

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

УДК 612.821.3

Ю.В. Бушов¹, М.В. Светлик², Е.П. Крутенкова¹

¹Томский государственный университет (г. Томск)

²Сибирский государственный медицинский университет (г. Томск)

МЕЖПОЛУШАРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ВЫСОКО- И НИЗКОЧАСТОТНЫМИ РИТМАМИ ЭЭГ ПРИ ВОСПРИЯТИИ КОРОТКИХ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (номер конкурса НК-481П) и гранта РГНФ № 11-36-00372a2.

У 7 юношей и 14 девушек в возрасте от 18 до 26 лет исследовали межполушарные фазовые взаимодействия между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ. Проведенные исследования показали, что на изучаемые фазовые взаимодействия существенное влияние оказывают пол испытуемого, вид и этап выполняемой деятельности. Установлено, что чаще всего тесные фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом частотой от 30 до 40 Гц и альфа-, бета- и тета-активностью мозга. Обнаружены статистически значимые корреляции между уровнем исследуемых фазовых взаимодействий и показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма и латеральной организации мозга. Оказалось, что характер обнаруженных корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности. Предполагается, что исследуемые фазовые взаимодействия могут быть результатом синаптического облегчения, а также дистантных полевых взаимодействий между нейронами.

Ключевые слова: межполушарные фазовые взаимодействия; высоко- и низкочастотные ритмы ЭЭГ; индивидуальные особенности человека; восприятие времени.

Введение

Выяснение механизмов функционального объединения нейронов для осуществления совместной деятельности является одной из наиболее актуальных проблем современной нейрофизиологии. В работах М.Н. Ливанова и его учеников [1–5] показана важная роль в этих процессах пространственной частотной синхронизации электрической активности мозга. Однако такой механизм объединения нейронов невозможен, если собственные частоты автоколебаний осцилляторов (нейронных популяций, нейросетей) значительно различаются. В этих случаях существенную роль в функциональном объединении нейронов могут играть фазовые взаимодействия между отдельными осцилляторами, которые проявляются во взаимодействии между разными ритмами ЭЭГ. Вместе с тем роль этих

взаимодействий в функциональном объединении нейронов, в системной деятельности мозга практически не изучена. Учитывая это, цель исследований – изучение межполушарных фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ, а также зависимости этих взаимодействий от индивидуальных особенностей человека, вида и этапа интеллектуальной деятельности, связанной с восприятием коротких интервалов времени.

Материалы и методики исследования

В исследованиях участвовали добровольцы, практически здоровые юноши (7 человек) и девушки (14 человек) в возрасте от 18 до 26 лет, учащиеся томских вузов. В ходе предварительного обследования с помощью тестов Г. Айзенка [6, 7] исследовали вербальный (ВИ) и невербальный (НВИ) интеллект, а также уровни экстраверсии (Э) и нейротизма (Н). С помощью батареи стандартных тестов исследовали особенности латеральной организации мозга. В частности, методом анкетирования [8], по показателю мануального предпочтения (МП), выявляли ведущую руку, а с помощью дихотического прослушивания слов [9] по величине коэффициента правого уха (КПУ) определяли речевое полушарие.

Проведены две серии наблюдений с репродукцией и отмериванием интервалов времени длительностью 200 и 800 мс при наличии и отсутствии обратной связи о результатах деятельности. Интервалы времени в серии с репродукцией длительности зрительных сигналов задавались невербальными стимулами (светлый квадрат со стороной 2 см, появляющийся на 200 или 800 мс в центре затемненного экрана монитора), в серии с отмериванием длительности временных интервалов – цифрами (0,2 или 0,8 с). Длительность указанных временных интервалов воспроизводилась и отмеривалась 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 секунду на экране монитора спустя секунду после воспроизведения или отмеривания каждого интервала времени. При этом угловые размеры предъявляемых 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 ДООС, его размер соответствовал 16pt Word. О точности репродукции или отмеривания интервалов времени судили по величине и модулю относительной ошибки воспроизведения (отмеривания). 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 монополярно 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. Запись ЭЭГ осуществлялась в покое при закрытых и открытых глазах (не менее 20 с) в начале и в конце исследования (для контроля состояния обследуемого), а также при восприятии времени. С целью исключения артефактов, связанных с движением глаз,

регистрировали ЭОГ. В последующем из анализа исключались участки записи ЭЭГ, на которых имелись окулографические или любые другие артефакты. Электроды для записи ЭОГ устанавливали на верхнее и нижнее веко левого глаза испытуемого. При вводе аналоговых сигналов в ЭВМ частота дискретизации составляла 250 Гц. С целью контроля мозгового происхождения гамма-ритма использовали метод дипольной локализации [10]. В последующую обработку включались только те «безартефактные» участки записи ЭЭГ, на которых источники гамма-ритма локализовались внутри мозга. При изучении фазовых взаимодействий между гамма-колебаниями и низкочастотными составляющими ЭЭГ использовали вейвлетный биспектральный анализ [11] и подсчитывали функцию бикогерентности. В качестве интегральной характеристики уровня фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ (0,5–30 Гц) использовали полусумму значений этой функции в исследуемом частотном диапазоне ЭЭГ. При анализе корреляционных связей между исследуемыми показателями бикогерентности и индивидуальными особенностями подсчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена (ККС). Для оценки влияния исследуемых факторов («пол», «режим деятельности», «этап деятельности» и др.) на фазовые взаимодействия использовали многофакторный дисперсионный анализ для повторных наблюдений. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакетов прикладных программ StatSoft Statistica 6.0 и MatLab 6.5.

Результаты исследования и обсуждение

Бикогерентный анализ позволил обнаружить существование отчетливых межполушарных фазовых связей между гамма-ритмом и низкочастотными ритмами ЭЭГ (0,5–30 Гц) при разных режимах восприятия времени и на разных этапах выполняемой деятельности. Установлено, что чаще всего тесные фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом частотой от 30 до 40 Гц и альфа-, бета- и тета-активностью мозга. Численные значения функции бикогерентности на указанных частотах превышают 0,8. Обнаружено, что на указанные фазовые взаимодействия существенное влияние оказывают факторы «пол» и «этап деятельности». Результаты дисперсионного анализа, характеризующие совместное влияние факторов «пол» и «этап деятельности» на межполушарные фазовые взаимодействия при отмеривании интервалов времени при наличии и отсутствии обратной связи о результатах деятельности, представлены соответственно в табл. 1, 2.

Таблица 1

Совместное влияние факторов «пол» и «этап деятельности» на межполушарные фазовые взаимодействия между гамма-ритмом и низкочастотными ритмами ЭЭГ при отмеривании длительности с обратной связью о результатах деятельности

Отв.	F	p
F3-T6	2,7590	0,03
C3-T4	2,5660	0,04
C3-T6	2,6052	0,04
T5-T6	2,7575	0,03

Примечание: Отв. – отведения ЭЭГ; F – найденное значение критерия Фишера по результатам дисперсионного анализа; p – уровень значимости (достоверным считали показатель при $p < 0,05$).

Таблица 2

Совместное влияние факторов «пол» и «этап деятельности» на межполушарные фазовые взаимодействия между гамма-ритмом и низкочастотными ритмами ЭЭГ при отмеривании длительности без обратной связи о результатах деятельности

Отв.	F	p
F3-C4	3,1656	0,03
F3-T6	3,7584	0,01
P3-T4	3,7482	0,01

Примечание. Обозначения те же, что и в табл. 1.

Результаты дисперсионного анализа позволили также обнаружить статистически значимое влияние факторов «пол» и «режим деятельности» на исследуемые фазовые взаимодействия. Результаты дисперсионного анализа, характеризующие совместное влияние факторов «пол» и «режим деятельности» на исследуемые фазовые взаимодействия на этапе деятельности «первое нажатие на клавишу пробел», представлены на табл. 3.

Таблица 3

Совместное влияние факторов «пол» и «режим деятельности» на межполушарные фазовые взаимодействия между гамма-ритмом и низкочастотными ритмами ЭЭГ на этапе деятельности «первое нажатие на клавишу пробел»

Отв.	F	p
O1-T6	3,7183	0,02
F3-C4	3,7495	0,01
F3-T6	3,2241	0,03
P3-P4	3,6907	0,02
P3-T6	3,0379	0,03
T5-P4	3,2981	0,02
T5-T6	3,1592	0,03

Примечание. Обозначения те же, что и в табл. 1.

Проведенный корреляционный анализ позволил обнаружить наличие статистически значимых корреляций между уровнем межполушарных фазовых связей и показателями вербального и невербального интеллекта, а также показателями экстраверсии (Э), нейротизма (Н), мануального предпочтения (МП) и коэффициентом правого уха (КПУ). Установлено, что характер обнаруженных 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 фазовых связей с показателями экстраверсии (ККС варьирует от $-0,63$ до $-0,84$, $p < 0,01$) и нейротизма (ККС варьирует от $-0,59$ до $-0,63$, $p < 0,01$), и положительные – с коэффициентом правого уха (ККС = $0,55$, $p < 0,05$). У юношей в тот же период деятельности обнаружены положительные корреляции уровня фазовых связей с показателями интеллекта (ККС варьирует от $0,76$ до $0,90$, $p < 0,01$), мануального предпочтения (ККС = $0,78$, $p < 0,03$) и коэффициентом правого уха (ККС = $0,82$, $p < 0,02$). В ряде случаев различия между значениями соответствующих ККС у мужчин и женщин статистически значимы. Так, например, если у мужчин ККС, характеризующий связь уровня фазовых взаимодействий с невербальным интеллектом

на этапе за 100 мс до начала стимула, составляет 0,9, то у женщин в тот же период деятельности соответствующий ККС статистически значимо отличается от него ($p < 0,05$) и составляет – 0,24. Процент от максимально возможного числа (36) статистически значимых коэффициентов корреляции у мужчин и женщин между уровнем межполушарных фазовых связей и указанными показателями на разных этапах деятельности, связанной с отмериванием длительности без обратной связи, представлен в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Процент статистически значимых коэффициентов корреляции у мужчин (м) и женщин (ж) между уровнем межполушарных фазовых взаимодействий и показателями вербального (ВИ1, ВИ2) и невербального (НВИ) интеллекта на разных этапах деятельности, связанной с отмериванием длительности без обратной связи

Этап деятельности	Процент значимых корреляций с НВИ		Процент значимых корреляций с ВИ1		Процент значимых корреляций с ВИ2	
	м	ж	м	ж	м	ж
За 100 мс до стимула	13,9	8,3	0	2,8	8,3	2,8
Начало стимула	8,3	13,9	0	11,1	5,5	5,5
100 мс после начала стимула	19,4	8,3	8,3	2,8	0	5,5
200 мс после начала стимула	13,9	16,7	8,3	11,1	5,5	0
300 мс после начала стимула	16,7	19,4	13,9	11,1	8,3	0
400 мс после начала стимула	13,9	8,3	8,3	16,7	0	5,5

Примечание. ВИ1 и ВИ2 – показатели вербального интеллекта, который оценивался соответственно по данным словесного и числового тестов Г. Айзенка, НВИ – показатель невербального интеллекта, оценивался по данным зрительно-пространственного теста Г. Айзенка.

Таблица 5

Процент статистически значимых коэффициентов корреляции у мужчин (м) и женщин (ж) между уровнем межполушарных фазовых взаимодействий и показателями экстраверсии (Э), нейротизма (Н), мануального предпочтения (МП) и коэффициентом правого уха (КПУ) на разных этапах деятельности, связанной с отмериванием длительности без обратной связи

Время, мс	Процент значимых корреляций с Э		Процент значимых корреляций с Н		Процент значимых корреляций с МП		Процент значимых корреляций с КПУ	
	м	ж	м	ж	м	ж	м	ж
1	2	3	4	5	6	7	8	9
За 100 мс до начала стимула	0	2,8	11,1	0	0	5,5	0	11,1

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Начало стимула	8,3	5,5	2,8	5,5	8,3	8,3	8,3	5,5
100 мс после начала стимула	0	0	2,8	8,3	2,8	5,5	8,3	5,5
200 мс после начала стимула	11,1	27,8	2,8	5,5	5,5	2,8	5,5	2,8
300 мс после начала стимула	2,8	2,8	5,5	2,8	0	2,8	19,4	8,3
400 мс после начала стимула	5,5	0	2,8	0	2,8	8,3	0	0

Таким образом, проведенные исследования показали, что на изучаемые фазовые взаимодействия существенное влияние оказывают пол испытуемого, вид и этап выполняемой деятельности. Установлено, что чаще всего тесные фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом частотой от 30 до 40 Гц и альфа-, бета- и тета-активностью мозга. Обнаружены статистически значимые корреляции между уровнем исследуемых фазовых взаимодействий и показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма и латеральной организации мозга. Оказалось, что характер обнаруженных корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности.

Сходные результаты нами были получены ранее при исследовании внутриполушарных фазовых взаимодействий [12, 13]. Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые фазовые взаимодействия информативны и отражают и вид, и этап выполняемой деятельности, и индивидуальные особенности человека. Вероятно, эти взаимодействия характеризуют процессы внутримозговой интеграции и их динамику при выполнении предлагаемой деятельности. В связи с этим большой интерес представляет вопрос, каким образом формируются указанные фазовые взаимодействия между разными ритмами ЭЭГ, с которыми, как мы полагаем, связаны разные нейронные сети. Теоретически возможны два таких механизма. Первый может быть связан с синаптическим облегчением, следствием которого являются повышение проводимости синаптических контактов и установление связей между разными группами нейронов. Второй может быть связан с дистантными полевыми взаимодействиями между нейронами.

Первый механизм представляется более инертным, так как при выработке условных рефлексов, обычно требуется многократное сочетание условного стимула с безусловным. Кроме того, с этих позиций трудно объяснить быстрые перестройки корковых, в том числе и фазовых, взаимодействий, которые занимают буквально несколько миллисекунд и сопровождают различные этапы выполняемой деятельности. Поэтому более предпочтительным является второй механизм, о возможном существовании которого свидетельствуют некоторые литературные данные. В частности, в одной из новейших теорий

сознания [14] приводятся следующие аргументы в пользу существования дистантных полевых взаимодействий между нейронами:

- мозг человека и животного может создавать изменяющееся электрическое поле напряженностью до нескольких десятков вольт на метр;
- ламинарная организация мозговых структур (кора, гиппокам и др.), характеризующаяся слоистым расположением нейронов, может усиливать локальные электрические поля;
- электрическое поле мозга может вызывать перераспределение зарядов как внутри, так и снаружи нервных клеток и, таким образом, изменять их активность;
- в мембранах нервных клеток имеются потенциалзависимые ионные каналы, которые могут быть чувствительны к воздействию электрического поля мозга;
- в мозге имеются нервные клетки с очень низким порогом возбуждения, которые могут переходить в возбужденное состояние при изменении напряженности электрического поля мозга;
- возбуждение, или «запуск», одного нейрона может влиять на состояние нескольких сотен соседних нейронов, а синхронный «запуск» нескольких групп нейронов может влиять на состояние нескольких миллионов распределенных нейронов.

Все это позволяет предположить, что фазовые связи между разными ритмами ЭЭГ могут быть не только результатом синаптического облегчения, но также результатом дистантных полевых взаимодействий между разными группами нейронов, и такие взаимодействия могут играть очень важную роль в механизмах внутримозговой интеграции.

Выводы

1. Обнаружены межполушарные фазовые связи между гамма-ритмом и низкочастотными ритмами ЭЭГ. Чаще всего указанные связи наблюдаются между гамма-ритмом частотой от 30 до 40 Гц и альфа-, бета- и тета-активностью мозга.

2. Установлено, что на изучаемые фазовые взаимодействия существенное влияние оказывают пол испытуемого, вид и этап выполняемой деятельности.

3. Обнаружены статистически значимые корреляции между уровнем исследуемых фазовых взаимодействий и показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма и латеральной организации мозга. Характер этих корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности.

Литература

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. Свидерская Н.Е., Королькова Т.А. Влияние свойств нервной системы и темперамента на пространственную организацию ЭЭГ // Журнал высшей нервной деятельности. 1996. Т. 46, № 5. С. 849–858.
4. Свидерская Н.Е., Королькова Т.А. Пространственная организация электрических процессов мозга: проблемы и решения // Журнал высшей нервной деятельности. 1997. Т. 47, № 5. С. 792.
5. Думенко В.Н. Высокочастотные компоненты ЭЭГ и инструментальное обучение. М. : Нука, 2006. 151 с.
6. Айзенк Г.Ю. Классические IQ тесты. М.: ЭКСМО-Пресс, 2001. 192 с.
7. Лучшие психологические тесты для профотбора и профориентации. Петрозаводск: Петроком, 1992. 316 с.
8. Леутин В.П., Николаева Е.И. Психофизиологические механизмы адаптации и функциональная асимметрия мозга. Новосибирск : Наука, 1988. 193 с.
9. Кок Е.П., Кочергина В.С. Якушева Л.В. Определение доминантности полушария при помощи дихотического прослушивания речи // Журнал высшей нервной деятельности. 1971. Т. 21, № 5. С. 59–72.
10. Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М. : МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.
11. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М. : Физматгиз, 2003. 176 с.
12. Бушов Ю.В., Светлик М.В., Ходанович М.Ю. О функциональном значении высокочастотной электрической активности мозга в процессах восприятия времени // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2007. № 1. С. 87–95.
13. Бушов Ю.В., Светлик М.В., Крутенкова Е.П. Гамма-активность коры головного мозга: связь с интеллектом и точностью восприятия времени // Физиология человека. 2010. Т. 36, № 4. С. 1–7.
14. McFadden J. Synchronous Firing and Its Influence on the Brain's Electromagnetic Field: Evidence for an Electromagnetic Field Theory of Consciousness // Journal of Consciousness Studies. 2002. Vol. 9, № 4. P. 23–50.

Поступила в редакцию 15.05.2011 г.

Jury V. Bushov¹, Michael V. Svetlik², Elena P. Krutenkova¹

¹Biological Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

INTERHEMISPHERIC PHASE INTERACTIONS BETWEEN HIGH-FREQUENCY AND LOW-FREQUENCY RHYTHMS OF EEG IN SHORT TIME INTERVALS PERCEPTION

Interhemispheric phase interaction between high- and low-frequency rhythms of EEG was investigated in 7 males and 14 females aged from 18 to 26 years old. During preview observation with H. Eysenk's tests, verbal and non-verbal intellect, extraversion-introversion and neuroticism level was determined. Interhemispheric asymmetry was investigated with using standard tests set for identification dominant hand and speech-hemisphere. Two modes of observations (reproduction and admeasuring of 200 ms and 800 ms time intervals with and without feedback) were provided.

In one mode, time intervals were presented as non-verbal stimuli (light square with 2 cm side which was presented in the center of monitor screen). In another set, digitals stimuli (in admeasuring intervals) were used.

As a feedback signal, relative reproduction of admeasuring error in percentage of the time interval was used. EEG was recorded in sides: Cz, Fz, Pz, F3, F4, C3, C4, P3,

P4, T3, T4, T5, T6, O1, O2 under «10–20%» system with 24-canals encephalograph-analyzer. Integrated reference electrode was installed on subject's earlaps of left and right ears; earthing electrode was installed on the wrist of the right hand. Phase interaction between EEG gamma-frequency and low-frequency bands were estimated with bispectral wavelet analysis and bicoherent function. As integral characteristics of phase interaction level between EEG high- and low-rhythms (0,5–30 Hz) were used half-sum of this function in the corresponding frequency band. The correlations between these parameters were estimated with Spearman's coefficient correlation. To determine the impact of different factors ("gender", "activity type", "activity stage" etc.) on phase interaction was used repeated measures analysis. This investigations showed that gender, activity type and activity stage have a significant impact on the phase interaction. It is found that close phase interconnections between 30–40 Hz gamma-frequency and alpha-, beta-, and tetha- brain activity were the most frequent. Statistically significant correlations between phase interaction level and intelligence quotient, extraversion, neuroticism and interhemispheric asymmetry were found. The result of this research showed that the kind of correlations is completely different from males and females and depends on the activity type and activity stage. It is proposed that the investigated phase interaction could be the results of synaptic potentiation as well as distant field interneuronal interactions.

Key words: interhemispheric phase interactions; high- and low-frequency rhythms of EEG; humans' personal traits; perception of time.

Received May 15, 2011