

УДК 612.821

ДИНАМИКА РИТМОВ ЭЭГ ПРИ ВОСПРИЯТИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ И УЛЫБАЮЩИХСЯ ЛИЦ

*Павленко Д. В., Чуян Е. Н., Михайлова А. А, Александрова С. В,
Александрова С. Е., Батиевская А. В., Павленко В. Б.*

*Институт биохимических технологий, экологии и фармации ФГАОУ ВО «Крымский
федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым,
Россия*

E-mail: vpav55@gmail.com

Исследованы особенности динамики тета- и мю-ритмов ЭЭГ при предъявлении взрослым здоровым испытуемым статичных и динамичных изображений нейтральных и улыбающихся лиц. Установлено, что при восприятии эмоциональной лицевой экспрессии в виде улыбки наибольшая реактивность ЭЭГ проявляется в лобных, центральных и височных регионах правого полушария. Обнаружены разнонаправленные реакции в частотных диапазонах тета-ритма, а также в диапазоне мю-альфа- и мю-бета-ритмов. При этом динамические стимулы вызывали более интенсивные ЭЭГ-реакции, чем статические. Выявление паттерна ЭЭГ-реакций при восприятии видеозаписей улыбки может быть полезным в разработке новых методов коррекционной работы с детьми, имеющими диагноз расстройство аутистического спектра.

Ключевые слова: лицевая экспрессия, трекинг движений глаз, ЭЭГ, мю-ритм, тета-ритм.

ВВЕДЕНИЕ

Успешное социальное взаимодействие требует распознавания тонких изменений психического состояния окружающих, которое обеспечивается в том числе, восприятием лицевой эмоциональной экспрессии окружающих, т.е. их мимических реакций (см. обзор [1]). Предполагается, что наблюдение за мимическими движениями других людей активизирует наши сенсомоторные образы, сопровождающие собственные движения мышц лица. Благодаря этому, мы бессознательно распознаем выражения лиц и соответствующие им эмоциональные состояния [2]. Целый ряд исследований указывает, что важную роль в этом процессе играет система зеркальных нейронов (СЗН) человека [3–5]. Основными компонентами этой системы являются: фронтальный (нижняя лобная извилина и вентральная премоторная кора), париетальный (нижняя и верхняя теменные доли) и височный (область верхней височной извилины) центры [6]. Эти центры образуют двусторонние связи с лимбической системой, и, прежде всего, с миндалевидным ядром. Благодаря таким связям реализуются и воспринимаются как моторные, так и эмоциональные составляющие мимических реакций [7].

Активация или торможение регионов коры сопровождается изменением осцилляций разных частотных диапазонов ЭЭГ. Наиболее тесно с восприятием эмоциональной лицевой экспрессии связана динамика тета-, альфа- и бета-ритмов.

Повышение мощности ЭЭГ в тета-диапазоне связывают с процессами сопоставления выражения лица с памятьными репрезентациями [8]. Особый интерес представляет анализ ЭЭГ-реакций частотных диапазонов альфа- и бета-ритмов, регистрирующихся в центральных регионах и пограничных с ними корковых областях (мю-альфа- и мю-бета-ритмов). Эти ритмы генерируются в соматосенсорной и моторных зонах коры, соответственно. Известно, что мощность мю-ритмов падает при выполнении или представлении собственных движений. Однако, поскольку снижение мощности данных ритмов наблюдается также, когда нервная система человека обрабатывает информацию, поступающую при восприятии движений других людей, их динамика считается индикатором состояния СЗН (см. обзор [9]). Снижение мощности мю-ритмов указывает на активацию СЗН человека, рост – на торможение ее активности.

Однако результаты исследований динамики мю-ритма при восприятии эмоциональной лицевой экспрессии весьма противоречивы. При предъявлении статичных изображений (черно-белых фотографий) счастливых и выражающих отвращение лиц была обнаружена десинхронизация мю-альфа-ритма (8–13 Гц) в центральных отведениях [10]. В последующей работе те же авторы [11] предъявляли видеозаписи, давая задания либо просто наблюдать, либо опознать и назвать эмоции. Подавление мю-альфа-ритма было выражено в большей степени при опознании эмоций, а не при простом наблюдении. Однако другие исследователи [12] при предъявлении видеозаписей улыбающегося лица выявили тенденцию к росту мощности мю-альфа-ритма (8–12 Гц) в обоих полушариях, больше справа. Значимую десинхронизацию обнаружили при анализе динамики мю-бета-ритма (12–20 Гц), но лишь разделив участников исследования на группы в зависимости от характеристик личности. У испытуемых с выраженными аутистическими чертами десинхронизация проявлялась на сердитое лицо, а у тех, кто не имел таких черт – при предъявлении улыбки. Третья группа исследователей [13] сравнивала реакции на эмоциональную лицевую экспрессию и на предъявление небιологического движения (демонстрация калейдоскопа), которое считалось фоновым. Оказалось, что по сравнению с реакцией на такое движение значимое подавление мю-ритма (8–13 Гц) вызывает лишь предъявление видеозаписи нейтрального или неопределенного выражения лица, а не показ динамического изображения с четко выраженной эмоцией радости или грусти.

В связи с тем, что использование видеоизображений человеческого лица, выражающего положительные эмоции, может быть полезным в коррекционной работе с детьми, имеющими диагноз расстройство аутистического спектра, целью нашего исследования явилось выявление особенностей динамики тета- и мю-ритмов ЭЭГ при предъявлении взрослым здоровым испытуемым статичных и динамичных изображений улыбающихся лиц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании, которое было проведено с информированного согласия испытуемых и соответствует этическим нормам Хельсинкской декларации, приняли участие 10 студентов КФУ им. В. И. Вернадского в возрасте от 18 до 25 лет (два юноши и восемь девушек). Все испытуемые были праворукими и имели нормальное или скорректированное до нормального зрение.

Во время записи движений глаз и регистрации ЭЭГ участники исследования находились в затемненной комнате в положении сидя в кресле. Трекинг взора выполняли с помощью бесконтактной установки RED-250 (производства SensoMotoric Instruments – SMI). Монитор (Dell P2213, LCD, 22", разрешение 1680x1050, частота обновления экрана 60 Гц), на котором предьявлялся стимульный материал, входил в состав установки и располагался на расстоянии 50–80 см от глаз испытуемого. Стимулы представляли собой фотографии и видеозаписи нейтральных и улыбающихся лиц из Амстердамского набора динамических экспрессий (Amsterdam Dynamic Facial Expression Set – ADFES [14]). Было предьявлено по шесть фотографий нейтральных и улыбающихся лиц (три мужских, три женских). Время экспозиции фотографий составляло 3 с, причем за показом нейтрального лица следовало предьявление улыбки. Видеозаписи улыбок тех же моделей с продолжительностью экспозиции 3 с также показывали шесть раз. В течении 1 с лицо сохраняло нейтральное выражение, затем на лице появлялась улыбка и достигнув максимальной выразительности примерно через 0,5 с сохранялась до конца экспозиции. Общая продолжительность улыбки составляла 2 с. Среди фотографий и видеозаписей изображения средиземноморских и североευропейских лиц были представлены в равной степени. Перед предьявлением стимулов испытуемому давалась инструкция определить, какая из улыбок моделей является, по их мнению, самой естественной.

Регистрацию ЭЭГ осуществляли с помощью электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр – 5», ЭЭГ-потенциалы записывали монополярно в 19 отведениях по системе 10–20. Областью интересов в данном исследовании являлись переднелобные, лобные, центральные, височные, теменные и затылочные регионы неокортекса (локусы Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, Fz, C3, C4, Cz, T3, T4, T5, T6, P3, P4, Pz, O1, O2). Референтным электродом служили объединенные контакты, закрепленные на мочках ушей. Частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли, соответственно, 1,5 и 35 Гц, частота оцифровки ЭЭГ-сигналов – 500 Гц.

На протяжении всего исследования велась видео- и аудиозапись, синхронизированная с регистрацией ЭЭГ.

Анализ движений глаз по интересующим показателям (траектория взора, количество и продолжительность фиксации на разных участках предлагаемых изображений) проводили с использованием программы SMI BeGaze. В данной статье приводятся лишь изображения, показывающие траектории взора и время фиксации.

Артефакты в ЭЭГ-записи устраняли при визуальном просмотре и с помощью метода анализа независимых компонент (Independent Components Analysis, ICA) в пакете EEGLAB toolbox (<http://www.sccn.ucsd.edu/eeeglab/>). Временно-частотное разложение сигнала производили с помощью вейвлета Morlet. Для оценки изменений спектральной мощности ЭЭГ, вызванных предьявлением изображений

лиц, с помощью того же пакета рассчитывали связанные с событием спектральные пертурбации (СССП, event-related spectral perturbation). Метод расчета СССП в пакете EEGLAB toolbox описан A. Delorme и S. Makeig [15]. СССП показывают изменения спектральной мощности ЭЭГ при предъявлении стимула по сравнению с уровнем пристимульного интервала (фона). В качестве фона использовали промежуток времени в 1 с, когда на мониторе находилось изображение нейтрального лица, а в качестве тестового участка – 2 с от момента предъявления фотографии улыбающегося лица, либо от момента появления улыбки на видеозаписи. При обработке данных получали изображения, отражающие в децибелах логарифм отношения тестовой к фоновой мощности ЭЭГ. Отрицательные значения СССП соответствуют меньшей мощности в тестовом по сравнению с фоновым интервалом (десинхронизация ЭЭГ в определенном частотном диапазоне), положительные значения – большей мощности в тестовом интервале по сравнению с фоновым (синхронизация ЭЭГ). Достоверность различий рассчитывалась в пакете EEGLAB на основе параметрических критериев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе с помощью программы SMI BeGaze зрительного восприятия статических изображений участниками исследования установлено следующее. При восприятии статических изображений лица с нейтральным выражением взгляд был в основном направлен на область глаз модели. Восприятие статического изображения улыбки приводило к преобладанию фиксаций взгляда на области рта (рис. 1). Подобный паттерн глазодвигательных движений выявлен также другими исследователями [16].



Рис. 1. Результаты трекинга глаз испытуемого А.Р. при предъявлении фотоизображения нейтрального выражения лица и улыбки. Линиями показаны саккадические движения, кружками – фиксации зра.

Восприятие статических изображений улыбки, предъявленных вслед за фотографией нейтрального выражения лица вызывало сложный комплекс ЭЭГ-реакций, наиболее выраженных в лобных, центральных и височных регионах. Так на

рис. 2 представлен паттерн изменений мощности ЭЭГ в лобных отведениях. Из графиков СССП видно, что наиболее выраженными были прирост мощности тета-ритма (4–8 Гц), рост мю-альфа- и мю-бета-ритмов в левом, и падение в правом полушарии, а также в сагиттальном отведении.

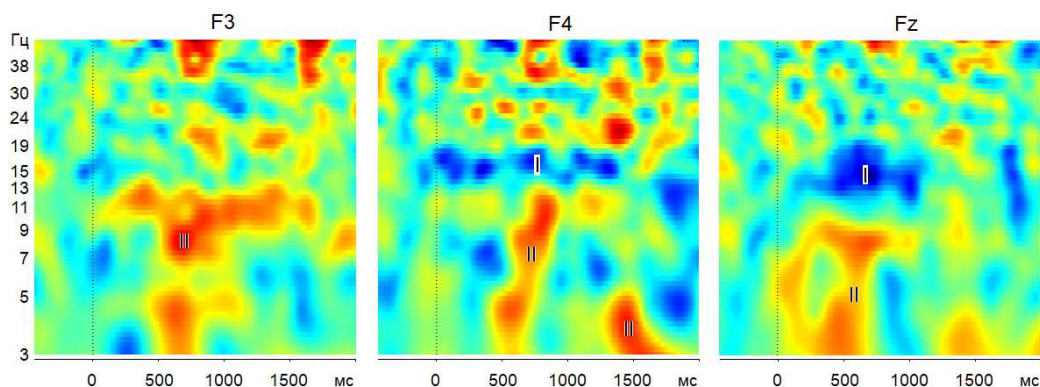


Рис. 2. Паттерн ЭЭГ-реакции в лобных отведениях на предъявление фотоизображений улыбающихся лиц. СССП график усреднен по всем испытуемым и всем лицам моделей. Вертикальная линия – момент смены фотографии нейтрального лица на фотографию улыбки. Синим цветом (I) отмечены участки графика с десинхронизацией (снижением мощности) ритма, красным цветом (II) – интервалы синхронизации (повышения мощности).

Усиление мощности тета-ритма в ряде отведений проявлялось в виде фазной реакции. Первая фаза роста мощности данного ритма развивалась через 250–500 мс после предъявления изображения улыбающегося лица, вторая – через 1300–1500 мс (см. рис. 1, отведения F4 и Fz). Поскольку ЭЭГ-осцилляции, возникающие в диапазоне тета-ритма традиционно связывают с процессами памяти (см. обзор [17]), можно высказать следующие предположения. Первый всплеск тета-активности может быть связан с опознанием выражения лица модели, изображение которого предъявлено вслед за изображением нейтрального лица. Для этого текущая информация сопоставляется с памятным следом. Второй комплекс тета-осцилляций может отражать процесс запечатления конкретного лица в памяти, поскольку в дальнейшем испытуемому приходится выбирать – у какой именно модели улыбка выглядит самой естественной. Снижение мощности мю-ритма, наиболее выраженное в частотной полосе 13–17 Гц и возникающее сразу вслед за предъявлением изображения улыбки в отведениях F4 и Fz, мы связываем с активацией СЗН. Такая активация критически важна для быстрого бессознательного распознавания эмоциональной лицевой экспрессии. Интересным феноменом является рост мощности мю-альфа-ритма, наблюдающийся в отведении F3. Мы вернемся к его интерпретации ниже, при рассмотрении эффектов восприятия динамических изображений.

При восприятии видеозаписей улыбки в центральных отведениях развивалась синхронизация ЭЭГ в диапазоне мю-альфа- и мю-бета-ритмов, наиболее выраженная

в правом полушарии (рис. 3). Динамические стимулы вызывали более интенсивные ЭЭГ-реакции, чем статические. Как видно из рисунка, различия в мощности реакций на два вида изображений были статистически значимы. Повышению мощности мю-ритмов в центральных отведениях при восприятии видеозаписей улыбки, как и подобным реакциям, описанным выше во фронтальных отведениях, мы предлагаем следующие объяснения. Ожидание появления на экране любого стимула в виде эмоциональной лицевой экспрессии вызывает у испытуемого состояние некоторого напряжения. Однако появление вслед за нейтральным, неопределенным выражением лица легко «читаемого» образа улыбки, окрашенного позитивными эмоциями, приводит к снятию напряжения, а также к генерации собственных положительных эмоций. Ранее в нашей лаборатории было показано, что для испытуемых с низким уровнем тревоги и высоким уровнем эмоциональной стабильности характерна повышенная мощность альфа-ритма [18]. Снятие психического напряжения при появлении изображения улыбки и вызывает появление мощных осцилляций в диапазоне альфа-ритма.

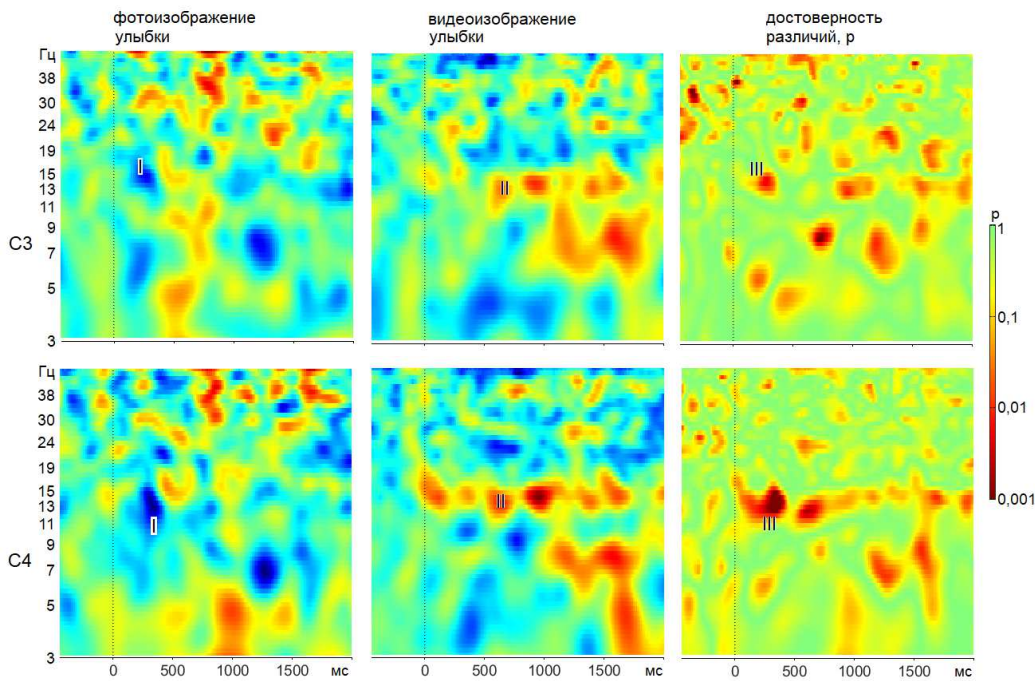


Рис. 3 Сопоставление паттерна ЭЭГ-реакции в центральных отведениях левого (верхний ряд, С3) и правого (нижний ряд, С4) на предъявление фото- и видеоизображений улыбки. СССП график усреднен по всем испытуемым и всем лицам моделей. Вертикальная линия – момент смены фотографии нейтрального лица на фотографию улыбки или начало появления улыбки на видеозаписи. На фрагментах справа красным цветом (III) обозначены наиболее значимые различия. Остальные обозначения как на рис. 2.

Не исключено, что дополнительной причиной усиления осцилляций в диапазоне мю-ритмов может являться активность нейронов антизеркальной системы. Такие нейроны были обнаружены при микроэлектродном обследовании мозга больных эпилепсией [19]. В нашем эксперименте видеозапись показала, что у испытуемых при появлении на мониторе улыбки наблюдались едва заметные движения мышц области рта. Мы предполагаем, что видеозапись улыбки модели побуждала участников исследования к аналогичной реакции. Подобные реакции являются характерным проявлением активации СЗН. Однако, поскольку улыбка в данной ситуации не совсем уместна (отсутствует реальный партнер по общению), мы, как и другие исследователи [13], считаем, что при восприятии видеоизображений эмоциональной экспрессии может запускаться активация нейронов антизеркальной системы. Ее следствием является снижение активности соматосенсорной и моторной зон коры, сопровождающееся ростом мощности мю-ритмов в центральных и фронтальных отведениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование является поисковым, с участием относительно небольшого количества испытуемых. Тем не менее, полученные результаты определенно свидетельствуют, что при восприятии эмоциональной лицевой экспрессии в виде улыбки наибольшая реактивность ЭЭГ проявляется в лобных, центральных и височных регионах. Обнаружены разнонаправленные реакции в частотных диапазонах тета-ритма, а также в диапазоне мю-альфа- и мю-бета-ритмов. При этом динамические стимулы вызывали более интенсивные ЭЭГ-реакции, чем статические. Выявление паттерна ЭЭГ-реакций при восприятии видеозаписей улыбки может быть полезным в разработке новых методов коррекционной работы с детьми, имеющими диагноз расстройство аутистического спектра.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского при содействии Программы развития ФГАОУ ВО "Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского" в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Список литературы

1. Павленко Д. В. Нейрофизиологические механизмы восприятия лицевой экспрессии и их особенности при расстройствах аутистического спектра / Д. В. Павленко, Е. Н. Чуян, В. Б. Павленко // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2021. – Т. 7 (73), № 4. – С. 160–179.
2. Adolphs R. How do we know the minds of others? Domain-specificity, simulation, and enactive social cognition / R. Adolphs // Brain Res. – 2006 – Vol. 1079, No 1. – P. 25–35.
3. Gallese V. What is so special about embodied simulation? / V. Gallese, C. Sinigaglia // Trends Cogn. Sci. – 2011. – Vol. 15, No 11. – P. 512–519.
4. Krauthen J. T. Emotion specific neural activation for the production and perception of facial expressions / J. T. Krauthen, M. Steines, U. Dannlowski, G. Neziroglu, H. Acosta, J. Sommer, B. Straube, T. Kircher // Cortex. – 2020. – Vol. 127. – P. 17–28.

5. Schmidt S. N. L. fMRI adaptation reveals: The human mirror neuron system discriminates emotional valence / S. N. L. Schmidt, C. A. Sojer, J. Hass, P. Kirsch, D. Mier // *Cortex*. – 2020. – Vol. 128. – P. 270–280.
6. Keysers C. Demystifying social cognition: a Hebbian perspective / C. Keysers, D. I. Perrett // *Trends Cogn. Sci.* – 2004. – Vol. 8, No 11. – P. 501–507.
7. Kircher T. Affect-specific activation of shared networks for perception and execution of facial expressions / T. Kircher, A. Pohl, S. Krach, M. Thimm, M. Schulte-Rüther, S. Anders, K. Mathiak // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* – 2013. – Vol. 8, No 4. – P. 370–377.
8. Symons A. E. The functional role of neural oscillations in non-verbal emotional communication / A. E. Symons, W. El-Dereby, W. Schwartze, S. A. Kotz // *Front. Hum. Neurosci.* – 2016. – Vol. 10 (Epub.).
9. Pineda J. The functional significant of mu rhythms: translating seeing and hearing into doing / J. Pineda // *Brain Res. Rev.* – 2005. – Vol. 50, No 1. – P. 57–68.
10. Moore A. EEG mu component responses to viewing emotional faces / A. Moore, I. Gorodnitsky, J. Pineda // *Behav. Brain Res.* – 2012. – Vol. 226, No 1. – P. 309–316.
11. Moore M. R. Mu rhythm suppression is associated with the classification of emotion in faces / M. R. Moore, E. A. Franz // *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* – 2017. – Vol. 17, No 1. – P. 224–234.
12. Cooper N. Beta event-related desynchronization as an index of individual differences in processing human facial expression: further investigations of autistic traits in typically developing adults / N. Cooper, A. Simpson, A. Till, K. Simmons, I. Puzzo // *Front. Hum. Neurosci.* – 2013. – Vol. 7 (Epub.).
13. Karakale O. Mental simulation of facial expressions: mu suppression to the viewing of dynamic neutral face videos / O. Karakale, M. R. Moore, I. J. Kirk // *Frontiers in human neuroscience*. – 2019. – Vol. 13 (Epub.).
14. van der Schalk J. Moving faces, looking places: validation of the amsterdam dynamic facial expression set (ADFES) / van der Schalk J., Hawk S. T., Fischer A. H., Doosje B. // *Emotion* – 2011. – Vol. 11, No 4. – P. 907–920.
15. Delorme A. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis / A. Delorme, S. Makeig // *J. Neurosci. Methods*. – 2004. – Vol. 134, No 1. – P. 9–21.
16. Барабанщиков В. А. Окуломоторная активность при восприятии динамических и статических выражений лица / В. А. Барабанщиков, А. В. Жегалло // *Экспериментальная психология*. – 2018. – Том 11, № 1. – С. 5–34.
17. Herweg N. A. Theta Oscillations in Human Memory / N. A. Herweg, E. A. Solomon, M. J. Kahana // *Trends Cogn. Sci.* – 2020. – Vol. 24, No. 3. – P. 208–227.
18. Павленко В. Б. ЭЭГ-корреляты тревоги, тревожности и эмоциональной стабильности у взрослых здоровых испытуемых / В. Б. Павленко, С. В. Черный, Д. Г. Губкина // *Нейрофизиология / Neurophysiology*. – 2009. – Т. 41, № 5. – С. 400–408.
19. Mukamel R. Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. / R. Mukamel, A. D. Ekstrom, J. Kaplan, M. Iacoboni, I. Fried // *Current biology* – 2010. – Vol. 20, No 8. – P. 750–756.

EEG OSCILLATION PATTERNS WHEN OBSERVING NEUTRAL AND SMILING FACES

Pavlenko D. V., Chuyan E. N., Mikhailova A. A., Alexandrova S. E., Alexandrova S. V., Batievskaya A. V., Pavlenko V. B.

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: vpav55@gmail.com*

Effective social interaction requires the recognition of subtle changes in the mental state of other people, which is achieved, among other things, by the perception of facial expressions of other people. Many studies suggest that the human mirror neuron system

(MNS) plays a significant role in this process. Of particular interest is the analysis of the EEG responses in the frequency ranges of alpha and beta rhythms (mu-alpha and mu-beta rhythms). Their dynamics is considered to be an indicator of the MNS status. However, the results of earlier studies on the mu-rhythm dynamics during the perception of emotional facial expression are quite contradictory. Given the use of human face videos expressing positive emotions can be useful for treatment of children diagnosed with autism spectrum disorder, the aim of our study was to clarify specific EEG patterns when presenting static and dynamic images of smiling faces to adult healthy subjects.

Ten students aged 18 to 25 years (two males and eight females) participated in the study. The subjects' eye-tracking and EEG patterns were recorded when they watched the photographs with neutral and smiling faces, and the video fragments of the same models' smiling faces. The exposure duration for each stimulus equaled 3 s. During the perception of static images of a face with a neutral expression, the gaze was mainly directed to the eye area of the model, while the perception of a static image of a smiling face showed the gaze fixation preference for the mouth area. A specific complex of EEG reactions occurred, most pronounced in the frontal, central and temporal regions. A general increase in theta rhythm power was revealed, as well as a power increase for mu-alpha and mu-beta rhythms in the left hemisphere, and a decrease in the right hemisphere. During the perception of smiling videos, the EEG in the range of mu-alpha and mu-beta rhythms showed a synchronization, most pronounced in the right hemisphere.

We suggest the following explanations for the fact of an increased power of mu-rhythms in the central leads when the subjects observed the videos with a smile. The appearance of a neutral, unspecific facial expression followed by an easily "readable" picture of a smile, colored with positive emotions, induces a release of tension, and leads to a production of positive emotions in the observer. These mental processes evoke powerful oscillations in the alpha rhythm frequency range. An alternative cause for the amplification of the EEG oscillations in the mu-rhythm frequency range may be the activity of neurons of the anti-mirror system of the brain. In our experiment, videorecording showed that the subjects had subtle movements of the mouth area muscles when a smile appeared on the monitor. We hypothesize that the video recording of the model's smile prompted similar reactions in the subjects. Such reactions are a characteristic manifestation of the activation of the MNS. However, since smiling in this situation is not quite appropriate (there is no real communication partner), we believe that the perception of video images of emotional expressions may trigger the activation of neurons of the anti-mirror system. As much as such activation occurs, our own mimic response is inhibited, and the power of mu-rhythms in the central and frontal leads increases.

Keywords: facial expression, tracking of eye movements, EEG, mu rhythm, theta rhythm.

References

1. Pavlenko D. V., Chuyan E. N. and Pavlenko V. B., Neurophysiological mechanisms of facial expression perception and their features in autistic spectrum disorders, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **7 (73)**, 160 (2021).

2. Adolphs R. How do we know the minds of others? Domain-specificity, simulation, and enactive social cognition, *Brain Res.*, **1079**, 25 (2006).
3. Gallese V. and Sinigaglia C., What is so special about embodied simulation? *Trends Cogn. Sci.*, **15**, 512 (2011).
4. Krautheim J. T., Steines M., Dannlowski U., Neziroğlu G., Acosta H., Sommer J., Straube B. and Kircher T., Emotion specific neural activation for the production and perception of facial expressions, *Cortex*, **127**, 17 (2020).
5. Schmidt S. N. L., Sojer C. A., Hass J., Kirsch P. and Mier D., fMRI adaptation reveals: The human mirror neuron system discriminates emotional valence, *Cortex*, **128**, 270 (2020).
6. Keysers C. and Perrett D. I., Demystifying social cognition: a Hebbian perspective, *Trends Cogn. Sci.*, **8**, 501 (2004).
7. Kircher T., Pohl A., Krach S., Thimm M., Schulte-Rüther M., Anders S. and Mathiak K., Affect-specific activation of shared networks for perception and execution of facial expressions, *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.*, **8**, 370 (2013).
8. Symons A. E., El-Deredy W., Schwartze M. and Kotz S. A., The Functional Role of Neural Oscillations in Non-Verbal Emotional Communication, *Front. Hum. Neurosci.*, **10**, (Epub.) (2016).
9. Pineda J., The functional significant of mu rhythms: translating seeing and hearing into doing, *Brain Res. Rev.*, **50**, 57 (2005).
10. Moore A., Gorodnitsky I. and Pineda J., EEG mu component responses to viewing emotional faces, *Behav. Brain Res.*, **226**, 309 (2012).
11. Moore M. R. and Franz E. A., Mu rhythm suppression is associated with the classification of emotion in faces, *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.*, **17**, 224 (2017).
12. Cooper N., Simpson A., Till A., Simmons K. and Puzzo I., Beta event-related desynchronization as an index of individual differences in processing human facial expression: further investigations of autistic traits in typically developing adults, *Front. Hum. Neurosci.*, **7**, (Epub.) (2013).
13. Karakale O., Moore M. R. and Kirk I. J., Mental Simulation of Facial Expressions: Mu Suppression to the Viewing of Dynamic Neutral Face Videos, *Frontiers in human neuroscience*, **13**, (Epub.) (2019).
14. van der Schalk J., Hawk S. T., Fischer A. H., and Doosje B., Moving faces, looking places: validation of the amsterdam dynamic facial expression set (ADFES), *Emotion*, **11**, 907 (2011).
15. Delorme A., and Makeig S., EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis, *J. Neurosci. Methods*, **134**, 9 (2004).
16. Barabanshikov V. A., and Zhegallo A. V., Okulomotor activity at the perception of dynamic and static expressions of the face, *Experimental Psychology (Russia)*, **11**, 5 (2018).
17. Herweg N. A., Solomon E. A., and Kahana M. J., Theta Oscillations in Human Memory, *Trends Cogn Sci.*, **24**, 208 (2020).
18. Pavlenko V. B., Chernyi S. V. and Goubkina D. G., EEG correlates of anxiety and emotional stability in adult healthy subjects. *Neurophysiology*, **41**, 337 (2009).
19. Mukamel R., Ekstrom A. D., Kaplan J., Iacoboni M. and Fried I., Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions, *Current biology*, **20**, 750 (2010).