

УДК 612.825

DOI 10.29039/2413-1725-2024-10-2-78-86

**ПОЛОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ КОРКОВЫХ
ВЗАИМОСВЯЗЕЙ В БЕТА ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ
РЕАЛИЗАЦИИ БИМАНУАЛЬНЫХ СЛОЖНОСКООРДИНИРОВАННЫХ
ДВИЖЕНИЙ**

Кононенко Н. С., Ткаченко П. В.

*ФГБОУ ВО Курский государственный медицинский университет Минздрава РФ, Курск, Россия
E-mail: kononenkons@kursksmu.net*

Взаимосвязь высших отделов нервной системы с ее структурными элементами является основой изучения сложной морфофункциональной системы двигательного акта. Половые различия в этом процессе носят результирующий характер и определяют стратегию выполнения бимануального движения. Целью исследования является изучение половых особенностей внутрикорковых взаимодействий при реализации сложнокоординированных целенаправленных движений для определения тактики выполнения двигательного задания. В статье описывается методика регистрации уровня бимануальной координации с помощью метода суппортметрии, а также регистрация корковой активности посредством записи электроэнцефалограммы. В результате сравнительного и корреляционного анализа установлены различия в инициации и коррекции программы двигательного акта у женщин и мужчин.

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

ВВЕДЕНИЕ

Двигательная активность является одной из самых сложных функциональных систем нашего организма, которая имеет строгую иерархию и включает в себя три основных механизма: афферентный синтез, эфферентный синтез, санкционирующая стадия [1–3]. Согласованная работа всех звеньев этой системы обуславливает координационную деятельность двигательного акта. Центральным звеном в реализации сложнокоординированной локомоции является аналитико-интегративная функция коры больших полушарий головного мозга [4, 5]. Именно здесь происходит инициация моторных программ и последующая их коррекция. Формирование бета-ритма при реализации движений отражает степень активации коры, а выделение высокочастотного диапазона данного ритма позволяет оценить когнитивные функции мозга в рамках двигательной задачи [6–14].

В исследованиях П. В. Ткаченко [15–18] установлены различия в координационной деятельности у мужчин и женщин, обусловленные разницей организации сенсомоторной сферы. Однако, влияние взаимосвязи различных

отделов неокортекса на уровень бимануальной координации остается по-прежнему мало изученным.

Целью данного исследования является изучение половых особенностей внутрисистемных корковых взаимосвязей при реализации сложнскоординированных бимануальных движений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на базе лаборатории физиологии двигательной активности НИИ физиологии, объединенного с однопрофильной кафедрой ФГБОУ ВО КГМУ Минздрава России.

В эксперименте, на основе информированного добровольного согласия, приняли участие 53 мужчины и 51 женщина в возрасте от 18 до 24 лет. В рамках первого этапа эксперимента в исследуемых группах производили оценку уровня бимануальной координации с помощью метода суппортметрии. В основе метода лежит использование модифицированного суппорта токарного станка, с помощью специальных микросхем соединенного с компьютером, на котором установлено специально разработанное программное обеспечение [16]. Респондентам предлагалось выполнить четыре задания разной сложности, по итогам которого оценивалось время выполнения задания, количество ошибок, время нахождения на и вне контура задания, а также вычислялся интегральный показатель координации.

Во втором этапе эксперимента производилась запись электроэнцефалограммы в течение 2 минут сразу после выполнения заданий суппортметрии. При наложении 21 чашечкового электрода на интактные покровы головы и экстракраниальные точки использовалась международная система отведений «10-20» [11,19]. 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 реализация движения. 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. В эксперименте использовался электроэнцефалограф-анализатор ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» (Таганрог, Россия). Дальнейшая 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). 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. Сравнение трех и более групп по количественному показателю, распределение которого отличалось от нормального, выполнялось с помощью критерия Краскела – Уоллиса, апостериорные сравнения – с помощью критерия Данна с поправкой Холма [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении сравнительного анализа (таблица 1) спектра мощности у женщин в бета высокочастотном диапазоне с величиной 26–35 Гц, минимальные значения электрической активности головного мозга были установлены в отведениях Т3-А1, Т4-А2. Значения в отведении Fp1-А1 выше на 43 %, в отведении Fp2-А2 на 43 %, в отведении С4-А2 на 57 %, в отведении С3-А1 на 71 %, в отведении О1-А1 на 71 %, в отведении О2-А2 на 100 %. Максимальная активность наблюдается в отведении О2-А2, что соответствует затылочной области коры больших полушарий. При оценке результатов спектра мощности у мужчин в бета высокочастотном диапазоне минимальные значения установлены в отведении Т3-А1, которое записывает активность коры больших полушарий в средневисочной области слева. В отведении Т4-А2 выше на 50 %, в Fp1-А1 значения выше на 125 %, в Fp2-А2 выше на 125 %, в С3-А1 выше на 125 %, в С4-А2 выше на 125 %, в О1-А1 выше на 150 %, в О2-А2 выше на 175 %. Максимальная активность выявлена в затылочной области справа, отведение О2-А2.

Таблица 1
Средние показатели спектра мощности ЭЭГ в бета высокочастотном диапазоне (мкВ²) у женщин и мужчин (Ме - медиана)

	Fp1-А1	Fp2-А2	С3-А1	С4-А2	О1-А1	О2-А2	Т3-А1	Т4-А2
Женщины	0,10	0,10	0,12	0,11	0,12	0,14	0,07	0,07
Мужчины	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,11	0,04	0,06

При сравнении средних величин в женской и мужской группах исследования (рис. 1) установлено, что в отведении Fp1-А1 (проекция лобной доли слева) и в отведении Fp2-А2 (проекция лобной доли справа) у женщин зарегистрирован показатель на 11 % ($p < 0,001$) выше аналогичного показателя у мужчин; в отведении С3-А1 (проекция центральной премоторной коры слева) выше на 33 % ($p < 0,001$); в отведении С4-А2 (проекция центральной премоторной коры справа) выше на 22 % ($p < 0,001$); в отведении О1-А1 (проекция затылочной области слева) выше на 20 % ($p < 0,001$); в отведении О2-А2 (проекция затылочной области справа) выше на 27 % ($p < 0,001$); в отведении Т3-А1 (проекция височной области слева) выше на 75 % ($p < 0,001$); в отведении Т4-А2 (проекция височной области справа) выше на 17 % ($p < 0,001$). При сравнительном анализе спектра мощности установлено преобладание активности головного мозга на всех его участках в бета высокочастотном диапазоне у лиц женского пола над мужским.

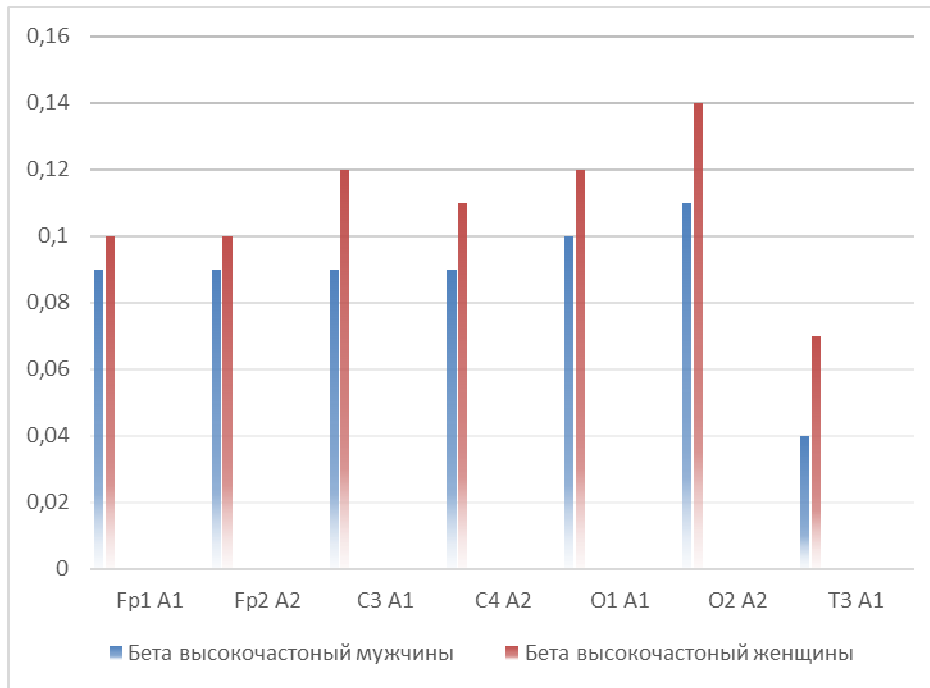
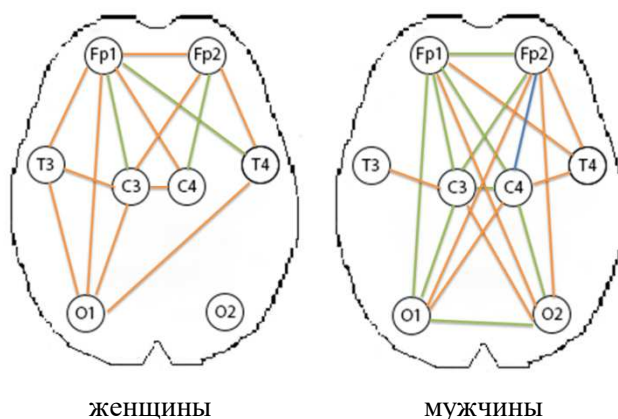


Рис. 1. Сравнительная характеристика средних показателей спектра мощности ЭЭГ у женщин и мужчин. По оси абсцисс указаны отведения при записи ЭЭГ. По оси ординат указаны показатели спектра мощности, mkB^2 .

При внутрисистемном корреляционном анализе спектра мощности в бета высокочастотном диапазоне (рис. 2) установлено, что мужской группе исследуемых в отведениях C4 A2 – T4 A2 связь выше на 3 % ($p < 0,001$), в C3 A1 – C4 A2 выше на 5 % ($p < 0,001$), в Fp1 A1 – O1 A1 выше на 5 % ($p < 0,001$), в Fp1 A1 – Fp2 A2 выше на 10 % ($p < 0,001$), в C3 A1 – O1 A1 выше на 10 % ($p < 0,001$), в Fp2 A2 – C4 A2 выше на 12 % ($p < 0,001$), в C3 A1 – O2 A2 выше на 15 % ($p < 0,001$), в Fp2 A2 – C3 A1 выше на 17 % ($p < 0,001$), в Fp1 A1 – C4 A2 выше на 18 % ($p < 0,001$), в Fp2 A2 – O2 A2 выше на 25 % ($p < 0,001$), в Fp2 A2 – O1 A1 выше на 26 % ($p < 0,001$), в O1 A1 – O2 A2 выше на 32 % ($p < 0,001$), в Fp1 A1 – O2 A2 выше на 38 % ($p < 0,001$). В женской группе исследования связи сильнее в отведениях Fp1 A1 – T4 A2 на 19 % ($p < 0,001$), в Fp1 A1 – T3 A1 выше на 16 % ($p < 0,001$). У женщин самые тесные связи выявлены между фронтальным отделом слева и центральными премоторными участками слева и права. Полностью отсутствуют связи с затылочной долей справа. Мультиполярным центром является левая лобная доля. У мужчин самая прочная связь выявлена между правой лобной долей и центральной премоторной областью справа. Наименее связанным участком является средневисочная область слева. Остальные центры имеют одинаковое количество взаимосвязанных участков [21].



Примечание: коэффициенты корреляции Спирмена

— $> 0,9$; — $> 0,8$; — $> 0,7$

Рис. 2. Корреляционные плеяды спектра мощности испытуемых женского и мужского пола в бета высокочастотном диапазоне

Высокочастотный бета ритм служит индикатором когнитивной деятельности при моторной и сенсорной стимуляции и отражает процессы формирования и коррекции моторных программ. Пиковая активность у женщин и мужчин в правой затылочной доле, говорит об интенсивных процессах обработки информации полученной от зрительного анализатора, а также активном включением ассоциативной коры в механизм извлечения из памяти имеющихся энграмм движений с последующей их переработкой. У женщин данный участок коры больших полушарий изолирован и не имеет статистически значимых корреляционных связей с другими областями неокортекса, в то время как у мужчин имеются высокой тесноты двухсторонние связи с левой затылочной областью, с правой и левой центральными премоторными и фронтальными участками. Кроме того, топографическая картина внутрисистемных взаимосвязей у мужчин характеризуется большим количеством контактов между центрами коры и взаимозависимостей фронтальной, центральной премоторной, затылочной и правой височной долей, что может обуславливать отличную от женщин тактику формирования моторной программы и более совершенную реализацию сложнскоординированной локомоции. Картирование связей в женской группе характеризуется левосторонней асимметрией и активным включением в процесс левой височной и левой лобной долей. При этом фронтальная область слева является мультиполярным центром и обладает наибольшим количеством связей и их суммарным корреляционным коэффициентом, соответственно, оказывает ведущее влияние на формирование и коррекцию моторных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уровень бимануальной координации у женщин и мужчин имеет существенные различия, что подтверждается исследованиями П. В. Ткаченко [18–21]. Согласно теории функциональных систем на результирующее действие оказывают влияние элементы системы находящиеся на всех уровнях организационной структуры. Ключевым фактором реализации целенаправленного движения является формирование программы двигательного акта в коре больших полушарий. Индикатором когнитивной деятельности мозга в этом процессе служит высокочастотный бета-ритм. В женской группе исследования наблюдается максимальная активность данного ритма в правой затылочной доле. При корреляционном анализе данный участок характеризуется отсутствием связей с другими областями и наблюдается левосторонняя асимметрия с активным включением левой фронтальной коры. В совокупности выявленные факторы могут обуславливать менее совершенную реализацию бимануальной локомоции. Мужская группа характеризуется наличием высокой тесноты двухсторонних связей между фронтальной, центральной премоторной и затылочной корой ипсилатерального полушария, а также включением в процесс правой височной области, что может служить причиной более высоких результатов бимануальной координации, по сравнению с женской группой.

Список литературы

1. Бернштейн Н. А. Физиология движений и активность / Н. А. Берштейн. – Москва : Наука, 1990. – 494 с.
2. Двейрина О. А. Координационные способности: определение понятия, классификация форм проявления / О. А. Двейрина. – Текст: электронный // Ученые записки университета Лесгафта. 2008. – №1. – С. 35–38.
3. Завьялов А. В. Соотношение функций организма / А. В. Завьялов. – Москва : Медицина, 1990. – 159 с.
4. Анохин П. К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем / П. К. Анохин // Принципы системной организации функций. – Москва : Наука, 1973. – С. 5–61.
5. Кабачкова А. В. Влияние уровня двигательной активности на пространственное распределение бета-ритма электроэнцефалограммы / А. В. Кабачкова, Г. С. Лалаева, А. Н. Захарова – Текст: электронный // Известия ТулГУ. Физическая культура. Спорт. – 2016. – №1. – С. 50–59.
6. Ball T. Movement related activity in the high gamma range of the human EEG / T. Ball / Neuroimage. – 2008. – Т. 41, №. 2. – С. 302–310.
7. Gildea L. Summated human EEG potentials with voluntary movement / L. Gildea, Jr. H. G. Vaughan, L. D. Costa // Electroencephalography and clinical Neurophysiology. – 1966. – Т. 20, №. 5. – С. 433–438.
8. Pirondini E. EEG topographies provide subject-specific correlates of motor control / E. Pirondini // Scientific reports. – 2017. – Т. 7, №. 1. – С. 13229.
9. Аликина М. А. Амплитудно-частотные, топографические, возрастные особенности и функциональное значение сенсомоторного ритма ЭЭГ / М. А. Аликина, С. А. Махин, В. Б. Павленко // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2016. – №2. – С. 3–24.
10. Брагина Н. Н. Функциональные асимметрии человека / Н. Н. Брагина, Т. А. Доброхотова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Медицина, 1988. – 240 с. – ISBN 5-225-00102-5.
11. Зенков Л. Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии) : руководство для врачей / Л. Р. Зенков. – Москва : МЕДпрессинформ, 2004. – 368 с.

12. Киной В. Н. Электрографические корреляты реальных и мысленных движений: спектральный анализ / В.Н. Киной. – Текст: непосредственный // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2010. – Т. 60, №. 5. – С. 525–533.
13. Кононенко Н. С. Современные подходы к анализу ЭЭГ активности / Н. С. Кононенко, Е. Д. Пронина, О. Ю. Авдеева // Молодежная наука и современность : Материалы 86-ой Международной научной конференции студентов и молодых ученых, посвященной 86-летию КГМУ: В 3-х томах, Курск, 22–23 апреля 2021 года. Том I. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2021. – С. 17–19. – EDN WANUVB.
14. Лурия А. Р. Высшие корковые функции и их нарушения при локальных поражениях мозга / А. Р. Лурия. – Москва : Изд-во МГУ, 1962. – 432 с.
15. Ткаченко П. В. Закономерности системной сенсомоторной организации сложнocoординированных бимануальных движений человека : автореферат дис. ... д-ра мед. наук : 03.03.01 / П. В. Ткаченко. – Курск, 2014. – 46 с.
16. Ткаченко П. В. Соотношение моторных и сенсорных функций человека / Ткаченко П. В., Бобынцев И. И. // Курск: Изд-во КГМУ. – 2016. – 264 с.
17. Ткаченко П. В. Особенности соотношений характеристик эффекторного аппарата и показателей бимануальной координации / П. В. Ткаченко, И. И. Бобынцев. – Текст: непосредственный // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». – 2015. – № 3. – С. 126–132.
18. Ткаченко П. В. Электрическая активность мозга при воображении целенаправленных движений рук у лиц, играющих на струнных и клавишных музыкальных инструментах / П. В. Ткаченко, Н. С. Кононенко, А. А. Насмачная // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 24–28. – DOI 10.19163/1994-9480-2023-20-1-24-28. – EDN QLWKKR.
19. Ашуркова Е. С. Исследование произвольной ритмической активности руки в аспекте сенсомоторной работоспособности / Е. С. Ашуркова, А. Я. Рыжов, А. В. Павленко // Вестник ТвГУ. Серия: Биология и экология (5). – 2007. – С. 39–44.
20. Гутор А. Г. Статистические критерии Манна-Уитни и Вилкоксона в исследованиях эффективности обучения / А. Г. Гутор, С. П. Шашуленок // Математическое и компьютерное моделирование : сборник материалов VIII Международной научной конференции, посвященной памяти А. Л. Иозефера, Омск, 20 ноября 2020 года. – Омск: Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, 2020. – С. 19–21. – EDN ETLQJM.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664073 Российская Федерация. Информационная система построения корреляционных плеяд на основании показателя вероятности получения наблюдаемых результатов (p-value) "Корреляционные плеяды_p-value" : № 2023663101 : заявл. 21.06.2023 : опубл. 29.06.2023 / Н. С. Кононенко, П. В. Ткаченко, Н. И. Белоусова, А. С. Малищева ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Курский государственный медицинский университет" Министерства здравоохранения Российской Федерации. – EDN JCNCBZ.

**SEXUAL CHARACTERISTICS OF INTRA-SYSTEMIC CORTICAL
RELATIONSHIPS IN THE IMPLEMENTATION OF BIMANUAL COMPLEX
COORDINATED MOVEMENTS**

Kononenko N. S., Tkachenko P. V.

*Kursk State Medical University (KSMU), Kursk, Russia
E-mail: kononenkons@kursksmu.net*

The interrelation of the higher parts of the nervous system with its structural elements is the basis for studying the complex morphofunctional system of the motor act. The sex

differences in this process are of a resultant nature and determine the strategy of performing the bimanual movement. As part of the study, the subjects registered the level of bimanual coordination using the method of supportmetry, the activity of the cortex was assessed by indicators of the power spectrum when recording an electroencephalogram.

As a result of the study, it was found that the level of bimanual coordination in women and men has significant differences. An indicator of the cognitive activity of the brain in this process is a high-frequency beta rhythm. In the female study group, the maximum activity of this rhythm is observed in the right occipital lobe. In correlation analysis, this area is characterized by a lack of connections with other areas and a left-sided asymmetry is observed with the active inclusion of the left frontal cortex. Collectively, the identified factors may cause a less perfect implementation of bimanual locomotion. The male group is characterized by the presence of high closeness of bilateral connections between the frontal, central premotor and occipital cortex of the ipsic and contralateral hemispheres, as well as the inclusion of the right temporal region in the process, which may cause higher results of bimanual coordination compared with the female group.

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

References

1. Bernstein N. A., *Physiology of movements and activity*, 494 p. (Moscow, 1990).
2. Dveirina O. A., Coordination abilities: definition of the concept, classification of forms of manifestation, *Scientific notes of Lesgaft University*, **1**, 35 (2008).
3. Zavyalov A.V., *Correlation of body functions*, 159 p. (Moscow, 1990).
4. Anokhin P. K., *Fundamental issues of the general theory of functional systems*, 56 p. (Moscow, 1973).
5. Kabachkova A. V., The influence of the level of motor activity on the spatial distribution of the beta rhythm of the electroencephalogram, *News of TulSU. Physical Culture. Sport*, **1**, 50 (2016).
6. Ball T., Movement related activity in the high gamma range of the human, *Neuroimage*, **2**, 302 (2008).
7. Gildea L., Vaughan Jr. H. G., Costa L. D., Summated human EEG potentials with voluntary movement, *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, **20** (5), 433 (1966).
8. Pirondini E., EEG topographies provide subject-specific correlates of motor control, *Scientific reports*, **7** (1), 13229 (2017).
9. Alikina M. A., Makhin S. A., Pavlenko V. B., Amplitude-frequency, topographic, age-related features and functional significance of the sensorimotor rhythm of the EEG, *Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **2**, 3 (2016).
10. Bragina, N. N., Dobrokhotova T. A., *Functional asymmetries of man*, 240 p. (Moscow, 1988)
11. Zenkov, L. R., *Clinical electroencephalography (with elements of epileptology): a guide for doctors*, 368 p. (Moscow, 2004).
12. Kira V. N., Electrographic correlates of real and mental movements: spectral analysis, *Journal of Higher nervous activity IP Pavlova*, **60** (5), 525 (2010).
13. Kononenko N. S., Pronina E. D., Avdeeva O. Yu., 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* (Kursk, 2021), p. 17.
14. Luria A. R., *Higher cortical functions and their disorders in local brain lesions*, 432 p. (Moscow, 1962).
15. Tkachenko P. V., *Regularities of the systemic sensorimotor organization of complexly coordinated bimanual human movements*, 46 p. (Kursk, 2014).
16. Tkachenko P. V., Bobyntsev I. I., *Correlation of human motor and sensory functions*, 264 p. (Publishing house of KSMU, 2016).

17. Tkachenko P. V., Bobyntsev I. I., Features of the relationship between the characteristics of the effector apparatus and indicators of bimanual coordination, *Kursk scientific and practical bulletin "Man and his health"*, **3**, 126 (2015).
18. Tkachenko P. V., Kononenko N. S., Nasmachnaya A. A., 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*, **20 (1)**, 24 (2023).
19. Ashurkova E. S., Ryzhov A. Ya., Pavlenko A. V., Investigation of arbitrary rhythmic activity of the hand in the aspect of sensorimotor performance, *TvSU Bulletin. Series: Biology and Ecology*, **5**, 39 (2007).
20. Gutor A. G., Stashulenok S. P., Mann-Whitney and Wilcoxon statistical criteria in studies of learning effectiveness, *Mathematical and computer modeling : a collection of materials of the VIII International Scientific Conference dedicated to the memory of A.L. Josefer* (Omsk, 2020), p. 19.
21. Kononenko N. S., Tkachenko P. V., Belousova N. I., Malisheva A. S., Certificate of state registration of the computer program No. 2023664073 Russian Federation. Information system for constructing correlation pleiades based on the probability index of obtaining observed results (p-value) "Correlation_p-value pleiades".No. 2023663101 : application. 06/21/2023 : publ. 06/29/2023 / ; applicant Federal State budgetary educational institution of higher education The Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation. – EDN JCNCBZ.