

УДК 612.82

DOI 10.5281/ZENODO.19654936

ИЗУЧЕНИЕ АКТИВНОСТИ ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ У МУЖЧИН И ЖЕНЩИН ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОРРЕКТНЫХ И ОШИБОЧНЫХ ДЕЙСТВИЙ

Мошкина М. В., Вавилина В. Е., Светлик М. В., Бушов Ю. В.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
Томск, Россия
E-mail: moshkinamv989@gmail.com*

Исследовали активность зеркальных нейронов у мужчин и женщин при выполнении деятельности, связанной с узнаванием коротких интервалов времени. Обнаружены статистически значимые различия в активации зеркальных нейронов при выполнении корректных и ошибочных действий, зависимость этих различий от гендерных особенностей.

Ключевые слова: зеркальные нейроны, мю-ритм, корректные и ошибочные действия.

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что важную роль в процессах обучения и социальной адаптации человека играют зеркальные нейроны и мозговой «детектор ошибок» [1]. Однако, в настоящее время неясно, как именно реагируют зеркальные нейроны на корректные и ошибочные действия и какова роль при этом разных типов зеркальных нейронов и индивидуальных особенностей человека?

В задачу настоящего исследования входило изучение активности зеркальных нейронов у мужчин и женщин при выполнении корректных и ошибочных действий, связанных с узнаванием коротких интервалов времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В программу исследований входило предварительное обследование, которое включало сбор анамнеза и изучение особенностей латеральной организации мозга с определением ведущей руки (анкета Аннет) и речевого полушария (дихотический тест).

В основном исследовании, которое проводилось, как правило, на следующий день, приняли участие «правши» с левым «речевым» полушарием, практически здоровые юноши (15 человек) и девушки (15 человек) в возрасте от 18 до 23 лет, учащиеся томских вузов. Все испытуемые дали информированное согласие на

участие в данном исследовании, которое было одобрено Комиссией по биоэтике Биологического института Томского государственного университета.

В качестве когнитивной задачи испытуемому предлагалась деятельность, связанная с узнаванием коротких интервалов времени. Эталоном служил светлый квадрат со стороной 3,5 см, появляющийся на 300 мс в центре экрана монитора. Предварительно (не менее 10 раз) эталон предъявляется испытуемому для запоминания. Затем предъявляется совместно с девиантными стимулами, которые отличаются от эталона в большую или меньшую сторону на 150 мс. Стимулы предъявляются многократно (не менее 50 раз) в случайном порядке с межстимульным интервалом 5–7 с. Предварительные эксперименты показали, что при такой разнице между эталоном и девиантными стимулами испытуемый достаточно успешно различает эталон (в 70–90 % случаев). В соответствии с инструкцией испытуемый средним и указательным пальцами ведущей руки нажимает на клавишу «Пробел» при предъявлении эталона и пропускает сигналы другой длительности.

С помощью 24-канального электроэнцефалографа «Энцефалан-131-03» регистрировали ЭЭГ 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 референтных электродов использовали отведения A1 и A2.

При обработке ЭЭГ-данных использовался расчетный метод электромагнитной томографии низкого разрешения (LORETA) [2, 3], подсчитывались оценки спектральной мощности мю-ритма на коротких (2 с), лишенных артефактов, отрезках записи ЭЭГ за 2 с до стимула (этап «Фон»), при выполнении корректного действия, при пропуске целевого стимула (эталона), а также при ошибочном нажатии на клавишу компьютера.

В качестве маркера активации зеркальных нейронов использовали депрессию мю-ритма в частотном диапазоне 8–14 Гц.

В ходе обработки полученных данных сравнивались следующие экспериментальные ситуации отдельно для мужчин и женщин:

- 1) Фон – корректное нажатие на клавишу;
- 2) Фон – ошибочное нажатие на клавишу;
- 3) Фон – пропуск целевого стимула.

Для анализа были выбраны поля Бродмана (ПБ), в которых, по имеющимся данным, локализуются «двигательные» зеркальные нейроны (4, 6, 38, 40, 44, 45) [4–7], а также «эмоциональные» зеркальные нейроны (24, 32, 33) [5–7].

При оценке статистической значимости различий использовали многомерный статистический анализ и t-критерий Стьюдента, который реализован в программе LORETA. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

С целью «нормализации» исследуемых показателей использовали преобразование Фишера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнения «Фон – корректное нажатие на клавишу»

Анализ электрической активности мозга на частоте мю-ритма у мужчин и женщин в фоне, а также при правильном распознавании целевого стимула и корректном нажатии на клавишу компьютера позволил обнаружить существенные различия в активности исследуемых зон коры (критерий Стьюдента, уровень значимости – $p < 0,05$). При сравнении подсчитывалось количество «активных» вокселей в соответствующих зонах коры.

Результаты сравнения электрической активности мозга на частоте мю-ритма у мужчин и женщин в фоне и при корректном нажатии на клавишу компьютера представлены на рис. 1.

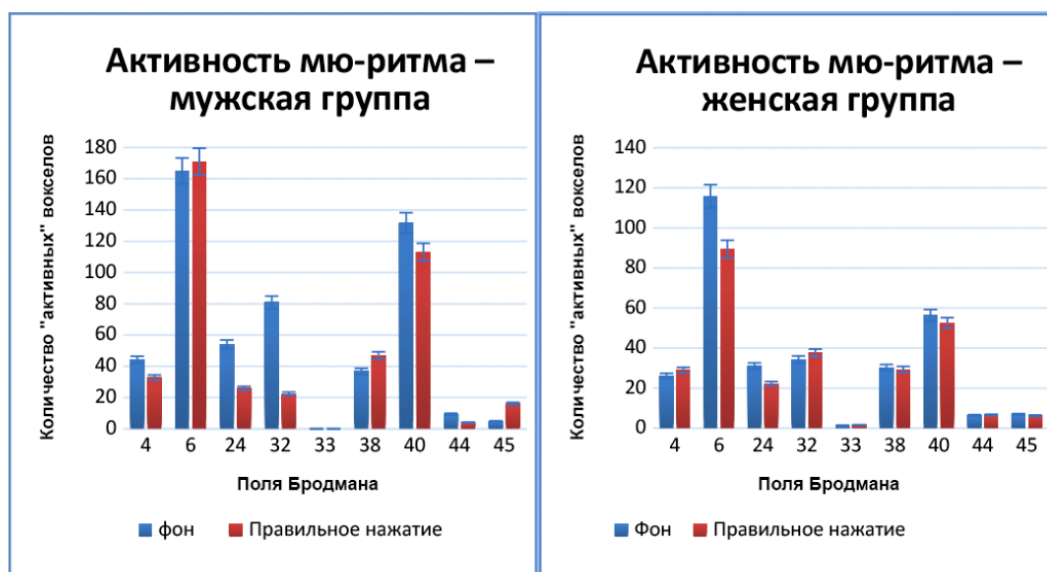


Рис. 1. Активность мю-ритма у мужчин и женщин в фоне, а также при корректном нажатии на клавишу компьютера.

Как следует из рисунка 1, у мужчин при корректном нажатии на клавишу компьютера отмечается депрессия мю-ритма в 4, 40 и 44 ПБ, что указывает на активацию «двигательных» зеркальных нейронов [4–7]. Наряду с этим, у них отмечается депрессия мю-ритма в 24 и 32 ПБ, что указывает на активацию «эмоциональных» зеркальных нейронов [5–7].

У женщин, в отличие от мужчин (рис. 1), депрессия мю-ритма отмечается в 6 и 40 ПБ, где локализуются «двигательные» зеркальных нейроны, а также в 24 ПБ, где локализуются «эмоциональные» зеркальные нейроны.

Обнаруженная активация «эмоциональных» зеркальных нейронов при корректном нажатии на клавишу компьютера свидетельствует о вовлечении эмоциогенных структур в обеспечение данной деятельности. Возможно, это связано

с трудностью принятия решения в условиях ограниченного времени и ситуации неопределенности [8].

Результаты сравнения «Фон – ошибочное нажатие на клавишу»

Изучение электрической активности мозга на частоте мю-ритма у мужчин и женщин в фоне, а также при неправильном распознавании целевого стимула и ошибочном нажатии на клавишу компьютера в ответ на предъявление девиантного стимула позволило обнаружить значительные различия в активности исследуемых зон коры.

Результаты сравнения представлена на рис. 2.

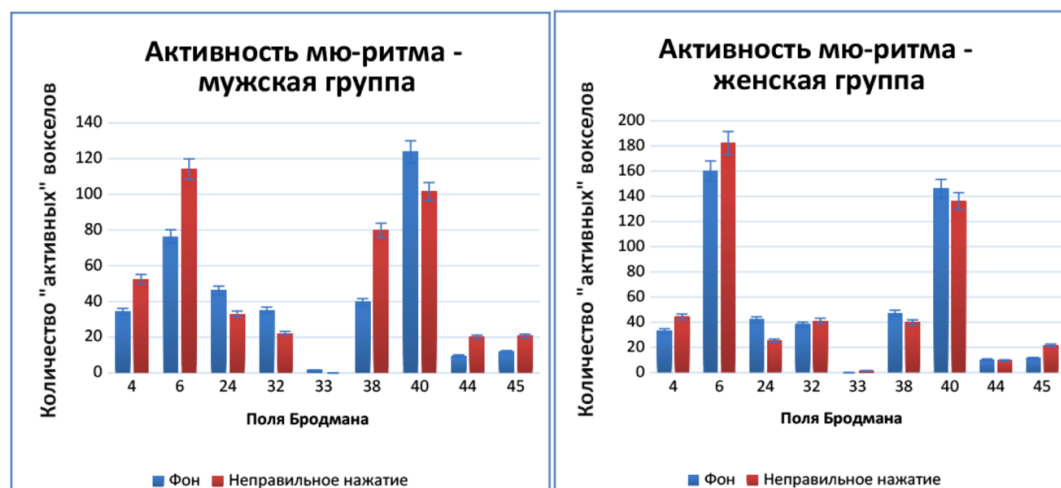


Рис. 2. Активность мю-ритма у мужчин и женщин в фоне и при ошибочном нажатии на клавишу компьютера.

Из рисунка 2 следует, что у мужчин при неправильном нажатии на клавишу компьютера наблюдается депрессия мю-ритма в 24 и 32 ПБ, где расположены «эмоциональные» нейроны. Помимо этого, у мужчин наблюдается депрессия мю-ритма в 40 ПБ, что указывает на активацию «двигательных» зеркальных нейронов.

У женщин, в отличие от мужчин, при ошибочном нажатии на клавишу компьютера в ответ на предъявление девиантного стимула наблюдается депрессия мю-ритма в 24 ПБ, где расположены «эмоциональные» зеркальные нейроны, а также в 38 и 40 ПБ, где находятся «двигательные» зеркальные нейроны (рис. 2).

Полученные данные, представленные на рисунках 1 и 2, свидетельствуют о том, что характер активации зеркальных нейронов при правильном и ошибочном выполнении транзитивных действий, связанных с узнаванием интервалов времени, существенно отличается и зависит от половых различий.

Учитывая, что передняя поясная кора, где локализуются «эмоциональные» зеркальные нейроны [5–7], также участвует в детекции ошибок [10, 11], можно предположить, что обнаруженные отличия в активации зеркальных нейронов при

ошибочном выполнении действия связаны с влиянием мозгового «детектора ошибок» [9].

Результаты сравнения «Фон – пропуск целевого стимула»

Исследование электрической активности мозга на частоте мю-ритма у мужчин и женщин в фоне и при пропуске целевого стимула позволило обнаружить существенные отличия в активности исследуемых зон коры (критерий Стьюдента, уровень значимости – $p < 0,05$).

Результаты сравнения представлены на рис. 3.

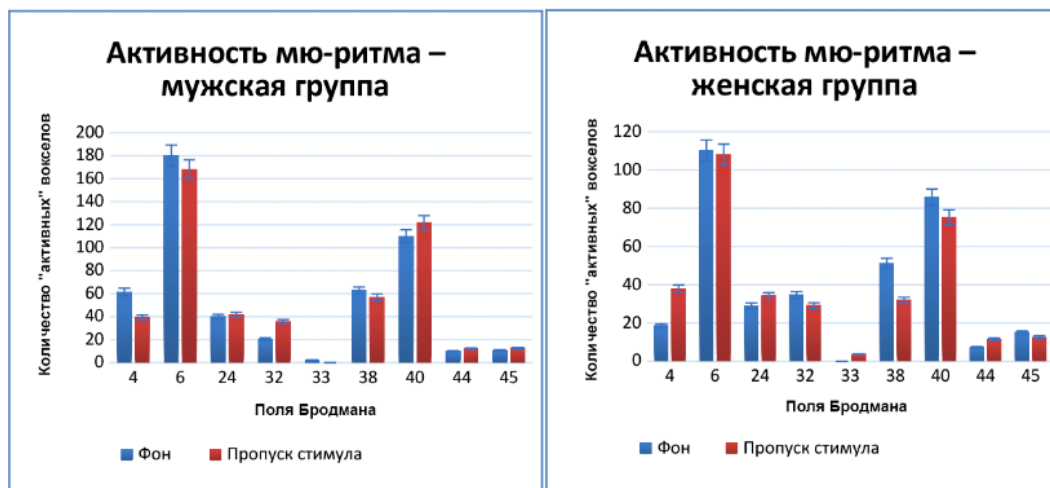


Рис. 3. Активность мю-ритма у мужчин и женщин в фоне и при пропуске целевого стимула.

Как следует из рисунка 3, у мужчин при пропуске целевого стимула депрессия мю-ритма отмечается в 4, 6 и 38 ПБ, где локализуются «двигательные» зеркальные нейроны. В то время как у женщин, депрессия мю-ритма отмечается в 38, 40 и 45 ПБ, где локализуются «двигательные» зеркальные нейроны, а также в 32 ПБ, где локализуются «эмоциональные» зеркальные нейроны.

Так как пропуск целевого стимула не сопровождается моторной реакцией испытуемого – нажатием на клавишу, следовало ожидать, что «двигательные» зеркальные нейроны в этом случае не активируются. Вероятно, наблюдаемая в этом случае депрессия мю-ритма связана с активацией зеркальных нейронов, которые активируются при выполнении и невыполнении действий. Эта разновидность зеркальных нейронов впервые обнаружена в вентральной премоторной коре макаки [12].

Однако имеются данные, свидетельствующие о наличии таких нейронов и у человека [13].

Вероятно, активация зеркальных нейронов, реагирующих на отсутствие действия, связана с актуализацией (подготовкой к выполнению) соответствующей двигательной программы.

Предполагается, что в случае положительного решения испытуемого о том, что предъявляемый стимул является эталоном, указанная программа реализуется, в противном случае – нет.

Вероятно, обнаруженные различия между мужчинами и женщинами в активации зеркальных нейронов, главным образом, связаны с особенностями латеральной организации мозга, от которых зависит точность восприятия времени [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что зеркальные нейроны избирательно реагируют на корректные и ошибочные действия, связанные с узнаванием интервалов времени и фактически выступают, как часть мозговой системы детекции ошибок.

Характер активации этих нейронов при выполнении указанной деятельности существенно отличается у мужчин и женщин.

Список литературы

1. Мошкина М. В. Зеркальные нейроны и мозговой «детектор ошибок» в распознавании корректных и ошибочных действий / Мошкина М. В., Вавилина В. Е., Бушов Ю. В. // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2025. – Т. 11 (77), № 2. – С. 145.
2. Moore M. R. Mu rhythm suppression is associated with the classification of emotion in faces / Moore M. R., Franz E. A. // Cogn. Affect. Behav. Neurosci. – 2017. – Vol. 17, № 1. – P. 224.
3. Puskas S. Quantitative EEG abnormalities in persons with «pure» epileptic predisposition without epilepsy: A low resolution electromagnetic tomography (LORETA) study / Puskas S., Bessenyei M., Fekete I. // Epilepsy Res. – 2010. – Vol. 91, № 1. – P. 94.
4. Hari E. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarına klinik yaklaşım / Hari E., Cengiz C., Kılıç F., Yurdakoş E. // Journal of Istanbul Faculty of Medicine. – 2021. – Vol. 84, № 3. – С. 430.
5. Bonini L. Mirror neurons 30 years later: implications and applications / Bonini L., Rotunno C., Arcuri E., Gallese V. // Trends in cognitive sciences. – 2022. – Vol. 26, № 9. – P. 767.
6. Rizzolatti G. The mirror mechanism: a basic principle of brain function / Rizzolatti G., Sinigaglia C. // Nature Reviews Neuroscience. – 2016. – Vol. 17, № 12. – С. 757.
7. Farina E., Borgnis F., Pozzo T. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders // Journal of Neuroscience Research. – 2020. – Vol. 98, № 6. – P. 1070.
8. Медведева Т. И. Принятие основанных на эмоциях решений в ситуации неопределенности / Медведева Т. И., Большакова С. П., Зинченко О. О., Ениколопова Е. В. // Психологические исследования. – 2015. – Т. 8, № 43. – С. 10.
9. Bechtereva N. P. Physiological foundations of mental activity / Bechtereva N. P., Gretchin V. B. // IntHCOational Review of Neurobiology. – 1968. – Vol. 11. – С. 329.
10. Coles M. G. Why is there an HCO/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing / Coles M. G., Scheffers M. K., Holroyd C. B. // Biological Psychology. – 2001. – Vol. 56, No 3. – P. 173.
11. Debener S. Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring / Debener S. [et al.] // Journal of Neuroscience. – 2005. – Vol. 25. – P. 11730.
12. Bonini L. Ventral Premotor Neurons Encoding Representations of Action during Self and Others' Inaction / Bonini L., Maranesi M., Livi A. et al. // Carrent Biology. – 2014. – Vol. 24, № 14. – P. 1611.

13. Kuhn S. The neural correlates of intending not to do something / Kuhn S., Gevers W., and Brass M. // J. Neurophysiol. – 2009. – Vol. 101. – P. 1913.
14. Бушов Ю. В. Восприятие времени человеком. Психофизиологические механизмы и индивидуальные особенности восприятия времени / Бушов Ю. В. – М. : Наука, 2022. – 359 с.

STUDY OF MIRROR NEURON ACTIVITY IN MEN AND WOMEN DURING CORRECT AND ERRONEOUS ACTIONS

Moshkina M. V., Vavilina V. E., Svetlik M. V., Bushov Yu. V.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk State University", Tomsk, Russia
E-mail: moshkinamv989@gmail.com*

Introduction. According to modern understanding, the mirror neuron system (MNS) and the "brain error detector" play an important role in human learning and social adaptation processes. At the same time, it remains unclear how exactly the mirror neuron system responds to correct and erroneous actions and what role different types of mirror neurons and individual characteristics of humans play in these processes.

Methods. The study involved volunteers – practically healthy, right-handed young men (15 people) and women (15 people) aged 18 to 23 years, students of Tomsk universities. During the study, subjects were presented with a task to recognize a standard stimulus: a visual stimulus of specific duration (a light square with a side of 3.5 cm, appearing for 300 ms in the center of the monitor screen). To memorize the standard, it was presented to the subject at least 10 times on the monitor screen. Then the standard was presented together with deviant stimuli. Stimuli were presented multiple times (at least 50 times) in random order. The inter-stimulus interval was 5–7 seconds. Deviant stimuli differed from the standard by 150 ms in either direction (longer or shorter). Preliminary experiments showed that with such a difference between the standard and deviant stimuli, subjects could distinguish the standard well enough (in 70–90 % of cases). In accordance with the instructions, subjects pressed the "Space" key with the middle and index fingers of their dominant hand when the standard stimulus was presented and ignored signals of other durations. Before and during the activity, EEG was recorded using a 24-channel electroencephalograph "Encephalograph-131-03" from frontal (F3, F4, Fz, F7, F8), central (C3, C4, Cz), temporal (T3, T4, T5, T6), parietal (P3, P4, Pz), and occipital (O1, O2) leads according to the "10–20%" system. Reference electrodes were placed at A1 and A2, located on the right and left mastoid processes of the temporal bone. A grounding electrode was also installed to reduce electrical noise. During EEG data processing, spectral power estimates were calculated on short (2 seconds) artifact-free segments of the EEG recording: 2 seconds before stimulus presentation (the "Baseline" stage), during correct action performance, during target stimulus omission, and during erroneous key presses. Mu-rhythm depression in the frequency range of 8–14 Hz was used as a marker of mirror neuron activation. Low-resolution electromagnetic tomography (LORETA) was used for EEG data processing. For analysis, Brodmann areas (BA) were

selected in which motor mirror neurons (4, 6, 38, 40, 44, 45) and emotional mirror neurons (24, 32, 33) are localized according to available data. Multivariate statistical analysis and Student's t-test were used to assess statistical significance of differences. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$. Fisher's transformation was used to "normalize" the studied parameters.

Results. Statistically significant differences were found in mirror neuron activation during correct and erroneous actions related to time interval recognition, with these differences depending on gender characteristics.

Conclusion. The obtained data indicate that mirror neurons selectively respond to correct and erroneous actions related to time interval recognition and actually function as part of the brain's error detection system. The pattern of activation of these neurons during the specified activity differs significantly between men and women.

Keywords: mirror neurons, mu-rhythm, time interval recognition, correct and erroneous actions.

References

1. Moshkina M. V., Vavilina V. E., Bushov Yu. V. Zerkal'ny'e nejrony` i mozgovoj «detektor oshibok» v raspoznavanii korrektny`x i oshibochny`x dejstvij, *Ucheny'e zapiski Kry'mskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Biologiya. Ximiya*, **11** (77), **2**, 145 (2025).
2. Moore M. R., Franz E. A. Mu rhythm suppression is associated with the classification of emotion in faces, *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.*, **17**, **1**, 224. (2017).
3. Puskas S., Bessenyei M., Fekete I. Quantitative EEG abnormalities in persons with «pure» epileptic predisposition without epilepsy: A low resolution electromagnetic tomography (LORETA) study, *Epilepsy Res.*, **91**, **1**, 94 (2010).
4. Hari E., Cengiz C., Kılıç F., Yurdakoş E. Ayna nöron sistemi ve fonksiyonlarına klinik yaklaşım, *Journal of Istanbul Faculty of Medicine*, **84**, **3**, 430 (2021).
5. Bonini L., Rotunno C., Arcuri E., Gallese V. Mirror neurons 30 years later: implications and applications, *Trends in cognitive sciences*, **26**, **9**, 767 (2022).
6. Rizzolatti G., Sinigaglia C. The mirror mechanism: a basic principle of brain function, *Nature Reviews Neuroscience*, **17**, **12**, 757 (2016).
7. Farina E., Borgnis F., Pozzo T. Mirror neurons and their relationship with neurodegenerative disorders, *Journal of Neuroscience Research.*, **98**, **6**, 1070 (2020).
8. Medvedeva T. I., Bol'shakova S. P., Zinchenko O. O., Enikolopova E. V. Prinyatie osnovanny`x na e`mociyax reshenij v situacii neopredelennosti, *Psixologicheskie issledovaniya*, **8**, **43**, 10. (2015).
9. Bechtereva N. P., Gretchin V. B. Physiological foundations of mental activity, *IntNSOational Review of Neurobiology*, **11**, 329 (1968).
10. Coles M. G., Scheffers M. K., Holroyd C. B. Why is there an NSO/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing, *Biological Psychology*, **56**, **3**, 173. (2001).
11. Debener S. [et al.] Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring, *Journal of Neuroscience*, **25**, 11730 (2005).
12. Bonini L., Maranesi M., Livi A. et al. Ventral Premotor Neurons Encoding Representations of Action during Self and Others' Inaction, *Carrent Biolog*, **24**, **14**, 1611 (2014).
13. Ku'hn S., Gevers W., and Brass M. The neural correlates of intending not to do something, *J. Neurophysiol*, **101**, 1913. (2009).
14. Bushov Yu. V. *Vospriyatie vremeni chelovekom. Psixofiziologicheskie mexanizmy` i individual'ny'e osobennosti vospriyatiya vremeni*, 359 s. (M. : Nauka, 2022).