

УДК 612.08

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-1-162-169

СИСТЕМА ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ – ВРОЖДЁННЫЙ МЕХАНИЗМ ИЛИ РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ?

Скрябина А. А., Бушов Ю. В.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
Томск, Россия
E-mail: skryabina.anastasiya1994@yandex.ru*

При наблюдении и произнесении слов мужчинами и женщинами (монолингвами и билингвами) на родном (русском) и неродном (английском) языках проверяли гипотезу о важной роли обучения в формировании системы зеркальных нейронов. У билингвов (мужчин и женщин) обнаружили более выраженную по сравнению с монолингвами (мужчинами и женщинами) активацию «коммуникативных» зеркальных нейронов. Последнее проявилось в более выраженном снижении спектральной мощности мио-ритма у билингвов по сравнению с монолингвами. Предполагается, что обнаруженные межгрупповые различия активации зеркальных нейронов обусловлены тем, что освоение второго языка сопровождалось у билингвов (мужчин и женщин) ростом числа «коммуникативных» зеркальных нейронов в соответствующих зонах коры за счет нейрогенеза. Полученные результаты подтверждают гипотезу о важной роли обучения в формировании системы зеркальных нейронов. Однако, это не исключает возможное влияние наследственных факторов на этот процесс.

Ключевые слова: система зеркальных нейронов, мио-ритм, наблюдение и произнесение слов, нейрогенез, обучение.

ВВЕДЕНИЕ

С момента открытия зеркальных нейронов в вентральной премоторной коре макак такой тип нейронов был найден у многих видов животных.

У летучих мышей зеркальные нейроны обнаружены в гиппокампе; у птиц – в каудальном ядре вентрального гиперстриатума и премоторной области, где расположен высший голосовой центр у певчих птиц; у крыс – в префронтальной коре, передней поясной коре, премоторной коре; у макак и человека – в префронтальной коре, передней поясной коре, первичной моторной коре, премоторной коре, нижней теменной доле [1, 2]. Кроме того, у человека зеркальные нейроны обнаружены в нижней лобной коре [1].

Согласно современным представлениям, зеркальные нейроны участвуют в понимании целей и намерений других, в моторной имитации (произвольной и непроизвольной) и моторном обучении, двигательной мимикрии, в осуществлении высших когнитивных функций (в обучении и памяти, эмпатии, социальном познании, самосознании, формировании модели психического состояния другого

человека и реализации речи), в восприятии времени и эмоций, эмоциональном общении [3].

Считается, что зеркальные нейроны могут быть задействованы в различных процессах, связанных с речью: в овладении языком, в восприятии и продукции речи, в возникновении и развитии речи у человека в ходе эволюционного развития [2, 3].

Вместе с тем, вопрос о происхождении зеркальных нейронов по-прежнему остается открытым. Некоторые исследователи полагают, что система зеркальных нейронов не является врождённым механизмом, а является результатом обучения [1, 4].

Целью настоящего исследования явилась проверка гипотезы о важной роли обучения в формировании системы зеркальных нейронов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели исследовали спектральные характеристики мю-ритма ЭЭГ при наблюдении и произнесении эмоционального и неэмоционального слов на родном и неродном языках. В качестве маркера активации зеркальных нейронов использовали депрессию мю-ритма в центральных отведениях ЭЭГ. В исследованиях приняли участие добровольцы – практически здоровые юноши и девушки (55 человек: среди них 10 монолингвов-юношей; 17 монолингвов-девушек; 9 билингвов-юношей; 19 билингвов-девушек) в возрасте от 18 до 29 лет – учащиеся Томского государственного университета.

Основным критерием выбора участников послужило: владение родным (русским) и неродным (английским) языками. Уровень владения английским языком у монолингвов являлся элементарным A1 (elementary) или ниже среднего A2 (pre-intermediate), тогда как уровень владения английским у билингвов – выше среднего B2 (upper intermediate) или продвинутый C1 (advanced) по шкале CEFR (Common European Framework of Reference).

Для отнесения добровольцев к монолингвам или билингвам участники исследования проходили предварительное тестирование на определение уровня владения английским языком, разработанное британской языковой школой (<https://www.europa-school.co.uk/language-level-test/>).

Для подтверждения высокого уровня владения английским языком участники, отнесённые к группе билингвов, проходили тест «English Placement Test C1/C2», разработанный Экономическим университетом в Катовице (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach) и направленный на установление владения английским языком на профессиональном уровне (https://www.ue.katowice.pl/fileadmin/_migrated/content_uploads/Placement_test_C1-C2_01.pdf).

Для всех участников тип билингвизма являлся одинаковым: последовательный и искусственный. Все испытуемые дали информированное согласие на участие в данном исследовании, которое было одобрено Комиссией по биоэтике Биологического института Томского государственного университета.

В ходе предварительного обследования осуществлялся сбор анамнеза с целью исключения лиц, страдающих неврологическими (эпилепсия), сердечно-сосудистыми и другими заболеваниями. Также проводился сбор языкового анамнеза, на основе которого определялся тип двуязычия. С помощью анкеты Аннет выявляли ведущую руку. По результатам анкетирования подсчитывали в баллах показатель мануального предпочтения (ПМП).

В сериях с наблюдением за произнесением слов испытуемый наблюдал за оператором, который беззвучно одними губами произносил слово, когда стрелка секундомера на экране монитора пересекала деления 0, 5, 10 и т. д. секунд. Всего стрелка секундомера совершала 5 оборотов. В сериях с произнесением слов испытуемый сам выполнял указанную деятельность. Серии чередовались следующим образом: наблюдение за произнесением слова «Раз», произнесение слова «Раз», наблюдение за произнесением слова «Боль», произнесение слова «Боль», наблюдение за произнесением слова «One», произнесение слова «One», наблюдение за произнесением слова «Rain», произнесение слова «Rain».

В ходе эксперимента оператор располагался за столом, на котором на расстоянии 40–50 см от него находился монитор компьютера. Испытуемый при этом находился спереди и справа на расстоянии 70–80 см от него и следил только за его губами. При произнесении слов испытуемый занимал место оператора и следил за движением стрелки секундомера на экране монитора. Перед выполнением деятельности и в процессе ее выполнения регистрировали ЭЭГ монополярно с помощью 24-канального энцефалографа-анализатора «Энцефалан-131-03» (фирма «Медиком», г. Таганрог, Россия) в лобных (F3, F4, Fz, F7, F8), центральных (C3, C4, Cz), височных (T3, T4, T5, T6), теменных (P3, P4, Pz) и затылочных (O1, O2) отведениях по системе «10–20 %». В качестве референтов использовали отведения A1 и A2. С целью исключения артефактов, связанных с движением глаз и мышечной активностью, регистрировали ЭОГ и ЭМГ мышц шеи и лба. При вводе аналоговых сигналов в ЭВМ частота дискретизации составляла 250 Гц. При обработке полученных данных подсчитывали оценки спектральной мощности мю-ритма на коротких отрезках записи ЭЭГ (1,5 с), лишенных артефактов: за 1,5 секунды до пересечения стрелкой секундомера соответствующего деления (этап «подготовка» к действию), сразу после пересечения стрелкой секундомера деления (этап «выполнение» действия) и через 1,5 секунды после пересечения стрелкой секундомера (этап «фон»). Полученные значения спектральной мощности усредняли отдельно для каждого этапа деятельности, для каждой серии и по всем испытуемым. Для описания спектра мощности ЭЭГ применяли преобразование Фурье. Расчет спектра выполнен с аппроксимацией на целые гармоники (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 Гц), что позволило существенно упростить последующую статистическую обработку и сравнительный анализ результатов. При статистической обработке данных использовали пакет «MatLab v6.5» и критерий Вилкоксона для связанных выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения мануального предпочтения показали, что в группах монолингвов и билингвов преобладают праворукие участники. Так, в группе монолингвов-юношей 9 из 10 человек оказались праворукими и 1 человек – амбидекстром, в группе монолингвов-девушек 14 из 17 человек оказались праворукими, 1 человек отличался выраженной леворукостью, 1 – слабой леворукостью и 1 человек оказался амбидекстром; в группе билингвов-юношей 8 из 9 человек оказались праворукими и 1 человек – амбидекстром, а в группе билингвов-девушек 16 из 19 человек оказались праворукими, 1 человек отличался выраженной леворукостью и 2 человека слабой леворукостью.

Изучение спектральных характеристик мю-ритма у мужчин и женщин (билингвов и монолингвов) при наблюдении и произнесении эмоционального и неэмоционального слов на родном и неродном языках позволило обнаружить у билингвов более выраженную, чем у монолингвов, депрессию мю-ритма.

Так, если при наблюдении за произнесением слова «РАЗ» у мужчин-билингвов на этапе выполнения по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении Cz на частоте 8 Гц на 22,7 %, на частоте 9 Гц – на 45,5 %, на частоте 10 Гц – на 15,5 %, в отведении C3 на частоте 8 Гц – на 2,1 %, а также увеличение спектральной мощности в отведении C3 на частоте 10 Гц на 5,4 %, то у мужчин-монолингвов отмечается только повышение спектральной мощности мю-ритма в отведении C3 на частоте 10 Гц на 5,6 %.

Если у мужчин-билингвов при произнесении слова «ONE» на этапе выполнения по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении Cz на частоте 13 Гц на 13,2 %, то у мужчин-монолингвов отмечается повышение спектральной мощности мю-ритма в том же отведении на той же частоте на 11,2 %.

Если у мужчин-билингвов при наблюдении за произнесением слова «PAIN» на этапе подготовки по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении Cz на частоте 11 Гц на 6,2 %, при произнесении того же слова – в отведении C3 на частотах 8 и 11 Гц – на 13,1 % и 32,6 % соответственно, а в отведении C4 на частоте 14 Гц – на 27,8 %, то у мужчин-монолингвов снижение спектральной мощности мю-ритма наблюдается только при произнесении слова «PAIN» и только в отведении Cz на частоте 13 Гц на 27 %.

Изучение спектральных характеристик мю-ритма у женщин (монолингвов и билингвов) при наблюдении и произнесении слов на родном и неродном языках позволило обнаружить ту же закономерность: более выраженную депрессию мю-ритма у женщин-билингвов по сравнению с монолингвами.

Так, если у женщин-билингвов при наблюдении за произнесением слова «РАЗ» на этапе выполнения по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении C3 на частоте 8 Гц на 17,1 %, на частоте 9 Гц – на 23,7 %, на частоте 14 Гц – на 11,2 %, а в отведении C4 на частоте 9 Гц – на 10,2 %, то у женщин-монолингвов отмечается

снижение спектральной мощности мю-ритма только в отведении С3 и только на частоте 13 Гц на 12 %.

Если у женщин-билинггов при произнесении слова «РАЗ» на этапе выполнения по сравнению с фоном отмечается снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении С3 на частоте 8 Гц на 23,2 % и увеличение спектральной мощности в отведении С3 на частотах 12 и 13 Гц на 18,7 % и на 29,3 %, соответственно, то у женщин-монолингвов отмечается только повышение спектральной мощности мю-ритма в отведении С3 на частоте 8 Гц на 8,9 %, в отведении Cz на частоте 9 Гц – на 13,7 %, а в отведении С4 на частоте 8 Гц – на 13,6 %, на частоте 9 Гц – на 20,4 %.

Если у женщин-билинггов при наблюдении за произнесением слова «ONE» на этапе выполнения по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении С3 на частоте 9 Гц на 17,9 %, в отведении Cz на частоте 9 Гц – на 14,6 %, а в отведении С4 на частоте 9 Гц – на 24,5 % и увеличение спектральной мощности в отведении С3 на частоте 12 Гц на 11,4 %, то у женщин-монолингвов отмечается снижение спектральной мощности мю-ритма только в отведении Cz на частотах 9 и 10 Гц на 0,4 % и 22,4 %, соответственно,

Если у женщин-билинггов при наблюдении за произнесением слова «БОЛЬ» на этапе подготовки по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении Cz на частоте 13 Гц на 9,9 %, в отведении С4 на частоте 8 Гц – на 19,1 %, а при произнесении слова «БОЛЬ» отмечается снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении С3 на частотах 9, 10 и 14 Гц, соответственно, на 5,3 %, 19,7 % и 26,3 % и в отведении Cz на частоте 9 Гц – на 9,6 % и увеличение спектральной мощности на частоте 12 Гц в отведениях С3 и С4 на 38,2 % и 0,003 %, соответственно, то у женщин-монолингвов статистически значимые по сравнению с фоном изменения спектральной мощности мю-ритма при наблюдении и произнесении слова «БОЛЬ» отсутствуют.

Если при произнесении слова «PAIN» у женщин-билинггов на этапе выполнения по сравнению с фоном отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) снижение спектральной мощности мю-ритма в отведении С3 на частотах 9 и 14 Гц, соответственно, на 33,4 % и 15,3 % и увеличение спектральной мощности на частоте 12 Гц – на 6,8 %, то у женщин-монолингвов отмечается статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с фоном повышение спектральной мощности мю-ритма в отведении Cz на частоте 13 Гц на 13,5 %, а в отведении С4 на частоте 11 Гц – на 12,9 %. Снижение спектральной мощности на 3,3 % отмечается у них только в отведении Cz на частоте 8 Гц.

Согласно имеющимся данным снижение спектральной мощности мю-ритма является характерным индикатором активации зеркальных нейронов [5–8], поэтому обнаруженное у билингвов (мужчин и женщин) более выраженное по сравнению с монолингвами (мужчинами и женщинами) снижение спектральной мощности мю-ритма при наблюдении и произнесении слов указывает на более значительную активацию «коммуникативных» зеркальных нейронов у билингвов по сравнению с монолингвами.

Вероятно, это связано с тем, что освоение второго языка сопровождалось у билингвов ростом числа «коммуникативных» зеркальных нейронов в соответствующих зонах коры за счет нейрогенеза.

В пользу этого предположения свидетельствуют и некоторые литературные данные. В частности установлено [9], что через три месяца интенсивных занятий у курсантов (будущих военных переводчиков) достоверно увеличилась толщина коры в нижней лобной извилине, верхней лобной извилине, верхней височной извилине и средней лобной извилине левого полушария. Помимо этого, увеличился объем гиппокампа, причем сильнее всего у тех курсантов, которые достигли наибольших результатов в освоении иностранного языка.

Можно ожидать, что те же процессы – нейрогенез и обучение – наблюдаются и на этапе освоения родного языка.

Полученные результаты и имеющиеся литературные данные [9] указывают на важную роль обучения в формировании системы зеркальных нейронов. Однако, это не исключает возможное влияние наследственных факторов на этот процесс, так как зеркальные нейроны обнаружены только у отдельных видов животных [1, 2] и существует сенситивный период в освоении языка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённые исследования показали, что наблюдение и произнесение эмоционального и неэмоционального слов на родном (русском) и неродном (английском) языках сопровождалось у билингвов (мужчин и женщин) более выраженной по сравнению с монолингвами (мужчинами и женщинами) активацией «коммуникативных» зеркальных нейронов.

Последнее проявилось в более выраженном снижении спектральной мощности мю-ритма у билингвов по сравнению с монолингвами.

Предполагается, что обнаруженные межгрупповые различия активации зеркальных нейронов обусловлены тем, что освоение второго языка сопровождалось у билингвов ростом числа «коммуникативных» зеркальных нейронов в соответствующих зонах коры за счет нейрогенеза.

Полученные результаты свидетельствуют о важной роли обучения в формировании системы зеркальных нейронов. Однако, это не исключает возможное влияние наследственных факторов на этот процесс.

Список литературы

1. Bonini L. Rotunno C. Mirror neurons 30 years later: implications and applications / Bonini L. Rotunno C., Arcuri E., Gallese V. // Trends in cognitive sciences. – 2022. – Т. 26, № 9. – P. 767–781.
2. Hari E. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarına klinik yaklaşım / Hari E., Cengiz C., Kılıç F., Yurdakoş E. // Journal of Istanbul Faculty of Medicine. – 2021. – Т. 84, № 3. – P. 430–438.
3. Farina E. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders / Farina E., Borgnis F., Pozzo T. // Journal of Neuroscience Research. – 2020. – Т. 98, № 6. – P. 1070–1094.
4. Heyes C. What happened to mirror neurons? / Heyes C., Catmur C. // Perspectives on Psychological Science. – 2022. – Т. 17, № 1. – P. 153–168.
5. Rizzolatti G. The mirror-neuron system / Rizzolatti G. and Craighero L. // Annual Review of Neuroscience Volume. – 2004. – № 27. – P. 169–192.

6. Аликина М. А. Амплитудно-частотные, топографические, возрастные особенности и функциональное значение сенсомоторного ритма ЭЭГ / М. А. Аликина, С. А. Махин, В. Б. Павленко // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология и химия. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 3–24.
7. Farina E. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders / Farina E., Borgnis F., Pozzo T. // J. of Neurosci. Research. – 2020. – V. 98, № 6. – P. 1070–1094.
8. Emre H. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarına klinik yaklaşım / Emre H., Canberk C., Ferhat K., Ertan Y. // Journal of Istanbul Faculty of Medicine. – 2021. – Т. 84, № 3. – P. 430–438.
9. Mårtensson J. Growth of language-related brain areas after foreign language learning / Mårtensson J., Eriksson J., Bodammer N.C., Lindgren M., Johansson M., Nyberg L., Lövdén M. // Neuroimage. – 2012. – Vol. 63, № 1. – P. 240–244. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.06.043

THE SYSTEM OF MIRROR NEURONS – AN INNATE MECHANISM OR A RESULT OF LEARNING?

Skryabina A. A., Bushov Yu. V.

***Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research Tomsk State University”, Tomsk, Russia
E-mail: skryabina.anastasiya1994@yandex.ru***

The study of the role of mirror neurons in cognitive processes is a pressing problem of modern neuroscience. It is believed that mirror neurons are involved in understanding the goals and intentions of others, in motor imitation and motor learning, motor mimicry, in the implementation of higher cognitive functions (in learning and memory, empathy, social cognition, self-awareness, the formation of a model of the mental state of another person and the implementation of speech), in the perception of time and emotions, emotional communication. However, the origin of mirror neurons remains an open question. Some researchers believe that the mirror neuron system is not an innate mechanism, but is the result of learning. The aim of this study was to test the hypothesis about the important role of learning in the formation of the mirror neuron system.

Methods. The study involved young men and women: monolinguals with an English proficiency level of A1 (elementary) or A2 (pre-intermediate) on the CEFR (Common European Framework of Reference) scale and bilinguals with an English proficiency level of B2 (upper intermediate) or C1 (advanced). Type of bilingualism: sequential and artificial. The participants in the experiment either silently pronounced emotional ("PAIN") and unemotional words ("ONE") in their native (Russian) and non-native (English) languages with their lips alone, or watched the operator pronounce the same words. The words were pronounced by the operator or the subject at the moments when the stopwatch hand on the monitor screen moved through the divisions of 0, 5, 10, etc. seconds. In this case, the stopwatch hand made 5 revolutions. Before and during the activity, the participants' EEG was recorded monopolarly using a 24-channel encephalograph-analyzer "Encephalan-131-03" in the frontal (F3, F4, Fz, F7, F8), central (C3, C4, Cz), temporal (T3, T4, T5, T6), parietal (P3, P4, Pz) and occipital (O1, O2) leads

according to the "10–20 %" system. Leads A1 and A2 were used as referents. When processing the obtained data, spectral power estimates were calculated on short segments of the EEG recording (1.5 s) free of artifacts: 1.5 seconds before the stopwatch arrow crossed the corresponding division (the "preparation" stage for the action), immediately after the stopwatch arrow crossed the division (the "execution" stage of the action) and 1.5 seconds after the stopwatch arrow crossed the division (the "background" stage). The obtained spectral power values were averaged separately for each stage of the activity, for each series and for all subjects. The "MatLab v6.5" package and the Wilcoxon test for related samples were used for statistical data processing.

Results. Bilinguals (men and women) showed a more pronounced decrease in the spectral power of the mu rhythm when observing and pronouncing emotional and non-emotional words in their native and non-native languages compared to monolinguals (men and women), which indicates a more significant activation of "communicative" mirror neurons in bilinguals.

Conclusion. It is assumed that the detected intergroup differences in the activation of mirror neurons are due to the fact that the acquisition of a second language was accompanied by an increase in the number of "communicative" mirror neurons in the corresponding areas of the cortex due to neurogenesis in bilinguals.

The results obtained indicate an important role of learning in the formation of the mirror neuron system. However, this does not exclude the possible influence of hereditary factors on this process.

Keywords: mirror neuron system, mu rhythm, observation and pronunciation of words, neurogenesis, learning.

References

1. Bonini L, Rotunno C., Arcuri E., Gallese V. Mirror neurons 30 years later: implications and applications, *Trends in cognitive sciences*, **26**, **9**, 767 (2022).
2. Hari E., Cengiz C., Kılıç F., Yurdakoş E. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarına klinik yaklaşım, *Journal of Istanbul Faculty of Medicine*, **84**, **3**, 430 (2021).
3. Farina E., Borgnis F., Pozzo T. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders, *Journal of Neuroscience Research*, **98**, **6**, 1070 (2020).
4. Heyes C., Catmur C. What happened to mirror neurons? *Perspectives on Psychological Science*, **17**, **1**, 153 (2022).
5. Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system, *Annual Review of Neuroscience*, **27**, 169 (2004).
6. Alikina M. A., Makhin S. A. and Pavlenko V. B. EEG sensorimotor rhythm: amplitude, frequency, topography, age-dependency and functional meaning, *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology and chemistry*, **2** (**2**), **3** (2016).
7. Farina E., Borgnis F., Pozzo T. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders, *J. of Neurosci. Research*, **98**, **6**, 1070 (2020).
8. Emre H., Canberk C., Ferhat K., Ertan Y. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarına klinik yaklaşım, *Journal of Istanbul Faculty of Medicine*, **84**, **3**, 430 (2021).
9. Mårtensson J., Eriksson J., Bodammer N. C., Lindgren M., Johansson M., Nyberg L., Lövdén M. Growth of language-related brain areas after foreign language learning, *Neuroimage*, **63**, **1**, 240 (2012). doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.06.043