



УДК 612.821, 612.822.3

Александрова Вероника Васильевна

аспирант кафедры «Общей психологии и психофизиологии»,

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» Институт Таврическая академия

ORCID: 0009-0003-2163-5259

veronika-aleksandrova-1996@mail.ru

Veronika V. Aleksandrova

Postgraduate student of the Department of General Psychology and Psychophysiology

Crimean Federal V.I. Vernadskiy University of the Institute Tauric Academy

ORCID: 0009-0003-2163-5259

veronika-aleksandrova-1996@mail.ru

СВЯЗЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ И ЧАСОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ С ЭМОЦИОГЕННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

RELATIONSHIP OF ELECTROENCEPHOLOGRAM AND HEART RATE INTERACTION WITH EMOTIOGENIC AROUSAL

Аннотация. Восприятие эмоций, происходящее в таких областях мозга, как префронтальная кора и миндалевидное тело, включает в себя вегетативные реакции, влияющие на сердечно-сосудистую динамику. В связи с этим мы объединили динамику электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и мгновенные оценки частоты сердечных сокращений (ЧСС) для изучения обработки эмоций зависящие от уровня возбуждения, между положительными и отрицательными стимулами, особенно на промежуточных уровнях возбуждения, за счёт взаимодействия префронтальной коры. Более того, сильные стимулы, по-видимому, смягчают изменения в динамике мозга и сердца в ответ на приятные/неприятные визуальные стимулы. Повышенное эмоциональное возбуждение связано с уменьшением высокочастотной ЧСС, снижением мощности альфа-ритма ЭЭГ в теменно-затылочной области и увеличением амплитуды потенциала, вызванного сокращением сердца. Всесторонний анализ активности мозга в дополнительных частотных диапазонах ЭЭГ (дельта-, тета-, альфа-, бета- и гамма-) и ЧСС (низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный) выявил височно-затылочный кластер, в котором более сильное эмоциональное возбуждение было связано с уменьшением потока информации от мозга к сердцу (т. е. гамма → высокочастотный диапазон ЧСС) и увеличением потока информации от сердца к мозгу (т. е. среднечастотный диапазон ЧСС → гамма). В этой статье кратко описываются физиологические основы частоты сердечных сокращений при оценке эмоциогенных стимулов, а также анализ эмоций на основе ЭЭГ. Предполагается, что ЧСС является эффективным инструментом для измерения и регулирования эмоциональных реакций с широкими перспективами применения. ЧСС отражает активность симпатических и парасимпатических нервов, участвующих в регуляции работы сердца, которая в дальнейшем регулируется центральной вегетативной системой, регулирующей эмоциональную реакцию и физиологическое возбуждение. Цель данного исследования состояла в определении особенностей динамики системной организации поведения, проявляющейся в изменении показателей сердечного ритма, при описании эмоциональных и нейтральных изображений.

Ключевые слова: ЧСС, эмоциогенные стимулы, ЭЭГ, эмоции, эмоциональное возбуждение, ЦНС.

Abstract. Emotion perception, occurring in brain regions such as the prefrontal cortex and amygdala, involves autonomic responses that influence cardiovascular dynamics. Therefore, we combined electroencephalogram (EEG) dynamics and instantaneous heart rate (HR) estimates to study emotion processing dependent on arousal levels, between positive and negative stimuli, especially at intermediate levels of arousal, due to prefrontal cortex interactions. Moreover, strong stimuli appear to moderate changes in brain and heart dynamics in response to pleasant/unpleasant visual stimuli. Increased emotional arousal is associated with a decrease in high-frequency HR, a decrease in the power of the EEG alpha rhythm in the parieto-occipital region, and an increase in the amplitude of the potential evoked by cardiac contraction. Whole-brain exploratory analyses in additional EEG (delta, theta, alpha, beta and gamma) and HRV (low-frequency, LF, and HF) frequency bands revealed a temporo-occipital cluster, in which higher emotional arousal was linked to

decreased brain-to-heart (i.e., $\gamma \rightarrow HF-HRV$) and increased heart-to-brain (i.e., $LF-HRV \rightarrow \gamma$) information flow. This article summarizes the physiological basis of heart rate in the assessment of emotiogenic stimuli as well as EEG-based emotion analysis. It is suggested that HR is an effective tool for measuring and regulating emotional reactions with broad application prospects. HR reflects the activity of sympathetic and parasympathetic nerves involved in the regulation of cardiac function, which is further regulated by the central autonomic system that regulates emotional response and physiologic arousal. The purpose of this study was to determine the peculiarities of the dynamics of the systemic organization of behavior, manifested in changes in heart rate indicators, when describing emotional and neutral images.

Keywords: HR, emotiogenic stimuli, EEG, emotion, emotional arousal, CNS.

Введение. Среди физиологических показателей важную роль во многих современных теориях эмоций играет активность вегетативной нервной системы, особенно оценки функционального состояния. Мы проверяем связь между показателями ЧСС и параметрами частотной области записей ЭЭГ в состоянии покоя. Мозг контролирует сердце непосредственно через симпатическую и парасимпатическую ветви вегетативной нервной системы. Частота сердечных сокращений описывает функциональную установку ВНС и отражает высшие функции мозга, и — по крайней мере, в некоторой степени — является независимым показателем взаимодействия ЦНС-ВНС.

Интеграция внешних (экстероцептивных) и внутренних (интероцептивных) сигналов (например, от сердца), которая приводит к возникновению эмоциональных переживаний, происходит в мозге. Основным каналом передачи информации между телом и мозгом является блуждающий нерв, который передаёт сенсорные сигналы от сердца (через дорсальный корешок и звёздчатые ганглии) [1] в ствол головного мозга, где они вызывают рефлекс (например, барорефлекс), а также передаются в головной мозг и мозжечок. С другой стороны, преганглионарные вегетативные двигательные нейроны также иннервируются блуждающим нервом и контролируются головным мозгом, в частности центральной вегетативной сетью, которая включает в себя гипоталамус, миндалевидное тело, переднюю поясную извилину, островок и медиальную префронтальную кору. Недавние исследования на грызунах показывают, что, в частности, островковая доля, миндалевидное тело и префронтальная кора, а также цепи ствола головного мозга интегрируют сердечную и вагусную активность в процесс обработки информации, влияя на восприятие эмоций и адаптивное поведение [2,3]. Данные этих работ позволяют получить доказательства того, что между сердцем и мозгом существует двусторонняя передача информации, а также того, что она играет роль в обработке эмоций.

Различные функции, от более фундаментальных сенсорных и двигательных до высших когнитивных процессов, приписываются разным типам регионально распределённых нейронных колебаний. В частности, теменно-затылочный альфа-ритм является доминирующим ритмом ЭЭГ у бодрствующих взрослых с закрытыми глазами, где он меняется в зависимости от бдительности. Его физиологической основой является крупномасштабная синхронизация нейронной активности и метаболическая деактивация. С точки зрения психофизиологии, мощность альфа-волн в теменно-затылочной области связана с эмоциональным возбуждением, а также с процессами внимания, которые помогают расставлять приоритеты и выбирать сенсорную информацию. Считается, что внимание, направленное снизу вверх или стимулируемое стимулами, направляет восприятие на подмножество значимых внешних стимулов.

Испытуемые. В исследовании приняли участие 45 студентов 2-3 курсов бакалавриата разных групп направлений КФУ им В.И. Вернадского.

Материалы. ЭЭГ (с частотой дискретизации 500 Гц, аппаратный фильтр нижних частот на частоте 131 Гц) была записана с помощью нейрон-спектр 5 21 активных электродов, подключённых в соответствии с международной системой 10–20. ЧСС регистрировалась синхронно.

Эмоциогенные стимулы были 91 картинок по блокам негативные, нейтральные, позитивные.

Результаты и их научное обсуждение.

Мы исследовали взаимодействие мозга и сердца во время эмоционального возбуждения стимулами. В частности, мы проанализировали сердечную активность, связанную с эмоциональным возбуждением, и то, в какой степени она влияет на ранее выявленную связь между эмоциональным возбуждением и мощностью альфа-волн в теменно-затылочной области. Мы обнаружили различия в сердечной активности, активности мозга и — в меньшей степени — во взаимодействии мозга и сердца между состояниями возбуждения и расслабления. В частности, мы наблюдали значительные различия, связанные с возбуждением, при анализе событий (т. е. сокращением сердца), но не при колебательном анализе, хотя общемозговой исследовательский анализ указывал на увеличение восходящего потока функциональной информации от сердца к мозгу и уменьшение нисходящего потока функциональной информации от мозга к сердцу при более высоком эмоциональном возбуждении.

Изучая изменения активности всего мозга, связанные с возбуждением, мы обнаружили разные паттерны активации для высокочастотной и низкочастотной областей ЧСС. Для высокочастотной области ЧСС → дельта один электрод ЭЭГ O1 показал более низкие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Для низкочастотной области ЧСС → дельта один электрод ЭЭГ P8 показал более высокие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Для высокочастотной области ЧСС → альфа один электрод ЭЭГ P3 показал более низкие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Для высокочастотной ЧСС → бета два электрода ЭЭГ Pz, CP2 показали более низкие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Для высокочастотной ЧСС → гамма один электрод ЭЭГ O2 показал более высокие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Для низкочастотной ЧСС → гамма 12 электродов ЭЭГ Fp2, Fz, FC5, CP5, P3, P8, T7, TP9, TP10, Oz, O1, O2 показали более высокие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Для гамма → высокочастотной ЧСС 17 электродов ЭЭГ Fp1, F3, FC5, FC6, C3, CP5, CP6, P3, P4, P7, T7, T8, TP9, TP10, Oz, O1, O2 показали более низкие коэффициенты связи при более высоком уровне возбуждения. Кроме того, что касается гамма-диапазона, при взгляде на перехват (FC5, CP5, P3, T7, TP9, TP10, O1, Oz, O2) обоих значимых электродов в восходящем (низкочастотной ЧСС → гамма) и нисходящем (гамма → высокочастотной ЧСС) направлениях оба эффекта все еще присутствовали (низкочастотной ЧСС → гамма: $t(28) = 2,8$; $p = 0,008$; гамма → высокочастотной ЧСС: $t(28) = -2,7$; $p = 0,012$).

Анализируя сердечный ритм, мы обнаружили значительное влияние эмоционального возбуждения, как на низкую, так и на высокую ЧСС, можно предположить, что во время сильного эмоционального возбуждения снижается (т. е. ослабевает) парасимпатическая регуляция сердечной деятельности. Колебания высокочастотной ЧСС во время эмоций связаны с функциональными изменениями в медиальной префронтальной коре. Таким образом, изменения ЧСС во время эмоционального возбуждения также могут быть связаны с модуляцией внимания (снизу вверх) в присутствии эмоциональных стимулов.

Поскольку ЭЭГ регистрируется на поверхности головы, задний альфа-ритм в основном отражает активность в теменно-затылочных долях коры головного мозга, было обнаружено, что области мозга, также участвуют в формировании заднего альфа-ритма, например, передняя поясная кора и миндалевидное тело, а также области ствола головного мозга и ядра таламуса. В частности, таламо-кортикальные петли связаны с задним альфа-ритмом, и это может обеспечивать (эмоциональные) изменения в сенсорной (в частности, зрительной) или внимательной обработке, основываясь на результатах [4].

В ходе дополнительного исследовательского анализа мы изучили различия, связанные с эмоциональным возбуждением, в других частотных диапазонах. Мы наблюдали значительные эффекты в других частотных диапазонах, таких как более низкая мощность тета-ритма, более низкая мощность бета-ритма и более высокая мощность гамма-ритма.

Объединив данные о работе ЧСС и ЭЭГ в рамках данного анализа, мы исследовали колебания в данных ЭЭГ и ЧСС во время различных состояний эмоционального возбуждения. Используя два разных подхода — событийно-ориентированный и осцилляторный анализ, — мы обнаружили, что функциональная связь между сердцем и мозгом связана с эмоциональным возбуждением, хотя и не всегда.

Результаты анализа всей поверхности ЭЭГ в нескольких частотных диапазонах указывают на связь между уровнем эмоционального возбуждения и взаимодействием между частотой сердечных сокращений и активностью мозга в разных частотных диапазонах. Таким образом, поток информации от сердца к мозгу, по-видимому, в большей степени меняется в зависимости от различных эмоциональных стимулов, чем поток информации от мозга к сердцу в противоположном направлении. Это подтверждает мнение о том, что сигналы от внутренних органов (например, сердца) влияют на наше восприятие мира и взаимодействие с ним [5].

Выводы. Исследования показывают, что стимулы разной валентности по-разному изменяют исходное состояние человека. Следовательно, мы можем предположить, что изучение частоты сердечного ритма может помочь отследить возникновение эмоций и, возможно, даже их валентность.

У индивидов с более низкой ЧСС в состоянии покоя наблюдается повышенная активность в средней затылочной извилине и клиновидной извилине во время визуального восприятия эмоциональных и нейтральных стимулов, а с более высокой частотой сердечного ритма медиальная префронтальная кора лучше задействуется при усилении положительных эмоций по сравнению с отрицательными.

Список литературы

1. Dusi, V., & Ardell, J. L. (2020). *Brain-heart afferent-efferent traffic*. In Govoni S., Politi P., & Vanoli E. (Eds.), *Brain and heart dynamics* (pp. 1–23). Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-90305-7_2-1.

2. Okonogi, T., Kuga, N., Yamakawa, M., Kayama, T., Ikegaya, Y., & Sasaki, T. (2024). Stress-induced vagal activity influences anxiety-relevant prefrontal and amygdala neuronal oscillations in male mice. *Nature Communications*, 15, 183. [10.1038/s41467-023-44205-y](https://doi.org/10.1038/s41467-023-44205-y).
3. Signoret-Genest, J., Schukraft, N., Reis, S. L., Segebarth, D., Deisseroth, K., & Tovote, P. (2023). Integrated cardio-behavioral responses to threat define defensive states. *Nature Neuroscience*, 26(3), 3. [10.1038/s41593-022-01252-w](https://doi.org/10.1038/s41593-022-01252-w).
4. Shibata, T., Hattori, N., Nishijo, H., Kuroda, S., & Takakusaki, K. (2024). Evolutionary origin of alpha rhythms in vertebrates. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 18, 1384340. [10.3389/fnbeh.2024.1384340](https://doi.org/10.3389/fnbeh.2024.1384340)
5. Galvez-Pol, A., Virdee, P., Villacampa, J., & Kilner, J. (2022). Active tactile discrimination is coupled with and modulated by the cardiac cycle. *eLife*, 11, e78126. [10.7554/eLife.78126](https://doi.org/10.7554/eLife.78126)