

АНОТАЦІЯ

Черних М.Є. Особливості формування ефективних нейрональних мереж кори головного мозку людини за умов сприйняття емоціогенних візуальних стимулів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 091 – Біологія. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2023.

Підготовка здійснювалась на кафедрі фізіології людини і тварин навчально-наукового центру «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота є комплексним дослідженням фундаментальних та прикладних проблем, пов'язаних із нейрофізіологічними механізмами сприйняття зорових емоціогенних стимулів на прикладі людських облич у представників чоловічої та жіночої статі. Окремо в роботі увага приділяється питанню уразливості даних механізмів до тривалого впливу стресогенних чинників. Актуальність даного дослідження обумовлюється рядом причин, зокрема існуванням двох конкуруючих гіпотез на пояснення принципу функціонування механізму сприйняття обличчя – концепцій холістичної обробки та сприйняття за окремими ознаками. Також наразі не існує досліджень, які б ґрунтовно оцінювали динаміку зміни психоемоційного стану цивільного населення в умовах тривалого впливу бойових дій високої інтенсивності. Окрім цього, дана робота відкриває перспективи подальшої розробки інтерфейсів мозок-комп'ютер, що можуть реалізовуватись в програмах нейрофідбек-терапії, а також для тренування штучних нейромереж конволюційного типу з метою розробки діагностичних систем на

основі дослідження динаміки викликаної електричної активності в основних частотних діапазонах.

Метою роботи було з'ясування особливостей нейрофізіологічних механізмів, відповідальних за сприйняття емоціогенних візуальних стимулів різної валентності на прикладі зображень людських облич – як природних, так і штучно видозмінених – на основі утворених ефективних нейрональних мереж у період до початку та під час повномасштабної військової агресії російської федерації.

У вступі до дисертаційної роботи визначено мету та завдання даного дослідження, обґрунтовано актуальність обраної теми, охарактеризовано предмет та об'єкт дослідження, перелічено методи, які використовувались для досягнення мети роботи. Окрім цього, у даному розділі роботи окреслено аспекти дослідження, що визначають його наукову новизну, а також зазначено основні результати роботи та перспективні напрямки їх практичного використання. Наведено дані щодо апробації результатів, отриманих в ході роботи та виділено особистий внесок здобувача у представлених наукових працях.

Перший розділ роботи містить огляд актуального наукового доробку, присвяченого тематиці дослідження. Так, у ньому розглянуто принципи взаємопов'язаності ділянок кори та підкіркових структур, що можуть брати участь у сприйнятті емоційного обличчя. Означено два конкуруючі концептуальні підходи до характеристики перебігу процесу зчитування людського обличчя, а саме холістичний та за ознаками, та сукупність свідчень на користь кожного з них. Наведено особливості просторово-часового перебігу процесу обробки обличчя, визначені з використанням методу потенціалів, пов'язаних з подією. Розглянуто основи фрактальної організації електричної активності головного мозку, а також принципи оцінки когнітивно-емоційного функціонування головного мозку людини на основі визначення співвідношень різних діапазонів електричної активності.

Зрештою, описано наслідки хронічного впливу стресогенних факторів з точки зору нейрофізіологічних механізмів.

Другий розділ містить основні відомості про організацію експериментальної парадигми, стимуляційні програми, структуру вибірки та основні етапи препроцесингу даних. Оскільки основним методом, використаним в даній роботі, була електроенцефалографія (ЕЕГ), у даному розділі описано основні характеристики та математичний апарат алгоритмів, що були застосовані задля аналізу отриманих даних, а саме потенціалів, пов'язаних з подією; методу ненаправленого ковзного середнього; методу оцінки співвідношень основних діапазонів електричної активності головного мозку на основі розрахунку глобальної потужності поля. Використання такого набору методів було направлене на всебічну оцінку функціонування кори головного мозку на основі різноманітних фізичних параметрів. Зокрема, когнітивні потенціали, пов'язані з подією, були розраховані з метою відображення просторово-часових характеристик перебігу процесу аналізу візуальних стимулів. Алгоритм ненаправленого ковзного середнього застосовувався для визначення міри комплексності і тенденцій поведінки коливального процесу в різних піддіапазонах електричної активності з різним ступенем прогностичності. Окрім цього, було проведено порівняння динамічних характеристик базових співвідношень діапазонів сигналу, з метою визначення домінуючих когнітивних процесів та формування уявлення про потенційні корекційні методики.

У третьому розділі наведено основні результати, отримані із використанням методу потенціалів, пов'язаних з подією (ППП). Відмічалось, що порівняння даних, отриманих до та під час повномасштабного вторгнення виявило більшу вираженість відмінностей для стимуляційних серій, що включали зображення розмитих облич, порівняно із перемішаними стимулами. При пред'явленні стимуляційних серій із зображеннями розмитих облич в обох групах можна було спостерігати значущі відмінності у трьох основних часових

проміжках епохи аналізу, що відображає запуск роботи механізмів, пов'язаних із суттєвою когнітивною обробкою стимульного матеріалу. Водночас, для зображень перемішаних облич подібних ефектів не спостерігалось – навпаки, ефекти комбінацій такого типу стимулів відображались переважно у змінах ранніх компонентів кривої, що пов'язані із швидким мимовільним позасвідомим реагуванням. Можна припустити, що дане явище ще раз свідчить на користь холістичної концепції сприйняття обличчя. Окрім цього, було виявлено відмінності в стратегіях сприйняття обличчя між представниками чоловічої та жіночої статі.

У четвертому розділі представлено результати дослідження, виконаного із застосуванням алгоритму ненаправленого ковзного середнього (НКС). Отримані теплові карти підкреслюють збереження рівня комплексності динаміки біоелектричної активності кори головного мозку під час сприйняття емоціогенних візуальних стимулів. Як і у випадку із аналізом потенціалів, пов'язаних із подією, можна відмітити більший рівень когнітивно-емоційного залучення при сприйнятті розмитих облич порівняно із перемішаними, незалежно від періоду отримання даних, в обох експериментальних групах. При проведенні внутрішньогрупового порівняння між станами до початку та під час повномасштабного вторгнення можна було спостерігати тенденцію до залучення більшої кількості ресурсів для регуляції різних типів уваги та пам'яті, нестійкість процесів низхідної регуляції когнітивної діяльності та утруднення інтеграції вхідної інформації в стані П/В, що може підкреслювати ефекти постійної дії травматичних факторів.

Вміст п'ятого розділу роботи становлять результати застосування методу глобального потенціалу поля для розрахунку еволюції в часі основних співвідношень діапазонів електричної активності – α/θ , α/β , θ/β – які розглядаються як маркери домінуючих процесів у функціональній активності головного мозку людини. При проведенні дослідження було встановлено, що основні відмінності спостерігались в значеннях θ/β коефіцієнту, що

підтверджує його значущість у відображенні рівня залученості та направленої уваги, а також задіяності когнітивного ресурсу в процесі виконання поточної діяльності. Отримані для даного методу результати цілком співвідносились із динамікою, відображеною в кривих потенціалів, пов'язаних з подією. Так, суттєве падіння рівня залученості спостерігалось переважно у пізніх часових проміжках від моменту подачі стимулу. Окрім цього, відмінності були виявлені для чоловічої та жіночої груп. Так, чоловічій групі притаманним було підтримання рівня уваги при перегляді стимуляційних серій із позитивними та нейтральними обличчями. В той же час, жіноча група характеризувалась не тільки більш вираженим падінням контролю уваги, а і зменшенням селективності реакції на представлені стимули. Отримані результати можуть сформувати основу для підбору релевантних терапевтичних нейрофідбек-протоколів.

Наукова новизна отриманих результатів визначається наступним:

1) Вперше було проведено масштабну оцінку показників електричної активності кори головного мозку людини в умовах хронічного перебування під впливом вітальної загрози з використанням арсеналу сучасних методів дослідження. Наразі бракує даних про те, як тривалі бойові дії та супутні обтяжуючі фактори впливають на ментальний стан цивільного населення, оскільки більшість досліджень, пов'язаних з війною, проводилася за участю ветеранів та членів їхніх сімей. Також дане дослідження висвітлює, як існування в умовах сучасного інформаційного поля, коли природньо змінюються стандарти прийнятного, формують наше сприйняття одних із еволюційно найважливіших візуальних подразників.

2) Вперше було проведено всебічну комплексну оцінку нейрофізіологічних механізмів сприйняття людського обличчя із поєднанням методів когнітивних потенціалів, пов'язаних з подією, мультифрактальних підходів та алгоритму оцінки динамічних змін

співвідношень коливань у основних діапазонах електричної активності з використанням методу глобальної потужності поля.

3) Вперше було проведено співставлення двох конкуруючих гіпотез відносно базових нейрофізіологічних механізмів сприйняття обличчя для представників чоловічої та жіночої статі в нормальних умовах та під час тривалого впливу стресогенних факторів.

4) Вперше було продемонстровано, що тривала дія травматичних факторів рівноцінно впливає на організацію функціонування нейрональних мереж уваги, пам'яті та емоційної регуляції у представників обох статей, що відображається у змінах амплітудно-часових характеристик когнітивних потенціалів, пов'язаних з подією (i); падіння рівня організації та прогностичності біоелектричного сигналу (ii); динаміці зміни співвідношення в θ - і β -діапазонах біоелектричної активності (iii).

Результатом роботи є комплексна оцінка просторово-часових характеристик перебігу процесу сприйняття емоціогенних візуальних стимулів на прикладі людських облич у представників чоловічої та жіночої статі. З огляду на отримані дані, висунуто припущення про переважаючу значущість холістичної концепції в основі даного нейрофізіологічного процесу. Окрім цього, проведено аналіз динаміки зміни сприйняття обличчя в умовах хронічної дії стресогенних факторів та вітальної загрози, а також визначено основні параметри для розробки реабілітаційних методик на основі показників електричної активності головного мозку.

Матеріали за результатами виконання досліджень опубліковано в 7 наукових працях, з них: чотири статті у наукових фахових періодичних виданнях (одна стаття у закордонному фаховому періодичному виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science (Q2), та три статті у вітчизняних фахових виданнях. Виконано апробацію результатів в рамках наукових конференцій з опублікуванням трьох тез доповіді.

Ключові слова: електроенцефалографія; нейрофізіологія; емоції; обличчя; потенціали, пов'язані з подією; метод ненаправленого ковзного середнього (НКС); коефіцієнти α/θ , α/β , θ/β ; функціональна зв'язаність; статеві відмінності; рівень стресу; тривожність

ANNOTATION

Features of the effective neuronal networks of human cerebral cortex formation under the conditions of emotional visual stimuli perception – qualifying scientific work on the rights of the manuscript – by PhD-student *Mariia Chernykh*.

Thesis for obtaining the scientific degree of PhD (Doctor of Philosophy) in specialty 091 – Biology. Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, 2023.

The work was carried out at the Department of Human and Animal Physiology, Educational and Scientific Center "Institute of Biology and Medicine", Taras Shevchenko Kyiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation is a comprehensive study of fundamental and applied problems related to the neurophysiological mechanisms of perception of visual emotional stimuli using the example of human faces in male and female representatives. Apart from that, the work pays attention to the issue of the vulnerability of these mechanisms to the long-term influence of stressogenic factors. The relevance of this study is determined by several reasons, in particular, the existence of two competing hypotheses to explain the principle of functioning of the face perception mechanism - the concepts of holistic processing and featural perception. Also, currently, there are no studies that would thoroughly assess the dynamics of changes in the psycho-emotional state of the civilian population in the conditions of prolonged high-intensity hostilities. Thus, this work opens up prospects for the further development of brain-computer interfaces that can be implemented in neurofeedback therapy programs, as well as for convolutional artificial neural networks (ANN) training for the purpose of diagnostic systems development, and further investigation of the evoked electrical activity dynamics in the main frequency ranges.

The aim of the work was to find out the features of the neurophysiological mechanisms responsible for the perception of emotional visual stimuli of different valence using the example of images of human faces - both natural and artificially modified - on the basis of effective neuronal networks formed in the period before and during the full-scale military aggression of the Russian Federation.

In the introduction, the purpose and tasks of this research are determined, the relevance of the chosen topic is substantiated, the subject and object of the research are characterized, and the methods used to achieve the goals of the work are listed. In addition, this section of the work outlines the aspects of the research that determine its scientific novelty, as well as the main results of the work and promising directions for their practical implementation. The data on the approbation and publication of the results are presented and the applicant's contribution is highlighted.

The first section of the work contains an overview of current scientific work devoted to the topic of the study. Thus, it examines the principles of interconnection of the cortical areas and subcortical structures that can participate in the perception of an emotional face. Two competing conceptual approaches to the characterization of face processing, namely holistic and featural, and a set of pieces of evidence in favor of each of them are identified. Features of the spatio-temporal course of the face processing process, determined using the method of event-related potentials (ERPs), are given. The fundamentals of the fractal organization of the electrical activity of the brain, as well as the principles of assessing the cognitive-emotional functioning of the human brain based on determining the ratios within different ranges of electrical activity, are considered. Finally, the consequences of chronic exposure to stressogenic factors are described from the point of view of neurophysiological mechanisms.

The second section contains basic information regarding the organization of the experimental paradigm, stimulation programs, sampling structure, and the main stages of data preprocessing. Since the main method used in this work was electroencephalography (EEG), this section describes the main characteristics and mathematical apparatus of the algorithms that were used to analyze the obtained data, namely, event-related potentials; detrended moving average method; a method of estimating the ratios within the main ranges of electrical activity of the brain based on the calculation of the global field potential. The use of such a set of methods was aimed at a comprehensive assessment of the cerebral cortex function based on distinct physical parameters. In particular, event-related potentials were calculated in order to reflect the spatio-temporal characteristics of the process of visual stimuli processing. The detrended moving average algorithm was used to determine the degree of complexity and trends in the behavior of the oscillatory process in different sub-ranges of electrical activity with varying degrees of predictability. In addition, a comparison of the dynamic characteristics of the basic subrange ratios was carried out, to determine the dominant cognitive processes and form an idea of potential therapeutic techniques.

The third section presents the main results obtained using the event-related potentiation (ERP) method. It was noted that a comparison of data obtained before and during the full-scale invasion revealed a greater degree of difference for the stimulus series that included images of blurred faces compared to the scrambled stimuli. When presented with a stimulation series with images of blurred faces in both groups, significant differences could be observed in the three main time intervals of the analysis epoch, reflecting the activation of mechanisms associated with significant cognitive processing of the material. At the same time, similar effects were not observed for images of scrambled faces - on the contrary, the effects induced by this type of stimuli combinations were mainly reflected in changes in the early components of the curve, which are associated with fast involuntary unconscious responding. It can be assumed that this phenomenon once again testifies in favor of the holistic concept of face perception. In addition, differences in face perception strategies were found between male and female groups.

The fourth chapter presents the results of the study performed using the detrended moving average (DMA) algorithm. The obtained heat maps emphasize the preservation of the level of complexity of the dynamics within the bioelectric activity of the cerebral cortex during the perception of emotional visual stimuli. As with the analysis of event-related potentials, a higher level of cognitive-emotional involvement can be noted when perceiving blurred faces compared to scrambled faces, regardless of the period of data acquisition, in both experimental groups. When conducting an intragroup comparison between the states before the beginning and during the full-scale invasion, it was possible to observe a tendency to involve more resources to regulate different types of attention and memory, the growing instability of the top-down regulation of cognitive activity, and the difficulty of integrating input information in the “during full-scale invasion” state, which can emphasize the effects of constant presence of stressogenic factors.

The fifth section of the work contains the results of the global field potential method application to calculate the evolution over time for the main ratios of electrical activity ranges - α/θ , α/β , θ/β - which are considered to be markers of dominant processes in the functional activity of the human brain. When conducting the research, it was established that the main differences were observed in the values of the θ/β coefficient, which confirms its significance in reflecting the level of involvement and directed attention, as well as the use of cognitive resources in the process of performing the current activity. The results obtained for this method were fully correlated with the dynamics reflected in averaged ERPs. Thus, a decrease in the level of involvement was observed mainly in the late time intervals from the moment of the rare stimulus onset. In addition, differences were found for male and female groups. Thus, the male group was characterized by maintaining the level of attention when viewing stimulation series with positive and neutral faces. At the same time, the female group was characterized not only by a more pronounced drop in attention control but also by a decrease in the selectivity of the response to the presented stimuli. The obtained results can form the basis for the selection of relevant therapeutic neurofeedback protocols.

The scientific novelty of the obtained results is defined as follows:

1) For the first time, a large-scale assessment of the cerebral electrical activity assessment in conditions of chronic exposure to a vital threat was carried out using an arsenal of modern research methods. Currently, there is a lack of data on how prolonged combat and associated aggravating factors affect the mental state of civilians, as most war-related research has been conducted on veterans and their family members. Also, this study highlights how existence in the conditions of the modern information field, when standards of what is acceptable naturally change, shapes our perception of some of the most evolutionarily important visual stimuli.

2) For the first time, a comprehensive assessment of the neurophysiological mechanisms of human face perception was carried out with a combination of

event-related cognitive potential methods, multifractal approaches, and an algorithm for evaluating dynamic changes in oscillatory ratios using the global field strength method.

3) For the first time, a comparison of two competing hypotheses was made regarding the basic neurophysiological mechanisms of face perception for male and female representatives under normal conditions and during long-term exposure to stressful factors.

4) It was demonstrated for the first time that long-term exposure to traumatic factors equally affects the organization of the functioning of neuronal networks of attention, memory and emotional regulation in representatives of both sexes, which is reflected in changes in the amplitude-time characteristics of cognitive potentials associated with the event (i) ; a drop in the level of organization and predictability of the bioelectrical signal (ii); dynamics of changes in the ratio in the θ - and β -ranges of bioelectric activity (iii).

Based on the obtained data, an assumption is made about the prevailing significance of the holistic concept of this neurophysiological process. In addition, an analysis of the dynamical alterations in face perception under the conditions of chronic exposure to stressogenic factors and vital threats was carried out, as well as the main parameters for the development of rehabilitation techniques based on indicators of electrical activity of the brain were determined.

Materials based on the results of the research were published in 7 scientific works, including three articles in scientific special periodicals (one article in a foreign special periodical, included in the international databases Scopus and Web of Science (Q2), and three articles in domestic scientific periodicals. Approbation of the results was carried out within the framework of scientific conferences with the publication of three theses.

Keywords: electroencephalography; neurophysiology; emotions; face; event-related potentials; the detrended moving average method (DMA); ratios α/θ , α/β , θ/β ; functional connectivity; gender differences; stress level; anxiety