

РОЛЬ ФАЗОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ВЫСОКО- И НИЗКОЧАСТОТНЫМИ РИТМАМИ ЭЭГ В КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ И МЕХАНИЗМАХ СОЗНАНИЯ

Ю.В. Бушов (Томск)

Аннотация. На основе анализа собственных и литературных данных сформулирована гипотеза о важной роли в когнитивных процессах, механизмах сознания фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ. Предполагается, что указанные фазовые взаимодействия обеспечивают функциональное объединение нейронов, кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге и являются результатом дистантных полевых взаимодействий между нейронами.

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

Изучение природы и механизмов сознания является актуальной междисциплинарной проблемой. В процессе становления взглядов на природу сознания сформировались три основные 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 сформулирована П.В. Симоновым в 1981 г. Согласно ей 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 [19], которая базируется на предположении, что материальным носителем сознания является электромагнитное поле мозга. В этой теории важная роль в механизмах сознания отводится дистант-

ным 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. В работах М.Н. Ливанова и его учеников [6, 10, 13–15] 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. Учитывая это, в задачи настоящего исследования автор включил следующее:

- обобщить результаты исследований внутри- и межполушарных фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ при восприятии человеком коротких интервалов времени;
- выяснить, какую роль играют указанные фазовые взаимодействия в когнитивных процессах, в механизмах сознания.

Материал и методы исследования

В исследованиях участвовали добровольцы, практически здоровые юноши (27 человек) и девушки (29 человек) в возрасте от 18 до 26 лет, студенты томских вузов. В ходе предварительного обследования с помощью тестов Г. Айзенка [1, 11] исследовали вербальный и невербальный интеллект, а также уровни экстраверсии и нейротизма. С помощью батареи стандартных тестов определили особенности латеральной организации мозга, ведущую руку и речевое полушарие [7, 9].

Для решения поставленных задач проведены 2 серии наблюдений с репродукцией и фиксацией интервалов времени длительностью 200 и 800 мс при наличии и отсутствии обратной связи. 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 [5]. При изучении фазовых взаимодействий между высоко- и низкочастотными составляющими ЭЭГ использовали 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 являются суммой или разностью двух других, то функция бикогерентности значительно отличается от нуля, и это свидетельствует о том, что фазы трех частот связаны. В качестве интегральной характеристики уровня фазовых взаимодействий между ритмами ЭЭГ использовали полусумму значений этой функции в исследуемом частотном диапазоне (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 для повторных наблюдений.

Результаты

Проведенные исследования позволили обнаружить наличие внутри- и межполушарных фазовых связей между гамма-ритмом и альфа-, бета- и тета-активностью мозга [2, 3]. Значения функции бикогерентности на указанных частотах превышают 0,8. Наряду с этим были обнаружены тесные фазовые связи между низкочастотными составляющими ЭЭГ (0,5–30 Гц), а также между разными частотами гамма-ритма.

Методом дисперсионного анализа установлено, что на указанные фазовые взаимодействия статистически значимое влияние ($p = 0,02 \div 0,008$) оказывают факторы «пол», «этап деятельности» и «вид деятельности» [2, 3].

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 [2, 3]. Величина найденных коэффициентов корреляции Спирмена по абсолютной величине варьировала от 0,56 до 0,98 ($p = 0,05 \div 0,003$). Установлено, что характер указанных корреляций отличается у юношей и девушек, зависит от вида и этапа выполняемой деятельности [2, 3].

Обсуждение и выводы

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые фазовые взаимодействия информативны и отражают вид и этап деятельности и индивидуальные особенности человека. Вероятно, зависимость фазовых взаимодействий от фактора «пол» обусловлена связанными с полом особенностями латеральной организации мозга [4]. Это подтверждают и обнаруженные корреляции уровня фазовых взаимодействий с показателем мануального предпочтения и коэффициентом правого уха [3].

Поскольку источниками ритмической активности мозга чаще всего являются не отдельные пейсмекерные нейроны, а нейронные сети [12], то обнаруженные фазовые взаимодействия между ритмами ЭЭГ фактически отражают нейросетевые взаимодействия, прежде всего взаимодействия между корковыми осцилляторами. 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 их активности, 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 могут обеспечивать кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге [18]. 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 [4].

Учитывая высокую скорость изменения обнаруженных фазовых взаимодействий и некоторые литературные данные [19], 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 бикогерентного 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.

По мнению некоторых исследователей [16], функциональное значение высокочастотной электрической активности мозга (40–200 Гц) состоит в том, что она обеспечивает повышение эффективности синаптических входов и 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, как правило, наблюдается снижение мощности гамма-ритма [17], можно ожидать, что потеря сознания сопровождается редукцией фазовых связей между гамма-ритмом и другими ритмами ЭЭГ. Все это позволяет предположить, что каждому состоянию мозга и сознания соответствует определенный «фазовый паттерн», являющийся характерным коррелятом сознания.

Таким образом, анализ полученных и литературных данных позволил установить, что исследуемые фазовые взаимодействия играют важную роль в когнитивных процессах, в механизмах сознания. Вероятно, это связано с тем, что фазовые взаимодействия обеспечивают функциональное объединение нейронов, кодирование, сжатие и координацию нейронных сообщений в мозге и являются результатом дистантных полевых взаимодействий между нейронами.

Литература

1. Айзенк Г.Ю. Классические IQ тесты. М. : ЭКСМО-Пресс, 2001. 192 с.
2. 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.
3. Бушов Ю.В., Светлик М.В., Крутенкова Е.П. Межполушарные фазовые взаимодействия между высоко- и низкочастотными ритмами ЭЭГ при восприятии коротких интервалов времени // Вестник ТГУ. Биология. 2011. № 3 (15). С. 161–171.
4. Вольф Н.В. Половые различия функциональной организации процессов полушарной обработки речевой информации. Ростов н/Д : Изд-во ООО «ЦВВР», 2000. 240 с.
5. Гнездицкий В.В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М. : МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.
6. Думенко В.Н. Высокочастотные компоненты ЭЭГ и инструментальное обучение. М. : Наука, 2006. 151 с.

7. 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.
8. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М. : Физматгиз, 2003. 176 с.
9. Леутин В.П., Николаева Е.И. Психофизиологические механизмы адаптации и функциональная асимметрия мозга. Новосибирск : Наука, 1988. 193 с.
10. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М. : Наука, 1972. 181 с.
11. Лучшие психологические тесты для профотбора и профориентации. Петрозаводск : Петроком, 1992. 316 с.
12. Николос Дж.Г., Мартин А.Р., Валлас Б.Дж., Фукс П.А. От нейрона к мозгу. 2-е изд. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
13. Свидерская Н.Е. Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М. : Наука, 1987. 156 с.
14. 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.
15. Свидерская Н.Е., Королькова Т.А. Пространственная организация электрических процессов мозга: проблемы и решения // Журнал высшей нервной деятельности. 1997. Т. 47, № 5. С. 792–811.
16. Соколов Е.Н. Проблема гештальта в нейробиологии // Журнал высшей нервной деятельности. 1996. Т. 46, № 2. С. 229–240.
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. Цукерман В.Д. Математическая модель фазового кодирования событий в мозге // Математическая биология и биоинформатика. 2006. Т. 1, № 1. С. 97.
19. 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.

ROLE OF PHASE INTERACTIONS BETWEEN HIGH - AND LOW-FREQUENCY RHYTHMS EEG IN COGNITIVE PROCESSES AND CONSCIOUSNESS MECHANISMS

Bushov Y.V. (Tomsk)

Summary. On the basis of the analysis of own and literary data the hypothesis about the important role in cognitive processes, mechanisms of consciousness of phase interactions between high- and low-frequency rhythms EEG is formulated. It is supposed that the specified phase interactions provide functional association нейронов, coding, compression and coordination of neural messages in a brain and grow out the interactions of distant field between neurons.

Key words: phase interactions; highly- and low-frequency rhythms EEG; cognitive processes; consciousness mechanisms.