

DOI: 10.56871/RBR.2024.10.39.003
УДК 612.825

ПОЛОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЖКОРКОВЫХ СВЯЗЕЙ В ДЕЛЬТА-ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА МОЩНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ БИМАНУАЛЬНЫХ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

© Николай Сергеевич Кононенко, Павел Владимирович Ткаченко

Курский государственный медицинский университет. 305041, г. Курск, ул. К. Маркса, 3

Контактная информация: Николай Сергеевич Кононенко — ассистент кафедры нормальной физиологии. E-mail: kononenkons@kursksmu.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7830-1637> SPIN: 9666-6228

Для цитирования: Кононенко Н.С., Ткаченко П.В. Половые особенности межкорковых связей в дельта-диапазоне спектра мощности при выполнении произвольных бимануальных целенаправленных движений // Российские биомедицинские исследования. 2024. Т. 9. № 2. С. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.56871/RBR.2024.10.39.003>

Поступила: 30.01.2024

Одобрена: 04.03.2024

Принята к печати: 20.05.2024

Резюме. Уровень бимануальной координации у лиц мужского и женского полов представлен разной результативностью, что объясняется особенностями организации сенсомоторной сферы у женщин и мужчин. Процессы возбуждения и торможения являются взаимодополняющими и способствуют эффективному построению двигательной системы. Целью исследования является изучение половых особенностей активации коры в дельта-диапазоне и выявление внутрисистемных корковых взаимосвязей при реализации сложнокоординированных бимануальных движений. Уровень активности мозга оценивался регистрацией дельта-ритма при проведении электроэнцефалографии, а результаты показателя координации — с помощью метода суппортметрии. Выявлены достоверные различия в тормозной активности коры больших полушарий и функциональных взаимосвязях ее центров, что обуславливает различия результирующей эффективности выполнения моторных программ. В женской группе ведущее значение в формировании моторной программы имеет высокая активность в дельта-диапазоне левой фронтальной ассоциативной коры и выраженная связь затылочной и премоторной области справа. У мужчин межполушарная асимметрия с торможением правого полушария способствует более совершенному результату.

Ключевые слова: произвольная двигательная активность, электроэнцефалография, бимануальная координация, корковая активность

SEXUAL CHARACTERISTICS OF INTERCORTICAL RELATIONSHIPS IN THE DELTA RANGE OF THE POWER SPECTRUM WHEN PERFORMING ARBITRARY BIMANUAL PURPOSEFUL MOVEMENTS

© Nikolay S. Kononenko, Pavel V. Tkachenko

Kursk State Medical University. 3 K. Marx str., Kursk 305041 Russian Federation

Contact information: Nikolay S. Kononenko — Assistant at the Department of Normal Physiology. E-mail: kononenkons@kursksmu.net
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7830-1637> SPIN: 9666-6228

For citation: Kononenko NS, Tkachenko PV. Sexual characteristics of intercortical relationships in the delta range of the power spectrum when performing arbitrary bimanual purposeful movements. Russian Biomedical Research. 2024;9(2):25–30. DOI: <https://doi.org/10.56871/RBR.2024.10.39.003>

Received: 30.01.2024

Revised: 04.03.2024

Accepted: 20.05.2024

Abstract. The level of bimanual coordination in men and women is represented by different effectiveness, which is explained by the peculiarities of the organization of the sensorimotor sphere in women and men. The processes of excitation and inhibition are complementary and contribute to the effective construction of the motor system. The aim

of the study is to study the sexual characteristics of cortical activation in the delta range and to identify intersystem cortical relationships in the implementation of complexly coordinated bimanual movements. The level of brain activity was assessed by recording the delta rhythm during electroencephalography, and the results of the coordination index using the method of supportmetry. Significant differences in the inhibitory activity of the cerebral cortex and the functional relationships of its centers have been revealed, which causes differences in the resulting effectiveness of motor programs. In the female group, high activity in the delta range of the left frontal associative cortex and a pronounced connection between the occipital and premotor regions on the right are of leading importance in the formation of the motor program. In men, hemispheric asymmetry with inhibition of the right hemisphere contributes to a more perfect result.

Keywords: voluntary motor activity, electroencephalography, bimanual coordination, cortical activity

ВВЕДЕНИЕ

Половые различия в двигательной сфере не вызывают сомнений у современных исследователей [1, 5, 8, 11, 15], однако природа данных расхождений по-прежнему изучена недостаточно. Ритмические бимануальные движения представлены в центральной нервной системе в виде моторной программы их такта, в рамках которой формируется стратегия выполнения локомоции [10, 12]. Активность различных центров коры больших полушарий головного мозга и их взаимосвязь являются ведущим фактором в инициации и коррекции энграмм движений [3, 5, 7, 15]. Процессы возбуждения и торможения являются взаимодополняющими и способствуют эффективному построению двигательной системы [1, 9, 16]. Общепринятая методика регистрации электрической активности мозга — электроэнцефалография — позволяет произвести запись медленных волн в дельта-диапазоне и оценить ингибирование участков коры больших полушарий [4].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данного исследования — изучение половых особенностей активации коры в дельта-диапазоне и выявление внутрисистемных корковых взаимосвязей при реализации сложнокоординированных бимануальных движений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на базе лаборатории физиологии двигательной активности НИИ физиологии, объединенного с однопрофильной кафедрой ФГБОУ ВО «Курский государственный медицинский университет» Минздрава России.

В эксперименте на основе информированного добровольного согласия приняли участие 53 мужчины и 51 женщина в возрасте от 18 до 24 лет. Испытуемым предстояло пройти оценку уровня бимануальной координации с помощью метода суппортметрии [10]. В рамках данной методики испытуемым предстояло выполнить четыре задания разной сложности, по итогам оценивалось время выполнения задания, количество ошибок, время нахождения на контуре и вне контура задания,

а также вычислялся интегральный показатель координации. Затем, после выполнения заданий, производилась запись электроэнцефалограммы в течение 2 минут. Для регистрации использовалась международная система отведений «10-20», в рамках которой фиксировалась активность от 21 чашечкового электрода. Для изучения использовали данные, полученные с отведений Fp1-A1, Fp2-A2, C4-A2, C3-A1, T3-A1, T4-A2, O1-A1, O2-A2, так как именно эти отведения отражают активность основных участков коры, отвечающих за реализацию движений. Показатель электродного импеданса не превышал 20 кОм, чувствительность установлена 7 мкВ/мм. Дальнейшая компьютерная обработка сигнала проводилась методом быстрого преобразования Фурье, с усреднением не менее 30 эпох по 2 с [4, 6].

В эксперименте использовался электроэнцефалограф-анализатор ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» (Таганрог, Россия). Статистическая обработка проводилась путем сравнения средних величин спектра мощности в исследуемых группах. Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Колмогорова–Смирнова (при числе исследуемых более 50 человек). В случае отсутствия нормального распределения количественные данные описывались с помощью медианы (Me), нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3). Категориальные данные описывались с указанием абсолютных значений и процентных долей [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При сравнении параметров в дельта-диапазоне (табл. 1) у женщин наименьшие значения зарегистрированы в отведении C3-A1. Показания в отведении T3-A1 выше на 13%, в Fp1-A1 на 29%, в T4-A2 на 51%, в O2-A2 на 67%, в Fp2-A2 на 79%. Средние значения в отведении O1-A1 выше медианы в отведении C3-A1 на 9%, а в C4-A2 выше на 63%. Максимальный показатель — в отведении Fp2-A2. У мужчин наименьшее значение спектра мощности зарегистрировано в отведении C3-A1. В отведении T3-A1 выше на 1%, в Fp1-A1 значения выше на 9%, в T4-A2 выше на 15%, в Fp2-A2 выше на 37%, в O2-A2 выше на 56%. Среднее значение в отведении C4-A2 выше медианы в O1-A1 на 26%, в C3-A1 выше на 32%. Макси-

Таблица 1

Средние показатели спектра мощности ЭЭГ в дельта-диапазоне у женщин и мужчин при выполнении произвольных бимануальных целенаправленных движений

Table 1

The average values of the EEG power spectrum in the delta range in women and men when performing arbitrary bimanual purposeful movements

Группа / Group	Отведение энцефалограммы / Electroencephalogram leads							
	Fp1-A1	Fp2-A2	C3-A1	C4-A2	O1-A1	O2-A2	T3-A1	T4-A2
Женщины / Women	8,31 (Me)	11,56 (Me)	6,45 (Me)	10,49±9,73 (M±SD)	7,03±3,93 (M±SD)	10,80 (Me)	7,28 (Me)	9,72 (Me)
Мужчины / Men	9,43 (Me)	11,83 (Me)	8,62 (Me)	11,36±7,54 (M±SD)	10,85±6,46 (M±SD)	13,58 (Me)	8,68 (Me)	9,95 (Me)

Примечание: М — среднее значение; SD — стандартное отклонение; Me — медиана.

Note: M — the average value; SD — the standard deviation; Me — the median.

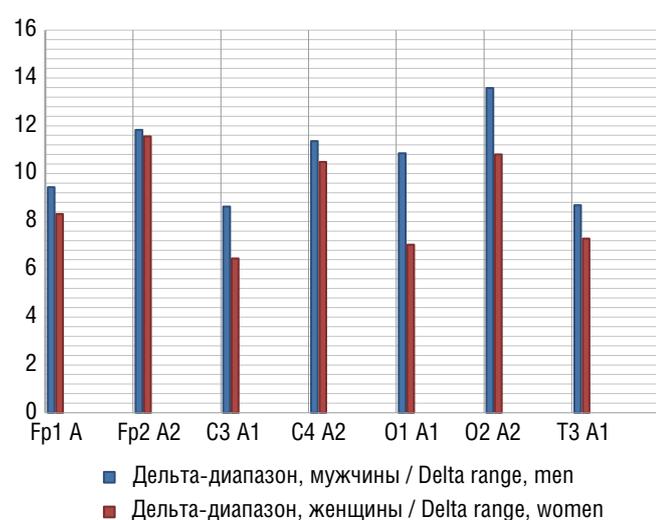


Рис. 1. Сравнительная характеристика средних показателей спектра мощности ЭЭГ в дельта-диапазоне у женщин и мужчин при выполнении произвольных бимануальных целенаправленных движений

Fig. 1. Comparative characteristics of the average values of the EEG power spectrum in the delta range in women and men when performing arbitrary bimanual purposeful movements

мальное значение выявлено в отведении O2-A2, это говорит о высокой дельта-активности в затылочной доле справа.

Сравнительный анализ средних величин в женской и мужской группах исследования (рис. 1) показал, что отведение Fp1-A1 отражает работу левой лобной доли. Значения в мужской группе исследования на 13% ($p < 0,001$) выше аналогичного показателя в женской группе. В отведении Fp2-A2, показывающем работу правой лобной доли, у мужчин выше на 2% ($p < 0,001$). В отведении C3-A1, проекции центральной премоторной коры слева, выше на 34% ($p < 0,001$). В отведении C4-A2, проекции центральной премоторной коры справа, выше

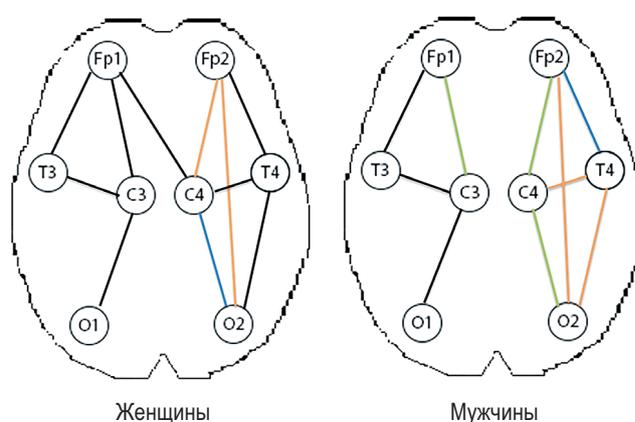


Рис. 2. Корреляционные плеяды спектра мощности испытуемых женского и мужского пола в дельта-диапазоне при выполнении произвольных бимануальных целенаправленных движений

Fig. 2. Correlation pleiades of the power spectrum of female and male subjects in the delta range when performing arbitrary bimanual purposeful movements

на 8% ($p < 0,001$). В отведении O1-A1, которое показывает работу левой затылочной области, выше на 54% ($p < 0,001$). В отведении O2-A2, отражающем работу затылочной области справа, выше на 26%, в отведении T3-A1, проекции височной области слева, выше на 19%, в отведении T4-A2, проекции височной области справа, выше на 2% ($p < 0,001$). При сравнительном анализе спектра мощности установлено преобладание активности головного мозга на всех его участках в дельта-диапазоне у лиц мужского пола над женским.

При проведении корреляционного анализа между показателями активности головного мозга в дельта-диапазоне спектра мощности у лиц мужского пола наблюдается отсутствие взаимосвязей левого и правого полушария (рис. 2). При этом в правых отделах мозга теснота связей выше. У женщин связь между правыми и левыми отделами обеспечивает взаи-

модействие левой фронтальной коры слева и центральной премоторной коры справа. При этом сила связи в мужской группе исследования в отведениях Fp2-A2 — C4-A2 выше на 15% ($p < 0,001$), в T4-A2 — O2-A2 выше на 17% ($p < 0,001$), в Fp1-A1 — C3-A1 выше на 34% ($p < 0,001$), в Fp2-A2 — T4-A2 выше на 34% ($p < 0,001$). В C4-A2 — O2-A2 у женщин выше на 14% ($p < 0,001$). Мультиполярным центром с самым высоким значением суммарного коэффициента корреляции у женщин является центральная премоторная область справа. Также она совместно с затылочной областью справа имеет двусторонние связи высокой тесноты. У мужчин также областью корреляции с максимальным значением суммарного коэффициента является центральная премоторная кора справа. Однако связи высокой тесноты расположены между фронтальной ассоциативной корой справа и правой височной областью.

ОБСУЖДЕНИЕ

Дельта-ритм по своей природе является таламокортикальным [4], и за счет зеркальных нейронов, расположенных в коре, показывает тормозную деятельность специфических ядер таламуса [9], а также отражает процессы консолидации памяти и когнитивной деятельности [7, 15, 17]. Учитывая, что двигательная активность является сочетанием процессов возбуждения и торможения, данный ритм будет оказывать существенное влияние на реализацию моторных программ [1, 9, 16]. Максимальная активность у женщин в левой фронтальной доле может говорить о процессах глубокого торможения третичных моторных полей ассоциативной коры слева. При этом образующийся мост между левым и правым полушариями, который находится между левой фронтальной областью и центральной премоторной корой, может обуславливать более низкие показатели уровня бимануальной координации у женщин по сравнению с мужчинами. Выраженная связь между затылочной и центральной премоторной областями справа может оказывать ингибирующее воздействие на процессы извлечения существующих энграмм из памяти.

Мужская группа исследования характеризуется более высокими показателями активности в дельта-диапазоне во всех отведениях, что говорит о более глубоком торможении структур. Картирование функциональных связей в данной группе позволяет говорить об отсутствии взаимных влияний между полушариями и выраженной правосторонней асимметрии активности. Двусторонняя связь высокой тесноты между лобной и височной долями справа может говорить о взаимном торможении третичных моторных полей фронтальной ассоциативной коры и вестибулярных центров справа, что в условиях выполнения заданий суппортметрии оказывает положительное влияние на более совершенный результат.

Показатели бимануальной координации в исследуемых группах женщин и мужчин имеют существенные различия, тем самым подтверждая ранее полученные данные [11, 13]. Разница в результатах обусловлена отличиями в тактике выполнения заданий, соответственно, в инициации и коррекции

моторных программ на корковом уровне [12, 14]. Регистрация дельта-активности головного мозга позволяет оценить процессы ингибирования центров, участвующих в движении. Женская группа исследования характеризуется активным торможением левой фронтальной ассоциативной коры, наличием «моста», связывающего полушария в левой лобной и правой центральной премоторной областях, и выраженными связями между центральной премоторной и затылочной корой справа, что в совокупности показывает менее эффективную стратегию выполнения двигательного акта по сравнению с мужчинами. В группе «мужчины» дельта-активность выражена сильнее и говорит о более глубоком торможении во всех центрах коры. Отсутствие связей между полушариями с выраженной правосторонней асимметрией активности и взаимное подавление височной и фронтальной области справа отражает более результативный процесс бимануальной координации.

ВЫВОДЫ

1. У женщин и мужчин выявлена разная стратегия выполнения произвольных бимануальных целенаправленных движений.
2. В женской группе ведущее значение в формировании моторной программы имеет высокая активность в дельта-диапазоне левой фронтальной ассоциативной коры и выраженная связь затылочной и премоторной области справа.
3. У мужчин межполушарная асимметрия с торможением правого полушария способствует более совершенному результату.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие пациентов на публикацию медицинских данных.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information within the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. М.: Наука; 1990.
2. Гутор А.Г. Статистические критерии Манна–Уитни и Вилкоксона в исследованиях эффективности обучения. Математическое и компьютерное моделирование: сборник материалов VIII Международной научной конференции, посвященной памяти А.Л. Иозефера. 2020;1:19–21.
3. Завьялов А.В. Соотношение функций организма. М.: Медицина; 1990.
4. Зенков Л.Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). Руководство для врачей. М.: МЕДпрессинформ; 2004.
5. Кирой В.Н. Электрографические корреляты реальных и мысленных движений: спектральный анализ. Журнал высшей нервной деятельности им. ИП Павлова. 2010;60(5):525–533.
6. Кононенко Н.С., Пронина Е.Д., Авдеева О.Ю. Современные подходы к анализу ЭЭГ активности. Молодежная наука и современность. Материалы 86-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых, посвященной 86-летию КГМУ. 2021;1:17–19.
7. Курганский А.В. Количественные меры кортико-кортикального взаимодействия: современное состояние. Физиология человека. 2013;39(4):122–122.
8. Павленко В.Б. Роль коры мозга и подкорковых аминергических структур в организации целенаправленного поведенческого акта. Киев; 2004.
9. Раева С.Н. Исследование функциональной роли и нейронных механизмов деятельности моторного таламуса и стриатума в системах управления и реализации произвольных двигательных реакций человека. Российский фонд фундаментальных исследований. 1995;95(4):11082.
10. Ткаченко П.В. Закономерности системной сенсомоторной организации сложнокоординированных бимануальных движений человека. Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Курск; 2014.
11. Ткаченко П.В., Бобынцев И.И. Соотношение моторных и сенсорных функций человека. Курск: КГМУ; 2016.
12. Ткаченко П.В., Бобынцев И.И. Особенности соотношений характеристик эффекторного аппарата и показателей бимануальной координации. Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». 2015;3:126–132.
13. Ткаченко П.В., Кононенко Н.С., Насмачная А.А. Электрическая активность мозга при воображении целенаправленных движений рук у лиц, играющих на струнных и клавишных музыкальных инструментах. Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. 2023;20(1):24–28.

14. Ball T. Movement related activity in the high gamma range of the human EEG. Neuroimage. 2008;41(2):302–310.
15. Gilden L., Vaughan Jr.H.G., Costa L.D. Summated human EEG potentials with voluntary movement. Electroencephalography and clinical Neurophysiology. 1966;20(5):433–438.
16. Pirondini E. EEG topographies provide subject-specific correlates of motor control. Scientific reports. 2017;7(1):13229.

REFERENCES

1. Bernstein N.A. Fiziologiya dvizhenij i aktivnost'. [Physiology of movements and activity]. Moscow: Nauka; 1990. (in Russian).
2. Gutor A.G., Stashulenok S.P. Statisticheskie kriterii Manna–Uitni i Vilkoksona v issledovaniyah effektivnosti obucheniya. [Mann–Whitney and Wilcoxon statistical criteria in studies of learning effectiveness]. Mathematical and computer modeling: a collection of materials at the VIII International Scientific Conference dedicated to the memory of A.L. Josefer. 2020;1:19–21. (in Russian).
3. Zavyalov A.V. Sootnoshenie funkcij organizma. [Correlation of body functions]. Moscow: Meditsina Publ.; 1990. (in Russian).
4. Zenkov L.R. Klinicheskaya elektroencefalografiya (s elementami epileptologii). [Clinical electroencephalography (with elements of epileptology)]. Rukovodstvo dlya vrachej. Moscow: MEDpressinform Publ.; 2004. (in Russian).
5. Kira V.N. Elektrograficheskie korrelyaty real'nyh i myslennyh dvizhenij: spektral'nyj analiz. [Electrographic correlates of real and mental movements: spectral analysis]. Journal of Higher nervous activity named after IP Pavlova. 2010;60(5):525–533. (in Russian).
6. Kononenko N.S. Sovremennye podhody k analizu EEG aktivnosti. [Modern approaches to the analysis of EEG activity]. Youth science and modernity. Materials of the 86th International Scientific Conference of students and young scientists dedicated to the 86th anniversary of KSMU. 2021;1:17–19. (in Russian).
7. Kurgansky A.V. Kolichestvennyye mery kortiko-kortikal'nogo vzaimodejstviya: sovremennoe sostoyanie [Quantitative measurements of cortical-cortical effects: current state]. Human Physiology. 2013; 39(4): 112- 122. (in Russian).
8. Pavlenko V.B. Rol' kory mozga i podkorkovyh aminergicheskikh struktur v organizacii celenapravlenno go povedencheskogo akta. [The role of the cerebral cortex and subcortical aminergic structures in the organization of a purposeful behavioral act]. Kiev; 2004. (in Russian).
9. Raeva S.N. Issledovanie funkcional'noj roli i nejronnyh mekhanizmov deyatel'nosti motornogo talamusa i striatuma v sistemah upravleniya i realizacii proizvol'nyh dvigatel'nyh reakcij cheloveka. [Investigation of the functional role and neural mechanisms of the motor thalamus and striatum in control systems and the implementation of voluntary motor reactions of a person]. Russian Foundation for Basic Research. 1995;95(4):11082. (in Russian).
10. Tkachenko P.V. Zakonomernosti sistemnoj sensomotornoj organizacii slozhnoskoordinirovannyh bimanual'nyh dvizhenij cheloveka. [Regularities of the systemic sensorimotor organization of complexly coordinated bimanual human movements]. abstract of the disser-

- tation of the Doctor of Medical Sciences : 03.03.01. Kursk, 2014. (in Russian).
11. Tkachenko P. V., Bobytsev I. I. Sootnoshenie motornyh i sornnyh funkciy cheloveka [Correlation of human motor and sensory functions]. Kursk: Publishing house of KSMU. 2016. (in Russian).
 12. Tkachenko P.V. Bobytsev I.I. Osobennosti sootnoshenij harakteristik effektornogo apparata i pokazatelej bimanual'noj koordinacii [Features of the relationship between the characteristics of the effector apparatus and indicators of bimanual coordination]. Kur'skiy nauchno-prakticheskiy vestnik «Chelovek i yego zdorov'ye». 2015;3:126–132. (in Russian).
 13. Tkachenko P.V., Kononenko N.S., Nasmachnaya A.A. Elektricheskaya aktivnost' mozga pri voobrazhenii celenapravlen-nyh dvizhenij ruk u lic, igrayushchih na strunnyh i klavishnyh muzykal'nyh instrumentah. [Electrical activity of the brain in the imagination of purposeful hand movements in persons playing stringed and keyboard musical instruments]. Bulletin of the Volgograd State Medical University. 2023;20(1):24–28. (in Russian).
 14. Ball T. Movement related activity in the high gamma range of the human EEG. *Neuroimage*. 2008;41(2):302–310.
 15. Gildea L., Vaughan Jr.H.G., Costa L.D. Summated human EEG potentials with voluntary movement. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*. 1966;20(5):433–438.
 16. Pirondini E. EEG topographies provide subject-specific correlates of motor control. *Scientific reports*. 2017;7(1):13229.