

УДК 612.821.3:51-76

ФАЗОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ РИТМАМИ ЭЭГ ПРИ ВОСПРИЯТИИ КОРОТКИХ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Ю.В. Бушов¹, М.В. Светлик²

(1 — Томский государственный университет,

2 — Сибирский государственный медицинский университет; e-mail: bushov@bio.tsu.ru)

У 27 юношей и 29 девушек — учащихся вузов — исследовали фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ при восприятии человеком коротких интервалов времени. Показано, что чаще всего тесные фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом и другими ритмами ЭЭГ или между разными частотами гамма-ритма. Установлено влияние факторов “пол”, “вид деятельности” и “этап деятельности” на изучаемые фазовые взаимодействия. Обнаружена связь фазовых взаимодействий с уровнями интеллекта, экстраверсии и нейротизма, с особенностями латеральной организации мозга и точностью восприятия времени.

Ключевые слова: восприятие времени, фазовые взаимодействия, ритмы ЭЭГ, индивидуальные особенности человека.

Изучение механизмов функционального объединения нейронов в процессе осуществления сознательной деятельности является актуальной проблемой современной нейрофизиологии. В работах М.Н. Ливанова и его учеников [1—3] показана важная роль в этих процессах пространственной частотной синхронизации электрической активности мозга. Наряду с этим в последние годы все большую популярность среди исследователей приобретает точка зрения, базирующаяся на концепции детерминированного хаоса, которая отводит важную роль в функциональном объединении нейронов, в формировании субъективных образов нелинейным и фазовым взаимодействиям между электрическими потенциалами мозга [4]. Роль этих взаимодействий в функциональном объединении нейронов, в различных когнитивных процессах в значительной степени остается неясной. Учитывая это, целью настоящего исследования являлось изучение фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ при восприятии человеком коротких интервалов времени. В задачу исследований входило изучение зависимости этих взаимодействий от вида и этапа выполняемой деятельности, а также от индивидуальных особенностей человека.

Объекты и методы

В исследованиях участвовали добровольцы, юноши (27 человек) и девушки (29 человек) в возрасте от 18 до 22 лет, учащиеся томских вузов. Все обследуемые дали информированное согласие на участие в настоящем исследовании. В ходе предварительного обследования с помощью тестов Г. Айзенка [5, 6] исследовали вербальный и невербальный интеллект, а также уровни экстраверсии и нейротизма. С помощью набора стандартных тестов исследовали осо-

бенности латеральной организации мозга с определением ведущей руки и речевого полушария [7, 8].

В ходе исследований испытуемым предлагали воспроизводить и отмерять короткие интервалы времени длительностью 200 и 800 мс при наличии и в отсутствие обратной связи о результатах деятельности. Интервалы времени в одной серии задавались невербальными стимулами (светлый квадрат со стороной 2 см, появляющийся в центре затемненного экрана монитора), а в другой — цифрами (при отмеривании длительности). Испытуемые воспроизводили и отмеривали интервалы времени двойным нажатием на клавишу “пробел”. В качестве сигнала обратной связи использовали выраженную в процентах относительную ошибку репродукции или отмеривания заданного интервала времени. Сигнал ошибки появлялся на одну секунду на экране монитора, спустя секунду после воспроизведения или отмеривания каждого интервала времени. При этом угловые размеры стимулов составили 2—2,3 град. в случае предъявления квадрата и 0,75—0,76 град. в случае предъявления цифр. При предъявлении цифр применялся стандартный шрифт ДОС, его размер соответствовал 16 кеглю Word. Стимулы длительностью 200 и 800 мс предъявлялись в случайном порядке, согласно RND функции, с корректировкой многократного “выкидывания” одного значения; стимул каждой длительности предъявлялся не менее 50 раз.

ЭЭГ записывали с помощью 24-канального энцефалографа-анализатора “Энцефалан-131-03” в следующих отведениях: Cz, Fz, Pz, F3, F4, C3, C4, P3, P4, T3, T4, T5, T6, O1, O2 по системе “10—20%”. Объединенный референтный электрод устанавливался на мочки левого и правого уха испытуемого, а заземляющий фиксировался на запястье правой руки. С целью исключения артефактов, связанных с дви-

жением глаз, регистрировали ЭОГ. Электроды для записи ЭОГ устанавливали на верхнее и нижнее веко левого глаза испытуемого. Запись ЭЭГ и ЭОГ проводилась в покое при открытых и закрытых глазах (в течение 20 с) и при восприятии времени. При вводе аналоговых сигналов в ЭВМ частота дискретизации составляла 250 Гц. С целью контроля мозгового происхождения гамма-ритма использовали метод дипольной локализации [9]. При изучении фазовых взаимодействий между высоко- (30–70 Гц) и низкочастотными ритмами ЭЭГ (0,5–30 Гц) использовали вейвлетный биспектральный анализ и подсчитывали функцию бикогерентности [10]. Эта функция принимает значения от 0 до 1 и является мерой фазовой связи на интервале времени T между частотными составляющими сигнала f_1, f_2, f_3 , которые удовлетворяют условию $f_3 = f_1 + f_2$. Если фазы одного из трех компонентов являются суммой или разностью двух других, то функция бикогерентности значительно отличается от нуля, и это свидетельствует о том, что фазы трех частот связаны. При изучении внутриполушарных фазовых связей значения функции бикогерентности подсчитывались между разными частотными составляющими одного и того же ЭЭГ-сигнала, а при изучении межполушарных фазовых связей — между разными частотными составляющими двух ЭЭГ-сигналов, записанных синхронно у одного и того же испытуемого в левополушарном и правополушарном отведениях. В качестве интегральной ха-

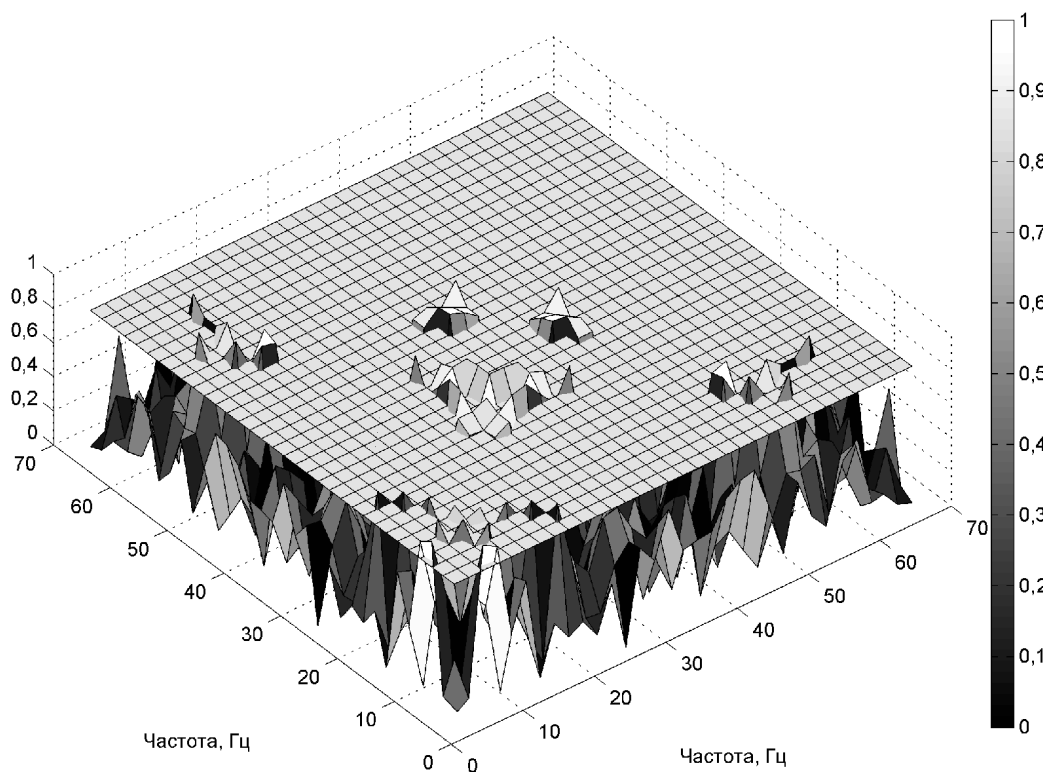
рактеристики уровня фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ использовали полусумму значений этой функции в исследуемом частотном диапазоне ЭЭГ (0,5–70 Гц).

При анализе корреляционных связей между исследуемыми показателями подсчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Для оценки влияния исследуемых факторов (“пол”, “этап деятельности”, “вид деятельности”) на фазовые взаимодействия использовали многофакторный дисперсионный анализ. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакетов прикладных программ “Statistica-6.0” и “MatLab-6.5”.

Результаты и обсуждение

Бикогерентный анализ позволил обнаружить и в фоне, и при восприятии времени тесные внутри- и межполушарные фазовые связи между ритмами ЭЭГ. Оказалось, что чаще всего (примерно в 60–70% случаев) фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом и низкочастотными составляющими ЭЭГ (0,5–30 Гц), а также между разными частотами гамма-ритма. Значения функции бикогерентности на указанных частотах достигают 0,8 и более.

Среднегрупповые значения функции бикогерентности между отведениями Т4 и Т5 у юношей при воспроизведении зрительных сигналов длительностью 200 мс без обратной связи представлены на рисунке.



Среднегрупповые значения функции бикогерентности между отведениями Т4 и Т5 у юношей при воспроизведении зрительных сигналов длительностью 200 мс без обратной связи.

Примечание: этап деятельности — спустя 400 мс после предъявления стимула; горизонтальная плоскость “отсекает” малозначимые (менее 0,8) значения функции бикогерентности

Как следует из рисунка, наиболее тесные фазовые связи наблюдаются между низкочастотными составляющими ЭЭГ (0,5–20 Гц), между гамма-ритмом 40–60 Гц и ритмами частотой 5–20 Гц, а также между разными частотами гамма-ритма (30–36, 38–44 Гц).

Дисперсионный анализ показал, что факторы “пол” и “этап деятельности” при воспроизведении длительности невербальных зрительных стимулов оказывают статистически значимое влияние на уровень фазовых связей между ритмами ЭЭГ соответственно в отведениях С4 ($p = 0,02$) и Т3 ($p = 0,03$). В частности, влияние фактора “пол” на уровень фазовых связей проявляется у женщин в более высоких, чем у мужчин, средних значениях функции бикогерентности в отведении С4. В остальных отведениях различия в уровнях фазовых связей у мужчин и женщин отсутствуют.

Фактор “этап деятельности” при отмеривании интервалов времени оказывает статистически значимое влияние на уровень фазовых связей между ритмами ЭЭГ только в отведениях С3 ($p = 0,008$), Т5 ($p = 0,003$) и Т6 ($p = 0,022$). Влияние этого фактора проявляется в повышении среднего уровня бикогерентности в указанных отведениях от первого (предъявление цифрового стимула) к заключительному этапу отмеривания заданного интервала времени (второе нажатие на клавишу). Влияние фактора “пол” на уровень тех же связей не установлено.

Сходные данные были получены и при изучении межполушарных фазовых взаимодействий между исследуемыми ритмами ЭЭГ. Дисперсионный анализ позволил, в частности, обнаружить статистически значимое совместное влияние факторов “пол” и “вид деятельности” на межполушарные фазовые взаимодействия.

Результаты дисперсионного анализа, характеризующие совместное влияние факторов “пол” и “вид деятельности” на исследуемые фазовые взаимодействия на этапе деятельности “первое нажатие на клавишу пробел”, представлены в таблице.

Как следует из таблицы, исследуемые факторы “пол” и “вид деятельности” оказывают статистически значимое совместное влияние на уровень межполушарных фазовых связей между затылочными и височными, лобными и центральными, лобными и височными, теменными, височными, теменными и височными зонами коры левого и правого полушарий на этапе деятельности “первое нажатие на клавишу пробел”. Вероятно, эти межполушарные фазовые связи отражают взаимодействие “заинтересованных” зон коры на этапе подготовки и реализации моторного акта (нажатие на клавишу компьютера).

Наряду с этим проведенные исследования позволили обнаружить наличие статистически значимых корреляций уровня внутри- и межполушарных фазовых взаимодействий с показателями вербально-

Совместное влияние факторов “пол” и “вид деятельности” на межполушарные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ на этапе деятельности “первое нажатие на клавишу пробел”

Отведения	Значения критерия Фишера (F)	Уровень значимости (p)
O1–T6	3,72	0,02
F3–C4	3,75	0,01
F3–T6	3,22	0,03
P3–P4	3,69	0,02
P3–T6	3,04	0,03
T5–P4	3,30	0,02
T5–T6	3,16	0,03

го и невербального интеллекта, экстраверсии и нейротизма, особенностями латеральной организации мозга и точностью восприятия времени. Величина найденных коэффициентов корреляции Спирмена по абсолютной величине варьировала от 0,56 до 0,98 ($p = 0,05 \div 0,003$). Обнаруженные корреляции свидетельствуют о том, что фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ существенно зависят от индивидуальных психофизиологических особенностей человека и влияют на точность восприятия времени.

Установлено, что характер указанных корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности. Например, у девушек при репродукции длительности стимулов с обратной связью на этапе за 100 мс до начала стимула обнаружены отрицательные корреляции уровня межполушарных фазовых связей с показателями экстраверсии ($r = -0,63 \div -0,84$, $p < 0,01$) и нейротизма ($r = -0,59 \div -0,63$, $p < 0,01$) и положительные — с коэффициентом правого уха ($r = 0,55$, $p < 0,05$). У юношей в тот же период деятельности обнаружены положительные корреляции уровня межполушарных фазовых связей с показателями интеллекта ($r = 0,76 \div 0,90$, $p < 0,01$), мануального предпочтения ($r = 0,78$, $p < 0,03$) и коэффициентом правого уха ($r = 0,82$, $p < 0,02$).

Таким образом, проведенные исследования показали, что исследуемые фазовые взаимодействия информативны и отражают и вид, и этап выполняемой деятельности, а также индивидуальные особенности человека. Вероятно, зависимость фазовых взаимодействий от фактора “пол” фактически обусловлена связанными с полом особенностями латеральной организации мозга, которые наиболее ярко проявляются в межполушарных взаимодействиях [11]. В пользу высказанного предположения свидетельствуют обнаруженные нами положительные корреляции уровня межполушарных фазовых связей с показателем мануального предпочтения и коэффициентом правого уха, которые отличаются у мужчин и женщин.

Особый интерес представляют обнаруженные корреляции уровня фазовых взаимодействий с точностью

восприятия времени, а также показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма и латеральной организации мозга, от которых, как известно [12], зависит эффективность интеллектуальной деятельности. Учитывая данные о том, что фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ могут обеспечивать функциональное объединение нейронов [4], а также кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге [13], можно ожидать, что эти взаимодействия играют важную роль не только в процессах восприятия времени, но и в других когнитивных процессах.

Полученные данные указывают на особую роль гамма-ритма в формировании изучаемых фазовых связей, так как чаще всего (примерно в 60–70% случаев) тесные внутри- и межполушарные фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом и другими ритмами ЭЭГ или между разными частотами гамма-ритма. Возможно, это связано с тем, что гамма-ритм обеспечивает повышение эффективности синаптических входов [14] и тем самым способствует функциональному объединению нейронов.

Выводы

1. Между ритмами ЭЭГ имеются тесные внутри- и межполушарные фазовые связи. Чаще всего (примерно в 60–70% случаев) эти связи наблюдаются между гамма-ритмом и низкочастотными ритмами ЭЭГ, а также между разными частотами гамма-ритма.

2. Существенное влияние на фазовые взаимодействия оказывают факторы: “пол испытуемого”, “вид” и “этап” выполняемой деятельности.

3. Обнаружены статистически значимые корреляции уровня фазовых взаимодействий с точностью восприятия времени, показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма и латеральной организации мозга. Характер этих корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности.

* * *

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского Гуманитарного Научного Фонда (№ 07-06-00167а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972. 181 с.
2. Свидерская Н.Е. Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М.: Наука, 1987. 156 с.
3. Думенко В.Н. Высокочастотные компоненты ЭЭГ и инструментальное обучение. М.: Наука, 2006. 151 с.
4. Freeman W.J. Mesoscopic neurodynamics: from neuron to brain // J. Physiol. (France). 2000. Vol. 94. N 5–6. P. 303–322.
5. Айзенк Г.Ю. Структура личности. СПб.: Ювента, 1999. 464 с.
6. Айзенк Г.Ю. Классические IQ тесты. М.: ЭКСМО-Пресс, 2001. 192 с.
7. Кок Е.П., Кочергина В.С., Якушева Л.В. Определение доминантности полушария при помощи дихотического прослушивания речи // Журн. высш. нервн. деят. 1971. Т. 21. № 5. С. 59–72.
8. Леутин В.П., Николаева Е.И. Психофизиологические механизмы адаптации и функциональная асимметрия мозга. Новосибирск: Наука, 1988. 193 с.
9. Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М.: МЕД пресс-информ, 2004. 624 с.
10. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейв-летный анализ и его приложения. М.: Физматгиз, 2003. 176 с.
12. Разумникова О.М. Отражение личностных свойств в функциональной активности мозга. Новосибирск: Наука, 2005. 135 с.
13. Цукерман В.Д. Математическая модель фазового кодирования событий в мозге // Матем. биол. и биоинформ. 2006. Т. 1. № 1. С. 97.
14. Соколов Е.Н. Проблема гештальта в нейробиологии // Журн. высш. нервн. деят. 1996. Т. 46. № 2. С. 229–240.

Поступила в редакцию
05.05.14

PHASE INTERACTIONS BETWEEN EEG RHYTHMS DURING SHORT TIME INTERVAL PERCEPTION

Yu.V. Buchov, M.V. Svetlik

Phase interactions between EEG rhythms during short time interval perception were studied in 27 young men and 29 young women, all university students. The study has shown that, most often, close phase connections are observed between gamma-rhythm and other EEG rhythms or between different frequencies of gamma-rhythm. The influence of such factors as “sex”, “activity type”, and “activity stage” on the phase interactions being studied has been established. A connection of phase interactions with the levels of intellect, extraversion, neuroticism, particularities of the lateral organization of brain, and the accuracy of time perception has been revealed.

Key words: *time perception, phase interactions, EEG rhythms, individual peculiarities of a person.*

Сведения об авторах

Бушов Юрий Валентинович — докт. биол. наук, проф., заведующий кафедрой физиологии человека и животных Биологического института Томского государственного университета. Тел.: 8-3822-529-600; e-mail: bushov@bio.tsu.ru

Светлик Михаил Васильевич — канд. биол. наук, доц. кафедры медицинской и биологической кибернетики медико-биологического факультета Сибирского государственного медицинского университета. Тел.: 8-3822-420-952; e-mail: mihasv@rambler.ru