

## АНАЛИЗ СЕГМЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ $\alpha$ -АКТИВНОСТИ ЭЭГ ЧЕЛОВЕКА

© А. Я. Каплан, С. В. Борисов, С. Л. Шишкин, В. А. Ермолаев

Кафедра физиологии человека и животных биологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Россия, 119889, Москва, Воробьевы горы

Выполнено пилотное исследование фазической организации  $\alpha$ -активности ЭЭГ человека на основе предложенной авторами технологии сегментного анализа ЭЭГ. Показано, что адаптивная сегментация ЭЭГ позволяет эффективно выделять эпизоды  $\alpha$ -активности разной интенсивности и кратковременные переходы между ними. Для 16 стандартных отведений ЭЭГ в норме при открытых и закрытых глазах получены количественные оценки средней амплитуды и продолжительности сегментов  $\alpha$ -активности, а также внутри- и межсегментной вариативности амплитудной огибающей ЭЭГ. При сравнении распределений амплитуд сегментов ЭЭГ, зарегистрированной при закрытых и открытых глазах, найдено, что различия в суммарной выраженности  $\alpha$ -активности для этих состояний определялись преимущественно вариациями числа сегментов разных амплитудных классов, а не смещением распределения амплитудных значений. Квартальный анализ распределения сегментов  $\alpha$ -активности по амплитуде показал возможную функциональную гетерогенность сегментов  $\alpha$ -активности верхней и средней части амплитудного диапазона.

*Ключевые слова:* ЭЭГ,  $\alpha$ -активность, сегментация ЭЭГ.

Рос. физиол. журн. им. Сеченова. Т. 88. № 4. С. 432—442. 2002.

*A. Ya. Kaplan, S. V. Borisov, S.L.Shishkin, V.A.Ermolaev. THE ANALYSIS OF SEGMENTAL STRUCTURE OF EEG ALPHA ACTIVITY IN HUMANS. M. V. Lomonossov State University, 119899, Vorobiev Gory, Moscow, Russia*

Phasic organisation of human EEG alpha activity was studied in a pilot investigation using a previously suggested EEG segmental analysis methodology. The EEG was recorded in three normal subjects under resting conditions. The segmentation procedure enabled effective identifying of the periods with different amplitude in alpha band and the short-term transitions between them. Mean intersegmental variability of amplitude envelope were computed for the eyes closed and eyes open EEG in each of 16 standard derivations. Analysis of segment amplitude distributions showed that the difference between the average alpha activity amplitude in these conditions were determined mainly by variations in the number of segments of different amplitude classes and not by a shift of the distribution or by change of its width. Distribution and quartile analysis of mean segment amplitudes provide evidence for possible functional heterogeneity of upper and middle subranges of the amplitude range.

*Key words:* EEG, alpha activity, segmentation of EEG.

I. M. Sechenov Russian Physiological Journal, V. 88. N 4. P. 432—442. 2002

$\alpha$ -Активность ЭЭГ в последние годы вновь стала привлекать повышенное внимание исследователей в связи с появлением существенно продвинутых технологий анализа процессов пространственно-временной изменчивости этого компонента ЭЭГ [1,4,9,13,15] и новых данных об отражении в этих процессах динамики когнитивных операций ([6,7,10,11,14,16] и др.).

Становится все более перспективным рассматривать  $\alpha$ -активность ЭЭГ не как признак «пассивных» или «нерабочих» состояний коры в контексте идеи Ганса Бергера, но, скорее, как компонент единого процесса интеграции функциональных

актов, где сдвиги в интенсивности  $\alpha$ -активности выступают своего рода «метками» смены рабочих парадигм [17]. С этой точки зрения сегменты квази-стационарной  $\alpha$ -активности в ЭЭГ могут рассматриваться как «элементарные сигналы» [6], «транзиторные активации — альфоны» [17] или «микросостояния» [13] коры больших полушарий головного мозга, отражающие периоды работы крупных операционных модулей нервной деятельности.

Таким образом, анализ сегментной структуры  $\alpha$ -активности ЭЭГ может рассматриваться как один из практических подходов к изучению собственно операционной архитектуры деятельности мозга.

Ранее нами были рассмотрены проблемы кусочно-стационарного описания ЭЭГ [1,2] и в дополнение к известным предложены новые методы сегментации ЭЭГ [3,8], позволяющие расставить в записи ЭЭГ метки кратковременных переходных периодов (КПП) или резких изменений мощности соответствующих ритмических компонентов, выделив тем самым сегменты относительно однородной активности ЭЭГ.

В настоящем исследовании предполагалось оценить возможности сегментного анализа ЭЭГ для описания амплитудных, временных и пространственных характеристик фазической структуры  $\alpha$ -активности ЭЭГ.

## МЕТОДИКА

ЭЭГ-исследование было выполнено с участием 4 здоровых испытуемых в возрасте от 19 до 26 лет, отобранных по признаку либо ярко выраженной, либо почти незаметной  $\alpha$ -активности в ЭЭГ затылочных отведений. Испытуемых комфортно размещали в кресле, установленном в защищенном от электромагнитных помех боксе, в котором соблюдали условия относительной звукоизоляции и затемнения. Чашечковые ЭЭГ-электроды устанавливали в 16 стандартных позициях: O1, O2, P3, P4, T5, T6, C3, C4, Cz, T3, T4, F3, F4, Fz, F7 и F8 согласно системе 10/20 по Джасперу. Регистрацию ЭЭГ осуществляли в полосе от 1 до 30 Гц с последующей дискретизацией (10 бит, 128/с) и записью данных на жесткий диск компьютера. Для каждого испытуемого выполняли 10—12 минутных записей ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с открытыми (ОГ) и закрытыми (ЗГ) глазами.

Обработку ЭЭГ-записей начинали с тщательного удаления артефактов путем ручного редактирования, цифровой фильтрации в полосе 7.5—13 Гц (фильтр Фурье) и последующего вычисления огибающей амплитудной модуляции отфильтрованного сигнала на основе преобразования Гильберта.

Полученные временные ряды подвергали процедуре адаптивного сегментирования, основанного на выделении «кратковременных переходных периодов» (КПП) в ЭЭГ, шириной 13 отсчетов. Процедуру сегментации ЭЭГ выполняли специально разработанным для настоящего исследования программным пакетом «SECTION», который реализует ранее описанный нами алгоритм [3], существенно дополненный в части статистического обоснования КПП и вычисления основных характеристик участков ЭЭГ между КПП (см. ниже).

Центральные отсчеты каждого КПП, отмеченные по всей длине отфильтрованной в  $\alpha$ -полосе записи, служили метками фазических изменений амплитуды огибающей  $\alpha$ -активности (далее в тексте — «амплитуды  $\alpha$ -активности») или границами сегментов ЭЭГ, существенно различающихся по мощности  $\alpha$ -активности. Далее вычисляли количественные характеристики этих сегментов для каждого отведения ЭЭГ: продолжительность сегментов, средняя амплитуда и вариативность огибающей ЭЭГ в пределах каждого сегмента. В качестве меры вариативности был выбран коэффициент вариации — взятое в процентах отношение значения среднеквадратического отклонения амплитуды огибающей отфильтрованной ЭЭГ внутри сегмента к ее среднему значению. Кроме того, вычисляли коэффициент амплитудного перепада соседних сегментов, взятый как разность амплитуд соседних сегментов в процентном отношении к минимальной амплитуде, а также показатель крутизны КПП: относительная разность величин средней амплитуды огибающей ЭЭГ, вычисленных для первой и второй половины КПП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлен пример автоматической сегментации записи затылочной ЭЭГ, предварительно отфильтрованной в  $\alpha$ -диапазоне. Как видно, метками границ сегментов очерчены не только собственные периоды присутствия или отсутствия  $\alpha$ -

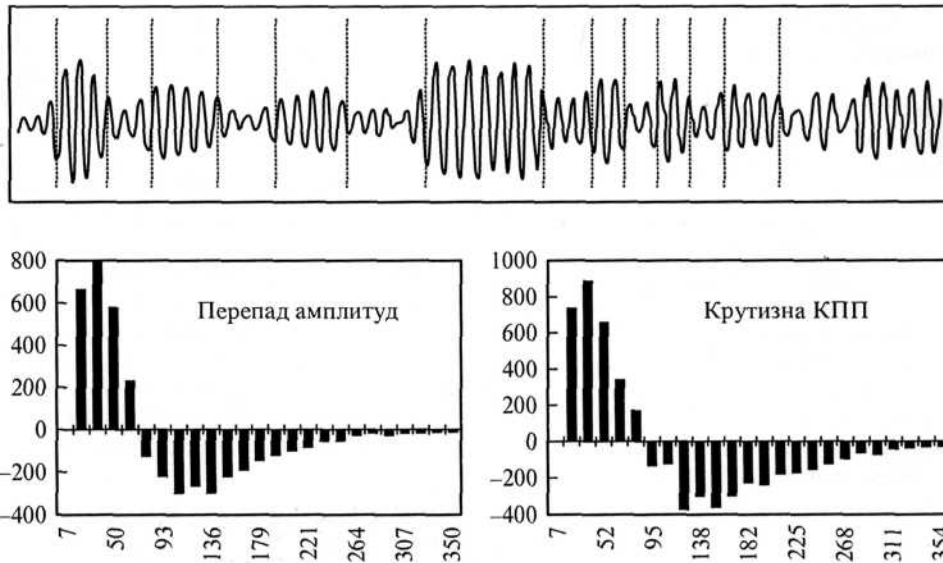


Рис. 1. *Вверху* — пример автоматической сегментации участка записи ЭЭГ, отфильтрованной в  $\alpha$ -диапазоне; *внизу* — результат взаимного вычитания ординат распределений величин амплитудных перепадов соседних сегментов и крутизны КПП при «случайной» и «реальной» сегментации ЭЭГ в сумме для передних отведений (F3, F4, F7, F8).

*По вертикали* — абсолютная разность ординат в числе случаев; *по горизонтали* — величина перепада соседних сегментов или крутизны КПП, %. Положительные оценки соответствуют доминированию ординат при «случайной» сегментации. Видно, что при «реальной» сегментации по сравнению со «случайной» значительно преобладают случаи более чем 80 % различий по амплитуде между соседними сегментами.

активности, но и фазические изменения этой активности, независимо от ее текущей интенсивности. Результаты подобной автоматической сегментации, как правило, на 85—95 % совпадают с результатами экспертной «ручной» сегментации.

Количественным критерием эффективности сегментации ЭЭГ может служить сравнение оценок величины перепада амплитуды огибающей ЭЭГ соседних сегментов при сегментации, согласно принятому алгоритму, и при случайной расстановке границ того же числа и той же длительности сегментов. Если большинство КПП действительно соответствует «стыкам» реальных сегментов, существенно различающихся по средней амплитуде ЭЭГ, то распределения значений «реальных» и «случайных» амплитудных перепадов для всей записи ЭЭГ, очевидно, должны существенно различаться: в первом должны преобладать большие, а во втором малые значения амплитудных перепадов. Полученные данные (рис. 2) действительно свидетельствуют об ожидавшемся значительном различии распределений «реальных» и «случайных» амплитудных перепадов сегментов ЭЭГ, демонстрируя, таким образом, достаточно высокую эффективность ее автоматической сегментации. Аналогичным образом различаются и распределения величин крутизны КПП для «реальной» и «случайной» сегментации (рис. 1).

Что же обозначают КПП: кратковременное изменение амплитуды  $\alpha$ -активности или переход ее на новый более или менее устойчивый амплитудный уровень вплоть до следующего КПП? Иначе говоря, насколько используемая технология сегментации позволяет выделить в ЭЭГ не просто моменты резких изменений, но вместе с этим и заключенные между КПП сегменты  $\alpha$ -активности разной интенсивности?

Показанные выше четкие различия распределений значений амплитудных перепадов для «реальных» и «случайных» реализаций сегментов ЭЭГ в значительной мере свидетельствуют в пользу последнего предположения, поскольку для вычисления этих перепадов используются величины усредненных по сегментам амплитуд

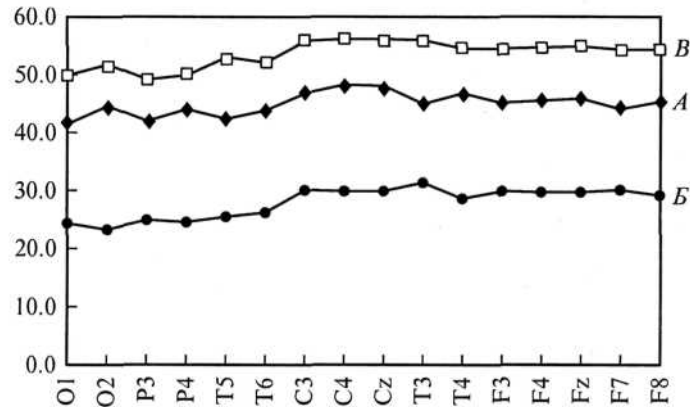


Рис. 2. Оценки внутрисегментной (B) и межсегментной (A) вариативности амплитуды огибающей ЭЭГ для различных отведений в среднем для 10-минутных записей у испытуемого в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами. Одновременно приведены оценки внутрисегментной вариативности (B) для тех же записей ЭЭГ, но после стохастического перемешивания амплитудных значений. По вертикали — коэффициент вариации; по горизонтали — стандартные обозначения отведений ЭЭГ.

ЭЭГ. По-видимому, в своем большинстве выделенные сегменты ЭЭГ действительно отражают разные уровни  $\alpha$ -активности.

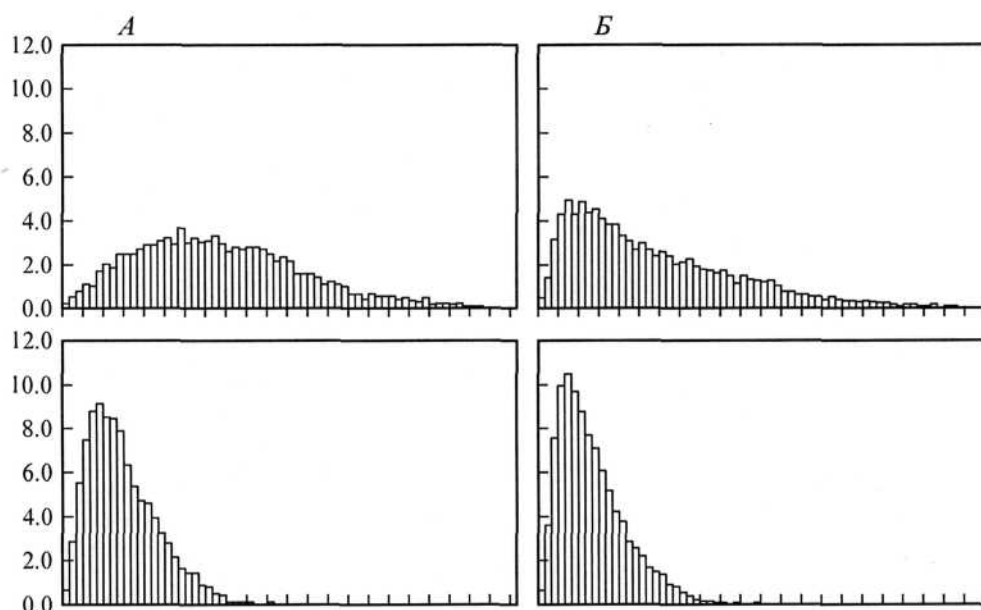
Насколько, однако, изменчива амплитуда ЭЭГ в рамках выделенных между КПП сегментов? Для ответа на этот вопрос нужно было сначала получить оценку изменчивости полностью деструктурированной ЭЭГ, с которой можно было бы сравнить внутрисегментную изменчивость реальной ЭЭГ.

Для сегментов деструктурированных записей ЭЭГ, полученных путем стохастического перемешивания последовательных амплитудных значений, коэффициенты внутрисегментной вариации достигают величин 50—60% (рис. 2). Это, очевидно, и есть оценка максимально возможной амплитудной изменчивости ЭЭГ. Примерно на уровне 40—50% находятся и оценки межсегментной вариативности ЭЭГ (рис. 2). Это свидетельствует о том, что разнообразие амплитудных оценок сегментов не сильно отличается от такового для амплитудных значений самой ЭЭГ. Последнее возможно, если в рамках выделенных сегментов агрегируются достаточно сходные амплитудные значения ЭЭГ. В противном случае усреднение амплитуд ЭЭГ в рамках сегментов привело бы к резкому нивелированию различий амплитуд соседних сегментов и к снижению оценок межсегментной вариативности. Однако более определенным признаком стабилизации амплитудных значений ЭЭГ в рамках выделенных сегментов является значительное снижение коэффициента внутрисегментной вариации ЭЭГ (до 25—30%) относительно максимально возможных оценок этого показателя в 50—60% (рис. 2).

Все это позволяет говорить о том, что в большинстве случаев метки КПП действительно являются границами относительно однородных сегментов  $\alpha$ -активности.

Таким образом, используемая технология автоматической разметки ЭЭГ действительно эффективно детектирует КПП, что позволяет выделить фазическую структуру  $\alpha$ -активности в виде последовательности относительно однородных сегментов разной амплитуды. Можно полагать, что в своем большинстве такие сегменты представляют собой элементы динамической квази-стационарной организации ЭЭГ, поскольку отражают эпизоды относительной стабилизации параметров локальной ансамблевой деятельности корковых нейронных сетей [ > ].

Рассмотрим подробнее амплитудные и временные характеристики сегментов  $\alpha$ -активности ЭЭГ. При анализе амплитудных характеристик сегментной организации



3 7 11 15 20 24 28 32 36 40 45 49 53 57 61 66 70 3 7 11 15 20 24 28 32 36 40 45 49 53 57 61 66 70

Рис. 3. Типичные распределения значений средней амплитуды сегментов  $\alpha$ -активности ЭЭГ для затылочных и лобных отведений при закрытых и открытых глазах.

По вертикали — представленность данного амплитудного класса, %, по горизонтали — амплитудные классы, мкВ.

$\alpha$ -активности наибольший интерес представляют не усредненные оценки сегментов, а характеристика их разнообразия.

Распределение сегментов  $\alpha$ -активности по их средней амплитуде оказалось мономодальным во всех отведениях ЭЭГ (рис. 3). Заметные различия по форме этих распределений достигались только между достаточно удаленными, например затылочными и лобными, отведениями (рис. 3). Для затылочных и теменных отделов при закрытых глазах характерно близкое к нормальному распределению амплитуд сегментов, переходящее при открытых глазах в несимметричное распределение с большей представленностью низких амплитуд. Последний тип распределения с еще большим сдвигом пика гистограммы в сторону меньших амплитуд характерен для передних отведений ЭЭГ, причем как при закрытых глазах, так и при открытых (рис. 3).

Таким образом, сегментный анализ позволяет получить более представительное описание  $\alpha$ -активности по сравнению с известными методами усредненных оценок ритмических компонентов ЭЭГ на интервале анализа. Видно, например, что в лобных отведениях, несмотря на известную меньшую суммарную выраженность  $\alpha$ -ритмики, для значительного (10—15 %) числа сегментов характерна высокоамплитудная  $\alpha$ -активность, сопоставимая с выраженной активностью в затылочных отведениях. С другой стороны, более 50% сегментов  $\alpha$ -ритма лобных отведений лежит в области низких амплитудных значений, на долю которых в затылочных отведениях тоже приходится не менее 10% сегментов.

Что касается изменчивости  $\alpha$ -активности в рамках самих сегментов, то здесь следует отметить в среднем заметно большую однородность этой активности в затылочных и теменных отведениях по сравнению с центральными и лобными отведениями (рис. 2).

Оценки длительности сегментов  $\alpha$ -активности ЭЭГ оказались не менее разнообразными, чем их амплитуда, и в показателях распределения практически не имели

топографической специфики (рис. 4, А, Б). Тотальное (вне зависимости от амплитуды) распределение длительностей сегментов  $\alpha$ -активности показало выраженный модальный профиль во всех отведениях с центром в области 0.30—0.33 с и максимумом 1.0—1.2 с. При этом длительность большинства (около 80%) сегментов находилась в пределах 0.2—0.8 с. На долю самых коротких сегментов (100—200 мс, т. е. 1—2 а-волны) приходилось не более 4—7 % с некоторой тенденцией к увеличению этой доли в передних отведениях (рис. 4, А, Б).

Приведенные выше данные касаются ЭЭГ-записей с хорошо выраженной  $\alpha$ -активностью. Для сравнения на рис. 4, В приведены результаты сегментного анализа ЭЭГ с плохо выраженным  $\alpha$ -ритмом. На примере затылочного отведения этой ЭЭГ видно, что, несмотря на практически полное отсутствие  $\alpha$ -пика в спектре мощности ЭЭГ, на фоне закрытых глаз сегментный анализ этой ЭЭГ показывает наличие достаточно широкого амплитудного распределения сегментов  $\alpha$ -активности. Однако для большей части сегментов (не менее 80%) этого распределения характерны достаточно низкие амплитуды, примерно в 3.0—3.5 раза меньшие, чем при закрытых глазах у испытуемых с ее хорошей выраженностью (рис. 4, А, Б). Длительность большинства сегментов  $\alpha$ -активности при ее низкой выраженности также была заметно меньше, чем в ЭЭГ с высоким  $\alpha$ -ритмом (рис. 4, В).

Анализ временных и амплитудных характеристик сегментов  $\alpha$ -активности, очевидно, был бы неполным без оценки возможной зависимости между этими параметрами сегментного описания ЭЭГ. Корреляционный анализ на базе коэффициентов Пирсона показал полное отсутствие линейной зависимости между средней амплитудой « $\alpha$ -сегментов» ЭЭГ и их продолжительностью (см. таблицу) для всех отведений ЭЭГ у всех тестировавшихся испытуемых. Дополнительный визуальный анализ точечных карт зависимости между амплитудой и продолжительностью сегментов  $\alpha$ -активности не дает оснований к предположению и о существовании простых форм нелинейной зависимости между указанными показателями.

Таким образом, за традиционными оценками усредненной спектральной мощности, даже при слабой выраженности спектрального  $\alpha$ -пика, скрывается достаточно устойчивая сегментная организация  $\alpha$ -ритма, включающая как низко-, так и высокоамплитудные сегменты. Низкий уровень пика усредненного спектра мощности в области  $\alpha$ -полосы отнюдь не свидетельствует об отсутствии высокоамплитудных сегментов этой активности на участке оценивания. Только конкретное доленое участие каждого амплитудного класса этих сегментов определяет средний уровень  $\alpha$ -активности.

Что же отражают разные уровни  $\alpha$ -активности: большую или меньшую «интенсивность» одного и того же функционального процесса (например, глубину «выключения» соответствующей корковой области по Бергеру) или конкурентную динамику разных функциональных процессов?

Для более подробного анализа сегментной организации  $\alpha$ -активности ЭЭГ был применен квартальный анализ: в каждом из отведений общий массив сегментов был сначала ранжирован по амплитуде, а затем разбит на 4 равных по численности сегментов кластера. Средние значения амплитуды сегментов вычислялись отдельно для низко- и высокоамплитудного кластера и совместно для двух промежуточных кластеров.

Анализ квартильной структуры сегментов  $\alpha$ -активности показал, что сегментам ЭЭГ нижнего амплитудного кластера соответствуют периоды практически полного отсутствия  $\alpha$ -активности в ЭЭГ, тогда как сегменты верхнего кластера содержат высокоамплитудные всплески  $\alpha$ -ритма.

Можно полагать, что сегменты трех квартальных уровней отражают разную степень локальной синхронизации корковых нейронов в данной области регистрации ЭЭГ. В таком случае, анализируя сегментную структуру  $\alpha$ -активности, можно сравнивать разные корковые области или разные функциональные состояния мозга не по усредненным по всей записи ЭЭГ абсолютным значениям  $\alpha$ -активности, а по ранговым уровням локальной синхронизации, соответствующим средней амплитуде  $\alpha$ -ак-

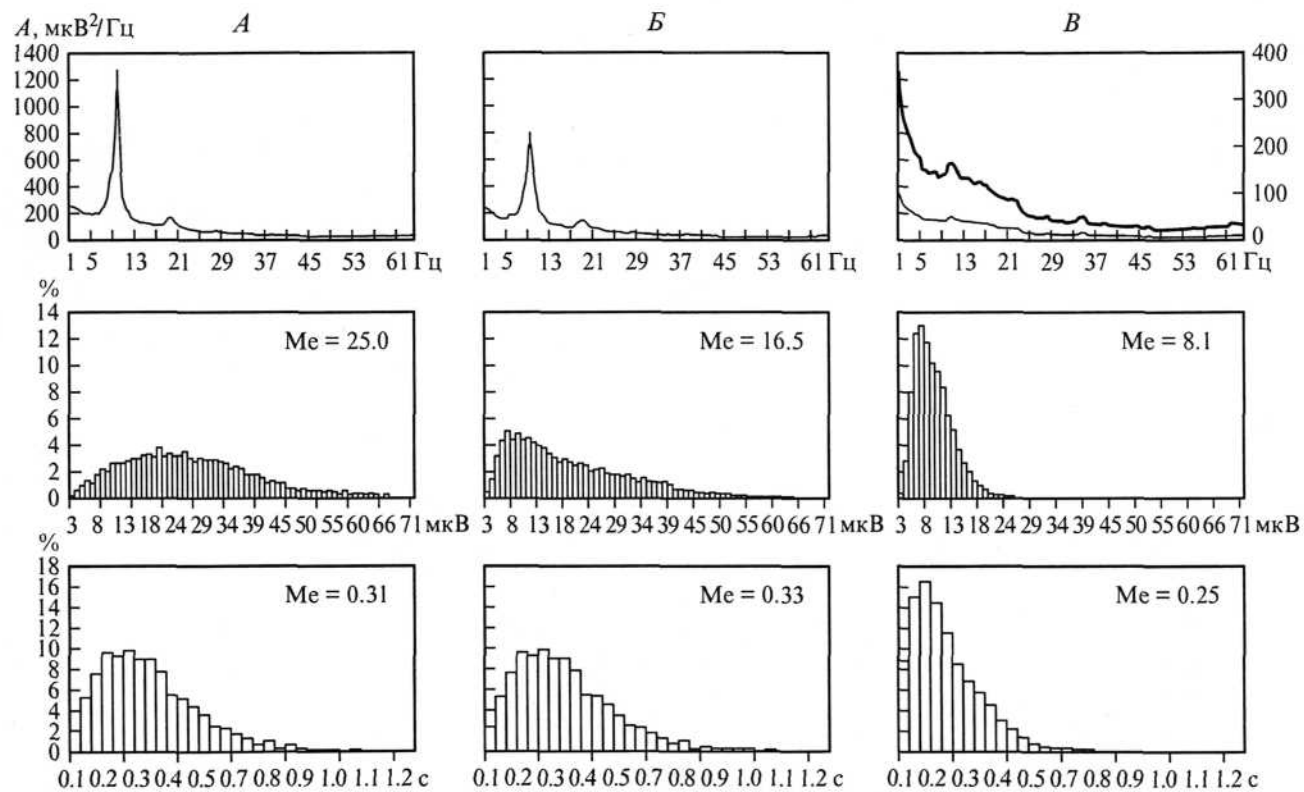


Рис. 4. Пример распределения оценок амплитуды и продолжительности сегментов а-активности в усредненном выражении отдельно для задних (О1—О2—Р3—Р4) и передних (F3—F4—F7—F8) отведений при закрытых и открытых глазах у испытуемых с сильно (А, Б) и слабо (В) выраженной а-ритмией.

Представлены усредненные данные по 10 записям ЭЭГ длительностью 1 мин каждая. Верхний ряд диаграмм — спектральные плотности, мкВ/Гц, средний и нижний — соответственно распределения сегментов по их амплитуде, мкВ, и продолжительности, с. На правой верхней диаграмме спектральная плотность представлена в двух масштабах.

Коэффициенты корреляции Пирсона (КП) между амплитудами сегментов и их длительностью в среднем выражении для 16 отведений ЭЭГ отдельно для 4 испытуемых

Показатель	Исп. ЕЗ		Исп. Р1		Исп. А1		Исп. А1	
	ОГ	ЗГ	ОГ	ЗГ	ОГ	ЗГ	ОГ	ЗГ
КП	0.09	0.05	-0.10	-0.08	0.08	0.09	-	0.07
ОСЗ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.02

Примечание. ОГ — открытие глаза, ЗГ — закрытие глаза. Исп. — испытуемые. Даны значения коэффициентов, усредненные для 16 каналов, с указанием ошибки среднего значения (ОСЗ).

тивности в каждой из квартальных групп. При этом автоматически выполняется своего рода нормирование, в результате которого, например, лобные и затылочные отведения ставятся в равные условия относительно репертуара возможных интенсивностей синхронизации (до минимума до максимума) в каждой из этих областей.

Итак, насколько выделенные квартальные амплитудные уровни  $\alpha$ -активности функционально специфичны, например при закрытых и открытых глазах? Обратим внимание главным образом на сегменты  $\alpha$ -активности среднего и верхнего амплитудных кластеров, поскольку к нижнему амплитудному кластеру, по-видимому, относятся преимущественно полностью десинхронизированные участки ЭЭГ.

На рис. 5 представлены результаты квартильного анализа сегментов  $\alpha$ -активности всех 16 отведений при закрытых и открытых глазах у испытуемых с ярко выраженным и почти незаметным  $\alpha$ -ритмом (графики спектральной плотности см. на рис. 4).

При хорошо выраженной  $\alpha$ -активности сегментный анализ ЭЭГ показал, что смена условий (закрытые или открытые глаза) практически не сказывается на средней амплитуде сегментов верхнего кластера. В то же время наибольшая разница в выраженности  $\alpha$ -активности для таких условий достигается для сегментов промежуточных кластеров (рис. 5, Б). Кстати, на этом рисунке видно, что и в нижнем кластере хорошо заметно различие амплитуд сегментов при закрытых и открытых глазах, что свидетельствует о наличии в этом кластере значительной доли  $\alpha$ -ритмичных сегментов, однако лобно-затылочный градиент  $\alpha$ -активности здесь сильно сглажен по сравнению с сегментами верхнего и среднего кластеров (рис. 5, Л).

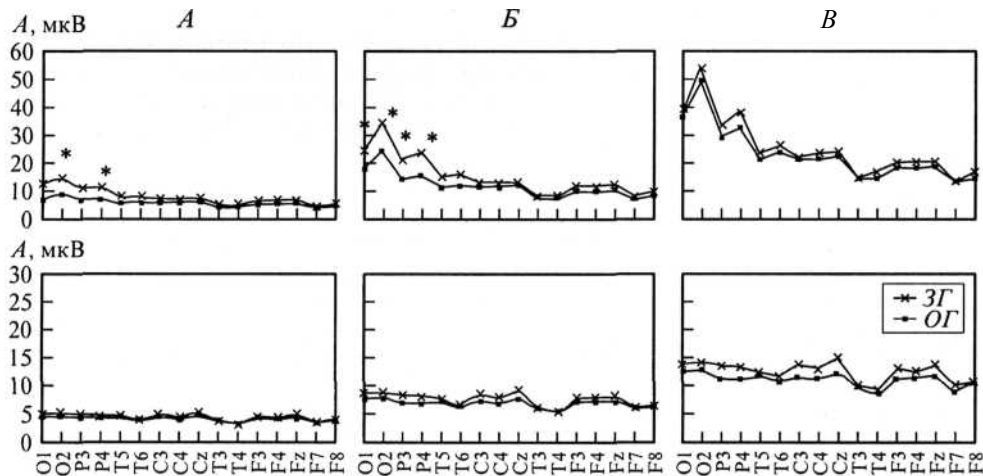


Рис. 5. Типичные примеры результатов квартильного анализа сегментной структуры ЭЭГ.

А, Б, В — средняя амплитуда сегментов ЭЭГ для кластеров нижнего, среднего и верхнего амплитудного уровня. На диаграммах представлены усредненные данные для 10 записей ЭЭГ испытуемого с сильной (верхний ряд диаграмм) и слабой (нижний ряд диаграмм)  $\alpha$ -активностью. По горизонтали — обозначения отведений ЭЭГ; по вертикали — амплитуда ЭЭГ, мкВ. \* Статистически значимые различия между ординатами с  $p < 0.05$  (по критерию Вилкоксона). ЗГ — закрытые глаза; ОТ — открытые глаза.



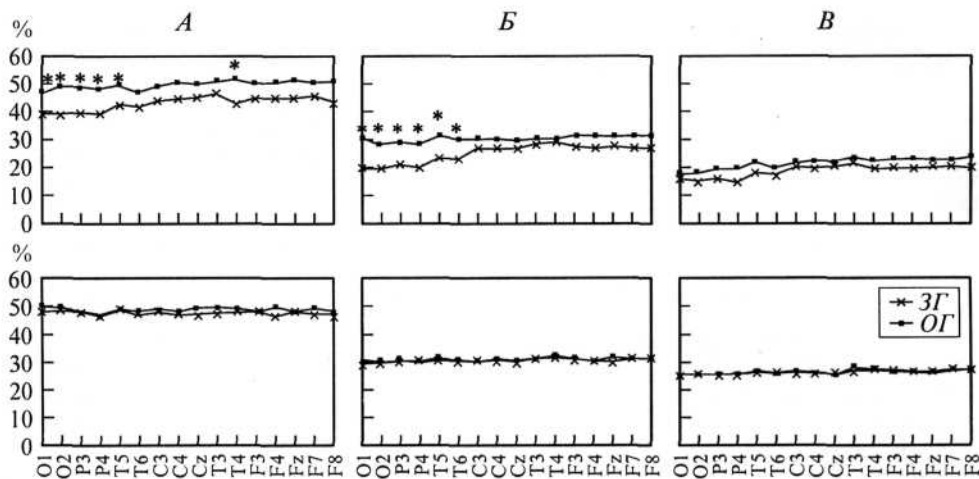


Рис. 6. Примеры результатов квартального анализа сегментной структуры ЭЭГ.

*А, Б, В* — средняя продолжительность сегментов ЭЭГ для кластеров нижнего, среднего и верхнего амплитудного уровня. На диаграммах представлены результаты анализа ЭЭГ при закрытых и открытых глазах для испытуемых с сильной (*верхний ряд диаграмм*) и слабой (*нижний ряд диаграмм*)  $\alpha$ -активностью. По вертикали — амплитуда ЭЭГ, %. Остальные обозначения те же, что и на рис. 5.

Для плоской ЭЭГ топографические различия в выраженности  $\alpha$ -активности ЭЭГ практически отсутствуют во всех трех амплитудных кластерах (рис. 5).

Как видно, известная блокада  $\alpha$ -ритмики при открытых глазах в действительности практически отсутствует в верхнем амплитудном классе сегментов  $\alpha$ -активности и в то же время хорошо выражена для сегментов среднего амплитудного класса.

Выше уже приводились средние оценки внутрисегментного разброса амплитудных значений ЭЭГ (коэффициент вариации) в целом для всей совокупности сегментов. Каковы же эти оценки для отдельных амплитудных кластеров сегментов  $\alpha$ -активности?

Полученные данные (рис. 6) свидетельствуют о том, что кластеры сегментов  $\alpha$ -активности среднего и верхнего амплитудных уровней значительно различаются по коэффициенту внутрисегментной вариации ЭЭГ. При этом эффект снижения коэффициента вариации ЭЭГ в сегментах верхнего кластера характерен для всех отведений ЭЭГ (рис. 6).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Понимание динамической организации эпизодов  $\alpha$ -активности ЭЭГ как «универсального кода» или даже «универсального оператора» нервной деятельности [6] позволяет надеяться на то, что в виде сегментного описания  $\alpha$ -активности исследователи могут получить мощный инструмент анализа функциональных модулей мозговых процессов [112].

В этой связи все большее практическое значение приобретают технологии анализа фазической организации ЭЭГ, например такие, как метод, «связанный с событием» десинхронизации-синхронизации [15], метод оценивания микросостояния по D. Lehmann и соавт. [13], классификация однократных спектров ЭЭГ [2, 4] и др.

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют прежде всего о том, что предложенная технология анализа сегментной организации ЭЭГ может служить полезным инструментом для оценивания фазической структуры отдельных частотных компонентов ЭЭГ, например  $\alpha$ -активности.

Учитывая вероятную гетерогенность  $\alpha$ -ритмом ЭЭГ [<sup>5101</sup>1], по-видимому, в дальнейшем следует обратиться к сегментации узкополосных компонентов  $\alpha$ -активности. Однако при недостаточной изученности функциональной и топографической специфики этих компонентов сегментные описания широкополосной  $\alpha$ -ритмики имеют самостоятельное значение в качестве интегральной оценки этого частотного диапазона ЭЭГ.

Использованный нами в контексте сегментного анализа квартальный подход для шкалирования амплитудных уровней  $\alpha$ -активности ЭЭГ оказался достаточно практичным для функционального разделения эпизодов тотальной  $\alpha$ -активности ЭЭГ разной выраженности. Действительно, были показаны явные различия сегментов среднего и верхнего амплитудных кластеров  $\alpha$ -активности ЭЭГ по характеристикам «отклика» на смену условий (закрытые или открытые глаза) и по степени их однородности. Это позволяет полагать, что отмеченные два амплитудных класса сегментов  $\alpha$ -активности ЭЭГ составляют не единый континуум непрерывной амплитудной изменчивости, но в значительной мере отражают разные функциональные механизмы.

Особо следует отметить, что коэффициенты внутрисегментной вариации амплитуды ЭЭГ в пределах каждого кластера практически не имеют топографической специфики, за исключением некоторого лобно-затылочного градиента в среднем кластере при закрытых глазах (рис. 6). Это притом, что сегменты  $\alpha$ -активности ЭЭГ разных отведений, очевидно, должны различаться по средней амплитуде. Таким образом, можно было бы предполагать отсутствие зависимости между выраженностью  $\alpha$ -активности и степенью ее амплитудной однородности в сегментах ЭЭГ.

В то же время при сравнении кластеров различных уровней зависимости коэффициента внутрисегментной вариации от амплитуды  $\alpha$ -активности, казалось бы, явно демонстрируется, поскольку наибольшие коэффициенты вариации достигаются в кластере сегментов низких амплитуд, а наименьшие — в кластерах высокоамплитудных сегментов, независимо от отведения (рис. 6).

Это кажущееся противоречие наталкивает на предположение о том, что внутрисегментная вариативность ЭЭГ зависит не от абсолютной амплитуды соответствующих сегментов  $\alpha$ -активности, а от положения конкретного класса сегментов в репертуаре их возможных амплитудных значений для данного коркового субстрата. Только в сегментах верхнего диапазона этого репертуара коэффициенты вариации ЭЭГ существенно снижаются по сравнению с сегментами, лежащими в середине этого диапазона (вне зависимости от конкретной области регистрации), и, следовательно, вне зависимости от абсолютной амплитуды  $\alpha$ -активности. По-видимому, различные функциональные механизмы мозга отражаются на уровне ЭЭГ не только и не столько в различиях абсолютной выраженности эпизодов  $\alpha$ -активности, сколько в степени ангажированности «индивидуальных» ресурсов соответствующего коркового субстрата в отношении локальной синхронизации нейронной активности.

Сегментный подход к анализу динамики  $\alpha$ -активности ЭЭГ ставит и совершенно новую проблему: как «расшифровывать» последовательность детектируемых сегментов в контексте текущих функциональных актов нервной деятельности. Здесь, по-видимому, исследователи находятся в самом начале пути, поскольку требуется сначала выполнить систематические работы по оценке пространственно-временных параметров сегментных последовательностей ЭЭГ на фоне разных функциональных нагрузок, чтобы затем сформулировать основные закономерности предполагаемого динамического «универсального кода  $\alpha$ -активности» [<sup>613</sup>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Каплан А. Я. Нестационарность ЭЭГ: методологический и экспериментальный анализ. Успехи физиол. наук. 29(3): 35. 1998.  
[2] Каплан А. Я. Проблемы сегментного описания ЭЭГ человека. Физиология человека. 25(1): 125. 1999.

- [3] Каплан А. Я., Фингелькурц Ан. А., Фингелькурц Ал. А., Шишкин С. Л., Ивашко Р. М. Пространственная синхронность сегментарной структуры ЭЭГ человека. Журн. высш. нерв. деятельности. Вып. 26(4): 624. 2000.
- [4] Николаев А. Р., Иваницкий Г. А., Иваницкий А. М. Воспроизводящиеся паттерны ритма ЭЭГ при решении психологических задач. Физиология человека. 24(3): 5. 1998.
- [5] Фарбер Д. А., Вильдавский В. Ю. Гетерогенность и возрастная динамика альфа-ритма электроэнцефалограммы. Физиология человека. 22(5): 5. 1996.
- [6] Basar E., Schumann M. Functional correlated of alphas. Panel discussion of the conference «Alpha processes in the brain». Intern. J. Psychophysiol. 26:455. 1997.
- [7] Jausovec N., Jausovec K. EEG activity during the performance of complex mental problems. Intern. J. Psychophysiol. 36:73. 2000.
- [8] Kaplan A., Roeschke J., Darkhovsky B., Fell J. Macrostructural EEG characterization based on nonparametric change-point segmentation: application to sleep analysis. J. Neurosci Methods. 106(1): 81. 2001.
- [9] Klimesch W., Doppelmayr M., Schwaiger J., Auinger P., Winkler Th. «Paradoxical» alpha synchronization in a memory task. Cognitie Brain Res. 7:493. 1999.
- [10] Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. Brain Res. Rev. 29 : 169. 1999.
- [11] Krause Ch. M. Event-related desynchronization (ERD) and synchronization (ERS) during auditory information processing. J. New Musik Research. 28(3): 257. 1999.
- [12] Lehmann D., Strik W. K., Hengelle B., Koenig T., Koukkou M. Brain electric microstates and momentary conscious mind states as building blocks of spontaneous thinking. I. Visual imagery and abstract thoughts. Intern. J. Psychophysiol. 29: 1. 1998.
- [13] Lehmann D., Ozaki H., Pall. EEG alpha map series: brain micro-states by space-oriented adaptive segmentation. EEG and Clin Neurophysiol. 67:271. 1987.
- [14] Maltseval., Geissler H.-G., Basar E. Alpha oscillations as an indicator of dynamic memory operations — anticipation of omitted stimuli. Intern. J. Psychophysiol. 36: 185. 2000.
- [15] Pfurtscheller G., Lopes da Silva F. H. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. Clin. Neurophysiol. 110: 1842. 1999.
- [16] Stain C. J. Brain dynamics in theta and alpha frequency bands and working memory performance in humans. Neurosci Letters. 286:115. 2000.
- [17] Williamson S. J., Kaufman L, Lu Z.-L, Wang J.-Z., Karen D. Study of human occipital alpha rhythm: the alphon hypothesis and alpha suppression. Intern. J. Psychophysiol. 26:63—76. 1997.

Поступила 25 VI 2001