

4. Климов А. С., Булка А. П., Булка К. А. Общие закономерности психофизиологических реакций организма на воздействие дозированных стрессорных факторов // Психофизиология профессионального здоровья человека: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 15-летию кафедры военной психофизиологии. 2012. С. 212-218.
5. Манухина С. Ю. и др. Психология труда : учебник и практикум для академического бакалавриата. М. 2015. 485 с.
6. Мельникова И. Е. Адаптация детей и подростков в условиях эмоционального стресса // Гуманитарный вектор. 2013. № 1 (33). С. 138-144
7. Методические рекомендации к аппаратно-программному комплексу "Эгоскоп" А_3184-24_РП от 01.04.2008г. Научно-производственно-конструкторская фирма "Медиком МТД".
8. Сиваченко И. Б., Ловягина А. Е., Медведев Д. С. Разработка и апробация модели воздействия стрессогенными факторами для оценки эмоционального напряжения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019; 21(1). С.155-162
9. Сиваченко И. Б., Медведев Д. С., Ловягина А. Е. Стрессоустойчивость мужчин 20-30 лет с различным уровнем физической активности // Вестник спортивной науки. 2019. № 4. С. 55-59.
10. Щербатых Ю. В. Психология стресса и методы коррекции. СПб.: Питер, 2006. 256 с.

List of references:

1. Bodrov V. A., Orlov V. Ya. Psychology and reliability: a person in technology control systems. M.: Institute of Psychology RAS, 1998. 288 p.
2. Gavrilova E. A. Rhythmokardiography in sport. North West St. Medicine Univ. Publ., 2014. 164 p.
3. Zotov M. V. Implementation of the psychophysiological approach to assessing stress tolerance // Materials of the Russian scientific conference "Psychophysiology of human professional activities". SPb. 2004. 96-97 p.
4. Klimov A. S., Bulka A. P., Bulka K. A. General regularities of psychophysiological reactions of the body on the influence of dosed stress factors. Sankt Peterburg. 2012. No. 212. P. 212-218.
5. Manukhina S. Y. and others. Psychology of work: tutorial and workshop for undergraduate academic. M. 2015. 485 p.
6. Melnikova I. E. Adaptation of children and adolescents under emotional stress. // Gumanitarny`j vektor. 2013. No. 1 (33). P. 138-144
7. Guidelines for the hardware-software complex "Egoscop" model A_3892-01_MP from 01.04.2008. Scientific and production engineering firm "Medicom MTD".
8. Sivatchenko I. B., Lovyagina A. Ye., Medvedev D. S. Development and testing of the impact model by stress-related factors for the evaluation of emotional effort // Medicine of extreme situations. 2019. No. 21 (1). P. 155-162.
9. Sivatchenko I. B., Lovyagina A. Ye., Medvedev D. S. Stress resistance of men 20-30 years with different levels of physical activity // The Bulletin of Sports Science. 2019. No. 4. P. 55-59.
10. Shcherbatykh Yu. V. Psychology of stress and methods of correction. SPb. Piter. 2006. 256 p.

Статья поступила в редакцию 18.01.2020

Статья принята к публикации 22.03.2020

УДК 612.821.3

ЗАВИСИМОСТЬ АКТИВНОСТИ "КОММУНИКАТИВНЫХ" ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ У ЧЕЛОВЕКА ОТ ПОЛА И ЛАТЕРАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МОЗГА*

¹Бушов Ю.В., ²Ушаков В.Л., ¹Светлик М.В., ²Карташов С.И., ¹Есипенко Е.А., ²Орлов В.А.

Российская Федерация, Томск,

¹Томский государственный университет

Российская Федерация, Москва

²НИЦ "Курчатовский институт"

bushov@bio.tsu.ru

Аннотация. Целью исследований явилось изучение активности "коммуникативных" зеркальных нейронов у мужчин и женщин при наблюдении и произнесении вслух и про себя неэмоционального слова "Раз" в зависимости от пола и латеральной организации мозга.

В ходе предварительного обследования изучали особенности латеральной организации мозга с определением ведущей руки (метод анкетирования) и речевого полушария (дихотический тест). При наблюдении и произнесении слова "Раз" регистрировали ЭЭГ в лобных, центральных, височных, теменных и затылочных отведениях по системе 10-20%. С целью пространственной локализации зеркальных нейронов в части опытов в тех же условиях исследовали активность мозга с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). В качестве ЭЭГ-маркеров активации зеркальных нейронов использовали депрессию мю-ритма и корковые взаимодействия на частоте этого ритма между центральными и другими зонами коры. При статистической обработке ЭЭГ-данных использовали пакет "MatLab v6.5", корреляционно-спектральный анализ, непараметрический дисперсионный анализ и критерий Вилкоксона для независимых и связанных выборок. Обработка фМРТ-данных проводилась с помощью пакета SPM8. В рамках каждой из парадигм были проведены попарные сравнения на основе статистики Стьюдента и получены индивидуальные и групповые статистические карты с уровнем значимости $p < 0.001$. Все полученные статистические карты наносились на шаблонное T-1 изображение и производилась анатомическая привязка "активных" вокселей к атласу CONN.

Установлено, что выполнение деятельности, связанной с наблюдением и произнесением неэмоционального слова, сопровождается депрессией мю-ритма на отдельных частотах и, чаще всего, усилением уровней корковых связей на частоте этого ритма между центральными и другими зонами коры. Характер этих изменений существенно зависит от частоты мю-ритма, вида и этапа выполняемой деятельности, пола и латеральной организации мозга.

Результаты фМРТ-исследования показали, что наблюдение за произнесением неэмоционального слова сопровождается активацией областей коры, где локализуются "коммуникативные" зеркальные нейроны, а также других зон коры и базальных ганглиев. Вероятно, эти структуры обеспечивают интерпретацию речевых действий. Произнесение неэмоционального слова вслух или про себя сопровождается активацией предклинья, язычной коры, клиновидной коры, латеральной затылочной коры, справа и слева, средней височной извилины, слева, угловой извилины, слева, средней и нижней лобной извилин, дополнительной моторной коры, прецентральной извилины и мозжечка, которые, вероятно, обеспечивают продукцию речи.

Предполагается, что основная функция "коммуникативных" зеркальных нейронов заключается в обеспечении взаимодействия между сенсорными, двигательными и фронтальными зонами коры, а также местами хранения в мозге моторно-речевых программ, что и создает необходимые условия для интерпретации речевых действий.

Ключевые слова: зеркальные нейроны, наблюдение и произнесение слова, мю-ритм, фМРТ

DEPENDENCE OF THE ACTIVITY OF "COMMUNICATIVE" MIRROR NEURONS IN HUMANS ON GENDER AND LATERAL ORGANIZATION OF THE BRAIN

¹Bushov Yu. V., ²Ushakov V. L., ¹Svetlik M. V., ²Kartashov S. I., ¹Esipenko E. A., ²Orlov V. A.
Russian Federation, Tomsk,
¹Tomsk State University
Russian Federation, Moscow
²SIC "Kurchatov Institute"

Abstract. The aim of the research was to study the activity of "communicative" mirror neurons in men and women when observing and pronouncing aloud and silently the unemotional word "Raz" depending on gender and on lateral brain organization.

During the preliminary examination, we studied the features of the lateral organization of the brain, taking into account the leading arm (questioning method) and the speech hemisphere (dichotic test). When observing and pronouncing the word "Raz", EEG was recorded in the frontal, central, temporal, parietal and occipital leads according to the 10-20% system. To assess the spatial localization of mirror neurons in some experiments, the activity of the brain was studied under the same conditions using functional magnetic resonance imaging (fMRI). As EEG markers of activation of mirror neurons, mu rhythm depression and cortical interactions at the frequency of this rhythm between the central and other zones of the cortex were used. For statistical processing of EEG data, the MatLab v6.5 package, correlation spectral analysis, nonparametric analysis of variance and Wilcoxon test for independent and related samples were used. The fMRI data were processed using the SPM8 package. Within each of the paradigms, pairwise comparisons were made based on student statistics and individual and group statistical maps were obtained with significance level $p < 0.001$. All the obtained statistical maps were applied to the template T-1 image and the "active" voxels were anatomically linked to the CONN atlas.

It has been established that the implementation of activities related to the observation and pronunciation of a non-emotional word is accompanied by depression of the mu rhythm at individual frequencies and, most often, increased levels of cortical connections at the frequency of this rhythm between the central and other zones of the cortex. The nature of these changes depends significantly on the frequency of the mu rhythm, on the type and stage of the activity performed, on gender and on the lateral organization of the brain.

The results of fMRI studies have shown that observation of the pronunciation of an unemotional word is accompanied by activation of the cortical areas where the "communicative" mirror neurons are localized, as well as other cortical areas and the basal ganglia. It is likely that these structures provide an interpretation of speech actions. Saying the non-emotional words aloud or silently accompanied by activation precuneus, lingual cortical wedge cortex, the lateral occipital cortex, the right and the left middle temporal gyrus, left angular gyrus, the left, middle and inferior frontal gyrus, supplementary motor cortex, precentral gyrus and cerebellum that are likely to provide speech production.

It is assumed that the main function of "communicative" mirror neurons is to provide interaction between the sensory, motor and frontal zones of the cortex, as well as storage areas in the brain of motor-speech programs, which creates the necessary conditions for the interpretation of speech actions.

Key words: mirror neurons, observation and pronunciation of a word, mu rhythm, fMRI

Изучение роли зеркальных нейронов в когнитивных процессах является актуальной проблемой современной психофизиологии. Согласно популярной в настоящее время гипотезе [13], зеркальные нейроны могут служить нейрональной основой для интерпретации действий, подражательного обучения и имитации поведения других людей. Характерным коррелятом активации зеркальных нейронов является так называемый мю-ритм частотой 8-13 Гц, который регистрируется в центральных областях коры и не подавляется при зрительной и слуховой стимуляции [1]. 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 [1; 2]. Вместе с тем, проведённые в этом направлении 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 [10]. Однако, другие авторы при изучении электрической активности мозга в ходе наблюдения за "биологическими" и "небиологическими" движениями приходят к выводу о том, что подавление мю-ритма может быть использовано как индикатор активации зеркальных

нейронов человека, но эффект слабый и ненадёжный, и легко смешивается с подавлением затылочного альфа-ритма [5]. Кроме того, некоторые исследователи [11] выделяют в мю-ритме два поддиапазона 8-10 и 10-12 Гц, которые, по их мнению, функционально различаются. Некоторые исследователи отмечают, что при изучении процессов сенсомоторной координации речи целесообразно учитывать не только изменения мю-ритма в альфа-, но и в бета-диапазоне частот [12]. В ряде исследований обнаружена зависимость реактивности мю-ритма от индивидуальных особенностей человека [6; 8; 9; 14]. Однако эти данные нередко отрывочны и противоречивы.

Целью настоящего исследования явилось изучение активности "коммуникативных" зеркальных нейронов у человека при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова в зависимости от пола и латеральной организации мозга.

Материал и методы исследования

Для достижения поставленной цели методами ЭЭГ и фМРТ исследовали активность мозга у юношей и девушек при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова. В качестве маркеров активации зеркальных нейронов использовали депрессию мю-ритма в альфа- и бета-диапазонах частот, корковые взаимодействия на частоте этого ритма между центральными и другими зонами коры, результаты фМРТ-сканирования мозга.

В ЭЭГ-исследовании участвовали добровольцы, практически здоровые юноши (31 человек) и девушки (34 человека), студенты в возрасте от 18 до 23 лет. Все испытуемые дали информированное согласие на участие в этих исследованиях. Данное исследование было разрешено комиссией по биоэтике Биологического Института Томского государственного университета. В ходе предварительного обследования с помощью стандартных методов исследовали особенности латеральной организации мозга с определением ведущей руки (методом анкетирования) и речевого полушария (дихотический тест). По результатам анкетирования подсчитывали в баллах показатель мануального предпочтения (ПМП) и коэффициент правого уха (КПУ).

В сериях с наблюдением за произнесением слов испытуемый наблюдал за оператором, который беззвучно одними губами произносил слово "Раз", когда стрелка секундомера на экране монитора пересекала деления 0, 5, 10 и т. д. секунд. Стрелка секундомера совершала всего 5 оборотов. В сериях с произнесением и мысленным воспроизведением слов испытуемый сам выполнял указанную деятельность. 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 или мысленном воспроизведении слов испытуемый занимал место оператора и следил за движением стрелки секундомера на экране монитора. Перед выполнением деятельности и в процессе её выполнения регистрировали ЭЭГ монополярно с помощью 24-канального энцефалографа-анализатора "Энцефалан-131-03" 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 использовались отведения A1 и A2. Для 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 применялся 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), лишённых артефактов, отрезках записи ЭЭГ за 3 с (этап "Фон") и 1,5 с (этап "Подготовка") до пересечения стрелкой секундомера соответствующего деления и сразу

после указанного события (этап "Выполнение действия"). Полученные значения коэффициентов корреляции и оценки спектральной мощности усредняли отдельно для каждого этапа деятельности, для каждой серии и по всем испытуемым. Для описания спектра мощности ЭЭГ применялось преобразование Фурье. Расчёт спектра выполнялся с аппроксимацией на целые гармоники (8, 9, 10 и т. д. Герц), что позволяло 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.

В фМРТ-исследовании приняли участие 40 здоровых добровольцев - юноши (20 человек) и девушки (20 человек), учащиеся вузов, в возрасте от 19 до 27 лет; средний возраст 23 года. От каждого испытуемого было получено добровольное согласие на участие в эксперименте. Разрешение на проведение данных исследований было предоставлено Этической Комиссией НИЦ "Курчатовский институт". В ходе предварительного обследования вышеуказанными методами исследовали особенности латеральной организации мозга с определением ведущей руки и речевого полушария. Результаты функциональной МРТ получены в комплексе НБИКС-технологий Национального Исследовательского центра "Курчатовский институт" на томографе 3 Тл Magnetom Verio (Siemens). Исследование включало несколько серий экспериментов. В первой серии испытуемому демонстрировался видеоролик, на котором изображено неподвижное лицо оператора. Затем показывали видеоролик с изображением лица оператора, который в моменты перехода стрелки секундомера через деления 0, 5, 10 и т. д. секунд произносит слово "Раз". Во второй и третьей сериях испытуемый сам произносит слово "Раз" (в первом случае - вслух, во втором случае - про себя) в моменты перехода стрелки секундомера через деления 0, 5, 10 и т. д. секунд. В рамках каждой из парадигм были произведены попарные сравнения с использованием статистики Стьюдента и получены индивидуальные и групповые статистические карты с уровнем значимости $p < 0.001$. Все полученные статистические карты наносили на шаблонное T-1 изображение и осуществляли анатомическую привязку "активных" вокселей к атласу CONN.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты ЭЭГ-исследования

Изучение латеральной организации мозга испытуемых показало, что среди юношей преобладают "правши" (27 человек), имеются "амбидекстры" (4 человека) и отсутствуют "левши". По результатам дихотического теста они распределились следующим образом: "лица с левополушарным доминированием в отношении речи" - 13, "лица с правополушарным доминированием в отношении речи" - 3, "лица, у которых не выявлено доминантное в отношении речи полушарие" - 15. Девушки по результатам анкетирования распределились следующим образом: "правшей" - 31, "амбидекстров" - 1, "левшей" - 2. По результатам дихотического теста они распределились следующим образом: "лица с левополушарным доминированием в отношении речи" - 26, "лица с правополушарным доминированием в отношении речи" - 4, "лица, у которых не выявлено доминантное в отношении речи полушарие" - 3. Из-за малочисленности групп "левшей" и "амбидекстров" в ходе последующего анализа учитывались только данные, полученные на "правшах".

Проведённые исследования позволили обнаружить у юношей и девушек статистически значимые изменения спектральной мощности ЭЭГ в центральных областях коры на частотах мю-ритма - при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слов. Оказалось, что характер этих изменений зависит от частоты ритма, вида и этапа выполняемой деятельности. В частности, у юношей в серии "Наблюдение за произнесением неэмоционального слова" на этапе "Выполнение действия" обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$), по сравнению с фоном, снижение спектральной мощности ЭЭГ на 1,8% в отведении С3 только на частоте 8 Гц.

Наряду с этим обнаружены статистически значимые межполушарные различия изменений спектральной мощности мю-ритма на разных этапах выполняемой деятельности. Так, если у юношей в серии "Наблюдение за произнесением неэмоционального слова" в отведении С3 на частоте 8 Гц спектральная мощность мю-ритма на этапе "Выполнение действия", по сравнению с фоном, снижается ($p < 0.05$) на 1,8%, то в отведении С4 на той же частоте наблюдается повышение мощности этого ритма на 6,3% ($p < 0.02$). По-видимому, обнаруженное на некоторых частотах снижение спектральной мощности мю-ритма отражает активацию "коммуникативных" зеркальных нейронов [3], а найденные межполушарные различия в изменении спектральной мощности мю-ритма свидетельствует о преимущественной активации левополушарных "коммуникативных" нейронов.

Таблица 1 - Влияние фактора "Ведущая рука" на спектральные характеристики мю-ритма у юношей при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова в зависимости от этапа выполняемой деятельности

Этап деятельности	Отведения ЭЭГ	Частота, Гц	Уровень значимости
Фон	С3	13	0,00853
	С4	12	0,0035
	С4	13	0,00473
	Сz	13	0,00622
Подготовка	С4	12	0,04217
	С4	13	0,00529
Выполнение	С3	13	0,00839
	С4	13	0,00405
	Сz	13	0,00812

Зависимость изменений спектральных характеристик мю-ритма от его частоты, вида и этапа выполняемой деятельности обнаружена и у девушек. Так, если при наблюдении за произнесением неэмоционального слова на этапе "Подготовка" в отведении С3 на частоте 10 Гц у них наблюдается статистически значимое ($p < 0.05$), по сравнению с фоном, снижение спектральной мощности ЭЭГ на 59,4%, то на этапе "Выполнение действия" в том же отведении обнаружено статистически значимое, по сравнению с фоном, снижение спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма 10 Гц (на 26,6%, $p < 0.01$), 12 Гц (на 33,2%, $p < 0.01$) и 13 Гц (на 56,5%, $p < 0.01$). Наряду с этим, дисперсионный анализ позволил обнаружить статистически значимое влияние факторов латеральной организации мозга "Ведущая рука" и "Речевое полушарие" на спектральные характеристики мю-ритма при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова. Оказалось, что влияние указанных факторов зависит от этапа выполняемой деятельности, зоны отведения ЭЭГ и частоты. Эти данные свидетельствуют о том, что активность "коммуникативных" зеркальных нейронов существенно зависит от латеральной организации мозга. Результаты оценки влияния факторов "Ведущая рука" и "Речевое полушарие" на спектральные характеристики мю-ритма у юношей представлены в таблице 1 и таблице 2.

Кроме того, проведенный анализ позволил обнаружить влияние фактора "Пол" на спектральные характеристики ЭЭГ при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слова. Оказалось, что влияние этого фактора зависит от вида и этапа выполняемой деятельности, зоны отведения ЭЭГ и частоты. Так, например, при наблюдении за произнесением слова "Раз" статистически значимое влияние этого фактора ($p = 0.014 \div 0.042$) обнаружено на этапе "Фон" в отведении С4 на частоте 7 Гц, на этапе "Подготовка" - в

отведении С4 на частоте 14 Гц, на этапе "Выполнения действия" - в отведении Cz на частоте 14 Гц.

Таблица 2 - Влияние фактора "Речевое полушарие" на спектральные характеристики мю-ритма у юношей при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слов в зависимости от этапа выполняемой деятельности

Этап деятельности	Отведения ЭЭГ	Частота, Гц	Уровень значимости
Фон	C3	10	0,0315
	C3	11	0,00236
	C3	12	0,00944
	C3	10	0,00266
	C4	11	0,00994
	C4	12	0,00038
	C4	13	0,01774
	Cz	11	0,01794
	Cz	12	0,00206
Подготовка	Cz	13	0,0061
	C3	11	0,00824
	C3	12	0,01916
	C3	13	0,00386
	C4	11	0,00606
	C4	12	0,0002
	C4	13	0,02368
	Cz	11	0,03982
	Cz	12	0,01708
Выполнение	Cz	13	0,00062
	C3	11	0,00208
	C3	12	0,0265
	C3	13	0,00058
	C4	11	0,00424
	C4	12	0,00088
	C4	13	0,01194
	Cz	11	0,02734
	Cz	12	0,01374
Cz	13	0,00264	

При произнесении слова "Раз" статистически значимое влияние того же фактора ($p=0.018 \div 0.047$) обнаружено на этапе "Фон" в отведениях С3, С4 и Cz на частоте 14 Гц, на этапе "Подготовка" - в отведениях С3 и С4, соответственно, на частотах 12 и 14 Гц, на этапе "Выполнение действия" - в отведении С4 на частоте 12 Гц. Эти данные свидетельствуют о том, что активность "коммуникативных" зеркальных нейронов существенно зависит не только от латеральной организации мозга, но и от гендерных различий.

Анализ корковых взаимодействий на частоте мю-ритма между центральными и другими зонами коры позволил обнаружить у юношей и девушек при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении слова зависимость этих взаимодействий от вида и этапа выполняемой деятельности. Это проявилось, в частности, у юношей в статистически значимом ($p<0,05$), по сравнению с фоном, повышении уровней корковых связей на частоте мю-ритма на этапах "Подготовка" и "Выполнение действия" при наблюдении за произнесением слов. Зависимость корковых взаимодействий от этапа выполняемой деятельности у юношей при наблюдении за произнесением неэмоционального слова иллюстрируют рисунок 1.

Зависимость корковых взаимодействий на частоте мю-ритма между центральными и другими зонами коры от вида и этапа выполняемой деятельности обнаружена и у девушек. Так, если при наблюдении за произнесением неэмоционального слова в фоне коэффициент корреляции между отведениями Cz и T4 составляет $r=0.639$, то на этапе "Выполнение действия" величина этого коэффициента статистически значимо ($p=0.025$) возрастает до $r=0.653$. Если при произнесении неэмоционального слова в фоне коэффициент корреляции между отведениями C4 и P4 составляет $r=0.801$, то на этапе "Выполнение действия" величина этого коэффициента статистически значимо ($p=0.032$) возрастает до $r=0.807$. Если при мысленном воспроизведении неэмоционального слова в фоне коэффициент корреляции между отведениями Cz и P4 составляет $r=0.714$, то на этапе "Выполнение действия" величина этого коэффициента статистически значимо ($p=0.048$) возрастает до $r=0.732$.

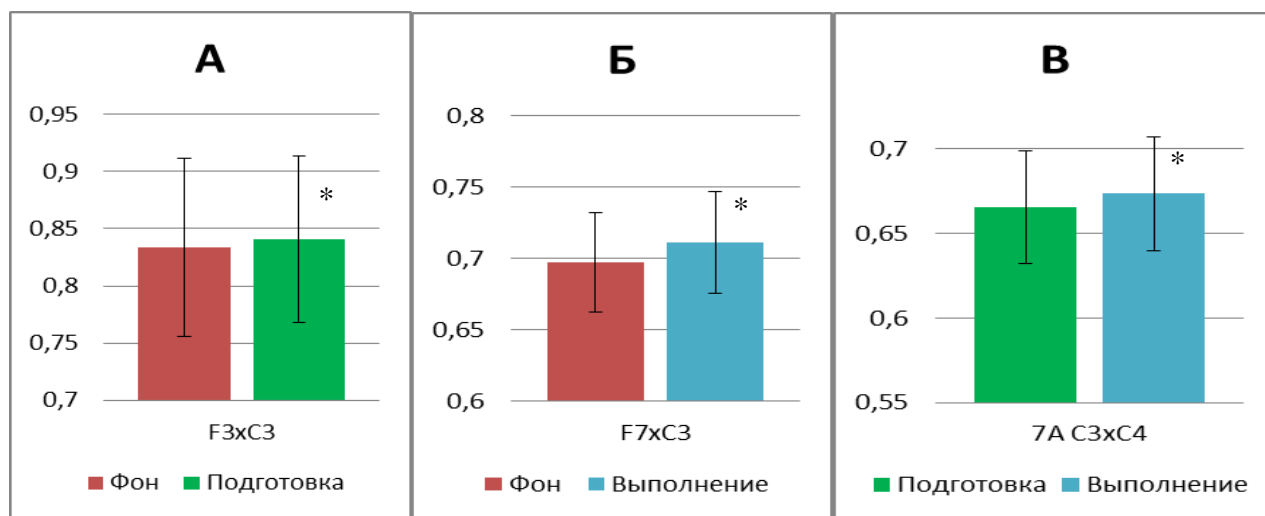


Рисунок 1 - Зависимость корковых взаимодействий на частоте мю-ритма от этапа выполняемой деятельности у юношей в серии "Наблюдение за произнесением неэмоционального слова"

Примечание: на оси ординат отложены значения коэффициента корреляции в отн.ед.;
 * - статистически значимые различия при $p < 0.05$.

Результаты фМРТ-исследования

Изучение латеральной организации мозга испытуемых показало, что из 20 юношей 10 характеризуются выраженной праворукостью, 8 - слабой праворукостью, 1 - выраженной леворукостью и 1 - слабо выраженной леворукостью. У 15 юношей речевые центры расположены в левом полушарии, у 2 - в правом, у 3 - асимметрия не выражена. Из 20 девушек 12 характеризуются выраженной праворукостью, 5 - слабой праворукостью, 1 - выраженной леворукостью, 2 - являются "амбидекстрами". У 12 девушек речевые центры расположены в левом полушарии, у 4 - в правом, у 4 - асимметрия речевых центров не выявлена.

Сравнение условий наблюдения за оператором, который произносит слово "Раз" в моменты перехода стрелки секундомера через деления 0, 5, 10, 15 и т. д. секунд с состоянием покоя (просмотр видеоролика с изображением неподвижного лица оператора), позволило обнаружить у юношей активацию следующих зон коры: средней и верхней височных извилин, справа и слева, надкраевой извилины, справа, средней лобной извилины, слева, лобной орбитальной коры, справа, дополнительной моторной коры, слева, височной площадки, слева, островковой коры, справа, прецентральной извилины, справа и поясной извилины. Кроме того, обнаружена активация и подкорковых структур: левого и правого таламуса, а также скорлупы, хвостатого ядра и бледного шара, которые относятся к

базальным ганглиям и считаются местом хранения двигательных программ. Вероятно, указанные структуры образуют функциональную систему, которая обеспечивает интерпретацию речевых действий. Гендерные различия проявились, в частности, в том, что только у девушек в тех же условиях дополнительно активируются латеральная затылочная кора, слева, угловая извилина, справа, нижняя лобная извилина, слева, а также нижняя височная извилина, справа.

Результаты сравнения активности мозговых структур при наблюдении за произнесением слова "Раз" с состоянием покоя иллюстрирует рисунок 2.

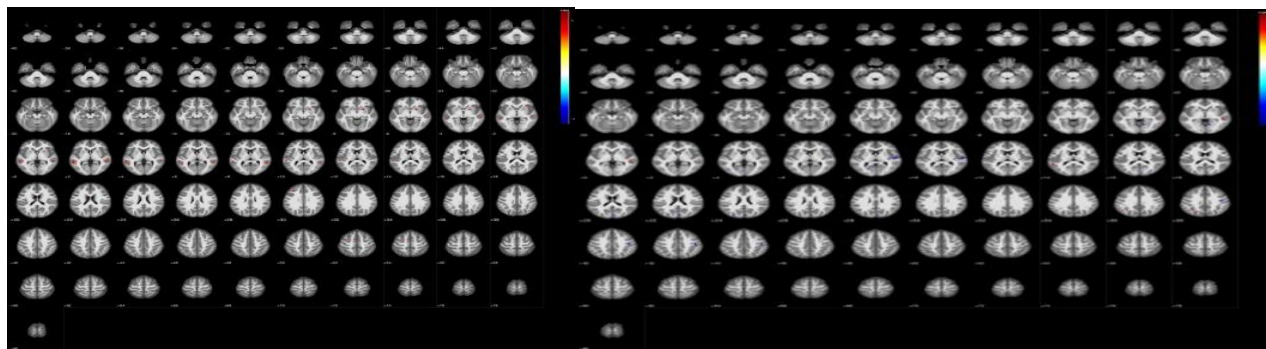


Рисунок 2 - Результаты сравнения между собой условий наблюдения за оператором, который произносит слово "Раз" в моменты перехода стрелки секундомера через деления 0, 5, 10 и т. д. секунд и состояния покоя (просмотр видеоролика с изображением неподвижного лица оператора) групповые статистические карты, нанесенные на шаблонное Т-1 изображение высокого разрешения. А - юноши, Б - девушки.

Сравнение условий произнесения слова "Раз" с состоянием покоя позволило обнаружить у юношей и девушек активацию ряда областей коры и подкорковых структур, в частности, предклинья, язычной коры, клиновидной коры, латеральной затылочной коры, справа и слева, средней височной извилины, слева, угловой извилины, слева, средней и нижней лобной извилин, дополнительной моторной коры, прецентральной извилины, отдельных зон мозжечка. Вероятно, указанные структуры образуют функциональную систему, которая обеспечивает продукцию речи. Гендерные различия проявились, в частности, в том, что у девушек указанные области мозга активируются сильнее. В частности, оказалось, что у девушек значительно сильнее активируются нижняя лобная извилина, слева, правый таламус, постцентральная извилина, слева, хвостатое ядро, справа.

Результаты сравнения условий произнесения слова "Раз" с состоянием покоя у юношей и девушек иллюстрирует рисунок 3.

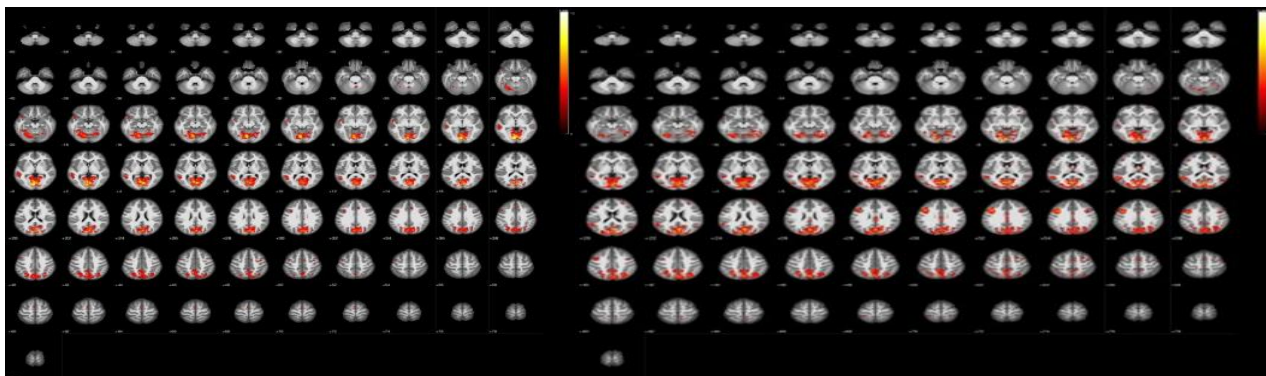


Рисунок 3 - Полученные при сравнении между собой условий произнесения слова "Раз" в моменты перехода стрелки секундомера через деления 0, 5, 10 и т. д. секунд и состояния покоя групповые статистические карты, нанесенные на шаблонное Т-1 изображение высокого разрешения. А - юноши, Б - девушки.

Сравнение условий произнесения слова "Раз" про себя с состоянием покоя позволило обнаружить у юношей и девушек активацию практически тех же мозговых структур, что и при произнесении слова "Раз" вслух, но их активация была заметно слабее. Гендерные различия проявились, в частности, в том, что у юношей сильнее активируются области правой и левой язычной извилин. Так, если у юношей число активированных вокселей в области левой язычной извилины составляет 964, а правой - 771, то у девушек, соответственно, - 596 и 347. Вероятно, обнаруженные гендерные различия связаны с особенностями латеральной организации мозга у мужчин и женщин.

Согласно имеющимся данным, "коммуникативные" зеркальные нейроны, отвечающие за формирование речи у человека, находятся в вентральной области премоторной коры и близко расположенной к ней зоне Брока [4]. Однако полученные нами результаты свидетельствуют о том, что в интерпретации речевых действий помимо указанных структур участвуют сенсорные, лобные и двигательные зоны коры, а также базальные ганглии, которые считаются местом хранения двигательных программ. Эти данные позволяют думать, что сами по себе "коммуникативные" зеркальные нейроны не обеспечивают понимание речевых действий другого человека, хотя и участвуют в этом процессе. Вероятно, они обеспечивают взаимодействие между сенсорными, двигательными и фронтальными зонами коры, а также местами хранения в мозге двигательных программ. Результатом этого взаимодействия и является понимание коммуникативных действий другого человека. В этом плане мы солидарны с теми исследователями, которые считают, что сами по себе зеркальные нейроны не могут обеспечивать понимание действий, полагая, что это может быть результатом их взаимодействия с другими мозговыми структурами [7].

Заключение

Таким образом, выполнение когнитивной деятельности, связанной с наблюдением, произнесением и мысленным воспроизведением неэмоционального слова, сопровождается снижением спектральной мощности ЭЭГ на частотах мю-ритма, что зависит от частоты этого ритма, вида и этапа выполняемой деятельности, а также от пола и латеральной организации мозга, усилением корковых связей между центральными и другими зонами коры, что зависит от вида и этапа выполняемой деятельности, пола и латеральной организации мозга. Результаты фМРТ-сканирования мозга позволили обнаружить существенные гендерные различия активации мозговых структур при наблюдении, произнесении и мысленном воспроизведении неэмоционального слова. Полученные данные свидетельствуют о том, что сами по себе "коммуникативные" зеркальные нейроны не обеспечивают интерпретацию речевых действий. Вероятно, они обеспечивают взаимодействие между сенсорными и двигательными зонами коры, фронтальной корой и местами хранения в мозге двигательных программ. Результатом этого взаимодействия и является интерпретация речевых действий других людей.

** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 18-013-00758).*

Литература (List of references):

1. Аликина М. А., Махин С. А., Павленко В. Б. Амплитудно-частотные, топографические, возраст-ные особенности и функциональное значение сенсомоторного ритма ЭЭГ// Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология и химия. 2016. Т. 2. № 2. С. 3-24.
Alikina M.A., Makhin S.A., Pavlenko V.B. Amplitude-frequency, topographic, age-related features and functional significance of the sensorimotor rhythm of the EEG // Uchenye zapiski Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Biology and chemistry. 2016, Vol. 2. No. 2. P. 3-24.
2. Махин С. А. Система "зеркальных нейронов": актуальные достижения и перспективы ЭЭГ исследований// Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Биология и химия. 2012. Т.25 (64). No. 1. С. 142-146.

- Makhin S.A. The system of “mirror neurons”: current achievements and prospects of EEG studies // Scientific notes of the Taurida National University named after V.I. Vernadsky. Biology and Chemistry. 2012, Vol. 25 (64). No. 1. P. 142-146.
3. Риццолатти Дж., Синигалья К. Зеркала в мозге: О механизмах совместного действия и сопереживания. М.: Языки славянских культур, 2012. 208 с.
- Rizzolatti G., Sinigaglia C., Anderson F. Mirrors in the Brain: How Our Minds Share Actions, Emotions, and Experience // Oxford University Press; 1 edition, 2008, P. 242.
4. 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-specifics: an fMRI study// Jurnal of Cognitive Neuroscience. 2004. 16. P. 114-126.
5. Hannah M. Hobson and Dorothy V. M. Bishop Mu suppression e A good measure of the human mirror neuron system?// Cortex. 2016. 8 2. P. 290-310.
6. 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. 87. P. 35-41.
7. Kosonogov V. Why the mirror neurons cannot support action understanding // Neurophysiology. 2012. T. 44. No. 6. P. 499-502.
8. Makhin S. A., Makaricheva A. A., Lutsyuk N. V., Cherny S. V., Orekhova L. S., Interrelation between individual level of emotional intelligence and EEG sensomotor 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). P. 121-126.
9. Nabeel M. A., Samran M. N., Khan M., Kitajo K. A possible correlation between performance IQ, visuomotor adaptation ability and mu suppression//Brainresearch. 2015. 1603. P. 84-93.
10. Perry Anat, Bentin Shlomo. Mirror activity in the human brain while observing hand movements: A comparison between EEG desynchronization in the μ -range and previous fMRI results// Brain resorch. 2009. 1282. P. 126-132.
11. 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. P. 1873-1876.
12. Saltuklaroglua T., Bowersb A., Harkridera A. W., Casenhisera D., Reillya K. J., JensoncD. E., Thorntond D. EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing//Brain and language (in press) (DOI: 10.1016/j.bandl.2018.09.005).
13. Skoyles J., John R. Gesture Language Origins and Right Handedness//Psychology. 2000. Vol.11. P.24-29.
14. Yang Chia-Yen, Decety J., Lee S., Chen C., Cheng Y. Gender differences in the mu rhythm during empathy for pain: An electroencephalographic study//Brainresearch. 2009. 1251. P. 176-184.

Статья поступила в редакцию 04.02.2020

Статья принята к публикации 03.03.2020

УДК 612.821

**НАРУШЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБОТКИ МОЗГОМ
СЕНСОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ У ДЕТЕЙ С ТРУДНОСТЯМИ В ОБУЧЕНИИ
(обзор зарубежных источников)**

Ефимова В. Л.

Российская Федерация, Санкт-Петербург

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
prefish@ya.ru*

Аннотация. В статье приводится обзор зарубежных исследований на тему влияния скоростных характеристик обработки сенсорной информации на успешность детей в обучении. Показано, что снижение скорости обработки сенсорной информации является достаточно распространённым дефицитом, который выявляется у детей с различными трудностями в обучении. Этот дефицит может касаться информации, относящейся как к зрительной, так и к слуховой модальностям. В ряде работ показана критическая роль нарушений скорости обработки сенсорной информации в возникновении нарушений чтения и письма, так как процесс овладения письменной речью требует умения быстро