

УДК 616.831-008.6+612.821+159.91

DOI 10.29039/2413-1725-2024-10-4-103-110

СВЯЗЬ РЕАКТИВНОСТИ СЕНСОМОТОРНЫХ РИТМОВ ЭЭГ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ ТЕСТОВ У ДЕТЕЙ С ДЦП ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТРЕНИНГОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА «ЭКЗОКИСТЬ-2»

Кезик Е. В.¹, Власенко С. В.², Кайда А. И.¹, Орехова Л. С.¹, Бирюкова Е. А.¹

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь,
Республика Крым, Россия

²Научно-исследовательский институт детской курортологии, физиотерапии и
медицинской реабилитации, Евпатория, Республика Крым, Россия
E-mail: vlasenko65@rambler.ru

Целью настоящего исследования явился анализ связи между реактивностью сенсомоторных мю- (8–13 Гц) и бета- (15–25 Гц) ритмов ЭЭГ с показателями тестов у детей с ДЦП в результате комплексного санаторно-курортного лечения, включающего сеансы нейрореабилитации. В исследовании приняли участие 50 детей в возрасте 7–15 лет (35 мальчиков и 15 девочек) с диагнозом ДЦП и нарушением двигательных функций правой руки. Результаты корреляционного анализа показали наличие статистически значимых связей между реактивностью мю- и бета-ритмов ЭЭГ при представлении движения правой руки и спастичностью мышц левой руки по шкале Эшворта, а также показателей речевых навыков, таких как «оральный праксис и артикуляция» и способность составлять предложения по картинкам. Полученные данные могут быть использованы при разработке новых методов коррекции двигательной и когнитивной сферы детей с ДЦП.

Ключевые слова: дети, детский церебральный паралич, электроэнцефалограмма, мю- и бета-ритм, интерфейс мозг-компьютер, биологическая обратная связь, нейрореабилитация, речь.

ВВЕДЕНИЕ

Детский церебральный паралич (ДЦП) – заболевание, вызванное повреждением головного мозга, сопровождающееся нарушением движения и осанки, когнитивными, сенсорно-перцептивными нарушениями [1] и расстройствами речи [2]. Дети с односторонним церебральным параличом, при котором поражается преимущественно одна сторона тела, составляют 39 % от общей численности населения с ДЦП. В таких случаях верхняя конечность обычно поражается сильнее, чем нижняя и повседневная деятельность, которая преимущественно осуществляется обеими руками, может быть серьезно нарушена [3, 4].

Особенности течения заболевания у детей с ДЦП исследуют с помощью функциональных или структурных методов визуализации мозга. Функциональные методы нейровизуализации используются для изучения сетей головного мозга посредством анализа нейрофизиологических сигналов, которые можно зарегистрировать посредством электроэнцефалографии (ЭЭГ) или

магнитоэнцефалографии (МЭГ), которые напрямую отражают нейронную активность [5].

В последнее десятилетие особое внимание уделяется динамике сенсомоторных ритмов ЭЭГ, которые регистрируются над центральными областями неокортекса и состоят из двух частотных диапазонов: мю- (8–13 Гц) и бета- (15–25 Гц) ритмов [6].

Были обнаружены различия в характеристиках ЭЭГ у двух детей 12 лет с разной степенью двигательных нарушений при ДЦП. У ребенка с правосторонним гемипарезом наблюдалась десинхронизация сенсомоторного мю-ритма в момент начала движения, тогда как у ребенка с левосторонним гемипарезом десинхронизация наблюдалась за несколько мгновений до начала движения, что указывает на лучшую способность к планированию движений у ребенка с левосторонним гемипарезом [7].

Также было показано, что при ДЦП в случае одностороннего поражения, в недоминантном полушарии менее выраженное снижение индекса реактивности (ИР) мю-ритма коррелирует с высокой степенью двигательных нарушений [8]. В случае двусторонней формы ДЦП десинхронизация мю-ритма при выполнении движений у детей 5–17 лет была больше, чем у контрольной группы здоровых сверстников [9].

В настоящее время для реабилитации двигательных функций у пациентов с ДЦП все чаще используют методы, основанные на применении неинвазивных интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК) и принципов биологической обратной связи (БОС) [10, 11]. Данный подход к двигательному обучению основывается на воображении движений, т. е. внутреннем моделировании движения без его реального выполнения [12].

Однако лишь единичные исследования посвящены анализу изменения двигательных и речевых функций пациентов до и после комплексного лечения с применением неинвазивных ИМК. В связи с этим, целью настоящей работы явился анализ связи между реактивностью сенсомоторных мю- (8–13 Гц) и бета- (15–25 Гц) ритмов ЭЭГ с показателями тестов у детей с ДЦП в результате комплексного санаторно-курортного лечения, включающего применение комплекса «Экзокисть-2».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 50 детей в возрасте 7–15 лет (35 мальчиков и 15 девочек) с диагнозом ДЦП и нарушением двигательных функций правой руки. Исследования проводились на базе центра «Технологии здоровья и реабилитации» Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, а также Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Санаторий для детей и детей с родителями «Чайка» им. Гелиловичей» для детей с неврологическими нарушениями.

Дети проходили комплексное санаторно-курортное лечение с курсом нейрореабилитации из 10 сеансов с применением комплекса, включающего неинвазивный ИМК и экзоскелет кисти «Экзокисть-2» (производства ООО «Экзопласт», г. Москва). Регистрация ЭЭГ осуществлялась по общепринятой методике с помощью электроэнцефалографа Нейровизор БММ-52 («Медицинские

Компьютерные Системы»; Россия). ЭЭГ-потенциалы отводили монополярно в 32 отведениях, которые были расположены по неполной международной схеме 10–10. Частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли, соответственно, 5 и 30 Гц, частота оцифровки ЭЭГ-сигналов – 500 Гц. В качестве референтного использовался усредненный электрод.

Дети проходили по 10 сеансов БОС, во время которых сидели в кресле перед компьютером и получали визуальные инструкции: расслабиться, кинестетически вообразить движение разгибания кисти левой или правой руки, воздерживаясь от их реального выполнения. При успешном выполнении пациентом задания на представление движения фиксирующая взор метка окрашивалась в зеленый цвет, экзоскелет выполнял соответствующее движение, и кисть руки пассивно разгибалась. Таким образом, генерировался комбинированный зрительный и кинестетический сигнал обратной связи (подробнее [13]).

Для оценки изменений биоэлектрической активности головного мозга пациентов при прохождении курса нейрореабилитации анализировали изменения амплитуды мю- и бета-ритмов ЭЭГ в частотных диапазонах 8-13 и 15-25 Гц, соответственно, в следующих отведениях: F3, Fz, F4, FC3, FCz, FC4, C3, Cz, C4, CP3, CPz, CP4, P3, Pz, P4. Временные отрезки ЭЭГ, использованные для анализа, соответствовали времени предъявления пациенту визуальной инструкции о представлении движения правой рукой и составляли 10 с. Артефакты исключались из обработки на основании визуального анализа. Безартефактные отрезки ЭЭГ разбивали на эпохи по 5 сек с перекрытием 30% и подвергали быстрому преобразованию Фурье. Анализировали не менее 10 безартефактных эпох (общая продолжительность ЭЭГ не менее 50 с) с использованием программного обеспечения фирмы «Нейрософт» (Россия).

Рассчитывали индексы реактивности (ИР) сенсомоторных ритмов при представлении детьми движений правой рукой в соответствии с формулой $ИР = \ln(B / A)$ [14], где B – амплитуда ритма на последнем сеансе, A – амплитуда ритма на первом сеансе. Данные подвергали логарифмированию для нормализации распределения. Значения $ИР > 0$ свидетельствуют об увеличении амплитуды ритма на последнем сеансе по сравнению с первым (синхронизация), а $ИР < 0$ – о снижении амплитуды ритма (десинхронизация).

У детей оценивали объем движений верхних конечностей с использованием следующих шкал:

1. Индекс Бартел, характеризующий способность к самообслуживанию пациента на основе результатов заполнения соответствующего опросника [15]. Чем выше возможности, тем выше балл (диапазон от 0 до 100 баллов).
2. Модифицированная шкала спастичности Эшворта (Modified Ashworth Scale, MAS) для оценки уровня спастичности при определении степени сопротивления пассивным движениям по 5-ти балльной шкале (от 0 до 4).
3. Шкала «Возможности кисти-дети» (ABILHANDKids) – тест оценки родителями двигательной функции верхней конечности ребенка в быту (3 степени возможности выполнения навыка: «невозможно», «трудно», «легко») [16].

Также проводили нейропсихологическую диагностику речевой патологии у детей, оценивая уровень моторной реализации высказывания по трем методикам [17].

1. Исследование орального праксиса и артикуляционной моторики (оценка движений губ, языка, надувания щек по инструкции или по образцу). Максимальная оценка – 30 баллов.

2. Исследование звукопроизнесения (повторение слов). Максимальная оценка – 30 баллов

3. Составление предложений по картинкам (ребенку демонстрируется ряд картинок, например, «мальчик моет руки», которые ему необходимо описать одним предложением). Максимальная оценка – 45 баллов.

Данные электрофизиологического исследования и показатели психологических тестов количественно обрабатывались посредством стандартных методов вариационной статистики с помощью программы Statistica 12 (StatSoft Inc., США). Для расчета корреляций использовали коэффициент корреляции Спирмена. Коэффициенты корреляции считались статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты корреляционного анализа показали наличие статистически значимых связей между индексом реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ во время представления движения разгибания кисти правой руки и показателями тестов у детей с ДЦП после прохождения курса нейрореабилитации. Так, было выявлено, что после прохождения курса тренировок БОС большим значениям ИР сенсомоторного мю-ритма в отведении СР4 при воображении движений правой рукой соответствовала более низкая спастичность мышц левой руки по шкале Эшворта: локтя ($r = -0,43$; $p = 0,019$), запястья ($r = -0,48$; $p = 0,008$) и пальцев ($r = -0,43$; $p = 0,019$). Чем больше был процент падения мю-ритма в отведении Сz в данной экспериментальной ситуации, тем ниже был тонус локтя правой руки по шкале Эшворта ($r = 0,39$; $p = 0,038$).

Также, чем больше снижалась амплитуда мю-ритма ЭЭГ в отведении Рz при представлении движений правой рукой, тем были лучше показатели двигательной функции верхней конечности ребенка в быту по Шкале «Возможности кисти – дети» ($r = 0,58$; $p = 0,038$). В данной экспериментальной ситуации росту амплитуды мю-ритма в отведении СР4 соответствовал более высокий уровень моторной реализации высказывания (Оральный праксис и артикуляция ($r = 0,4$; $p = 0,03$)), а также лучшая способность составлять предложения по картинкам ($r = 0,51$; $p = 0,005$).

Расчет коэффициентов корреляции по Спирмену для сенсомоторного бета-ритма ЭЭГ выявил, что большим значениям ИР данного ритма в отведении СР4 при воображении движений правой рукой, соответствовали более низкие показатели спастичности мышц левой руки по шкале Эшворта (локоть ($r = -0,45$; $p = 0,015$), запястье ($r = -0,48$; $p = 0,008$), пальцы ($r = -0,45$; $p = 0,015$)). Чем больше росла амплитуда бета-ритма в отведении Р4 при выполнении детьми движений правой рукой, тем были выше показатели способности к самообслуживанию по Шкале Бартел ($r = 0,57$; $p = 0,02$). Также, росту амплитуды бета-ритма в отведении СР4 соответствовали более высокие баллы при тестировании орального праксиса и артикуляции ($r = 0,41$; $p = 0,03$), а также при составлении предложений по картинкам ($r = 0,51$; $p = 0,005$).

В проводимом исследовании используемая в ИМК программа обеспечивает выявление намерения выполнить движение на основе анализа паттерна сенсомоторных ритмов ЭЭГ, генерацию визуального сигнала обратной связи и формирование команд управления экзоскелетом кисти руки. Анализ взаимосвязей динамики амплитуды сенсомоторных ритмов ЭЭГ и показателей двигательных и речевых функций у детей с ДЦП после прохождения курса нейротерапии показал, что синхронизация мю- и бета-ритмов ЭЭГ в отведении СР4 при представлении движения правой руки связана с более низкой спастичностью мышц левой руки по шкале Эшворта. При этом, большая десинхронизация мю-ритма в отведении Cz связана со снижением тонуса локтя правой руки по данной шкале. Известно, что рост синхронизации сенсомоторных мю- и бета-ритмов рассматривают как отражение процессов торможения в областях неокортекса, контролирующих моторные функции [5, 18], что необходимо при планировании и более точном выполнении движения. Мы предполагаем, что выявленный рост амплитуды сенсомоторных ритмов может лежать в основе наблюдаемых у детей благоприятных изменений подвижности верхних конечностей.

Нами получены данные, свидетельствующие о связи реактивности сенсомоторных ритмов ЭЭГ и показателей речевых навыков, таких как «оральный праксис и артикуляция» и способность составлять предложения по картинкам. Результаты исследования подтверждают теорию о том, что улучшение функций рук детей с ДЦП после серии сеансов нейрореабилитации сопровождается ростом показателей речевых навыков. Основой таких изменений может быть усиления процессов пластичности нейронных цепей моторных и сенсомоторных зон неокортекса и находящихся рядом речевых зон [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило наличие связи между реактивностью сенсомоторных мю- и бета-ритмов ЭЭГ при представлении движений правой рукой с показателями двигательных функций и речевых навыков у детей с ДЦП в результате комплексного санаторно-курортного лечения, включающего применение комплекса «Экзокисть-2».

В настоящем исследовании вновь показана эффективность комплексного санаторно-курортного лечения ДЦП с курсом нейрореабилитации на основе применения неинвазивного интерфейса «мозг–компьютер–экзоскелет кисти», а полученные данные могут быть использованы при разработке новых методов коррекции двигательной и когнитивной сферы детей с ДЦП.

Данная работа финансировалась за счет средств гранта Российского научного фонда и Республики Крым № 22-15-20035, <https://rscf.ru/project/22-15-20035/>.

Список литературы

1. Fluss J. Cognitive and academic profiles in children with cerebral palsy: A narrative review / J. Fluss, K. Lidzba // Ann Phys Rehabil Med. – 2020. – Vol. 63, Is. 5. – P. 447–456 <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2020.01.005>.

2. Немкова С. А. Речевые нарушения при детском церебральном параличе: диагностика и коррекция / С. А. Немкова // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. – 2019. – Т. 119, № 5. – С. 112–119 <https://doi.org/10.17116/jnevro2019119051112>.
3. Cioni G. MRI and clinical characteristics of children with hemiplegic cerebral palsy / G. Cioni, B. Sales, P. B. Paolicelli [et al.] // *Neuropediatrics*. – 1999. – Vol. 30. – P. 249–255 <https://doi.org/10.1055/s-2007-973499>.
4. Errante A. Mirror neuron system activation in children with unilateral cerebral palsy during observation of actions performed by a pathological model / A. Errante, G. Di Cesare, C. Pinardi [et al.] // *Neurorehabil Neural Repair*. – 2019. – Vol. 33, Is. 6. – P. 419–431 <https://doi.org/10.1177/1545968319847964>.
5. Démas J. Mu rhythm: State of the art with special focus on cerebral palsy / J. Démas, M. Bourguignon, M. Périer [et al.] // *Ann Phys Rehabil Med*. – 2020. – Vol. 63, Is. 5. – P. 439–446 <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.06.007>.
6. Jenson D. The Application of EEG mu rhythm measures to neurophysiological research in stuttering / D. Jenson, A. L. Bowers, D. Hudock, T. Saltuklaroglu // *Front Hum Neurosci*. – 2020. – Vol. 10, Is. 13. – P. 458 <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00458>.
7. Miziara I. M. Comparison of mu rhythm desynchronisation between children with right-side and left-side hemiparetic cerebral palsy during a voluntary movement: case study / I. M. Miziara, J. B. P. Lopes, R. D. Lazzari [et al.] // *Gait & Posture*. – 2019. – Vol. 73, Is. 1. – P. 306–307 <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.07.176>.
8. Inuggi A. Ipsilesional functional recruitment within lower mu band in children with unilateral cerebral palsy, an event-related desynchronization study / A. Inuggi, M. Bassolino, C. Tacchino [et al.] // *Exp Brain Res*. – 2018. – Vol. 236, Is. 2. – P. 517–527 <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5149-3>.
9. Hinchberger V. Investigation of brain mechanisms underlying upper limb function in bilateral cerebral palsy using EEG / V. Hinchberger, S. H. Kang, J. Kline [et al.] // *Clin Neurophysiol*. – 2023. – Vol. 151. – P. 116–127 <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2023.04.006>.
10. Ларина Н. В. Комплекс «Эзкокисть-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с использованием неинвазивного интерфейса «мозг-компьютер» / Н. В. Ларина, Л. Л. Корсунская, С. В. Власенко // *Нервно-мышечные болезни*. – 2019. – Т. 11, № 4. – С. 12–20 <https://doi.org/10.17650/2222-8721-2019-9-4-44-50>.
11. Xie J. Rehabilitation of motor function in children with cerebral palsy based on motor imagery / J. Xie, L. Jiang, Y. Li [et al.] // *Cogn Neurodyn*. – 2021. – Vol. 15, Is. 6. – P. 939–948 <https://doi.org/10.1007/s11571-021-09672-3>.
12. Fedotova I. R. Foundation and aspects of using motor imagery and brain computer interfaces in rehabilitation of children with cerebral palsy / I. R. Fedotova, P. D. Bobrov // *IP Pavlov J Higher Nervous Activity*. – 2022. – Vol. 72, Is. 1. – P. 87–99 <https://doi.org/10.31857/S004446772201004X>.
13. Pavlenko V. B. Speech improvement in children with cerebral palsy by "brain-computer-hand exoskeleton" neurointerface rehabilitation / V. B. Pavlenko, S. V. Vlasenko, L. S. Orekhova, E. A. Biryukova // *Bulletin of RSMU*. – 2023. – Is. 4. – P. 62–67 <https://doi.org/10.24075/brsmu.2023.026>.
14. Raymaekers R. EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism / R. Raymaekers, J. R. Wiersema, H. Roeyers // *Brain Res*. – 2009. – Vol. 1304. – P. 113–121 <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.09.068>.
15. Mahoney F. I. Functional evaluation: The Barthel index / F. I. Mahoney, D. W. Barthel // *Md State Med J*. – 1965. – Vol. 14. – P. 61–65.
16. Bleyenheuft Y. Measuring changes of manual ability with ABILHAND-Kids following intensive training for children with unilateral cerebral palsy / Y. Bleyenheuft, A. M. Gordon, E. Rameckers [et al.] // *Dev Med Child Neurol*. – 2017. – Vol. 59, Is. 5. – P. 505–511 <https://doi.org/10.1111/dmcn.13338>.
17. Фотекова Т. А. Нейропсихологическая диагностика речевой патологии у детей / Т. А. Фотекова, Т. В. Ахутина // *Школьный психолог*. – 2001. – № 37. – С. 3–14.
18. Larionova E. V. Mu-rhythm in contemporary research: theoretical and methodological aspects / E. V. Larionova, Zh. V. Garakh, Y. S. Zaytseva // *IP Pavlov J Higher Nervous Activity*. – 2022. – Vol. 72, Is. 1. – P. 11–35 <https://doi.org/10.31857/S0044467722010051>.
19. Hodgson J. C. Hemispheric speech lateralisation in the developing brain is related to motor praxis ability / J. C. Hodgson, R. J. Hirst, J. M. Hudson // *Dev Cogn Neurosci*. – 2016. – Vol. 22. – P. 9–17 <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.09.005>.

THE LINK BETWEEN SENSORIMOTOR RHYTHMS REACTIVITY OF THE EEG WITH TEST SCORES IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY AFTER COMPLETING BIOFEEDBACK WITH AN EXTERNAL BRAIN COMPUTER INTERFACE "EXOKIST'-2"

Kezik E. V.¹, Vlasenko S. V.², Kaida A. I.¹, Orekhova L. S.¹, Birukova E. A.¹

¹*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

²*Research Institute of Children's Balneology, Physiotherapy and Medical Rehabilitation, Yevpatoria, Russia*

E-mail: vlasenko65@rambler.ru

The purpose of this study was to analyze the relationship between the reactivity of sensorimotor mu (8–13 Hz) and beta (15–25 Hz) EEG rhythms with test scores in children with cerebral palsy as a result of complex sanatorium treatment, including the use of the Exokist-2 complex. The study involved 50 children aged 7–15 years (35 boys and 15 girls) diagnosed with cerebral palsy and impaired motor functions of the right hand. In the current study, the program used in the IMC provides the identification of the intention to perform a movement based on the analysis of the pattern of sensorimotor rhythms of the EEG, the generation of a visual feedback signal and the formation of commands to control the exoskeleton of the hand.

The results of the correlation analysis showed the presence of statistically significant links between the index of EEG sensorimotor rhythms reactivity during the presentation of the right hand extension movement and test scores in children with cerebral palsy after undergoing a course of neurorehabilitation. EEG mu- and beta-rhythms synchronization in the C4 lead when representing the movement of the right arm is associated with lower spasticity of the muscles of the left arm on the Ashworth scale. At the same time, a large desynchronization of the mu-rhythm in the Cz lead is associated with a decrease in the tone of the right elbow on this scale. It is known that the increase in synchronization of sensorimotor mu- and beta-rhythms is considered as a reflection of the processes of inhibition in the areas of the neocortex that control motor functions, which is necessary for planning and more accurate execution of movement. We suggest that the revealed increase in the amplitude of sensorimotor rhythms may underlie the favorable changes in the mobility of the upper extremities observed in children.

We have obtained data indicating the relationship between the reactivity of sensorimotor rhythms of the EEG and indicators of speech skills, such as "oral praxis and articulation" and the ability to make sentences based on pictures. The results of the study confirm the theory that the improvement of hand functions in children with cerebral palsy after a series of neurorehabilitation sessions is accompanied by an increase in speech skills. The obtained data can be used in the development of new methods of correction of the motor and cognitive sphere of children with cerebral palsy.

Keywords: children, cerebral palsy, electroencephalogram, mu- and beta-rhythm, brain-computer interface, biofeedback, neurorehabilitation, speech.

References

1. Fluss J., Lidzba K. Cognitive and academic profiles in children with cerebral palsy: A narrative review. *Ann Phys Rehabil Med*, **63(5)**, 447 (2020).
2. Nemkova S. A. Speech disorders in infantile cerebral palsy: diagnosis and correction. *Journal of neurology and psychiatry named after. S.S. Korsakov*, **119(5)**, 112 (2019).
3. Cioni G., Sales B., Paolicelli P. B., Petacchi E., Scusa M. F., Canapicchi R. MRI and clinical characteristics of children with hemiplegic cerebral palsy. *Neuropediatrics*, **30**, 249 (1999).
4. Errante A., Di Cesare G., Pinardi C., Fasano F., Sghedoni S., Costi S., Ferrari A., Fogassi L. Mirror neuron system activation in children with unilateral cerebral palsy during observation of actions performed by a pathological model. *Neurorehabil Neural Repair*, **33(6)**, 419 (2019).
5. Démas J., Bourguignon M., Périer M., De Tiège X., Dinomais M., Van Bogaert P. Mu rhythm: State of the art with special focus on cerebral palsy. *Ann Phys Rehabil Med*, **63(5)**, 439 (2020).
6. Jensen D., Bowers A. L., Hudock D., Saltuklaroglu T. The Application of EEG mu rhythm measures to neurophysiological research in stuttering. *Front Hum Neuroscience*, **10(13)**, 458 (2020).
7. Mizlana I. M., Lopes J. B. P., Lazzari R. D., de Moura R. C. F., Albuquerque M. B., Oliveira C., Navesa E. L. M. Comparison of mu rhythm desynchronisation between children with right-side and left-side hemiparetic cerebral palsy during a voluntary movement: case study. *Gait & Posture*, **73(1)**, 306 (2019).
8. Inuggi A., Bassolino M., Tacchino C., Pippo V., Bergamaschi V., Campus C., De Franchis V., Pozzo T., Moretti P. Ipsilesional functional recruitment within lower mu band in children with unilateral cerebral palsy, an event-related desynchronization study. *Exp Brain Res*, **236(2)**, 517 (2018).
9. Hinchberger V., Kang S. H., Kline J., Stanley C. J., Bulea T. C., Damiano D. L. Investigation of brain mechanisms underlying upper limb function in bilateral cerebral palsy using EEG. *Clin Neurophysiology*, **151**, 116 (2023).
10. Larina N. V., Korsunskaya L. L., Vlasenko S. V. The "Exo hand-2" complex in the rehabilitation of the upper limb in cerebral palsy using the non-invasive interface "brain-computer". *Neuromuscular Diseases*, **9(4)**, 44 (2019).
11. Xie J., Jiang L., Li Y., Chen B., Li F., Jiang Y., Gao D., Deng L., Lv X., Ma X., Yin G., Yao D., Xu P. Rehabilitation of motor function in children with cerebral palsy based on motor imagery. *Cogn Neurodyn*, **15(6)**, 939 (2021).
12. Fedotova I. R., Bobrov P. D. Foundation and aspects of using motor imagery and brain computer interfaces in rehabilitation of children with cerebral palsy. *IP Pavlov J Higher Nervous Activity*, **72(1)**, 87 (2022).
13. Pavlenko V. B., Vlasenko S. V., Orekhova L. S., Biryukova E. A. Speech improvement in children with cerebral palsy by "brain-computer-hand exoskeleton" neurointerface rehabilitation. *Bulletin of RSMU*, **4**, 62 (2023).
14. Raymaekers R., Wiersma J. R., Roeyers H. EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism. *Brain Res*, **1304**, 113 (2009).
15. Mahoney F. I., Barthel D. W. Functional evaluation: The Barthel index. *Md State Med J*, **14**, 61 (1965).
16. Bleyenheuft Y., Gordon A. M., Rameckers E., Thonnard J. L., Arnould C. Measuring changes of manual ability with ABILHAND-Kids following intensive training for children with unilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*, **59(5)**, 505 (2017).
17. Fotekova T. A., Ahutina T. V. Neuropsychological diagnosis of the speeches of children. *Shkol'nyj psiholog*, **37**, 3 (2001).
18. Larionova E. V., Garakh Zh. V., Zaytseva Y. S. Mu-rhythm in contemporary research: theoretical and methodological aspects. *IP Pavlov J Higher Nervous Activity*, **72(1)**, 11 (2022).
19. Hodgson J. C., Hirst R. J., Hudson J. M. Hemispheric speech lateralisation in the developing brain is related to motor praxis ability. *Dev Cogn Neurosci*, **22**, 9 (2016).