

УДК 612.821.3

doi: 10.17223/19988591/19/10

Ю.В. Бушов<sup>1</sup>, М.В. Светлик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Биологический институт Томского государственного университета (г. Томск)

<sup>2</sup>Сибирский государственный медицинский университет (г. Томск)

## ФАЗОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ВЫСОКО- И НИЗКОЧАСТОТНЫМИ РИТМАМИ ЭЭГ И ИХ РОЛЬ В КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

Результаты исследования представлены на Международной молодежной школе «Организация познавательной деятельности и функциональных систем мозга на разных этапах развития» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК № 14.740.11.0183).

*У 27 практически здоровых юношей и 29 девушек в возрасте от 18 до 26 лет исследовали внутри- и межполушарные фазовые взаимодействия между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ при восприятии коротких интервалов времени. Обнаружены тесные внутри- и межполушарные фазовые взаимодействия между разными ритмами ЭЭГ. Чаще всего эти взаимодействия наблюдаются между гамма-ритмом и низкочастотными составляющими ЭЭГ (0,5–30 Гц), а также между разными частотами гамма-ритма (30–70 Гц). Установлена зависимость этих взаимодействий от факторов «пол», «этап» и «режим деятельности». Обнаружены корреляции уровня фазовых взаимодействий с показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма, латеральной организации мозга и точности восприятия времени. Предполагается, что наряду с пространственной частотной синхронизацией электрической активности мозга эти взаимодействия являются эффективным механизмом функционального объединения нейронов. Полученные результаты и литературные данные свидетельствуют о том, что исследуемые фазовые взаимодействия играют важную роль в когнитивных процессах, в механизмах сознания. Высокая скорость изменения обнаруженных фазовых взаимодействий и некоторые литературные данные позволяют предположить, что эти взаимодействия могут быть не только результатом синаптического облегчения, но также дистантных полевых взаимодействий между нейронами.*

**Ключевые слова:** фазовые взаимодействия; высоко- и низкочастотные ритмы ЭЭГ; когнитивные процессы.

### Введение

Изучение природы и механизмов сознания является актуальной междисциплинарной проблемой. В процессе становления взглядов на природу сознания сформировались три основные концепции. Это концепции «светлого пятна», «информационного синтеза» и коммуникативная концепция сознания. Согласно первой концепции, предложенной И.П. Павловым в 1913 г.,

сознание связано с деятельностью «творческого участка» коры, находящегося в состоянии оптимальной возбудимости, где легко образуются новые условные связи и дифференцировки. Остальные зоны коры участвуют в обеспечении уже сформированных рефлексов и бессознательной деятельности. Вторая концепция, концепция «информационного синтеза», была предложена А.М. Иваницким в 1976 г. Согласно этой концепции важную роль в механизмах сознания играют кольцевое движение нервных импульсов по замкнутым круговым путям, повторный вход информации в одни и те же мозговые структуры и синтез разных видов информации. Третья концепция, коммуникативная концепция сознания, была впервые сформулирована П.В. Симоновым в 1981 г. Согласно этой концепции сознание возникло в процессе эволюции на базе потребности к общению и передаче знаний, а также коллективной деятельности людей. В настоящее время эти концепции в значительной степени утратили свою актуальность. В 2002 г. была предложена так называемая электромагнитная теория сознания [1], которая базируется на предположении о том, что материальным носителем сознания является электромагнитное поле мозга. В этой теории важная роль в механизмах сознания отводится дистантным полевым взаимодействиям между нейронами и, в частности, синхронному запуску нейронов. Существенным недостатком этой теории является то, что из-за отсутствия в общем случае единственного решения обратной задачи физики активация различных мозговых структур или их комбинаций может создавать совершенно одинаковые электромагнитные поля. Это означает, что разные состояния мозга и сознания будут неотличимы по характеристикам электромагнитного поля. Одним из важных аспектов проблемы сознания является выяснение механизмов функционального объединения нейронов в процессе осуществления сознательной деятельности. Работами М.Н. Ливанова и его учеников [2–6] показана важная роль в этих процессах пространственной частотной синхронизации электрической активности мозга. В тех же случаях, когда собственные частоты ритмической активности осцилляторов (нейронных популяций, нейросетей) значительно различаются, важную роль в функциональном объединении нейронов могут играть фазовые взаимодействия между отдельными осцилляторами, которые, вероятно, проявляются во взаимодействии между разными ритмами ЭЭГ. Вместе с тем роль этих взаимодействий в функциональном объединении нейронов, в когнитивных процессах практически не исследовалась.

Цель исследования – на основе изучения внутри- и межполушарных фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ при выполнении человеком интеллектуальной деятельности попытаться выяснить, какую роль играют указанные фазовые взаимодействия в когнитивных процессах и механизмах сознания.

### Материалы и методики исследования

В исследованиях участвовали добровольцы – практически здоровые юноши (27 человек) и девушки (29 человек) в возрасте от 18 до 26 лет, учащиеся томских вузов. В ходе предварительного обследования с помощью тестов Г. Айзенка [7, 8] исследовали вербальный и невербальный интеллект, а также уровни экстраверсии и нейротизма. С помощью батареи стандартных тестов исследовали особенности латеральной организации мозга с определением ведущей руки и речевого полушария [9, 10]. Для решения поставленных задач проведены 2 серии наблюдений с репродукцией и отмериванием интервалов 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) 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. ЭЭГ записывали с помощью 24-канального энцефалографа-анализатора 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 ЭОГ. 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 [11]. При изучении фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными составляющими ЭЭГ использовали вейвлетный биспектральный анализ и подсчитывали функцию бикогерентности [12]. 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», «режим деятельности») на фазовые взаимодействия использовали многофакторный дисперсионный анализ для повторных наблюдений.

### Результаты исследования и обсуждение

Проведенные исследования позволили обнаружить наличие внутри- и межполушарных фазовых связей между гамма-ритмом и альфа-, бета- и тета-

активностью мозга. Наряду с этим были обнаружены тесные фазовые связи и между низкочастотными составляющими ЭЭГ (0,5–30 Гц). Значения функции бикогерентности, найденные между отведениями Т4 и Т5 у одного из испытуемых при репродукции зрительных сигналов длительностью 200 мс без обратной связи, на этапе предъявления стимула представлены на рис. 1.

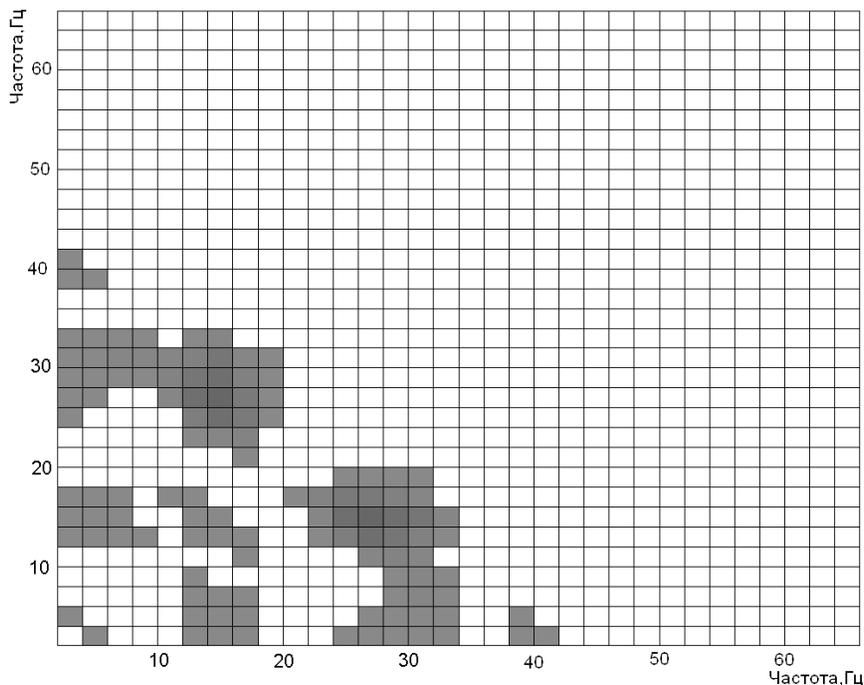


Рис. 1. Значения функции бикогерентности, найденные между отведениями Т4 и Т5 у одного из испытуемых при репродукции зрительных сигналов длительностью 200 мс без обратной связи, на этапе предъявления стимула.

На темных участках значения функции бикогерентности больше или равны 0,8, на светлых – меньше 0,8

Установлено, что на указанные 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 репродукции и отмеривании коротких интервалов времени в отсутствии обратной связи о результатах деятельности представлены в табл. 1–2.

Как следует из табл. 1 и 2, факторы «пол» и «этап деятельности» оказывают статистически значимое влияние на внутрислошарные фазовые взаимодействия между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ; результат влияния этих факторов зависит от места отведения и вида выполняемой деятельности.

Таблица 1

**Влияние факторов «пол» и «этап деятельности» на внутриполушарные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ при воспроизведении длительности сигналов без обратной связи**

Фактор	p	Отведения
Пол	0,020	C4
Этап деятельности	0,030	T3

*Примечание.* Здесь и далее в таблицах p – уровень статистической значимости.

Таблица 2

**Влияние фактора «этап деятельности» на внутриполушарные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ при отмеривании длительности без обратной связи**

Фактор	p	Отведения
Этап деятельности	0,008	C3
Этап деятельности	0,022	T6
Этап деятельности	0,003	T5

Сходные данные были получены при изучении межполушарных фазовых взаимодействий между исследуемыми ритмами ЭЭГ.

Результаты изучения совместного влияния факторов «пол» и «этап деятельности» на межполушарные фазовые взаимодействия при отмеривании коротких интервалов времени при наличии и в отсутствие обратной связи о результатах деятельности представлены в табл. 3–4.

Таблица 3

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

Отведения	F	p
F3-T6	2,76	0,03
C3-T4	2,57	0,04
C3-T6	2,60	0,04
T5-T6	2,76	0,03

*Примечание.* Здесь и далее в таблицах F – найденное значение критерия Фишера по результатам дисперсионного анализа.

Таблица 4

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

Отведения	F	p
F3-C4	3,16	0,03
F3-T6	3,76	0,01
P3-T4	3,75	0,01

Результаты дисперсионного анализа позволили также обнаружить статистически значимое влияние факторов «пол» и «режим деятельности» на

межполушарные 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 в табл. 5.

Таблица 5

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

Отведения	F	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

Наряду с этим проведенные исследования позволили обнаружить наличие статистически значимых корреляций уровня фазовых взаимодействий с показателями вербального и невербального интеллекта, уровнями экстраверсии и нейротизма, особенностями латеральной организации мозга и точностью восприятия времени. Величина найденных коэффициентов корреляций по абсолютной величине варьировала от 0,56 до 0,98 ( $p = 0,05-0,003$ ). Установлено, что характер указанных корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности. Вероятно, зависимость фазовых взаимодействий от фактора пола фактически обусловлена связанными с полом особенностями латеральной организации мозга [13]. Это подтверждают и обнаруженные корреляции уровня фазовых взаимодействий с показателем мануального предпочтения и коэффициентом правого уха [14].

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые фазовые взаимодействия информативны и отражают вид и этап выполняемой деятельности и индивидуальные особенности человека. Поскольку источниками ритмической активности мозга чаще всего являются не отдельные пейсмекерные нейроны, а нейронные сети [15], то обнаруженные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ фактически отражают нейросетевые взаимодействия. Вероятно, высокая пластичность, легкость и скорость формирования фазовых связей делают их, наряду с пространственной частотной синхронизацией электрической активности мозга, эффективным механизмом функционального объединения нейронов. Причем если в последнем случае объединение нейронных популяций обеспечивается за счет навязывания, раскачки, подстройки и сближения ритмов активности этих популяций, то в случае фазовых взаимодействий – путем модуляции ритмической активности одной популяции нейронов другой. Кроме того, методами компьютерного моделирования показано, что фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ мо-

гут обеспечивать кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге [16]. Это позволяет думать, что изучаемые фазовые взаимодействия, обеспечивая функциональное объединение нейронов, кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений, играют важную роль в когнитивных процессах, в механизмах сознания. В пользу этого свидетельствуют и обнаруженные корреляции уровня фазовых взаимодействий с точностью восприятия времени, а также показателями интеллекта, экстраверсии и нейротизма, латеральной организации мозга, от которых зависит успешность когнитивной деятельности [13]. Учитывая высокую скорость изменения обнаруженных фазовых взаимодействий и некоторые литературные данные [1], можно предположить, что эти взаимодействия могут быть не только результатом синаптического облегчения, но также дистантных полевых взаимодействий между нейронами. Особую роль в формировании указанных фазовых взаимодействий, вероятно, играет гамма-ритм. В частности, изучение результатов бикоррентного анализа показало, что чаще всего тесные внутри- и межполушарные фазовые связи наблюдаются между гамма-ритмом и другими ритмами ЭЭГ или между разными частотами гамма-ритма. Необходимо отметить, что, по мнению некоторых исследователей [17], функциональное значение высокочастотной электрической активности мозга (40–200 Гц) состоит в том, что она обеспечивает повышение эффективности синаптических входов и, тем самым, способствует функциональному объединению нейронов. Все это подтверждает выдвинутое предположение о ведущей роли гамма-ритма в формировании изучаемых фазовых взаимодействий. Поскольку при нарушениях высших психических функций и заболеваниях ЦНС наблюдается снижение мощности гамма-ритма [18], можно ожидать, что потеря сознания сопровождается редукцией фазовых связей между гамма-ритмом и другими ритмами ЭЭГ.

Все изложенное выше позволяет предложить «фазовую» концепцию сознания, согласно которой сознание связано с фазовыми нейросетевыми взаимодействиями. При этом каждому состоянию мозга и сознания соответствует определенный «фазовый паттерн», являющийся характерным коррелятом сознания.

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволили обнаружить наличие внутри- и межполушарных фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ в условиях интеллектуальной деятельности, связанной с восприятием коротких интервалов времени. Установлена зависимость этих взаимодействий от факторов «пол», «этап» и «режим деятельности». Обнаружены корреляции уровня фазовых взаимодействий с показателями интеллекта, экстраверсии, нейротизма, латеральной организации мозга и точности восприятия времени. Полученные результаты и литературные данные свидетельствуют о том, что исследуемые фазовые вза-

имодействия играют важную роль в когнитивных процессах, в механизмах сознания. Предполагается, что эти взаимодействия, наряду с пространственной частотной синхронизацией электрической активности мозга, являются эффективным механизмом функционального объединения нейронов. Имеющиеся литературные данные позволяют предположить, что указанные фазовые взаимодействия могут быть не только результатом синаптического облегчения, но также дистантных полевых взаимодействий между нейронами.

### Литература

1. *McFadden J.* Synchronous Firing and Its Influence on the Brain's Electromagnetic Field: Evidence for an Electromagnetic Field Theory of Consciousness // *J. of Consciousness Studies*. 2002. Vol. 9, № 4. P. 23–50.
2. *Ливанов М.Н.* Пространственная организация процессов головного мозга. М. : Наука, 1972. 181 с.
3. *Свидерская Н.Е.* Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М. : Наука, 1987. 156 с.
4. *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.
5. *Свидерская Н.Е., Королькова Т.А.* Пространственная организация электрических процессов мозга: проблемы и решения // *Журнал высшей нервной деятельности*. 1997. Т. 47, № 5. С. 792.
6. *Думенко В.Н.* Высокочастотные компоненты ЭЭГ и инструментальное обучение. М. : Наука, 2006. 151 с.
7. *Айзенк Г.Ю.* Классические IQ тесты. М. : ЭКСМО-Пресс, 2001. 192 с.
8. *Лучшие психологические тесты для профотбора и профориентации.* Петрозаводск : Петроком, 1992. 316 с.
9. *Леутин В.П., Николаева Е.И.* Психофизиологические механизмы адаптации и функциональная асимметрия мозга. Новосибирск : Наука, 1988. 193 с.
10. *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.
11. *Гнездицкий В.В.* Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М. : МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.
12. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М. : Физматгиз, 2003. 176 с.
13. *Вольф Н.В.* Половые различия функциональной организации процессов полушарной обработки речевой информации. Ростов на/Д : ЦВВР, 2000. 240 с.
14. *Бушов Ю.В., Светлик М.В., Крутенкова Е.П.* Межполушарные фазовые взаимодействия между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ при восприятии коротких интервалов времени // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2011. № 3 (15). С. 161–171.
15. *Николос Дж. Г., Мартин А.Р., Валлас Б.Дж., Фукс П.А.* От нейрона к мозгу. Издание второе. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
16. *Цукерман В.Д.* Математическая модель фазового кодирования событий в мозге // *Математическая биология и биоинформатика*. 2006. Т. 1, № 1. С. 97.
17. *Сорокина Н.Д., Селицкий Г.В., Косицин Н.С.* Нейробиологические исследования биоэлектрической активности мозга в диапазоне гамма-ритма у человека // *Успехи физиологических наук*. 2006. Т. 17, № 3. С. 3–10.

18. Соколов Е.Н. Проблема гештальта в нейробиологии // Журнал высшей нервной деятельности. 1996. Т. 46, № 2. С. 229–240.

Поступила в редакцию 26.03.2012 г.

*Tomsk State University Journal of Biology. 2012. № 3 (19). P. 137–145*

doi: 10.17223/19988591/19/10

**Yury V. Bushov, Michael V. Svetlik**

*Biological Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia  
Siberian State Medical University, Tomsk, Russia*

### **PHASE INTERACTION BETWEEN HIGH-AND LOW-FREQUENCY EEG RHYTHMS AND THEIR ROLE IN COGNITIVE PROCESSES**

*From 27 healthy boys and 29 girls aged 18 to 26 years investigated the intra- and interhemispheric phase of interaction between high- and low-frequency EEG rhythms of reproduction and measure short time intervals in the presence and absence of feedback on performance. In a preliminary study investigated the verbal and nonverbal intelligence, levels of extraversion and neuroticism, particularly the lateral organization of the brain with the definition of a leading hand and speech hemisphere. Time Intervals in the series given as non-verbal stimuli (white square with a side of 2 cm, which appears in the center of a darken monitor) at another series – the figures (for measuring length of time Interval). Tested persons have been double-clicking on the «gap» to reproduce or measure time intervals. Like a feedback signal was a percentage expressed relative error of measuring reproduction or specified time interval. EEG were recorded using 24-channel analyzer encephalograph in the following diversion of the electrodes: Cz, Fz, Pz, F3, F4, C3, C4, P3, P4, T3, T4, T5, T6, O1, O2 in accordance with the scheme «10–20%». To study of phase interactions between high- and low-frequency components of EEG used Wavelet and bispectral analysis calculate the function of bicohere. As an integral characteristic of the phase-level interactions between the rhythms of the EEG used half the sum of the values of this function in the investigated frequency range of the EEG (0,5–70 Hz). To analysis of correlations between the studied parameters calculated a Spearman rank correlation coefficient. To assess the influence of the investigated factors («sex», «stage of activity» «kind of activity») on the phase interaction using ANOVA analysis for repeated observations.*

*Strong intra- and interhemispheric phase interaction between high- and low-frequency EEG rhythms was found. Most often, these interactions are observed between gamma rhythms and low-frequency components of the EEG (0,5–30 Hz), as well as between different frequencies of gamma rhythm (30–70 Hz). The dependence of the interactions in the factors «sex», «stage of activity», «kind of activity» was established. The correlation between phase-level interactions and the indicators of intelligence, extraversion, neuroticism, the lateral organization of the brain and the accuracy of time perception. It is assumed that along with the spatial frequency synchronization of brain electrical activity it have are an effective mechanism of functional association neurons. Obtained results and published data suggest that the investigated phase interactions play an important role in cognitive processes in the consciousness mechanisms. The high rate of change of the detected phase interactions, and some literature data suggest that these interactions can't be only the result of synaptic facilitation and can be as the interactions of distant field between neurons.*

**Key words:** *phase interactions; high- and low-frequency EEG rhythms; cognitive processes.*

*Received March 26, 2012*