

УДК 57.01

СИСТЕМА «ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ»: АКТУАЛЬНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЭГ-ИССЛЕДОВАНИЙ

Махин С.А.

*Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Украина
E-mail: smakhin@inbox.ru*

В статье дается краткий обзор исследований системы «зеркальных нейронов» с использованием электроэнцефалографических методов. Показана особая роль осцилляторных механизмов в альфа-диапазоне, таких как соматосенсорный мю-ритм и фи-комплекс, включающий в себя компоненты фи-1 и фи-2.

Ключевые слова: зеркальные нейроны, ЭЭГ, мю-ритм, фи-комплекс.

Концепция «зеркальных нейронов» возникла и получила первоначальное развитие около 20 лет назад в работах итальянских нейрофизиологов Дж. Риццолатти, Г. ди Пеллегрини, В. Галлезе и др. как результат экспериментов с регистрацией активности отдельных нейронов покрышечной части нижней лобной извилины у макак [1, 2]. Как оказалось, группа нейронов данной области, активирующихся в ходе выполнения приматами простейших действий, также проявляла активность и при наблюдении за аналогичными действиями, выполняемыми другими обезьянами или даже человеком. Несколько позже начали находить подобные нейроны и в других регионах коры, включая нижнюю теменную долю [3, 4] и верхнюю височную борозду [5, 6].

В отличие от приматов, прямых исследований отдельных нейронов человека с точки зрения их «зеркальных» функций до последнего времени практически не проводилось. Широкий резонанс в прошлом году получило единственное в своем роде исследование с имплантацией внутричерепных электродов больным эпилепсией, проведенное на базе калифорнийского университета UCLA [7]. С согласия пациентов биологи университета изучили активность в общей сложности 1177 нейронов медиальной корковой поверхности лобной и височной коры, значительная часть которых проявила «зеркальные» свойства. И хотя данные области не являются традиционным объектом исследований такого рода, полученные результаты все же подчеркивают сложность изучаемой проблематики.

Способность одних и тех же нервных клеток в столь обширных регионах коры отражать в своей активности процессы как реализации моторных актов, так и наблюдения за ними, стала толчком для популяризации идеи об определенной эволюции системы зеркальных нейронов (СЗМ) в ходе филогенеза высших животных. Стала распространяться точка зрения, согласно которой СЗМ для низших приматов служит в основном для понимания чужих действий [4], в то время как у высших приматов эта система эволюционировала в достаточной степени, чтобы обеспечивать

подражание посредством активации моторных свойств зеркальных нейронов в реальном времени [8]. У человека зеркальные нейроны получили еще большее развитие и стали способны отражать уже не только физические аспекты действий, но и понимание намерений, мыслей и чувств, которые стоят за этими действиями, возможно, благодаря установлению реципрокных связей с другими отделами мозга, такими как лимбическая система и медиальная часть префронтальной коры [9]. Была предложена гипотеза о том, что данный эволюционный рывок смог обеспечить формирование некоторых чисто человеческих социальных умений, таких как «теория чужого разума» (анг. «theory of mind»), эмпатия и языковая коммуникация [10].

В поддержку гипотезы о роли СЗН в формировании социальных качеств человека свидетельствуют исследования пациентов с аутистическим спектром расстройств. Сразу же вслед за предварительными данными о дисфункции СЗН у людей с аутизмом, представленными лабораторией, возглавляемой В. Рамачандраном, пять других независимых лабораторий опубликовали отчеты о своих нейрофизиологических исследованиях в пользу данной гипотезы [11–15].

Основной мишенью в электроэнцефалографических исследованиях функционирования системы «зеркальных нейронов», в силу относительной простоты регистрации, стал так называемый сенсомоторный ритм (мю-ритм). В покое нейроны сенсомоторной коры разряжаются синхронно, что позволяет регистрировать высокоамплитудные ЭЭГ-волны в альфа-диапазоне (8-13 Гц) на поверхности кожи головы в отведениях C3, Cz и C4 (см. обзор у Pineda, 2005) [16]. Использование явления десинхронизации мю-ритма как показателя активации СЗН объясняется развитыми анатомическими и физиологическими кортико-кортикальными связями между вентральной премоторной корой (которая включает в себя гипотетическую область зеркальных нейронов) и первичной сенсомоторной корой, которая, собственно, и генерирует мю-ритм [17–19]. В пользу данного метода свидетельствует, кроме того, следующие факты. Во-первых, еще эксперименты 1954 г. продемонстрировали, что, подобно зеркальным нейронам, мю-ритм специфично отражает не только осуществляемые, но и наблюдаемые, а также воображаемые действия [20]. Во-вторых, активность как зеркальных нейронов, так и мю-ритма модулируется лишь при наблюдении за биологическим движением [13] и более выражена для целенаправленных действий (в противовес нецеленаправленным) [21]. Кроме того, и зеркальные нейроны [22], и мю-ритм [23] реагируют на стимуляцию в соответствии с соматотопическим принципом. Как следствие, регистрация активности сенсомоторного ритма представляется достаточно простым и недорогим неинвазивным методом изучения функционирования СЗН.

Чувствительность мю-ритма к аспекту социальной координации при осуществлении простых действий была продемонстрирована в экспериментах Л. Оберман с коллегами [9], что, по мнению авторов, указывает на усиление роли СЗН, если стимул содержит социальные элементы. Что интересно, еще в середине прошлого века было отмечено, что степень десинхронизации мю-ритма была тем выше, чем больше испытуемый идентифицировал себя с человеком на экране, выполняющим действие [9]. В пользу данного феномена косвенно говорят также и результаты экспериментов с использованием функциональной магнитно-резонансной

томографии (фМРТ), показавшие увеличение активности в нижней лобной извилине в реакциях на стимул при наличном социальном взаимодействии [24].

В качестве еще одного примера можно привести недавно опубликованную статью канадских психологов [25], в которой была сделана попытка доказать, базируясь на регистрации амплитуды мю-ритма, что «зеркальный» эффект в моторной коре наиболее выражен при наблюдении за действиями представителей так называемых «Мы-групп» и практически не фиксируется при наблюдении за действиями представителей из «Они-групп». В данном исследовании участвовали представители различных расово-этнических общностей, проживающих в Канаде. Чем более глубокие предубеждения сложились по отношению к чужой «Они-группе», тем меньше была и активация зеркальных нейронов (мерой активности которых авторы взяли степень падения амплитуды мю-ритма в левом полушарии) при наблюдении за их действиями, вплоть до полного «молчания» этих нейронов. И хотя эффект по абсолютной величине был в целом невелик, тем не менее он оказался статистически достоверным.

В продолжение данной линии исследований, С. Келзо с коллегами разработали специальный экспериментальный комплекс для изучения ЭЭГ-эффектов динамики социальной координации [26]. Комплекс позволял двум испытуемым, совершающим вращательные движения указательным пальцем с произвольной скоростью, синхронизировать при желании свои движения, когда экран между ними становился прозрачным, в ходе чего у них регистрировалась ЭЭГ. Эксперимент продемонстрировал отчетливое падение амплитуды как мю-, так и альфа-ритма в результате возникшего социального взаимодействия. При этом величина десинхронизации не зависела от того, синхронизировали испытуемые свои действия или нет. Однако, что особенно интересно, были обнаружены два дополнительных альфа-подобных осциляторных компонента центрально-теменной локализации в правом полушарии, которые оказались чувствительными к эффективности социальной координации. Так, первый компонент, получивший название фи-1, рос по амплитуде, если испытуемые продолжали совершать движения независимо. Второй компонент, названный фи-2, увеличивал амплитуду, если испытуемые начинали синхронизировать свои движения. Был сделан вывод о том, что и мю-, и фи-ритмы являются коррелятами нейронной активности для СЗН, но при этом они играют различную роль. В то время как мю-ритм сопровождает процесс «соматосенсорного осознания» при наблюдении за совершающим действие партнером [27, 28], фи-комплекс отражает работу селективного механизма, отделяющего социальное восприятие от индивидуального.

Стоит заметить, что, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в исследованиях СЗН с помощью методов ЭЭГ, имеют место и очевидные трудности, связанные, в частности, с низкой пространственной разрешающей способности данного метода по сравнению с такими техниками нейровизуализации, как фМРТ и ПЭТ (позитронно-эмиссионная томография), не говоря уже о регистрации активности отдельных нейронов. Вследствие этого, зачастую бывает сложно отделить мю-активность от накладывающейся на нее затылочной альфа-активности. Требование учета возможности генерации еще одного дополнительного

осцилляторного фи-комплекса еще более усложняет задачу. В любом случае, исследуемая проблематика требует еще многих лет экспериментального изучения, прежде чем результаты работ в данном направлении будут возможно относительно успешно свести к единому знаменателю.

ВЫВОД

В заключение, хотелось бы подчеркнуть, что сама концепция зеркальных нейронов все еще достаточно молода и окружена множеством гипотез и допущений, ждущих своего доказательства или опровержения. Тем не менее, ее популярность позволила сделать существенный рывок в исследовании базовых механизмов работы мозга, стоящих за возможностью непосредственного понимания нами поведения и намерений других людей. И электрофизиологические методы закономерно нашли свое место и показали значительную эффективность в экспериментальной проверке некоторых ключевых моментов, описывающих «зеркальную» активность головного мозга.

Список литературы

1. Understanding motor events: a neurophysiological study / G. di Pellegrino, L. Fadiga, L. Fogassi [et al.] // *Experimental Brain Research*. – 1992. – Vol. 91. – P. 176–180.
2. Action recognition in the premotor cortex / V. Gallese, L. Fadiga, L. Fogassi [et al.] // *Brain*. – 1996. – Vol. 119. – P. 593–609.
3. Rizzolatti G. The organization of the cortical motor system: new concepts / G. Rizzolatti, G. Luppino, M. Matelli // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. – 1998. – Vol. 106. – P. 283–296.
4. Rizzolatti G. Neurophysiological mechanisms underlying action understanding and imitation / G. Rizzolatti, L. Fogassi, V. Gallese // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2001. – Vol. 2. – P. 661–670.
5. Cortical mechanisms of human imitation / M. Iacoboni, R.P. Woods, M. Brass [et al.] // *Science*. – 1999. – Vol. 286. – P. 2526–2528.
6. Reafferent copies of imitated actions in the right superior temporal cortex / M. Iacoboni, L.M. Koski, M.Brass [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2001. – Vol. 98. – P. 13995–13999.
7. Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions / R. Mukamel, A.D. Ekstrom, J. Kaplan [et al.] // *Current Biology*. – 2010. – Vol. 20, № 8. – P. 750–756.
8. Rizzolatti G. Language within our grasp / G. Rizzolatti, M.A. Arbib // *Trends Neuroscience*. – 1998. – Vol. 21, № 5. – P. 188–194.
9. Oberman L.M. The human mirror neuron system: A link between action observation and social skills / L.M. Oberman, J.A. Pineda, V.S. Ramachandran // *Social Cognitive and Affective Neuroscience*. – 2007. – Vol. 2, № 1. – P. 62–66.
10. Gallese V. The ‘Shared Manifold’ hypothesis / V. Gallese // *Journal of Consciousness Studies*. – 2001. – Vol. 8. – P. 33–50.
11. Nishitani N. Abnormal imitation-related cortical activation sequences in Asperger’s syndrome / N. Nishitani, S. Avikainen, R. Hari // *Annals of Neurology*. – 2004. – Vol. 55. – P. 558–562.
12. Dapretto M. Understanding emotions in others: mirror neuron dysfunction in children with autism spectrum disorders / M. Dapretto, M.S. Davies, J.H. Pfeifer [et al.] // *Nature Neuroscience*. – 2005. – Vol. 9, № 1. – P. 28–30.
13. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders / L.M. Oberman, E.M. Hubbard, J.P. McCleery [et al.] // *Cognitive Brain Research*. – 2005. – Vol. 24. – P. 190–198.
14. Theoret H. Impaired motor facilitation during action observation in individuals with autism spectrum disorder / H. Theoret, E. Halligan, M. Kobayashi // *Current Biology*. – 2005. – Vol. 15. – P. R84–R85.

15. Reduced functional connectivity between V1 and inferior frontal cortex associated with visuomotor performance in autism / M.E. Villalobos, A. Mizuno, B.C. Dahl [et al.] // *Neuroimage*. – 2005. – Vol. 25. – P. 916–925.
16. Pineda J.A. The functional significance of mu rhythms: Translating “seeing” and “hearing” into “doing” / J.A. Pineda // *Brain Research Reviews*. – 2005. – Vol. 50. – P. 57–68.
17. Muakkassa A.F. Frontal lobe inputs to primate motor cortex: evidence for four somatotopically organized ‘premotor’ areas / A.F. Muakkassa, P.L. Strick // *Brain Research*. – 1979. – Vol. 177. – P. 176–182.
18. Cortical afferents and efferents of monkey postarcuate area: an anatomical and electrophysiological study / M. Godschalk, R.N. Lemon, H.G. Kuyper [et al.] // *Experimental Brain Research*. – 1984. – Vol. 56. – P. 410–424.
19. Afferent and efferent projections of the inferior area 6 in the macaque monkey / M. Matelli, M. Carmarda, M. Glickstein [et al.] // *The Journal of Comparative Neurology*. – 1986. – Vol. 251. – P. 281–298.
20. Gastaut H.J. EEG changes during cinematographic presentation / H.J. Gastaut, J. Bert // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. – 1954. – Vol. 6, № 3. – P. 433–444.
21. Muthukumaraswamy S.D. Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp / S.D. Muthukumaraswamy, B.W. Johnson, N.A. McNair // *Cognitive Brain Research*. – 2004. – Vol. 19. – P. 195–201.
22. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: a fMRI study / G. Buccino, F. Binkofski, G.R. Fink [et al.] // *European Journal of Neuroscience*. – 2001. – Vol. 13, № 2. – P. 400–404.
23. Foot and hand area mu rhythms / G. Pfurtscheller, C. Neuper, C. Andrew [et al.] // *International Journal of Psychophysiology*. – 1997. – Vol. 26. – P. 121–135.
24. Watching social interactions produces dorsomedial prefrontal and medial parietal BOLD fMRI signal increases compared to a resting baseline / M. Iacoboni, M.D. Lieberman, B.J. Knowlton [et al.] // *Neuroimage*. – 2004. – Vol. 21. – P. 1167–1173.
25. Gutsell J.N. Empathy constrained: Prejudice predicts reduced mental simulation of actions during observation of outgroups / J.N. Gutsell, M. Inzlicht // *Journal of Experimental Social Psychology*. – 2010. – Vol. 46. – P. 841–845.
26. The phi complex as a neuromarker of human social coordination / E. Tognoli, J. Lagarde, G.C. DeGuzman [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. – 2007. – Vol. 104, № 19. – P. 8190–8195.
27. Gastaut H.J. Electroencephalographic study of the reactivity of rolandic rhythm / H.J. Gastaut // *Rev Neurol (Paris)*. – 1952. – Vol. 87. – P. 176–182.
28. Somatosensory activations during the observation of touch and a case of vision-touch synesthesia / S.J. Blakemore, D. Bristow, G. Bird [et al.] // *Brain*. – 2005. – Vol. 128. – P. 1571–1583.

Махін С.А. Система «дзеркальних нейронів»: актуальні досягнення та перспективи ЕЕГ-досліджень / С.А. Махін // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2012. – Т. 25 (64), № 1. – С. 142–146.

У статті надається огляд основних результатів використання ЕЕГ технік для пошуку і ідентифікації можливої кіркової локалізації системи дзеркальних нейронів. Показано особливу роль осциляторних механізмів в альфа-діапазоні, таких як соматосенсорний мю-ритм і фі-комплекс, що включає компоненти фі-1 і фі-2.

Ключові слова: дзеркальні нейрони, ЕЕГ, мю-ритм, фі-комплекс.

Makhin S.A. “Mirror neurons” system: current achievements and research trends in use of the EEG-based methods / S.A. Makhin // Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2012. – Vol. 25 (64), No 1. – P. 142–146.

The article briefly reviews the basic results of implementing the EEG-based methods for the search and identification of the possible cortical localization of the mirror neuron system. The focus is given to a special role of such alpha-band oscillatory mechanisms as somatosensory mu-rhythm and phi-complex including phi-1 and phi-2 components.

Keywords: mirror neurons, EEG, mu-rhythm, phi-complex.

Поступила в редакцію 09.02.2012 г.