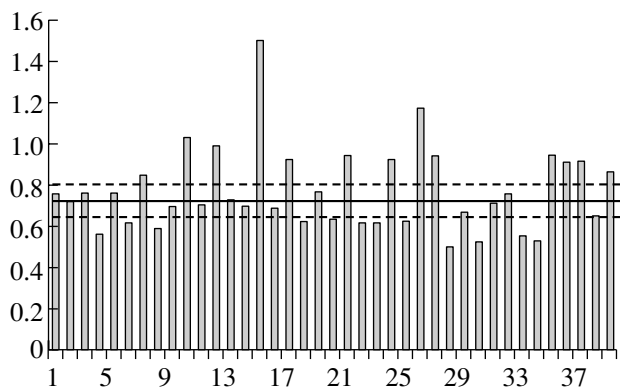


Рис. 3. Индексы изменчивости автокорреляционной структуры ЭЭГ, вычисленные по 2-минутным записям ЭЭГ для 39 испытуемых. Сплошной горизонтальной линией на диаграмме указано среднее значение индекса ИКС, равное 0.77 ± 0.03 (\pm ошибка среднего значения); По вертикали – значение индекса ИКС, по горизонтали – номера испытуемых.

Fig. 3. Indexes of variability of the autocorrelation EEG structure calculated on 2-minute EEG records for 39 subjects. On a vertical line – a value of the index of autocorrelation function variability, on a horizontal line – the numbers of examinees. The dark horizontal line on the diagram specifies an average value of the index equal to 0.77 ± 0.03 and dashed horizontal line marks \pm standard error deviation.

отведений ЭЭГ, для различных функциональных и патологических состояний

Автокорреляционный “каркас” ЭЭГ, очевидно, вполне функционален и порождается динамическим характером мозговых процессов, в значительной мере детерминирующих траекторию активности нейронных сетей в пределах некоторого временного интервала. Полученные данные свидетельствуют о том, что существует достаточно выраженная краткосрочная, в диапазоне нескольких секунд, изменчивость автокорреляционной структуры ЭЭГ, которая выходит за пределы возможной случайной вариативности этой характеристики ЭЭГ, по крайней мере для затылочных отведений у человека, находящегося в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами. По-видимому, неслучайные перестройки степени взаимной обусловленности последовательных отсчетов ЭЭГ отражают функционально значимые изменения параметров краткосрочной динамики процессов локальной корковой синхронизации [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно полагать, что индекс изменчивости автокорреляционной структуры ЭЭГ окажется полезным для дифференциально-диагностических исследований различных функциональных состоя-

ний мозга человека в норме и при патологии. Проверке этого предположения будет посвящена следующая работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодунов М.В. “Алфавит” ЭЭГ: типология стационарных сегментов ЭЭГ человека // Индивидуально-психологические различия и биоэлектрическая активность мозга человека. М.: Наука, 1988. С. 56–70.
2. Борисов С.В., Каплан А.Я., Горбачевская Н.Л., Козлова И.А. Анализ структурной синхронности ЭЭГ подростков, страдающих расстройствами шизофренического спектра // Физиология человека. 2005. Т. 3. № 3. С. 1–8.
3. Каплан А.Я. Нестационарность ЭЭГ: методологический и экспериментальный анализ // Успехи физиол. наук. 1998. Т. 29. № 3. С. 35–55.
4. Каплан А.Я., Борисов С.В. Динамика сегментных характеристик альфа-активности ЭЭГ человека в покое и при когнитивных нагрузках // Журн. высш. нерв. деят. 2003. Т. 53. № 1. С. 22–231.
5. Каплан А.Я., Борисов С.В., Желиговский В.А. Классификация ЭЭГ подростков по спектральным и сегментным характеристикам в норме и при расстройствах шизофренического спектра // Журн. высш. нерв. деят. 2005. Т. 55. № 4. С. 450–458.
6. Тимашев С.Ф., Встовский Г.В. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения “сигнал–шум” // Электрохимия. 2003. Т. 39. № 2. С. 149–162.
7. Barlow J.S. Methods of analysis of nonstationary EEGs, with emphasis on segmentation techniques: a comparative review // J. Clin. Neurophysiol. 1985. V. 2. № 3. P. 267–304.
8. Bodenstein G., Schneider W., Malsburg C.V. Computerized EEG pattern classification by adaptive segmentation and probability-density-function classification. Description of the method // Comput. Biol. Med. 1985. V. 15. № 5. P. 297–313.
9. Fingelkurts A.A., Fingelkurts A.A., Kivisaari R., Pekkonen E., Ilmoniemi R.J., Kahkonen S. Local and remote functional connectivity of neocortex under the inhibition influence // Neuroimage. 2004. V. 22. № 3. P. 1390–1406.
10. Jansen B.H., Cheng W.K. Structural EEG analysis: an explorative study // Int. J. Biomed. Comput. 1988. V. 23. №. 3–4. P. 221–237.
11. Kaplan A., Roeschke J., Darkhovsky B., Fell J. Macrostructural EEG characterization based on nonparametric change-point segmentation: application to sleep analysis // J. Neurosci. Methods. 2001. V. 106. № 1. P. 81–90.
12. Lehmann D. Brain electric field mapping and map analysis in psychiatry: The “atoms of thought” // Biol. Psychiatry. 1991. V. 2. P. 391–394.
13. Lopes da Silva F. Neural mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks // EEG a. Clin. Neurophysiol. 1991. V. 79. № 2. P. 81–93.