

ФИЗИОЛОГИЯ

УДК 612.821.3

doi: 10.17223/19988591/45/5

Ю.В. Бушов¹, М.В. Светлик², Е.А. Есипенко¹, С.Р.-К. Джафарова¹

¹ Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

² Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия

Корковые взаимодействия и спектральные характеристики мю-ритма у человека при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-013-00758.

Изучены спектральные характеристики мю-ритма и корковые взаимодействия на частоте этого ритма у юношей при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова. Обнаружены статистически значимые по сравнению с фоном изменения спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма в центральных областях коры. Характер этих изменений зависит от частоты ритма: на одних частотах наблюдается рост спектральной мощности ЭЭГ, на других – снижение. Обнаружено также усиление уровней корковых связей на частоте мю-ритма между центральными и лобными, центральными и височными, центральными и затылочными зонами коры на этапах подготовки и выполнения коммуникативного действия. Полученные данные свидетельствуют о том, что мю-ритм включает ряд частот, которые имеют разное функциональное значение и отражают активность разных нейросетевых осцилляторов. Установлено, что корковые взаимодействия и спектральные характеристики мю-ритма отличаются при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова.

Ключевые слова: коммуникативные зеркальные нейроны; произнесение слов; мю-ритм; корковые взаимодействия.

Введение

Изучение роли зеркальных нейронов в когнитивных процессах является актуальной научно-практической проблемой, имеющей важное значение для понимания социального поведения человека. Согласно популярной в настоящее время гипотезе [1], зеркальные нейроны могут служить нейрональной основой для интерпретации действий, подражательного обучения и

имитации поведения других людей. Важным аспектом указанной проблемы является поиск надежных маркеров активации этих нейронов. Особый интерес в этом плане представляет так называемый, мю-ритм частотой 8–13 Гц, который регистрируется в центральных областях коры и не подавляется при зрительной и слуховой стимуляции [2]. Установлено, что депрессия этого ритма, как и активация зеркальных нейронов, наблюдается не только при выполнении человеком какого-либо действия, но также при наблюдении и мысленном воспроизведении этого действия [2, 3]. Вместе с тем проведенные исследования дали неоднозначные результаты. В частности, в опытах с параллельной регистрацией ЭЭГ и ФМРТ-сканированием мозга при наблюдении хватательных движений подтверждена связь депрессии мю-ритма с активацией системы зеркальных нейронов у человека [4]. Однако другие авторы [5] при изучении электрической активности мозга в центральных и затылочных отведениях при наблюдении за «биологическими» движениями (руками) и небологическими движениями (калейдоскопически движущимися стимулами) приходят к выводу о том, что подавление мю-ритма не является действенным средством изучения активности зеркальных нейронов. На основе полученных данных эти авторы [5] утверждают, что подавление мю-ритма может быть использовано как индикатор активации зеркальных нейронов человека, но эффект слабый, ненадежный и легко смешивается с подавлением затылочного альфа-ритма.

Кроме того, некоторые исследователи [6] выделяют в мю-ритме два поддиапазона: 8–10 и 10–12 Гц, которые, по их мнению, функционально различаются. По данным этих авторов [6], низкочастотная составляющая мю-ритма (8–10 Гц) проявляет «неспецифическую» десинхронизацию, регистрируемую при разных движениях, в то время как высокочастотная составляющая (10–12 Гц) проявляет «специфическую» десинхронизацию, которая отчетливо различается при движениях пальцев руки и ступни. В ряде исследований обнаружена зависимость реактивности мю-ритма от индивидуальных особенностей человека [7–10]. В частности, при наблюдении и выполнении движений руками из 22 здоровых испытуемых значительные изменения мощности мю-ритма обнаружены у 18 – во время движения и у 11 – во время просмотра изображений движения. У 8 испытуемых эти изменения наблюдались в обоих случаях. В большинстве случаев изменения мощности мю-ритма во время движения связаны с уменьшением его амплитуды. Однако у 2 испытуемых они связаны с увеличением и у 9 – с уменьшением амплитуды мю-ритма во время наблюдения [9].

Изучение мю-ритма при подготовке [11] и выполнении [12, 13] речевых действий показало, что «коммуникативные» движения сопровождаются такими же изменениями его амплитуды, как и другие движения. Поэтому некоторые исследователи считают [14], что мю-ритм можно использовать как показатель сенсомоторной интеграции речи, а измерения мю-ритма целесообразно проводить не только в альфа-, но и в бета-диапазонах частот [15, 16].

Все эти данные указывают на необходимость дальнейших исследований, направленных, в частности, на изучение зависимости реактивности мю-ритма от вида выполняемых действий и индивидуальных особенностей человека, на выяснение функциональной значимости различных частотных составляющих этого ритма.

Цель исследования – изучение корковых взаимодействий на частоте мю-ритма и спектральных характеристик этого ритма у человека на разных этапах деятельности, связанной с наблюдением, произнесением и мысленным воспроизведением неэмоционального слова.

Материалы и методики исследования

В исследованиях участвовали добровольцы, практически здоровые юноши (32 человека) в возрасте от 18 до 23 лет (средний возраст $21 \pm 1,6$ лет), учащиеся томских вузов, правши. Все испытуемые дали информированное согласие на участие в данном исследовании, которое одобрено комиссией по биоэтике Биологического института Томского государственного университета (г. Томск, Россия). Для решения поставленных задач проведены три серии экспериментов. В первой серии («Наблюдение») испытуемый наблюдал за оператором, который беззвучно одними губами произносил слово «Раз», когда стрелка секундомера на экране монитора пересекала деления 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 и 55 с. Всего стрелка секундомера совершала 5 оборотов. В ходе эксперимента оператор располагался за столом, на котором на расстоянии 40–50 см от испытуемого находился монитор компьютера. Испытуемый при этом находился спереди и справа на расстоянии 70–80 см от него и следил только за его губами. Во второй серии («Произнесение слова») испытуемый сам выполнял указанную деятельность, а в третьей серии («Мысленное воспроизведение слова») – в указанные моменты времени мысленно произносил то же слово. При произнесении или мысленном воспроизведении слова 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. С целью изучения корковых связей на частоте мю-ритма ЭЭГ предварительно фильтровали. Для этого применяли полосовой фильтр Баттерворта 20-го порядка с коэффициентом подавления частот выше 13 Гц не менее 80 дБ и частот

ниже 8 Гц не менее 40 дБ. При обработке полученных данных подсчитывали максимальные значения кросскорреляционных функций и оценки спектральной мощности на коротких (1,5 с), лишенных артефактов, отрезках записи ЭЭГ за 3 с (фон) и 1,5 с (этап подготовки) до пересечения стрелкой секундомера соответствующего деления и сразу после указанного события (этап выполнения действия). Полученные значения коэффициентов корреляции и оценки спектральной мощности усредняли отдельно для каждого этапа деятельности, для каждой серии и по всем испытуемым. При подсчете кросскорреляционных функций опирались на существующие рекомендации [17] о том, что максимальный временной сдвиг должен быть не более одной десятой длины реализации, которая выбиралась больше или равной десяти периодам мю-ритма (1,5 с). Для описания спектра мощности ЭЭГ применяли преобразование Фурье. Расчет спектра выполнен с аппроксимацией на целые гармоники (8, 9, 10, 11, 12, 13 Гц), что позволило существенно упростить последующую статистическую обработку и сравнительный анализ результатов. При статистической обработке данных использовали пакет «MatLab v6.5», непараметрический дисперсионный анализ и критерий Вилкоксона для связанных выборок.

Результаты исследования и обсуждение

В исследованиях на животных при изучении активности зеркальных нейронов широко используется метод регистрации импульсной активности этих нейронов с помощью интрацеребральных электродов. Однако по этическим соображениям в наблюдениях на людях этот метод не применяется. Поэтому в настоящем исследовании для этих целей используется электроэнцефалографический метод, а в качестве маркеров активности зеркальных нейронов исследуются спектральные характеристики мю-ритма и корковые взаимодействия на частоте этого ритма.

Проведенные исследования позволили обнаружить статистически значимые изменения спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма на разных этапах выполняемой деятельности. Оказалось, что характер этих изменений зависит от частоты ритма. В частности, в серии «Наблюдение» на этапе выполнения действия в отведении С3 обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с фоном снижение спектральной мощности ЭЭГ на частоте 8 Гц, а на частоте 10 Гц в том же отведении наблюдается статистически значимое ($p < 0,05$) повышение спектральной мощности ЭЭГ (рис. 1).

В серии «Произнесение слова» на этапе «Подготовка» на частоте 9 Гц обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с фоном снижение спектральной мощности ЭЭГ в отведении С4, а на частоте 12 Гц в том же отведении обнаружено статистически значимое по сравнению с фоном ($p < 0,05$) повышение спектральной мощности ЭЭГ (рис. 2).

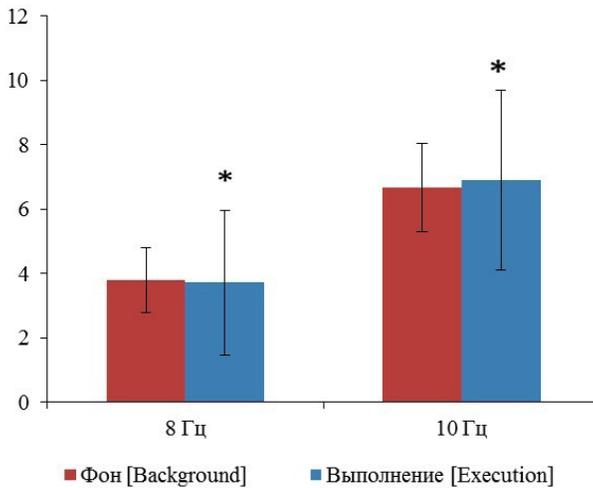


Рис 1. Зависимость изменений спектральной мощности ЭЭГ в отведении С3 на разных этапах деятельности, связанной с наблюдением за действиями оператора, от частоты мю-ритма

Примечание: на оси ординат отложены значения спектральной мощности ЭЭГ в мкВ²
[Fig 1. The dependence of changes in the spectral power of the EEG in the C3 lead at different stages of activity associated with monitoring the operator's actions on the frequency of the mu rhythm. On the Y-axis - The EEG spectral power in μV^2 . *The correlation coefficient values in relative units]

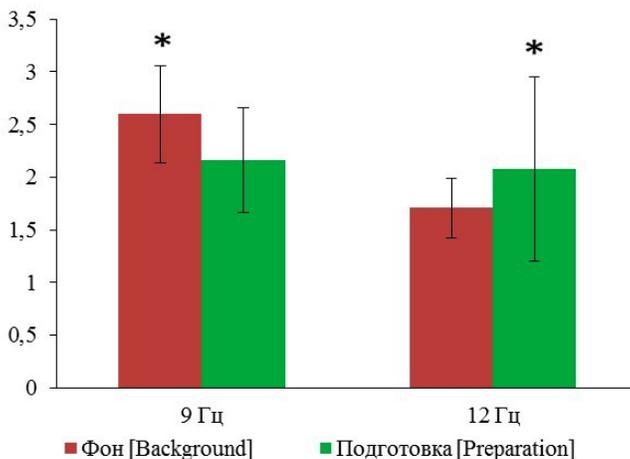


Рис. 2. Зависимость изменений спектральной мощности ЭЭГ в отведении С4 на разных этапах деятельности, связанной с произнесением слова, от частоты мю-ритма

Примечание: на оси ординат отложены значения спектральной мощности ЭЭГ в мкВ²
[Fig. 2. The dependence of changes in the spectral power of the EEG in the C4 lead at different stages of activity associated with the operator's actions on the frequency of the mu rhythm. On the Y-Axis - The EEG spectral power in μV^2 . *The correlation coefficient values in relative units]

Анализ корковых взаимодействий позволил обнаружить при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слова статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с фоном усиление уровней корковых связей на частоте мю-ритма между центральными и лобными, центральными и височными, центральными и затылочными зонами коры на этапах подготовки и выполнения действия, а также на этапе выполнения действия по сравнению с подготовкой. Характер изменений уровней корковых связей отличается при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слова. Так, например, в серии «Наблюдение» обнаружено усиление корреляций между отведениями F3 и C3 на этапе подготовки по сравнению с фоном (рис. 3, А), а также усиление корреляций между отведениями F7 и C3 на этапе выполнения действия по сравнению с фоном (рис. 3, В). Усиление корреляций на частоте мю-ритма наблюдается также между отведениями C3 и C4 на этапе выполнения коммуникативного действия по сравнению с его подготовкой (рис. 3, С).

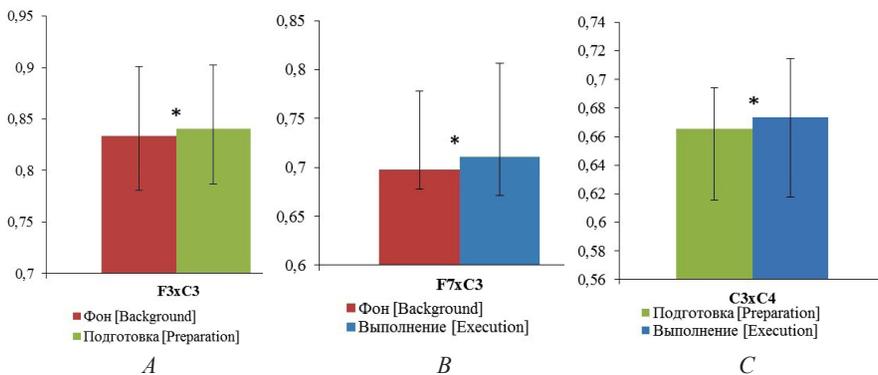


Рис. 3. Зависимость корковых взаимодействий на частоте мю-ритма от этапа выполняемой деятельности в серии «Наблюдение»

Примечание: на оси ординат отложены значения коэффициента корреляции в отн.ед.

[Fig. 3. The dependence of cortical interactions at a frequency of mu rhythm at the stage of the activities performed in the “Observation” series. *The correlation coefficient values in relative units].

В серии «Произнесение слова» обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с фоном усиление корреляций между отведениями F8 и C3 на этапе подготовки к действию (рис. 4, А), а также между отведениями F8 и C4, C3 и T5, C3 и O1 на этапе выполнения действия (рис. 4, В). На этапе выполнения действия наблюдается статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с этапом подготовки усиление корреляции между отведениями Cz и C4 (рис. 4, С).

В серии «Мысленное воспроизведение» обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с фоном усиление корреляций между отведениями Fz и C3, F7 и C4, C3 и T6 на этапе подготовки коммуникативного

действия (рис. 5, А), а также между отведениями F7 и C3 на этапе выполнения действия (рис. 5, В). На этапе выполнения действия обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$) по сравнению с этапом подготовки усиление корреляций между отведениями F7 и C4, Cz и C4, C4 и T5 (рис. 5, С).

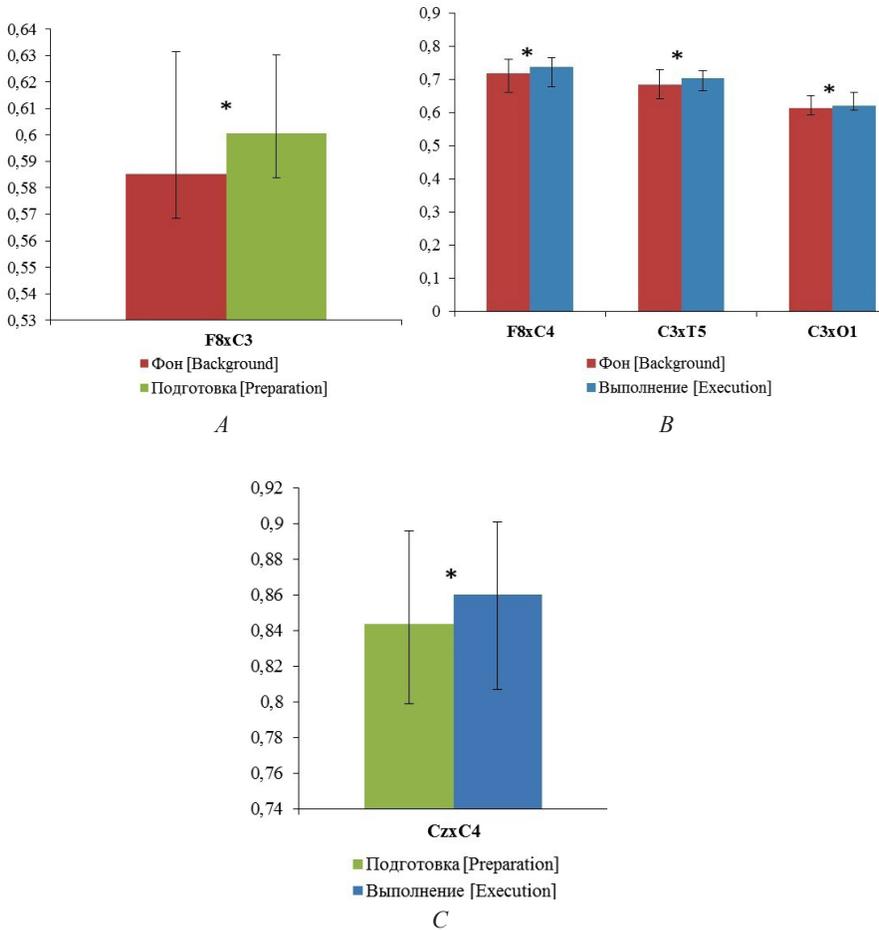


Рис. 4. Зависимость корковых взаимодействий на частоте мю-ритма от этапа выполняемой деятельности в серии «Произнесение слова»

[Fig. 4. The dependence of cortical interactions at a frequency of mu rhythm at the stage of the activities performed in the “Pronunciation of the word” series. *The correlation coefficient values in relative units]

Дисперсионный анализ выявил влияние фактора «Вид деятельности» на спектральные характеристики мю-ритма и корковые взаимодействия на частоте этого ритма при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова. Оказалось, что влияние этого фактора зависит от этапа выполняемой деятельности. Так, если на этапе «Подготовка» в отведении C3 влияние исследуемого фактора проявилось только на

частотах 8 и 13 Гц ($p = 0,0004 \div 5,25 \cdot 10^{-7}$), то на этапе «Выполнения действия» в том же отведении ЭЭГ – на всех частотах мю-ритма от 8 до 13 Гц ($p = 0,012 \div 1,05 \cdot 10^{-7}$). Если на этапе «Подготовка» исследуемый фактор оказывает статистически значимое ($p = 0,048 \div 6,29 \cdot 10^{-7}$) влияние на большинство корковых связей (20) между центральными и другими зонами коры, то на этапе «Выполнение действия» количество таких связей снижается вдвое.

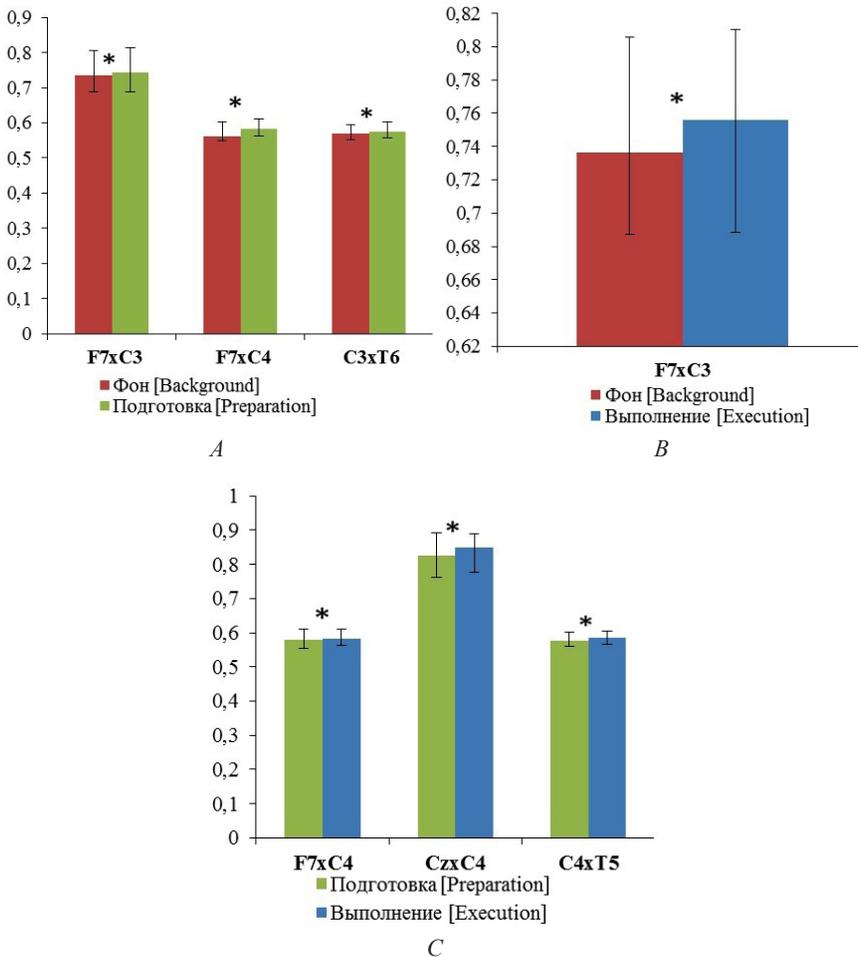


Рис. 5. Зависимость корковых взаимодействий на частоте мю-ритма

от этапа выполняемой деятельности в серии «Мысленное воспроизведение»

[Fig. 5. The dependence of cortical interactions at a frequency of mu rhythm at the stage of the activities performed in the “Mental reproduction” series. *The correlation coefficient values in relative units]

Таким образом, проведенные исследования позволили обнаружить в центральных зонах коры при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова статистически значимые по сравнению с фоном изменения спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма

на этапах подготовки и выполнения коммуникативного действия. Причем на одних частотах мю-ритма наблюдается повышение спектральной мощности ЭЭГ, на других – снижение. Эти данные свидетельствуют о том, что мю-ритм включает в себя ряд частот, которые имеют разное функциональное значение и отражают активность разных нейросетевых осцилляторов. По-видимому, обнаруженное на некоторых частотах снижение спектральной мощности мю-ритма отражает активацию зеркальных нейронов [18]. Полученные результаты подтверждаются и некоторыми литературными данными. В частности, наличие функциональной разобщенности между низкочастотным (8–10 Гц) и высокочастотным (10–12 Гц) поддиапазонами мю-ритма [6], подавление мю-ритма при аудиовизуальном предъявлении речевых сигналов [19], при подготовке [11] и выполнении [12, 13] речевых действий ранее отмечали и другие исследователи.

Наряду с этим проведенные исследования позволили обнаружить статистически значимое усиление уровней корковых связей на частоте мю-ритма между центральными и лобными, центральными и височными, центральными и затылочными зонами коры на этапах подготовки и выполнения коммуникативного действия по сравнению с фоном, а также на этапе выполнения действия по сравнению с подготовкой. Вероятно, это усиление корковых связей обусловлено передачей сигналов из зрительной, слуховой и соматосенсорной зон коры в вентральную область премоторной коры [3] и близко расположенную к ней зону Брока, в которой предположительно находятся коммуникативные зеркальные нейроны [20]. Полученные данные также свидетельствуют о том, что обнаруженные изменения спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма и корковых взаимодействий на частоте этого ритма отличаются при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слова. Эти данные свидетельствуют о том, что указанные виды когнитивной деятельности обеспечиваются разными функциональными системами, которые включают в качестве обязательного компонента подсистему коммуникативных зеркальных нейронов.

Выводы

Выполнение когнитивной деятельности, связанной с наблюдением, произнесением и мысленным воспроизведением неэмоционального слова, сопровождается:

- 1) изменением спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма; характер этих изменений зависит от частоты ритма, а также от вида и этапа выполняемой деятельности;

- 2) усилением корковых связей на частоте мю-ритма между центральными и лобными, центральными и височными, центральными и затылочными зонами коры; характер этих изменений зависит от вида и этапа выполняемой деятельности.

Литература

1. Skoyles J. R. Gesture language origins and right handedness // *Psychology*. 2000. № 11. E24.
2. Аликина М.А., Махин С.А., Павленко В.Б. Амплитудно-частотные, топографические, возрастные особенности и функциональное значение сенсомоторного ритма ЭЭГ // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология и химия*. 2016. Т. 2 (68), № 2. С. 3–24.
3. Махин С.А. Система «зеркальных нейронов»: актуальные достижения и перспективы ЭЭГ исследований // *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Биология и химия*. 2012. Т. 25 (64), № 1. С. 142–146.
4. Perry A., Bentin S. Mirror activity in the human brain while observing hand movements: A comparison between EEG desynchronization in the μ -range and previous fMRI results // *Brain Res*. 2009. Vol. 1282. PP. 126–132.
5. Hobson H.M., Bishop D.V.M. Mu suppression are a good measure of the human mirror neuron system? // *Cortex*. 2016. Vol. 82. PP. 290–310.
6. Pfurtscheller G., Neuper C., Krausz G. Functional dissociation of lower and upper frequency mu rhythms in relation to voluntary limb movement // *Clin. Neurophysiol*. 2000. Vol. 111. PP. 1873–1876.
7. Yang C.Y., Decety J., Lee S., Chen C., Cheng Y. Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: An electroencephalographic study // *Brain Res*. 2009. Vol. 1251. PP. 176–184.
8. Anwar M. N., Navid M. S., Khan M., Kitajo K. A possible correlation between performance IQ, visuomotor adaptation ability and mu suppression // *Brain Res*. 2015. 1603. PP. 84–93.
9. Höller Y., Bergmann J., Kronbichler M., Crone J.S., Schmid E.V., Thomschewski A., Butz K., Schütze V., Höller P., Trinka E. Real movement vs. motor imagery in healthy subjects // *International Journal of Psychophysiology*. 2013. Vol. 87. PP. 35–41.
10. Makhin S.A., Makaricheva A.A., Lutsyuk N.V., Cherny S.V., Orekhova L.S. Interrelation between individual level of emotional intelligence and EEG sensorimotor rhythm reactivity at the time of synchronized imitation of another person's movement // *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University*. 2013. 26(65). PP. 121–126.
11. Gehrig J., Wibral M., Arnold C., Kell C. A. Setting up the speech production network: How oscillations contribute to lateralized information routing // *Frontiers in Psychology*. 2012. Vol. 3. PP. 169.
12. Mandel A., Bourguignon M., Parkkonen L., Hari R. Sensorimotor activation related to speaker vs. listener role during natural conversation // *Neuroscience Letters*. 2016. 614. PP. 99–104.
13. Salmelin R., Sams M. Motor cortex involvement during verbal versus nonverbal lip and tongue movements // *Human Brain Mapping*. 2002. 16(2). PP. 81–91.
14. Saltuklaroglu T., Bowers A., Harkrider A.W., Casenhiser D., Reilly K., Jenson D.E., Thorntond D. EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing // *Brain and Language*. 2018. Vol. 187, PP. 41–61. doi: [10.1016/j.bandl.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2018.09.005)
15. Buzsaki G. *Rhythms of the Brain*. New York : Oxford University Press Inc., 2006.
16. Kane N., Acharya J., Beniczky S., Caboclo L., Finnigan S., Kaplan P.W. Shibusaki H., Pressler R, van Putten MJAM. A revised glossary of terms most commonly used by clinical electroencephalographers and updated proposal for the report format of the EEG findings. Revision 2017 // *Clinical Neurophysiology Practice*. 2017. 2. PP. 170–185.
17. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М. : Мир, 1971. 408 с.

18. Риццолатти Дж., Синигалья К. Зеркала в мозге: О механизмах совместного действия и сопереживания. М.: Языки славянских культур, 2012. 223 с.
19. Crawcour S., Bowers A., Harkrider A., Saltuklaroglu T. Mu wave suppression during the perception of meaningless syllables: EEG evidence of motor recruitment // *Neuropsychologia*. 2009. Vol. 47, Iss. 12. PP. 2558–2563.
20. Buccino G., Lui F., Canessa N., Patteri I., Lagravinese G., Benuzzi F., Porro C.A., Rizzolatti G. Neural circuits involved in recognition of actions performed by non con-specifices: an fMRI study // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2004. 16. PP. 114–126.

Поступила в редакцию 01.09.2018 г.; повторно 23.01.2019 г.;
принята 15.02.2019 г.; опубликована 21.03.2019 г.

Авторский коллектив:

Бушов Юрий Валентинович – д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой физиологии человека и животных, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36).

E-mail: bushov@bio.tsu.ru

Светлик Михаил Васильевич – канд. биол. наук, доцент кафедры медицинской и биологической кибернетики, Сибирский государственный медицинский университет (Россия, 634050, Томск, Московский тракт, 2).

E-mail: mihav@ssmu.ru

Есипенко Елена Александровна – канд. биол. наук, доцент кафедры генетической и клинической психологии, факультет психологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36).

E-mail: esipenkoea@gmail.com

Джафарова Самира Рамиз-Кызы – студент кафедры физиологии человека и животных, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36).

E-mail: samira9508@gmail.com

For citation: Bushov YuV, Svetlik MV, Esipenko EA, Djafarova SR-K. Cortical interactions and spectral characteristics of the mu rhythm in humans during observation, pronunciation and mental pronunciation of non-emotional words. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2019;45:91-105. doi: 10.17223/19988591/44/5 In Russian, English Summary

Yury V. Bushov¹, Mikhail V. Svetlik², Elena A. Esipenko¹, Samira R-K. Djafarova¹

¹ Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation

Cortical interactions and spectral characteristics of the mu rhythm in humans during observation, pronunciation and mental pronunciation of non-emotional words

The study of the role of mirror neurons in cognitive processes is an important problem of modern psychophysiology. Therefore, an urgent task is to search for and study EEG correlates of the activation of mirror neurons. The aim of the research was to study the cortical interactions at the frequency of the mu rhythm and the spectral characteristics of this rhythm in humans at different stages of activity related to observation, pronunciation and mental pronunciation of a non-emotional word.

The studies involved volunteers, practically healthy young men (32 people) aged 18 to 23 years old (average age 21 ± 1.6 years), students of Tomsk universities, right-handers. All subjects gave informed consent to participate in this study, which was approved by the Commission on Bioethics of the Biological Institute of Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). Three series of experiments were

carried out for the task. In the first series ("Observation"), the subject observed the operator, who uttered the word "Raz" silently with his lips, when the stopwatch on the monitor crossed the divisions 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 and 55 s. Total stopwatch hand made 5 turns. During the experiment, the operator was located at the table, on which at a distance of 40-50 cm from him was a computer monitor. The subject, at the same time, was in front and to the right at a distance of 70-80 cm from him and watched only his lips. In the second series ("Speaking the word"), the subject himself performed the indicated activity, and in the third series ("The mental pronunciation of the word"), at specified points in time he also mentally pronounced the word. During the pronunciation or mental reproduction of the word, the subject took the place of the operator and followed the movement of the stopwatch hand on the monitor screen. Before and during the execution of the activity, the monopolar EEG was recorded using the Encephalan-131-03 24-channel encephalograph-analyzer (Medicom company, Taganrog, Russia) in the frontal areas (F3, F4, Fz, F7, F8) central (C3, C4, Cz), temporal (T3, T4, T5, T6), parietal (P3, P4, Pz) and occipital (O1, O2) leads by the "10-20%" system. The leads A1 and A2 were used as referents. To exclude artifacts associated with eye movement and muscle activity, EOG and EMG of the neck and forehead muscles were recorded. The sampling rate of EEG recordings was 250 Hz. To study the cortical connections at the frequency of the mu rhythm, the EEG was pre-filtered: a 20-order Butterworth bandpass filter with a frequency suppression factor above 13 Hz at least 80 dB and frequencies below 8 Hz at least 40 dB). When processing the obtained data, we calculated the maximum values of cross-correlation functions and spectral power estimates for short (1.5 s), devoid of artifacts, EEG recording periods before 3 s (background) and 1.5 s (preparation stage) with the stopwatch of the corresponding division and immediately after the specified event (stage of execution). The obtained values of the correlation coefficients and spectral power estimates were averaged separately for each stage of activity, for each series and over all subjects. When calculating the cross-correlation functions, we complied with the existing recommendations (Bendat SJ and Piersol AG.) that the maximum time shift should be no more than one-tenth of the length of the implementation, which was chosen to be greater than or equal to ten periods of mu rhythm (1.5 s). To describe the EEG power spectrum, a Fourier transform was used. The spectrum was calculated with an approximation for integer harmonics (8, 9, 10, 11, 12, 13 Hz), which made it possible to simplify the subsequent statistical processing and comparative analysis of the results. In the statistical processing of data, the MatLab v6.5 package, nonparametric analysis of variance, and the Wilcoxon criterion for related samples were used.

The conducted research allowed to detect in the central areas of the cortex when observing, pronouncing and mentally pronouncing a non-emotional word, changes in the spectral power of the EEG, which are statistically significant compared to the background, at mu rhythm frequencies during the preparation and execution of the communicative action. We found that the nature of these changes depends on the frequency of the rhythm. In particular, in the "Observation" series, at the stage of performing the action in lead C3 compared to the background, a decrease in the spectral power of the EEG at a frequency of 8 Hz is statistically significant ($p < 0.05$), and at a frequency of 10 Hz in the same lead there is a statistically significant ($p < 0.05$) increase in the spectral power of the EEG (Fig. 1). In the series "Pronouncing the word" at the "Preparing" stage at a frequency of 9 Hz compared to the background, the decrease in the spectral power of the EEG in lead C4 is statistically significant ($p < 0.05$), and at a frequency of 12 Hz in the same lead it was found significant compared to the background increase in the spectral power of the EEG ($p < 0.05$) (Fig. 2). The obtained data indicate that the mu wave includes a series of frequencies which have different

functional importance and reflect the activity of different neural oscillators. Apparently, the decrease in the spectral power of the mu rhythm observed at some frequencies reflects the activation of mirror neurons. Analysis of cortical interactions allowed to detect statistically significant ($p < 0.05$), in a series of observations, pronouncing and mental pronouncing of a word compared to the background, enhancement of cortical connections at the mu rhythm frequency between central and frontal, central and temporal areas of the cortex at the stages of preparing and executing an action, as well as at the stage of executing an action in comparison with preparation. The nature of changes at the levels of cortical communication is different in the series of observation, pronunciation and mental pronunciation of the word. For example, in the Observation series, there was an increase in correlations between leads F3 and C3 at the preparation stage compared with the background (Fig. 3A), as well as increased correlations between leads F7 and C3 at the stage of performing the action compared with the background (Fig. 3B). An increase in the level of correlations at the frequency of the mu rhythm is also observed between leads C3 and C4 at the stage of executing a communicative action compared to its preparation (Fig. 3C). In the "pronunciation of the word" series, we observed statistically significant ($p < 0.05$), compared with the background, increased correlations between leads F8 and C3 at the stage of preparation for action (Fig. 4A), as well as between leads F8 and C4, C3 and T5, C3 and O1 at the stage of performing the action (Fig. 4B). At the stage of performing the action, there is a statistically significant ($p < 0.05$), compared with the preparation stage, increase in the correlation between the Cz and C4 leads (Fig. 4C). In the "Mental Pronunciation" series, there was a statistically significant ($p < 0.05$), compared with the background, amplification of correlations between leads Fz and C3, F7 and C4, C3 and T6 at the preparation stage of the communicative action (Fig. 5A), as well as between leads F7 and C3 at the stage of performing the action (Fig. 5B). At the stage of performing the action compared to the stage of preparation, the increased correlations between the leads F7 and C4, Cz and C4, C4 and T5 (Fig. 5C) were statistically significant ($p < 0.05$). Probably, the observed enhancements of cortical connections are due to the transmission of signals from the visual, auditory and somatosensory zones of the cortex to the ventral region of the premotor cortex and, close to it, the Broca zone, in which there are apparently communicative mirror neurons. Dispersion analysis revealed a statistically significant ($p < 0.05$) influence of the "type of activity" factor on the spectral characteristics of the mu rhythm and cortical interactions at the frequency of this rhythm when observing, pronouncing and mentally pronouncing a non-emotional word. We established that the influence of this factor depends on the stage of the activity performed. So, if at the stage of "Preparation" in lead C3, the influence of the studied factor manifested itself only at frequencies of 8 and 13 Hz ($p = 0.0004 \div 5.25 \cdot 10^{-7}$), then at the stage of "Execution" in the same lead, EEG at all mu rhythm frequencies from 8 to 13 Hz ($p = 0.012 \div 1.05 \cdot 10^{-7}$). If at the "Preparation" stage, the factor under consideration has a statistically significant ($p = 0.048 \div 6.29 \cdot 10^{-7}$) effect on the majority of cortical connections (20) between the central and other areas of the cortex, then at the "Execution" stage, the number of such connections decreases twice.

The results show that the spectral characteristics of the mu rhythm and cortical interactions at the frequency of this rhythm depend on the type and stage of the performed activity, and that the types of cognitive activity associated with observation, pronunciation and mental pronunciation of the word are provided by different functional systems that, as a mandatory component, include a subsystem of communicative mirror neurons.

The paper contains 5 Figures and 20 References.

Key words: communicative mirror neurons; pronunciation of words; mu rhythm; cortical interactions.

Funding: This research was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No 18-013-00758).

References

1. Skoyles JR. Gesture language origins and right handedness. *Psychology*. 2000;11:E24.
2. Alikina MA, Makhin SA, Pavlenko VB. Eeg sensorimotor rhythm: amplitude, frequency, topography, age-dependency and functional meaning. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2016;2(68)(2):3-24. In Russian, English Summary
3. Makhin SA. "Mirror neurons" system: Current achievements and research trends in use of the EEGbased methods. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2012;25(64)(1):142-146. In Russian
4. Perry A, Bentin S. Mirror activity in the human brain while observing hand movements: A comparison between EEG desynchronization in the μ -range and previous fMRI results. *Brain Res*. 2009;1282:126-132. doi: [10.1016/j.brainres.2009.05.059](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.05.059)
5. Hobson HM, Bishop DVM. Mu suppression are a good measure of the human mirror neuron system? *Cortex*. 2016;82:290-310. doi: [10.1016/j.cortex.2016.03.019](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.03.019)
6. Pfurtscheller G, Neuper C, Krausz G. Functional dissociation of lower and upper frequency mu rhythms in relation to voluntary limb movement. *Clin Neurophysiol*. 2000;111:1873-1876. doi: [10.1016/S1388-2457\(00\)00428-4](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00428-4)
7. Yang CY, Decety J, Lee S, Chen C, Cheng Y. Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: An electroencephalographic study. *Brain Res*. 2009;1251:176-184. doi: [10.1016/j.brainres.2008.11.062](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.11.062)
8. Anwar MN, Navid MS, Khan M, Kitajo K. A possible correlation between performance IQ, visuomotor adaptation ability and mu suppression. *Brain Res*. 2015;1603:84-93. doi: [10.1016/j.brainres.2015.01.045](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.01.045)
9. Höller Y, Bergmann J, Kronbichler M, Crone JS, Schmid EV, Thomschewski A, Butz K, Schütze V, Höller P, Trinka E. Real movement vs. motor imagery in healthy subjects. *Int J Psychophysiology*. 2013;87:35-41. doi: [10.1016/j.ijpsycho.2012.10.015](https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.10.015)
10. Makhin SA, Makaricheva AA, Lutsyuk NV, Cherny SV, Orekhova LS. Interrelation between individual level of emotional intelligence and EEG sensorimotor rhythm reactivity at the time of synchronized imitation of another person's movement. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University*. 2013;26(65)(4):121-126. In Russian, English Summary
11. Gehrig J, Wibrall M, Arnold C, Kell CA. Setting up the speech production network: How oscillations contribute to lateralized information routing. *Frontiers in Psychology*. 2012;3:169. doi: [10.3389/fpsyg.2012.00169](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00169)
12. Mandel A, Bourguignon M, Parkkonen L, Hari R. Sensorimotor activation related to speaker vs. listener role during natural conversation. *Neuroscience Letters*. 2016;614:99-104. doi: [10.1016/j.neulet.2015.12.054](https://doi.org/10.1016/j.neulet.2015.12.054)
13. Salmelin R, Sams M. Motor cortex involvement during verbal versus nonverbal lip and tongue movements. *Human Brain Mapping*. 2002;16(2):81-91. doi: [10.1002/hbm.10031](https://doi.org/10.1002/hbm.10031)
14. Saltuklaroglu T, Bowersb A, Harkridera AW, Casenhisera D, Reillya KJ, Jensonc DE, Thorntond D. EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing. *Brain and Language*. 2018;187:41-61. doi: [10.1016/j.bandl.2018.09.005](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2018.09.005)
15. Buzsaki G. Rhythms of the Brain. New York: Oxford University Press Inc.; 2006. 465 p.
16. Kane N, Acharya J, Benickzy S, Caboclo L, Finnigan S, Kaplan PW, Shibasaki H, Pressler R, van Putten MJAM. A revised glossary of terms most commonly used by clinical electroencephalographers and updated proposal for the report format of the EEG findings. Revision 2017. *Clinical Neurophysiology Practice*. 2017;2:170-185. doi: [10.1016/j.cnp.2017.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cnp.2017.05.001)

[cnp.2017.07.002](#)

17. Bendat SJ, Piersol AG. Random Data: Analysis and measurement procedures. Translated from English Matushevskiy GV; Prival'skiy VE, editor. Moscow: Mir Publ.; 1971. 408 p.
18. Rizzolatti G, Sinigaglia C. Mirrors in the brain: How our minds share actions, emotions. Translated from English Kurakovoy OA, and Falikman MV. Moscow: LRC Publishing House; 2012. 223 с.
19. Crawcour S, Bowers A, Harkrider A, Saltuklaroglu T. Mu wave suppression during the perception of meaningless syllables: EEG evidence of motor recruitment. *Neuropsychologia*. 2009;47(12):2558-2563. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.001](#)
20. Buccino G, Lui F, Canessa N, Patteri I, Lagravinese G, Benuzzi F, Porro CA, Rizzolatti G. Neural circuits involved in recognition of actions performed by non con-specifics: An fMRI study. *J Cognitive Neuroscience*. 2004;16:114-126. doi: [10.1162/089892904322755601](#)

*Received 01 September 2018; Revised 23 January 2019;
Accepted 15 February 2019; Published 21 March 2019*

Author info:

Bushov Yury V, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Department of Human and Animal Physiology, Institute of Biology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: bushov@bio.tsu.ru

Svetlik Mikhail V, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of Medical and Biological Cybernetics, Siberian State Medical University, 2 Moskovsky tr., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: mihav@ssmu.ru

Esipenko Elena A, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of Genetic and Clinical Psychology, Faculty of Psychology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: esipenkoea@gmail.com

Djafarova Samira R-K, Student, Department of Human and Animal Physiology, Institute of Biology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: samira9508@gmail.com