

УДК 612.65 : 616-056.216

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНОСТИ ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ У ДЕТЕЙ РАННЕГО ВОЗРАСТА

Дягилева Ю.О., Белалов В.В., Павленко В.Б.

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

В статье приводится описание методики исследования активности зеркальных нейронов у детей в возрасте от 1 до 3 лет. Предлагаемая методика отличается эффективностью, простотой и быстротой выполнения, что необходимо для работы с детьми раннего возраста. Позволяет оценить активность головного мозга при демонстрации целевого и нецелевого действия, что характеризует понимание ребенком действий другого человека. Анализ ЭЭГ ребенка в момент выполнения действия и сравнение реактивности мю-ритма при действиях наблюдение/выполнение дает возможность оценить активность зеркальных нейронов. Использование программы EEG Mapping 3.0 позволяет детально анализировать ЭЭГ, проводить спектральный анализ и топографическое картирование в заданных частотных диапазонах ЭЭГ.

Ключевые слова: зеркальные нейроны, мю-ритм, ЭЭГ, дети раннего возраста.

ВВЕДЕНИЕ

Зеркальные нейроны – это нейроны, которые активируются как при выполнении человеком определенных действий, так и тогда, когда этот человек просто смотрит, как эти действия выполняет кто-то другой. Предполагается, что благодаря системе этих нейронов, человек имплицитно понимает и превосхищает действия других людей, не прибегая к сложным сознательным умозаключениям [1]. Активность зеркальных нейронов мозга можно исследовать несколькими методами. Первый, регистрация активности отдельных нейронов – это инвазивный метод, поэтому существуют лишь единичные клинические исследования активности нервных клеток, принадлежащих к зеркальной системе мозга человека [2]. Второй метод объединяет в себя различные виды томографии. С помощью этих методов было показано, что наблюдение и выполнение различных действий сопровождаются активацией задней части нижней лобной извилины, премоторной коры, и нижней теменной доли [3]. Эти области считают принадлежащими к зеркальной системе мозга человека, а по цитоархитектоническим свойствам они гомологичны областям мозга обезьяны, в которых также обнаружены зеркальные нейроны [4–8]. Однако, необходимость ограничений движений в период регистрации и высокая стоимость оборудования для проведения томографии ограничивают широкое использование этого метода, особенно в исследованиях с участием детей раннего возраста. Третий способ – это электроэнцефалография. Критерием идентификации активности зеркальных нейронов при действиях наблюдение/выполнение считается

реактивность сенсомоторного альфа (или мю)-ритма ЭЭГ [7, 8]. Этот метод неинвазивный и получает все большее распространение для изучения зеркальных свойств мозга, а у детей является единственной альтернативой всех остальных методов. В тоже время, актуальным вопросом остается разработка универсальной тестовой методики для активации системы зеркальных нейронов у детей раннего возраста (от 1 до 3 лет).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование включает в себя регистрацию ЭЭГ при проведении тестовых заданий на активацию зеркальных нейронов головного мозга ребенка. Отведение ЭЭГ осуществляется по общепринятой методике с помощью современного 16-ти канального электроэнцефалографа «TREDEX Эксперт ТМ». Все тестовые задания предъявляет экспериментатор. Задания включают целенаправленное и нецеленаправленное действие. Существуют исследования доказывающие, что система зеркальных нейронов активируется сильнее при выполнении целенаправленного действия, по сравнению с нецеленаправленным [9, 10].

Ребенок сидит за столом. На столе перед ребенком устанавливается игрушечная горка (на расстоянии 15 см от края стола) ее спуск ориентирован вправо относительно положения ребенка. Задания выполняются в три этапа. Первый, нецеленаправленное действие – экспериментатор имитирует как будто он ставит что-то на горку и толкает. Второй этап, целенаправленное действие, экспериментатор ставит на горку игрушечную машинку и сталкивает ее с горки. Третий этап, экспериментатор ставит на горку машинку и ее должен столкнуть ребенок. Ребенку не дается никаких инструкций. Он должен сам догадаться толкнуть машинку (рис. 1, А). Проведение всех этапов исследования занимает не более 3-х мин. Весь эксперимент проводится в условиях видеорегистрации.

Предлагаемая нами методика, во-первых, отличается простотой выполнения (для ее выполнения ребенок должен совершать лишь минимальное количество моторных действий, что уменьшает двигательные артефакты в ЭЭГ) и понятна ребенку в возрасте от 1-го года до 3-х лет. Во-вторых, методика отличается простотой предъявления заданий, т.к. основные действия выполняет экспериментатор без использования видеопрезентации. При этом, можно ожидать, что зеркальные нейроны будут эффективно вовлекаться в процесс обработки информации. Так, с участием взрослых испытуемых было показано, что при предъявлении заданий экспериментатором, по сравнению с видеопрезентацией, реактивность мю-ритма увеличивается на 15-20% [11]. В тоже время экспериментатору необходимо строго соблюдение одинаковых условий для каждого участника эксперимента.

Для записи и интерпретации ЭЭГ в работе используется разработанная нами компьютерная программа (А.с. 32317. Комп'ютерна програма для запису та аналізу електроенцефалограми з паралельним записом мови. EEG Mapping 3.0.). Данная программа позволяет регистрировать текущую ЭЭГ с одновременной записью речи. Окно работы этой программы показано на рис. 2.

После проведения исследования ЭЭГ-файлы синхронизируются с видеозаписью, что позволяет нам оценить выполнение заданий, уровень внимания ребенка, отсутствие движений и вокализации. Затем ЭЭГ оценивается визуально. При наличии артефактов движения или напряжения мышц, распространяющихся по всей ЭЭГ, запись исключается из анализа.

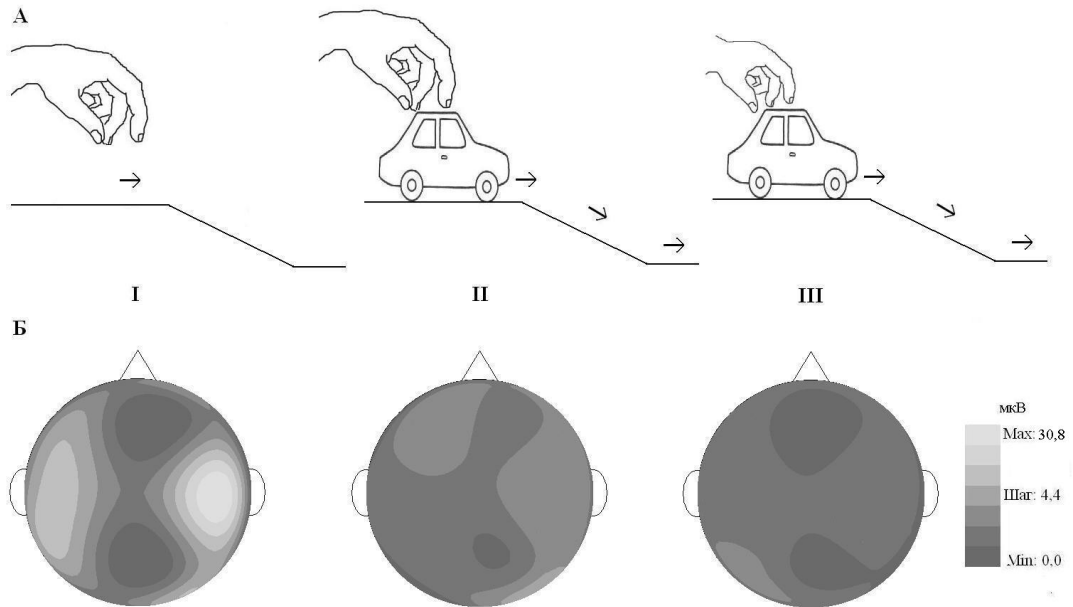


Рис. 1. Схематическое изображение этапов эксперимента (А) и топографические карты мю-ритма ЭЭГ (7-8 Гц) ребенка 3-х лет при прохождении разных этапов эксперимента (Б)

I – «имитация»; II – демонстрация; III – выполнение ребенком.

Полученные данные обрабатываются путем сравнения фрагментов ЭЭГ ребенка при выполнении разных этапов эксперимента. ЭЭГ анализируется в отведениях F3, F4, C3, C4, P3, P4 – эти отведения соответствуют анатомическому расположению системы зеркальных нейронов. Анализу подвергается мю-ритм ЭЭГ. Мю-ритм характеризуется частотами, которые находятся в диапазоне альфа-ритма. При этом учитывается то, что альфа-ритм не является статичным и его частотный диапазон изменяется с возрастом. Marshall и др. [12] показали, что частота альфа-ритма возрастает в период от новорожденности до раннего детства. У 5-ти месячного ребенка частота мю-ритма 5-6 Гц, и эта частота увеличивается до 8 Гц к 2-х летнему возрасту, а в возрасте 4-х лет мю-ритм имеет такие же частотные диапазоны, как и у взрослых людей – 9-10 Гц. Исходя из этих данных, мы индивидуально определяли границы мю-ритма у каждого ребенка, участвующего в исследовании, с помощью построения спектров и топографических карт в программе EEG Mapping 3.0 для разных этапов эксперимента (рис. 1.Б).

Статистическая обработка проводилась с применением t-критерия Стьюдента. Достоверными считали различия при $p \leq 0,05$.

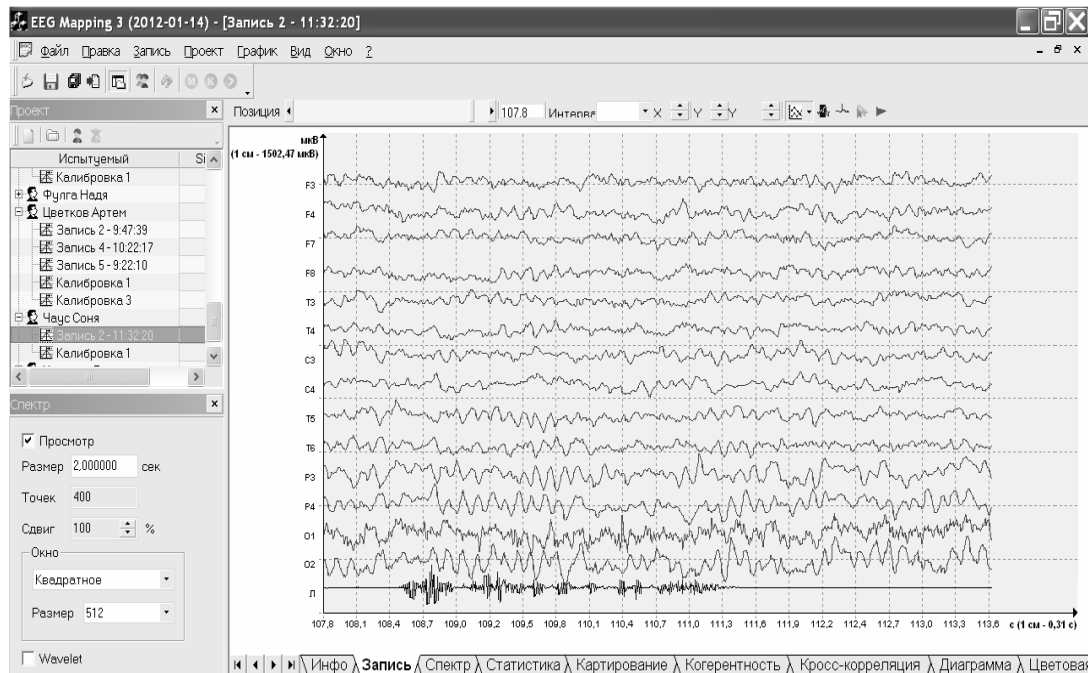


Рис. 2. Окно работы компьютерной программы для записи и анализа электроэнцефалограммы с параллельной записью речи. F3-O2 – отведения ЭЭГ; Л – канал для записи речи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании приняло участие 17 детей обоего пола (7 девочек, 10 мальчиков). Из них двое детей не выполнили 3 этап эксперимента и не столкнули машинку с горки, запись ЭЭГ еще двоих детей отличалась наличием множественных двигательных артефактов. Результаты исследования этих детей были исключены из анализа.

Выявлено, что при проведении разных этапов эксперимента наблюдается изменение амплитуды мю-ритма ЭЭГ в диапазоне 7-8 Гц. При этом отмечается сходное снижение амплитуды указанного ритма, как при «демонстрации действия», так и при выполнении этого же действия ребенком, по сравнению с амплитудой мю-ритма при «имитации действия». Такие изменения наблюдаются в отведениях F3, F4, C3, C4, P3, P4. В тоже время, достоверные изменения выявлены только в отведениях C3 и C4 (рис. 3). Так, в отведении C3 амплитуда мю-ритма при «имитации» действия составила $27,4 \pm 8,2$ мкВ, при «демонстрации действия» - $19,8 \pm 7,6$ мкВ и при выполнении действия ребенком $19,4 \pm 7,1$ мкВ, а в отведении C4 эти показатели составили $27,5 \pm 9,0$; $16,6 \pm 8,7$ и $18,7 \pm 8,6$ мкВ, соответственно.

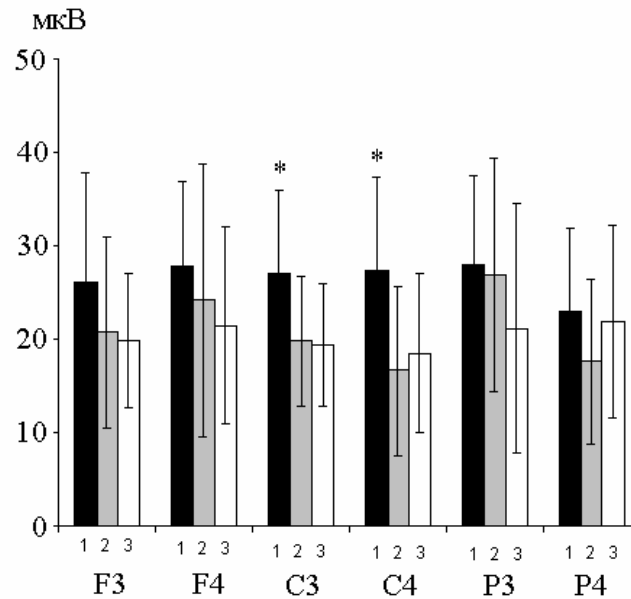


Рис. 3. Амплитуда мю-ритма ЭЭГ во время разных этапов эксперимента.

1 – «имитация»; 2 – демонстрация; 3 – выполнение ребенком.

F3, F4 – лобные; C3, C4 – центральные; P3, P4 – теменные отведения ЭЭГ, левые и правые, соответственно.

Звездочками отмечены достоверные различия ($p \leq 0,05$) в величине мю-ритма одновременно между 1 и 2; 1 и 3 этапами эксперимента.

Полученные нами данные согласуются с результатами других исследований по выявлению ЭЭГ индикаторов активности зеркальных нейронов у детей. Так, в работах P. Nystrom показана значительная десинхронизация мю-ритма у 8-ми месячных детей при наблюдении за тем, как экспериментатор хватает движущийся игрушечный поезд [13]. Fecteau и др. выявили подавление мю-ритма у девочек в возрасте 36 месяцев, когда они рисовали сами и смотрели, как рисует экспериментатор [14]. В исследовании детей 14-16 месяцев van Elk и др. [15] регистрировали ЭЭГ при наблюдении за детьми, которые ходят или ползают. Они обнаружили большую величину десинхронизации мю-ритма при наблюдении за процессом ползания, по сравнению с ходьбой. Амплитуда десинхронизации мю-ритма была достоверно связана с уровнем ползания (опытом) детей. Хотя понимание ребенком действия другого ребенка в этой работе не оценивалось, это исследование показывает, что величина десинхронизации мю-ритма напрямую связана с опытом и способностями, которые имеются у ребенка. Marshall et al. исследовали десинхронизацию мю-ритма у детей в возрасте 14-ти месяцев во фронтальных, центральных и париетальных отведениях при наблюдении и выполнении преднамеренных действий. Авторы выявили наибольшую десинхронизацию мю-ритма в лобных, центральных и теменных отведениях ЭЭГ в

процессе наблюдения и только в центральных отведениях при выполнении действия [16]. Warreyn и др. выявили наибольшую десинхронизацию мю-ритма в центральных отведениях ЭЭГ как при действиях наблюдения, так и при двигательном исполнении [17].

В проведенном нами исследовании также показана достоверная десинхронизация мю-ритма. Исходя из литературных данных, такая десинхронизация мю-ритма может быть рассмотрена, как критерий активации зеркальных нейронов мозга ребенка. Поэтому результаты проведенного исследования доказывают эффективность разработанной нами методики для идентификации активности зеркальных нейронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая методика отличается эффективностью, простотой и быстротой выполнения, что необходимо для работы с детьми раннего возраста. Позволяет оценить активность головного мозга при демонстрации целевого и нецелевого действия, что характеризует понимание ребенком действий другого человека. Анализ ЭЭГ ребенка в момент выполнения действия и сравнение реактивности мю-ритма при действиях наблюдение/выполнение дает возможность оценить активность зеркальных нейронов. Использование программы EEG Mapping 3.0 позволяет детально анализировать ЭЭГ, проводить спектральный анализ и топографическое картирование в заданных частотных диапазонах ЭЭГ.

Список литературы

1. Рамачандран В. Разбитые зеркала: теория аутизма / В. Рамачандран, Л. Оберман // В мире науки. – 2007. – № 3. – С. 34–46.
2. Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions / R. Mukamel, A.D. Ekstrom, J. Kaplan [et al.] // *Current Biology* / - 2010. – V. 20. – P. 750–756.
3. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study / G. Buccino, F. Binkofski, G.R. Fink [et al.] // *European Journal of Neuroscience* / - 2001. – V. 13. – P. 400–404.
4. Brain areas selective for both observed and executed movements / I. Dinstein, U. Hasson, N. Rubin [et al.] // *Journal of Neurophysiology*. – 2007. – V. 98. – P. 1415–1427.
5. Cortical mechanisms of human imitation / M. Iacoboni, R.P. Woods, M. Brass [et al.] // *Science*. – 1999. – V. 286. – P. 2526–2528.
6. Manthey S. Premotor cortex in observing erroneous action: an fMRI study / S. Manthey, R.I. Schubotz, D.Y. von Cramon // *Cognitive Brain Research*. – 2003. – V. 15. - P. 296–307.
7. Molenberghs P. Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies / Molenberghs, R. Cunnington, J.B. Mattingley // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. – 2012. – V. 36. – P. 341–349.
8. Ross E. The mirror mechanism and mu rhythm in social development / R. E. Vanderwert, N. A. Fox, P. F. Ferrari // *Neuroscience Letters*. – 2013 (article in press).
9. Muthukumaraswamy S.D. Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp / S.D. Muthukumaraswamy, B.W. Johnson, A. McNair // *Cognitive Brain Research*. – 2004. –V. 19. – P. 195–201.
10. Lepage J-F. EEG evidence for the presence of an action observation-execution matching system in children / J-F. Lepage, H. Théoret // *European Journal of Neuroscience*. – 2006. – V. 23. – P. 2505-2510.

11. Stronger reactivity of the human primary motor cortex during observation of live rather than video motor acts / J. Järveläinen, M. Schürmann, S. Avikainen [et al.] // *NeuroReport*. – 2001. – V. 12. – P. 3493–3495.
12. Marshall P.J. Development of the EEG from 5 months to 4 years of age / P.J. Marshall, Y. Bar-Haim, N.A. Fox // *Clinical Neurophysiology*. – 2002. – V. 113. – P. 1199–1208.
13. Nystrom P. The infant mirror neuron system studied with high density EEG / P. Nystrom // *Social Neuroscience*. – 2008. – V. 3. – P. 334–347.
14. A motor resonance mechanism in children? Evidence from subdural electrodes in a 36-month old child / S. Fecteau, L. Carmant, C. Tremblay [et al.] // *NeuroReport*. – 2004. – V. 15. – P. 2625–2627.
15. You'll never crawl alone: neurophysiological evidence for experience-dependent motor resonance in infancy / M. van Elk, H.T. van Schie, S. Hunnius [et al.] // *Neuroimage*. – 2008. – V. 43. – P. 808–814.
16. Marshall P.J. Neural correlates of action observation and execution in 14-monthold infants: an event-related EEG desynchronization study / P.J. Marshall, T. Young, A.N. Meltzoff // *Developmental Science*. – 2011. – V. 14. – P. 474–480.
17. Infants' mu suppression during the observation of real and mimicked goal-directed actions / P. Warreyn, L. Ruyschaert, J. R. Wiersema [et al.] // *Developmental Science*. – 2012. – P 1–12.

Дягілева Ю.О. Методика дослідження активності дзеркальних нейронів у дітей раннього віку / Ю.О. Дягілева, В.В. Белалов, В.Б. Павленко // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія „Біологія, хімія”. – 2013. – Т. 26 (65), № 2. – С. 34-40.

У статті наводиться опис методики дослідження активності дзеркальних нейронів у дітей у віці від 1 до 3 років. Запропонована методика відрізняється ефективністю, простотою і швидкістю виконання, що необхідно для роботи з дітьми раннього віку. Дозволяє оцінити активність головного мозку при демонстрації цільової та нецільової дії, що характеризує розуміння дитиною дій іншої людини. Аналіз ЕЕГ дитини в момент виконання дії і порівняння реактивності мю-ритму при діях спостереження / виконання дає можливість оцінити активність дзеркальних нейронів. Використання програми EEG Mapping 3.0 дозволяє детально аналізувати ЕЕГ, проводити спектральний аналіз і топографічне картування в заданих частотних діапазонах ЕЕГ.

Ключові слова: дзеркальні нейрони, мю-ритм, ЕЕГ, діти раннього віку.

Dyagileva Iu.O. The technique to study the activity of mirror neurons in toddlers / Iu.O. Dyagileva, V.V. Belalov, V.B. Pavlenko // Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. – Series: Biology, chemistry. – 2013. – Vol. 26 (65), No. 2. – P. 34-40.

The article describes a technique of research activity of mirror neurons in children aged 1 to 3 years. The proposed method is efficient, simplicity and quickness of execution, it is necessary to work with young children. This technique allows to evaluate the activity of the brain during a demonstration of goal-directed and non-goal-directed action that determines the child's understanding of another person's actions. Analysis of toddlers' EEG at the time of the action execution and comparing the reactivity of mu-rhythm in action observation / execution makes it possible to assess the activity of mirror neurons. Using the program EEG Mapping 3.0 allows perform analysis of the EEG, to carry out spectral analysis and topographic mapping in the EEG specified frequency bands.

Keywords: mirror neurons, mu-rhythm, EEG, toddlers.

Поступила в редакцію 18.04.2013 г.