

УДК 612.843.544-072.7-073.97-073.7

ФАЗОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ РИТМАМИ ЭЭГ В ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ВОСПРИЯТИЯ ВРЕМЕНИ

Бушов Ю.В.¹, Светлик М.В.²¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск*² *Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск*

РЕЗЮМЕ

Целью исследования явилось изучение роли фазовых взаимодействий между ритмами электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в процессах восприятия времени. В задачу исследований входило изучение зависимости этих взаимодействий от вида и этапа выполняемой деятельности, а также от индивидуальных особенностей человека. Для этого у 27 юношей и 29 девушек (студенты вузов) при репродукции и отмеривании коротких интервалов времени (200 и 800 мс) регистрировали ЭЭГ в лобных, центральных, теменных, височных и затылочных отведениях по системе «10–20%». При изучении фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ использовали биспектральный вейвлетный анализ и подсчитывали функцию бикогерентности. 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.

Введение

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 [1]. Методами компьютерного моделирования показано, что фазовые взаимодействия между ритмами электроэнцефалограммы (ЭЭГ) могут обеспечивать кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге [2]. Это позволяет предположить, что указанные взаимодействия играют очень важную роль в различных когнитивных процессах.

Цель исследования – изучить роль фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ в процессах восприятия времени. В задачу исследований входило изучение зависимости этих взаимодействий от вида и этапа

выполняемой деятельности, а также от индивидуальных особенностей человека.

Материал и методы

В исследовании участвовали добровольцы, практически здоровые 27 юношей и 29 девушек в возрасте от 18 до 22 лет, студенты томских вузов. Все обследуемые дали информированное согласие на участие в исследовании. В ходе предварительного обследования с помощью тестов Г. Айзенка [3, 4] исследовали вербальный и невербальный интеллект, а также уровни экстраверсии и нейротизма. С помощью набора стандартных тестов исследовали особенности латеральной организации мозга с определением ведущей руки и речевого полушария [5, 6].

В ходе исследований испытуемым предлагали воспроизводить и отмеривать короткие интервалы времени длительностью 200 и 800 мс при наличии и в отсутствии 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 отмерива-

✉ Бушов Юрий Валентинович, тел. 8 (3822) 52-96-00;
e-mail: bushov@bio.tsu.ru

нии 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 1 с на экране монитора через 1 с после воспроизведения или отмеривания каждого интервала времени. При этом угловые размеры стимулов составили 2–2,3° в случае предъявления квадрата и 0,75–0,76° – в случае предъявления цифр. При предъявлении цифр применялся стандартный шрифт ДОС, его размер соответствовал 16 пт 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.

Электроэнцефалограммы записывали монополярно с помощью 24-канального энцефалографоанализатора «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 движением глаз, регистрировали электроокулограмму (ЭОГ). Электроды для записи ЭОГ устанавливали на верхнее и нижнее веко левого глаза испытуемого. Запись ЭЭГ и ЭОГ проводилась в фоне 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 [7]. При изучении фазовых взаимодействий между высоко- (30–70 Гц) и низкочастотными ритмами ЭЭГ (0,5–30 Гц) применяли вейвлетный биспектральный анализ и подсчитывали функцию бикогерентности [8]. 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 представляют собой сумму или разность двух других, то функция бикогерентности значимо 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

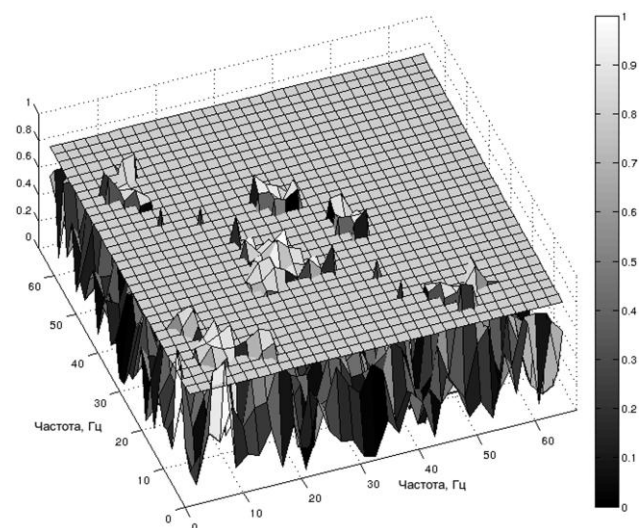
у одного и того же испытуемого в левополушарном и правополушарном отведениях. В качестве интегральной характеристики уровня фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ использовали полусумму значений этой функции в исследуемом частотном диапазоне ЭЭГ (0,5–70 Гц).

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 применяли многофакторный дисперсионный анализ. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакетов прикладных программ Statistica 6.0 for Windows и MatLab-6.5.

Результаты

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 T4 и T5 у юношей при воспроизведении зрительных сигналов длительностью 200 мс без обратной связи представлены на рисунке.



Среднегрупповые значения функции бикогерентности между отведениями T4 и T5 у юношей при воспроизведении зрительных сигналов длительностью 200 мс без обратной связи. Этап деятельности – спустя 400 мс после предъявления стимула; горизонтальная плоскость «отсекает» малозначимые (менее 0,8) значения функции бикогерентности

Установлено, что 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 и 38–44 Гц).

Дисперсионный анализ показал, что на исследуемые фазовые взаимодействия статистически значимое влияние оказывают факторы «пол» и «этап деятельности». Результаты оценки влияния факторов «пол» и «этап деятельности» на внутрислошарные фазовые взаимодействия между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ при воспроизведении и отмеривании коротких интервалов времени в отсутствии обратной связи о результатах деятельности представлены в табл. 1–2.

Таблица 1

| Влияние факторов «пол» и «этап деятельности» на внутрислошарные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ при воспроизведении длительности невербальных зрительных сигналов без обратной связи | | |
|---|----------|-----------|
| Фактор | <i>p</i> | Отведение |
| Пол | 0,020 | C4 |
| Этап деятельности | 0,030 | T3 |

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: *p* – уровень значимости.

Таблица 2

| Влияние фактора «этап деятельности» на внутрислошарные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ при отмеривании длительности без обратной связи | | |
|---|----------|-----------|
| Фактор | <i>p</i> | Отведение |
| | 0,008 | C3 |
| Этап деятельности | 0,022 | T6 |
| | 0,003 | T5 |

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 C4 и T3 (табл. 1). В частности, влияние фактора «пол» на уровень фазовых связей проявляется у женщин в более высоких, чем у мужчин, средних значениях функции бикогерентности в отведении C4. 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 C3, T5 и T6 (табл. 2). Влияние этого фактора выражается 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 табл. 3.

Показано, что 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).

Таблица 3

| Совместное влияние факторов «пол» и «вид деятельности» на межполушарные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ на этапе деятельности «первое нажатие на клавишу „пробел“» | | |
|---|----------|----------|
| Отведение | <i>F</i> | <i>p</i> |
| 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 |

Примечание. *F* – значения критерия Фишера по результатам дисперсионного анализа.

Проведенные исследования позволили обнаружить наличие статистически значимых корреляций уровня внутри- и межполушарных фазовых взаимодействий с показателями вербального 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 ($r = 0,82$; $p < 0,02$).

Обсуждение

Проведенные исследования показали, что исследуемые фазовые взаимодействия информативны и отражают и вид, и этап выполняемой деятельности, и 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 [9]. В пользу высказанного предположения свидетельствуют обнаруженные нами положительные корреляции уровня межполушарных фазовых связей с показателями 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 [10], зависит эффективность интеллектуальной деятельности. Учитывая данные о том, что фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ могут обеспечивать функциональное объединение нейронов [1], а также кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге [2], 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 обеспе-

чивает повышение эффективности синаптических входов [11] 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», «вид деятельности» и «этап 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 (РГНФ) № 07-06-00167а.

Литература

1. Freeman W.J. Mesoscopic neurodynamics: From neuron to brain // J. physiol. (France). 2000. V. 94, № 5/6. P. 303–322.
2. Цукерман В.Д. Математическая модель фазового кодирования событий в мозге // Математическая биология и биоинформатика. 2006. Т. 1, № 1. С. 97–103.
3. Айзенк Г.Ю. Структура личности: пер. с англ. СПб.: Ювента; М.: КСП+, 1999. 464 с.
4. Айзенк Г.Ю. Классические IQ тесты. М.: Эксмо-Пресс, 2001. 192 с.
5. Кок Е.П., Кочергина В.С., Якушева Л.В. Определение доминантности полушария при помощи дихотического прослушивания речи // Журн. высш. нервн. деятельности. 1971. Т. 21, № 5. С. 59–72.
6. Леутин В.П., Николаева Е.И. Психофизиологические механизмы адаптации и функциональная асимметрия мозга. Новосибирск: Наука, 1988. 193 с.
7. Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М.: МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.
8. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматгиз, 2003. 176 с.
9. Вольф Н.В. Половые различия функциональной организации процессов полушарной обработки речевой информации. Ростов н/Д: Изд-во ООО «ЦВВР», 2000. 240 с.
10. Разумникова О.М. Отражение личностных свойств в функциональной активности мозга. Новосибирск: Наука, 2005. 135 с.
11. Соколов Е.Н. Проблема гештальта в нейробиологии // Журн. высш. нервн. деятельности. 1996. Т. 46, № 2. С. 229–240.

Поступила в редакцию 01.11.2014 г.

Утверждена к печати 12.11.2014 г.

Бушов Юрий Валентинович (✉) – профессор, зав. кафедрой физиологии человека и животных Биологического института ТГУ (г. Томск).

Светлик Михаил Васильевич – доцент кафедры медицинской и биологической кибернетики медико-биологического факультета СибГМУ (г. Томск).

✉ Бушов Юрий Валентинович, тел. 8 (3822) 52-96-00; e-mail: bushov@bio.tsu.ru

PHASE INTERACTION BETWEEN EEG RHYTHMS IN THE STUDY OF PROCESSES OF TIME PERCEPTION

Bushov Yu.V.¹, Svetlik M.V.²

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

The present study pursued to investigate the role of phase interactions between EEG rhythms in the process of the perception of time. The purpose of the study was to analyse the dependence of these interactions on the type and stage of the activity being performed, as well as on the individual characteristics of a human. For this purpose, 27 boys and 29 girls, all university students, were asked to reproduce and measure short intervals of time (200 and 800 ms), during which their EEG was recorded in frontal, central, parietal, temporal, and occipital lobes, according to the system 10–20%. While studying phase interactions between EEG rhythms, we used wavelet bispectral analysis and calculated the bicoherence function. As it follows from the conducted research, most often close phase interactions are observed between the gamma-rhythm and other rhythms of EEG or between different frequencies of the gamma-rhythm. It was established that the phase interactions under study were influenced by the factors of “sex”, “activity type”, and “activity stage”. The study showed correlations of phase interactions with the levels of intellect, extraversion, neuroticism, with the particularities of the lateral organisation of brain, and the accuracy of time perception.

KEY WORDS: perception of time, phase interactions, EEG rhythms.

Bulletin of Siberian Medicine, 2014, vol. 13, no. 6, pp. 121–125

References

- Freeman W. J. Mesoscopic neurodynamics: From neuron to brain. *J. Physiol. (France)*, 2000, vol. 94, no. 5/6, pp. 303–322.
- Cukerman V.D. Matematicheskaja model' fazovogo kodirovaniya sobytij v mozge [The mathematical model of phase encoding events in the brain]. *Matematicheskaja biologija i bioinformatika* 2006, vol. 1, no. 1, pp. 97–103 (in Russian).
- Ajzenk G.Yu. *Struktura lichnosti*: per. s angl. St. Petersburg, Yuventa Publ.; Moscow, KSP+ Publ., 1999. 464 p. (in Russian).
- Ajzenk G.Yu. *Klassicheskie IQ testy* [Classic IQ tests]. Moscow, JeKSMO-Press, 2001. 192 p. (in Russian).
- Kok Ye.P., Kochergina V.S., Yakusheva L.V. Opredelenie dominantnosti polusharija pri pomoshhi dihoticheskogo proslushivaniya rechi [Determination of hemisphere dominance using dichotic listen in the speech]. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti*, 1971, vol. 21, no. 5, pp. 59–72 (in Russian).
- Leutin V.P., Nikolayeva Ye.I. *Psihofiziologicheskie mekhanizmy adaptatsii i funkcional'naya asimmetrija mozga* [Psychophysiological mechanisms of adaptation and functional asymmetry of the brain]. Novosibirsk, Science Publ., 1988. 193 p. (in Russian).
- Gnezditsky V.V. *Obratnaya zadacha EEG i klinicheskaya elektroencefalografiya* [The inverse problem of EEG and clinical electroencephalography]. Moscow, MEDpress-inform Publ., 2004. 624 p. (in Russian).
- Koronovskiy A.A., Khramov A.Ye. *Nepreryvnyi veivletnyi analiz i ego prilozheniya* [Continuous wavelet analysis and its applications]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2003. 176 p. (in Russian).
- Volf N.V. *Polovye razlichiya funkcional'noi organizatsii protsessov polusharnoi obrabotki rechevoi informatsii* [Sex differences in the functional organization of hemispheric processing processes of verbal information]. Rostov-on-Don, CVVR Ltd. Publ., 2000. 240 p. (in Russian).
- Razumnikova O.M. *Otazhenie lichnostnyh svojstv v funkcional'noj aktivnosti mozga* [A personal reflection properties in the functional activity of the brain]. Novosibirsk, Science Publ., 2005. 135 s. (in Russian)
- Sokolov E.N. Problema geshtal'ta v neirobiologii [The problem of Gestalt in neuroscience]. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti – Journal of Higher Nervous Activity*, 1996, vol. 46, no. 2, pp. 229–240 (in Russian).

Busov Yuri V., National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

Svetlik Mikhail V., Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation.

