
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ДИНАМИКА СЕНСОМОТОРНЫХ РИТМОВ ЭЭГ У ДЕТЕЙ
С ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ КУРСА
НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСПЕШНОСТИ
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИМИ ДВИЖЕНИЙ

© 2024 г. В. Б. Павленко^{1,*}, С. В. Власенко^{1,2}, Е. Н. Чуян¹, А. И. Кайда¹,
Л. С. Орехова¹, Е. А. Бирюкова¹, Д. В. Павленко¹, Ш. Э. Татарис¹

¹Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия
²Научно-исследовательский институт детской курортологии, физиотерапии и медицинской
реабилитации, Евпатория, Россия

* E-mail: vpav55@gmail.com

Поступила в редакцию 10.04.2024 г.

После доработки 04.06.2024 г.

Принята к публикации 02.07.2024 г.

У 50 детей 7–15 лет обоего пола, страдающих детским церебральным параличом (ДЦП), проведен анализ изменений электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в частотных диапазонах сенсомоторных мю- (8–13 Гц) и бета- (15–25 Гц) ритмов и особенностей восстановления двигательных функций в процессе курса нейрореабилитации из 10 сеансов с применением неинвазивного интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти». ЭЭГ регистрировали в 32 отведениях в условиях покоя и кинестетического воображения движений разгибания кистей рук. В зависимости от успешности определения программой-классификатором воображаемых состояний по паттерну ЭЭГ дети были разделены на две группы – с высокой и низкой успешностью представления движений. У детей исследованных групп при прохождении курса нейрореабилитации выявлены отличия в характере изменений амплитуды ЭЭГ в частотных диапазонах указанных ритмов. При представлении движений правой руки межгрупповые различия для мю-ритма достигали уровня статистической значимости в сагиттальных отведениях лобно-центральных и теменных областей неокортекса, для бета-ритма – в сагиттальном лобно-центральном отведении. У детей группы с низкой успешностью в указанных областях на последнем сеансе курса по сравнению с первым наблюдался рост амплитуды сенсомоторных ритмов, свидетельствующий о развитии торможения в лобно-теменной двигательной сети. У детей группы с высокой успешностью в этих областях амплитуды мю- и бета-ритма к последнему сеансу не менялись, т. е. степень синхронизации/десинхронизации сенсомоторных ритмов при представлении движений в процессе курса нейрореабилитации оставалась стабильной. Пациенты, состояния которых классификатор определял более точно, достигли более высоких показателей реабилитации двигательной сферы. Результаты исследования важны для уточнения мозговых механизмов восстановления двигательных функций у пациентов с ДЦП под влиянием курса нейрореабилитации.

Ключевые слова: детский церебральный паралич, электроэнцефалограмма, интерфейс мозг – компьютер, мю- и бета-ритм, нейрореабилитация

ВВЕДЕНИЕ

Детский церебральный паралич (ДЦП) является наиболее распространенной причиной инвалидности в детском возрасте. В настоящее время его встречаемость в разных странах составляет от 1.6 до 3.4 случаев на 1000 новорожденных [1]. Данное заболевание представляет гетерогенную группу нарушений движения и осанки, обусловленную непрогрессирующим повреждением головного мозга, возникшим на ранних этапах развития (внутриутробный период или первые два года жизни). Гетерогенность клинической картины связана со сложным взаимодействием между поражением головного мозга (которое варьирует от случая к случаю в зависимости от локализации, степени и времени возникновения), индивидуальным генетическим фоном конкретного ребенка и последующими эпигенетическими и экологическими факторами [2]. Повреждения головного мозга сопровождаются аберрантным формированием нейронных связей. Все это приводит к стойкому нарушению тонуса мышц конечностей, запуску и координации движений, сенсорному дефициту, когнитивным нарушениям (см. обзор [3]). Наиболее частым симптомом у детей с ДЦП является спастичность, то есть состояние повышенного мышечного напряжения, которое ограничивает объем пассивных и активных движений в суставах. Спастичность отрицательно влияет на дальнейшее развитие двигательных функций и вызывает вторичные нарушения опорно-двигательного аппарата [4]. Причиной спастических нарушений являются поражения как моторных кортикоспинальных, так и таламокортикальных путей. В большинстве случаев они возникают вследствие внутриутробного или перинатального инсульта [5].

Существующие медикаментозные и физиотерапевтические методы помощи больным с ДЦП не всегда оказываются эффективными. В связи с этим активно развиваются методы нейрореабилитации, основанные на феномене пластичности мозга в условиях интенсивных упражнений пациента. К числу таких методов относятся: роботизированная механотерапия [6]; терапия с использованием наблюдения за действиями с последующей их имитацией [7]; применение комплексов, включающих неинвазивные интерфейсы мозг – компьютер (ИМК) с биологической обратной связью на основе виртуальной реальности [8, 9] или на основе кинестетической обратной связи с использованием экзоскелета кисти руки (см. обзор [10]). Получены доказательства эффективности последнего подхода в улучшении двигательных функций верхних конечностей [11, 12] и показателей моторной реализации речи [13] у детей со спастическими формами ДЦП.

У больных с ДЦП степень поражения структур мозга и связей между ними, а также пластичность нервной ткани в процессе лечения можно оценить посредством анализа характеристик электроэнцефалограммы (ЭЭГ), которые отражают активность распределенных нейронных сетей [2]. При анализе фоновой ЭЭГ у детей с ДЦП в возрасте 6–14 лет отмечено снижение мощности альфа-ритма в затылочных областях неокортекса и увеличение мощности в тета- и дельта-диапазонах почти во всех отведениях по сравнению с контрольной группой здоровых сверстников [14].

Особое внимание в последнее десятилетие уделяется динамике сенсомоторных ритмов ЭЭГ при выполнении пациентами различных функциональных проб. Сенсомоторный мю-ритм, регистрируемый над центральными областями неокортекса, включает как минимум две негармонические составляющие – в альфа- (8–13 Гц) и бета- (15–25 Гц) диапазонах частот, иногда называемые мю-альфа- и мю-бета-ритмами [15]. Однако большинство исследователей обозначают эти компоненты как мю- и бета-ритмы соответственно. В настоящей работе мы также будем придерживаться этих названий. Мю-ритм генерируется в сенсомоторной постцентральной коре, а бета-активность – в прецентральной моторной области неокортекса [16, 17]. Считают [18], что мю-ритм в основном отражает сенсомоторные функции, в то время как бета-компонент более тесно связан с моторным кортикальным контролем. Поскольку подавление амплитуды (десинхронизация) сенсомоторных ритмов вызывается как реальным движением, так и его вообра-

жением, модуляции сенсомоторных ритмов предложено использовать в качестве электрофизиологических маркеров состояния кортикальной сенсомоторной системы и ее пластичности в процессе реабилитации у пациентов с ДЦП [2, 19].

Исследования динамики сенсомоторных ритмов ЭЭГ при выполнении движений пациентами с ДЦП указывают на ее зависимость от формы заболевания. У детей и взрослых с гемипарезом (односторонней формой ДЦП) движения паретичной руки сопровождаются меньшей десинхронизацией мю-ритма в центральных отведениях пораженного контралатерального полушария, чем у здоровых людей. Чем меньше падала амплитуда мю-ритма и, следовательно, меньше активировалось полушарие, тем выше была степень нарушений движений пораженной руки [20]. У детей и подростков с двусторонней формой ДЦП десинхронизация мю-ритма при выполнении движений была больше, чем у здоровых сверстников, причем, чем сильнее были выражены нарушения, тем больше десинхронизация. Предполагают, что дети с билатеральной формой ДЦП нуждаются в большей степени активации неокортекса, чем пациенты с односторонней формой заболевания [21]. Также у таких пациентов была больше выражена десинхронизация бета-ритма. При этом более высокая степень подавления данного ритма в большинстве отведений была связана с лучшими показателями исполнения двигательных задач [22].

В последние годы было выполнено несколько работ, в которых для восстановления двигательных функций у детей с ДЦП применялись тренировки с использованием ИМК. В процессе лечебных сеансов ИМК контролируют паттерны ЭЭГ с помощью программы-классификатора и генерируют сигналы биологической обратной связи при воображении пациентами собственных движений. Обоснованием для применения таких тренировок является тот факт, что в реальном выполнении и кинестетическом представлении одних и тех же движений участвуют одни и те же нейронные структуры за исключением лишь моторного выхода, который в последнем случае тормозится [10, 23]. Основываясь на обратной связи в реальном времени, дети могут корректировать свои ментальные стратегии. В одной из работ для проведения тренировок у детей с ДЦП 8–12 лет применяли визуальную обратную связь (изменение цвета объектов и их движения в период воображения движений левой и правой руки) [8]. На протяжении серии сеансов было обнаружено увеличение мощности ЭЭГ в диапазоне 8–15 Гц, усредненной для центральных, теменных и височных областей. По мнению авторов, рост мощности ЭЭГ в этом диапазоне отражает торможение реального движения при его воображении. Такое изменение паттерна ЭЭГ считали индикатором улучшения обработки сенсомоторной информации.

В двух работах с использованием для нейрореабилитации комплекса «Экзоскисть-2» в качестве сигналов обратной связи выступали движения экзоскелета кисти. В одной из них показано, что при воображении движений в виде разгибания пальцев кисти во время первого сеанса у детей и подростков с ДЦП в большинстве отведений наблюдалась синхронизация ЭЭГ в диапазоне альфа-ритма (8–13 Гц). К концу серии тренировок из десяти сеансов происходило замещение реакций синхронизации на десинхронизацию, что свидетельствовало об увеличении активации неокортекса [24]. Также в процессе тренировок уменьшились различия в степени реактивности альфа-ритма у пациентов с левополушарным и правополушарным поражением. Выявленные перестройки паттерна ЭЭГ в частотной полосе альфа-ритма рассматривались авторами как проявление процессов благоприятной реорганизации нейронных цепей, контролирующих планирование и выполнение сложных движений рук.

В другой работе [12] анализировали свойства источников мю-ритма ЭЭГ детей и подростков при воображении движений во время управления ИМК. Средняя вероятность успешного распознавания воображаемых движений и состояния покоя во время сессий составила 0.51, но у отдельных детей доходила до 0.70. Участников, наиболее эффективно управлявших ИМК, характеризовала высокая доля сеансов, в которых уда-

лось идентифицировать источники мю-ритма. Показано, что чем больше десинхронизация ритма при воображении движения как сохранной, так и паретичной руки, тем выше точность управления ИМК.

Однако в исследованиях с применением ИМК не анализировались особенности двигательных или иных функций до и после комплексного лечения у тех детей, состояния которых определяли по паттерну ЭЭГ с разной, низкой или высокой степенью успешности. Также в указанных работах в процессе тренингов оценивалась динамика либо лишь альфа-диапазона мю-ритма [24], либо всего частотного диапазона сенсомоторных ритмов [12], а особенности изменений бета-активности в центральных и прилегающих к ним регионах не анализировалась. В связи с этим целью настоящего исследования явился анализ изменений сенсомоторных ритмов в процессе нейрореабилитации в мю- (8–13 Гц) и бета- (15–25 Гц) диапазонах частот, а также выявление особенностей восстановления двигательных функций у детей, процессы кинестетического представления движений или расслабления которых распознавались программой-классификатором с высокой и низкой степенью успешности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика выборки. Исследования проводили в 2022–2023 гг. на базе центра «Технологии здоровья и реабилитации» Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского и Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Санаторий для детей и детей с родителями «Чайка» им. Гелимовичей». В исследованиях приняли участие 50 детей в возрасте от 7 до 15 лет (35 мальчиков и 15 девочек) с установленным диагнозом ДЦП и основной формой нарушений в виде спастической диплегии. У 36 из них преобладали нарушения двигательных функций правой, а у 14 – левой руки. Среди указанных пациентов отсутствовали дети с умственной отсталостью умеренной, тяжелой и глубокой степеней. Средний возраст испытуемых составил 10.0 ± 3.3 лет.

Дети проходили комплексное санаторно-курортное лечение с курсом нейрореабилитации из 10 сеансов с применением комплекса, включающего неинвазивный ИМК и экзоскелет кисти «Экзоскисть-2» (производства ООО «Экзопласт», Москва). Комплекс обеспечивает генерацию визуальных сигналов и формирование команд управления экзоскелетом кисти руки. В состав ИМК входил электроэнцефалограф Нейровизор БММ-52 («Медицинские Компьютерные Системы», Россия). Регистрацию ЭЭГ проводили монополярно с помощью хлорсеребряных датчиков в 32 отведениях, которые были расположены по неполной международной схеме 10–10. В процессе записи частота оцифровки ЭЭГ-сигналов составляла 500 Гц, а частоты среза фильтров высоких и низких частот – 5 и 30 Гц соответственно. Сопротивление электродов составляло менее 20 кОм. В качестве референтного использовался усредненный электрод.

Сеансы проводились через день по одинаковой схеме: три сессии по 8 мин с перерывом на отдых не менее 5 мин. Во время сеанса пациенты сидели в кресле перед компьютерным монитором, на котором им предъявляли визуальные инструкции. Кисти рук размещались внутри «рукавиц» экзоскелета. В центре экрана находилась круглая метка белого цвета, служившая для фиксации взгляда, и расположенные вокруг нее три стрелки, менявшие цвет для обозначения инструкций. Продолжительность активации каждой стрелки составляла 10 с. Пациент выполнял следующие команды: расслабиться, кинестетически воображать движение разгибания кисти левой или правой руки, воздерживаясь от их реального выполнения. В течение сеанса ситуации расслабления и воображения движений каждой руки повторяли 24 раза. Для создания конкретного кинестетического образа при воображении движений детям давали инструкцию: «Представь, что у тебя в руке маленький мячик, ты раскрываешь кисть и роняешь его. Почувствуй это движение». При успешном выполнении пациентом задания на пред-

ставление 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]).

Работа ИМК была основана на анализе в реальном режиме времени паттернов ЭЭГ, возникающих при кинестетическом воображении разгибания кисти. Для классификации состояний (воображаемых движений рук и расслабления) использовали различия ковариационных матриц ЭЭГ в терминах римановой метрики [25]. По окончании каждого сеанса отображалось соотношение правильно распознанных классификатором состояний к общему числу заданий. Поскольку, как мы предполагаем, это соотношение зависело от способности ребенка успешно представить себе движение, все пациенты были разделены на две группы – с низкой и высокой успешностью представления движения. Чтобы исключить эффекты новизны обстановки и сложности понимания задания, за основу для такого деления были взяты показатели последнего сеанса нейрореабилитации.

Для оценки изменений биоэлектрической активности головного мозга пациентов при прохождении курса комплексной терапии с применением нейрореабилитации использовали записи ЭЭГ, зарегистрированной над моторной и сенсомоторной областями коры и прилегающих к ним регионах в следующих отведениях: $F_3, F_2, F_4, FC_3, FC_2, FC_4, C_3, C_2, C_4, CP_3, CP_2, CP_4, P_3, P_2, P_4$. Анализировали изменения амплитуды мю- и бета-ритмов ЭЭГ в частотных диапазонах 8–13 и 15–25 Гц соответственно. Временные отрезки ЭЭГ, использованные для анализа, соответствовали времени предъявления пациенту визуальной инструкции о представлении движения и составляли 10 с. Участки записей ЭЭГ с амплитудой более 250 мкВ, а также отрезки, содержащие большое количество артефактов, исключались из обработки на основании визуального анализа. Безартефактные отрезки ЭЭГ разбивали на эпохи по 5 с с перекрытием 30% и подвергали быстрому преобразованию Фурье. Анализировали не менее 10 безартефактных эпох (общая продолжительность ЭЭГ не менее 50 с). При этом использовали программное обеспечение фирмы «Нейрософт» (Россия), входящее в комплект электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-5».

Для выявления изменений амплитуды мю- и бета-ритмов ЭЭГ у детей с ДЦП при прохождении курса нейрореабилитации рассчитывали индексы реактивности (ИР) в соответствии с формулой $ИР = \ln (B/A)$ [26], где B – амплитуда ритма на последнем сеансе, A – амплитуда ритма на первом сеансе. Для нормализации распределения применяли логарифмирование. Значения $ИР > 0$ свидетельствуют об увеличении амплитуды ритма на последнем сеансе по сравнению с первым (синхронизация), а $ИР < 0$ – о снижении амплитуды ритма (десинхронизация).

Для оценки двигательных функций были использованы:

1. Индекс Бартел, характеризующий возможности самостоятельного передвижения или самообслуживания пациента на основе результатов заполнения соответствующего опросника [27]. Чем выше возможности, тем выше балл (диапазон от 0 до 100 баллов).
2. Модифицированная шкала для определения двигательной функции верхних конечностей ребенка в быту (ABILHANDKids, «Возможности кисти –дети») [11]. Чем выше суммарный показатель (диапазон от 0 до 42 баллов), тем легче выполняет ребенок действия с предметами без посторонней помощи.
3. Модифицированная шкала Эшворта, отражающая степень сопротивления, встреченного при равномерном пассивном движении верхней конечности [28]. Оценке подвергались сгибатели локтевого сустава, сгибатели лучезапястного

сустава, поверхностный сгибатель пальцев. Чем выше суммарный показатель (диапазон от 0 до 18 баллов), тем выше спастичность мышц руки.

4. Шкала функционирования верхних конечностей (The Manual Ability Classification System, MACS) для определения уровня владения левой и правой рукой при манипулировании предметами [29]. Включает пять уровней, где самый высокий из них указывает на наиболее тяжелые нарушения.

Статистический анализ данных проводили с использованием программы STATISTICA v.12. Различия в ИР ритмов оценивали с помощью дисперсионного анализа с повторными измерениями (repeated measures ANOVA). Определяли влияние межсубъектного фактора – ГРУППА (2 уровня: группы детей с высокой и низкой успешностью) и внутрисубъектного фактора ЛОКУС (15 отведений ЭЭГ) по схеме 2×15 . Для оценки значимости изменений ИР в каждом из отведений ЭЭГ применяли метод априорных контрастов на основе сравнения средних значений наименьших квадратов.

Распределение иных показателей оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. Если распределение не отличалось от нормального, статистические данные представляли в виде среднего и стандартного отклонения, а для сравнений применяли *t*-критерий Стьюдента. При отличии распределения от нормального статистические данные представляли в виде медианы и интерквартильного размаха $Me [Q1; Q3]$, а для оценки межгрупповых различий использовали *U*-критерий Манна-Уитни, внутригрупповых – *T*-критерий Вилкоксона. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех детей с ДЦП, принявших участие в исследовании, в заключительном сеансе нейрореабилитации точность классификации ЭЭГ паттернов правильно распознанных состояний (т.е. соответствующих предъявленной инструкции) для трех классов задач (воображаемых движений левой и правой руки, расслабления) получена в пределах от 0.30 до 0.68 при пороге случайных распознаваний 0.33. Значение медианы составило 0.395 [0.350; 0.480]. В группу с низкой успешностью были включены дети, вероятность правильно распознанных состояний которых не превышала 0.39. В эту группу вошло 25 детей (19 мальчиков и 6 девочек), средний возраст составил 9.0 ± 3.6 лет. В группу с высокой успешностью, для которой соотношение правильно распознанных состояний составило не менее 0.40, вошли 25 детей (16 мальчиков и 9 девочек, средний возраст 10.3 ± 2.9 лет). Различия между группами по возрасту не были статистически значимы ($p = 0.22$). В обеих группах преобладали пациенты с нарушением двигательных функций правой руки. Значения медиан и интерквартильного размаха показателя успешности заключительного сеанса для первой и второй групп составили 0.37 [0.31; 0.37] и 0.52 [0.43; 0.60] соответственно (различия статистически значимы при $p < 0.001$). Нужно отметить, что для группы с низкой успешностью этот показатель был статистически значимо ниже, чем у детей с высокой успешностью, уже на первом сеансе нейрореабилитации (0.37 [0.30; 0.41] и 0.46 [0.36; 0.56], $p < 0.05$). В результате прохождения комплексного лечения у детей группы с высокой успешностью показатель распознавания состояний статистически значимо ($p < 0.05$) вырос, а у детей из группы с низкой успешностью – изменился незначительно.

Дисперсионный анализ изменений амплитуды мио-ритма ЭЭГ при прохождении комплексного санаторно-курортного лечения с курсом нейрореабилитации выявил значимое влияние фактора ГРУППА ($F_{1,2} = 61.2$; $p = 0.02$) при представлении пациентами движений правой рукой. Так, у детей группы с высокой успешностью в данной ситуации амплитуды мио-ритма на последнем сеансе по сравнению с первым не изменилась, а у группы с низкой успешностью наблюдался рост амплитуды указанного ритма (рис. 1а).

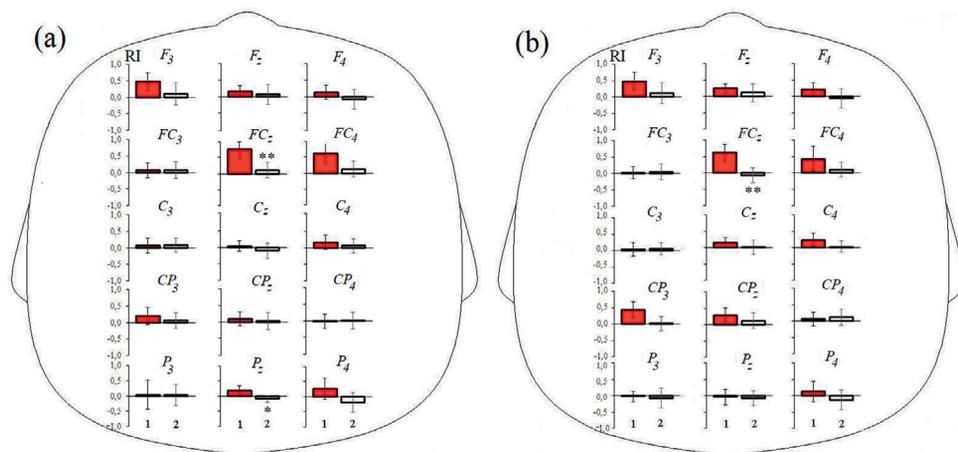


Рис. 1. Индексы реактивности (RI), отражающие изменение мю- (а) и бета-ритмов (б) ЭЭГ при прохождении курса реабилитации с использованием роботизированного комплекса в ситуации представления движений правой рукой у детей групп с низкой (красные столбцы) и высокой (белые столбцы) успешностью. Приведены средние значения и ошибки средних. Различия индексов реактивности у детей двух групп: * – $p < 0.05$; ** – $p < 0.01$.

В диапазоне бета-ритма ЭЭГ при представлении движений правой руки также обнаружено значимое влияние фактора ГРУППА ($F_{1,2} = 29.1$; $p = 0.03$) (рис. 1б).

Анализ различий в изменении амплитуды ЭЭГ при прохождении первого и заключительного сеанса комплексной реабилитации в ситуации представления движений левой рукой не выявил значимого влияния фактора ГРУППА на динамику мю- ($F_{1,2} = 0.19$; $p = 0.70$) и бета-ритмов ($F_{1,2} = 16.3$; $p = 0.06$). Также не выявлено значимого влияния данного фактора при выполнении испытуемыми команды, предписывающей расслабиться.

Показатели двигательных функций участников исследования до и после комплексной терапии приведены в табл. 1. Представленные данные свидетельствуют о том, что прохождение курса комплексной терапии с применением нейрореабилитации привело к статистически значимым улучшениям состояния детей обеих групп: росту способности к самообслуживанию по шкале Бартел и суммарному показателю «Возможности кисти – дети». При этом отметим, что значимое снижение спастичности мышц правой руки по шкале Эшворт и рост способности манипулировать предметами левой и правой рукой по шкале MACS выявлены лишь у группы с высокой успешностью представления движений.

Как видно из представленных в табл. 1 показателей, двигательные функции двух исследованных групп имели заметные особенности. Так, индекс Бартел и суммарный показатель «Возможности кисти – дети» у пациентов группы с высокой успешностью были статистически значимо выше еще до начала комплексной терапии, и эти различия сохранились после ее завершения. После завершения курса дети группы с высокой успешностью, в отличие от пациентов другой группы, достигли статистически значимо более высокого уровня владения левой рукой при манипулировании предметами (шкала MACS).

Таблица 1. Показатели двигательных функций у детей исследуемых групп до и после прохождения комплексного санаторно-курортного лечения с курсом нейрореабилитации

Показатель	Группа с низкой успешностью	Группа с высокой успешностью		
	До	После	До	После
Индекс Бартел	45 [5; 55]	60** [15; 80]	80** [65; 90]	90**** [75; 100]
Суммарный показатель «Возможности кисти – дети»	14 [0; 28]	17** [2; 32]	27* [22; 36]	35**** [25; 38]
Шкала Эшворт, левая рука	3.0 [3; 6]	3.0 [3; 6]	3.0 [3; 3]	3.0 [0; 3]
Шкала Эшворт, правая рука	5.5 [3; 6]	3.5 [1; 6]	5.0 [3; 6]	4.0*** [3; 5]
Шкала MACS, левая рука	2 [2; 3]	2 [1; 2]	2 [1; 2]	1**** [1; 1]
Шкала MACS, правая рука	2 [2; 3]	2 [1; 3]	2 [2; 3]	2** [1; 2]

Приведены медианы, в скобках – верхний и нижний квартили. Указаны статистически значимые изменения показателя относительно исходного значения соответствующей группы: ** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$, а также различия между показателями групп: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$. Значения показателей шкал, где есть клинические улучшения, выделены жирным шрифтом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты настоящего исследования показали, что вероятность распознавания программой классификатором состояний кинестетического представления движений у разных детей с ДЦП и в первом, и в завершающем сеансе курса нейрореабилитации значительно отличается. Одной из причин таких различий может быть неодинаковая способность участников исследования к воображению движений руки. Можно предположить, что при недостаточной способности к представлению движений паттерн ковариационных матриц ЭЭГ детей группы с низкой успешностью при выполнении команд на кинестетическое воображение движений разгибания кисти левой или правой руки менялся меньше, что не позволяло классификатору правильно определить состояние, заданное пациенту инструкцией. Как отмечалось выше, доля правильно определенных классификатором состояний для этой группы в завершающем сеансе не превышала 0.39, что незначительно отличается от случайного показателя 0.33 для выполнения трех команд. Затруднять распознавание классификатором паттернов ЭЭГ могли также недостаточная мотивация и, как следствие, низкая способность ребенка к поддержанию внимания на воображаемых двигательных образах в течение временного периода предъявления команды, а также неспособность избежать произвольных движений тела, что приводило к росту мышечных артефактов и нарушало работу нейронтер-

фейса. На неравноценные, в том числе пониженные способности к выполнению задач на воображение движений у детей с ДЦП, указывают и другие авторы [10, 23, 30].

Для группы с высокой успешностью нами отмечен статистически значимый рост выявления состояний программой классификатором в завершающем сеансе курса по сравнению с первым сеансом. Можно предположить, что дети этой группы, пользуясь сигналом обратной связи (движение рукавицы экзоскелета, изменение цвета метки, фиксирующей взор), более эффективно обучались управлению своим состоянием, поддерживали и даже улучшали способность к генерации соответствующих кинестетических образов.

Величины ИР, отражающие изменение мю- и бета-ритмов ЭЭГ при проведении завершающего сеанса по отношению к первому, у детей группы с высокой успешностью были близки к единице (см. рис. 1), т.е. степень синхронизации/десинхронизации сенсомоторных ритмов в процессе нейрореабилитации оставалась стабильной. Если учесть, что активация моторных областей коры отражает не только выполнение, но и внутреннее моделирование движений [7, 31], особенности динамики паттерна ЭЭГ еще раз указывают – дети этой группы на протяжении курса нейрореабилитации поддерживали необходимый уровень представления двигательных образов.

Показатели ИР сенсомоторных ритмов у детей исследованных групп достигали статистически значимых различий в сагиттальных отведениях лобно-центральных, а также теменных областей неокортекса: для мю-ритма в локусах FC_z и P_z , для бета-ритма – в FC_z . Отведение FC_z отражает активность верхней лобной извилины, являющейся частью премоторной коры, а локус P_z – активность предклинья (precuneus), части теменной доли [32]. Ранее у детей с ДЦП показана особая роль премоторной коры при выполнении задач на кинестетическое воображение движений – ее активация у таких детей была выше, чем у здоровых сверстников [33]. Предклинье, в свою очередь, является важным корковым центром эгоцентрического представления окружающего пространства и собственных движений в нем [34]. Рост десинхронизации альфа-ритма в области предклинья у другой группы детей с ДЦП в процессе нейрореабилитации уже отмечался нами в предыдущем исследовании [24]. Нейроны лобно-центральных и теменных регионов образуют так называемую лобно-теменную двигательную сеть, которая активна при представлении и планировании движений [23, 35]. Работа с применением функциональной томографии показала повышенную активацию этих областей у детей с ДЦП при проведении интенсивного обучения выполнению действий пораженной конечностью [36]. Можно предположить, что обнаруженные нами различия в ИР сенсомоторных ритмов ЭЭГ в процессе курса нейрореабилитации связаны с особенностями перестройки активации лобно-теменных двигательных сетей у детей сравниваемых групп.

В нашем исследовании степень синхронизации/десинхронизации сенсомоторных ритмов ЭЭГ у детей успешной группы сохранялась, указывая на стабильный уровень активности лобно-теменной сети. Такая активность благоприятствует нейропластичности, то есть появлению стойких структурных и функциональных изменений нервной системы в ответ на внутренние и внешние раздражители [4]. Нейропластичность связывают с ультраструктурными изменениями нервной ткани, включающими модификацию дендритной архитектуры или силы синапсов.

Как видно из рис. 1, характер изменений ИР мю- и бета-ритмов при прохождении комплексной реабилитации у детей с ДЦП демонстрировал значительное сходство. Считают [18, 19], что мю-ритм в основном отражает сенсомоторные функции, в то время как бета-компонент более тесно связан с моторным кортикальным контролем. Причиной обнаруженного в нашем исследовании сходства паттерна изменений мю- и бета-ритмов может быть сопряженность их динамики в процессе кинестетического представления движений. Параллельные изменения мощности в альфа- и бета-диапазонах при реализации задач на воображение движений при ходьбе выявлены у здоровых испытуемых. При этом степень десинхронизации ЭЭГ в указанных диапазонах росла по мере усложнения

двигательных задач [37] и зависела от способности к зрительному воображению движений, определяемой с помощью психологических тестов [38].

Ранее было установлено, что применение в реабилитационном процессе интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти» приводит у пациентов с ДЦП к снижению спастичности верхних конечностей и улучшению их двигательных функций [11, 12]. В случае, если в исследованиях присутствовала контрольная группа пациентов, получавшая традиционное санаторно-курортное лечение, статистически значимые положительные изменения показателей отмечены только у группы пациентов, прошедших комплексную терапию с курсом нейрореабилитации [11, 13]. Настоящее исследование подтверждает результаты предыдущих работ и впервые показывает, что группа пациентов, состояния которых классификатор определяет более эффективно, благодаря успешному представлению ими движений, достигает более высоких показателей реабилитации двигательной сферы.

У детей менее успешной группы амплитуда сенсомоторных ритмов в лобно-центральных, а также теменных областях неокортекса в завершающем сеансе значительно увеличилась. Рост синхронизации сенсомоторных мио- и бета-ритмов рассматривают как отражение процессов торможения в областях неокортекса, контролирующих моторные функции [2, 19]. Возможными причинами повышения амплитуды таких ритмов и усиления тормозных реакций в указанных областях коры на протяжении завершающего сеанса может быть снижение мотивации пациентов в процессе курса реабилитации и, как следствие, снижение внимания к выполнению задачи на воображение движения. Как указано выше, программа-классификатор распознает состояния пациентов на основании различий ковариационных матриц ЭЭГ. Мы предполагаем, что развитие торможения в ряде корковых областей, участвующих в кинестетическом представлении движений, приводит к снижению взаимодействия нейронов лобно-теменных сетей, что в свою очередь приводит к уменьшению различий ковариационных матриц состояний покоя и воображения движений.

У группы детей с низкой успешностью под влиянием комплексного лечения развивались благоприятные изменения двигательных функций, но в меньшей степени, чем у детей, чьи состояния программа-классификатор различала эффективнее. У пациентов данной группы не было выявлено статистически значимых изменений показателей по шкалам Эшворт и MACS (см. табл. 1). Нужно отметить, что еще до начала курса реабилитации участники исследования с низкой успешностью отличались более низкими показателями способностей к самообслуживанию и манипулированию предметами, т.е. у них в большей степени была нарушена координация движений. Возможно, таким детям приходилось прилагать больше усилий, чтобы не допустить произвольных движений во время их мысленного представления, что и вело к синхронизации сенсомоторных ритмов. Мы считаем, что для повышения успешности комплексного санаторно-курортного лечения необходимо особое внимание обращать на тех детей с ДЦП, которые имеют следующие особенности: более высокие баллы по шкалам Эшворт и MACS и, судя по результатам работы программы-классификатора во время первого сеанса нейрореабилитации, наименьшую степень способности к кинестетическому воображению движений. В дальнейшем необходимо разработать дополнительные меры по повышению мотивации таких детей к достижению успеха при выполнении задач на воображение движений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование подтверждает результаты предыдущих работ об эффективности комплексного санаторно-курортного лечения ДЦП с курсом нейрореабилитации на основе применения неинвазивного интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти». Разделение пациентов на две группы – с низкой и высокой успешностью

представления движения по соотношению правильно распознанных классификатором состояний показало, что реактивность сенсомоторных ритмов у детей исследованных групп достигала статистически значимых различий в сагиттальных отведениях лобно-центральных и теменных областей неокортекса. Эти области относятся к так называемой лобно-теменной двигательной сети, которая активна при представлении и планировании движений. У детей группы с низкой успешностью в указанных областях на последнем сеансе курса по сравнению с первым наблюдался рост амплитуды сенсомоторных ритмов, свидетельствующий о развитии торможения в лобно-теменной двигательной сети. У детей группы с высокой успешностью в этих областях амплитуды мю- и бета-ритма к последнему сеансу не менялись, т.е. степень синхронизации/десинхронизации сенсомоторных ритмов при представлении движений в процессе курса нейрореабилитации оставалась стабильной. Программа-классификатор, чья работа основана на анализе ковариационных матриц, с большей вероятностью распознавала состояния детей этой группы в процессе представления движений в завершающем сеансе курса по сравнению с первым сеансом, благодаря чему такие пациенты лучше управляли ИМК. Мы предполагаем, что дети этой группы не только способны лучше кинестетически вообразить движения на протяжении всего курса нейрореабилитации, но и, основываясь на сигналах обратной связи, обучаются эффективно корректировать свои стратегии представления движений.

Пациенты, состояния которых классификатор определяет более точно, достигают более высоких показателей реабилитации двигательной сферы. Это указывает на необходимость принятия дополнительных мер с целью повышения мотивации детей той группы, чьи состояния определяются менее успешно. Например, для них можно попытаться дополнительно создавать игровые ситуации, стимулировать небольшими подарками успешность выполнения задач. Для уменьшения числа произвольных движений, создающих артефакты и мешающих работе классификатора, целесообразно уделить особое внимание снижению тревожности детей этой группы.

ВКЛАДЫ АВТОРОВ

В. Б. П., С. В. В., Е. Н. Ч.– идея работы, планирование исследования, написание статьи. А. И. К., Л. С. О., Е. А. Б., Д. В. П.– набор и обработка данных, написание статьи. Ш. Э. Т.– набор и обработка данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств гранта Российского научного фонда и Республики Крым № 22–15–20035, <https://rscf.ru/project/22-15-20035/>. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены Комитетом по этике Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (г. Симферополь), протокол № 1 от 25 января 2022 г.

Родители каждого участника исследования дали добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McIntyre S, Goldsmith S, Webb A, Ehlinger V, Hollung SJ, McConnell K, Arnaud C, Smithers-Sheedy H, Oskoui M, Khandaker G, Himmelmann K* (2022) Global prevalence of cerebral palsy: A systematic analysis. *Dev Med Child Neurol* 64(12): 1494–1506.
<http://doi.org/10.1111/dmcn.15346>
2. *Démas J, Bourguignon M, Périvier M, De Tiège X, Dinomais M, Van Bogaert P* (2020) Mu rhythm: State of the art with special focus on cerebral palsy. *Ann Phys Rehabil Med* 63(5): 439–446.
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.06.007>
3. *Aisen ML, Kerkovich D, Mast J, Mulroy S, Wren TA, Kay RM, Rethlefsen SA* (2011) Cerebral palsy: clinical care and neurological rehabilitation. *Lancet Neurol* 10(9): 844–852.
[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(11\)70176-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(11)70176-4)
4. *Sadowska M, Sarecka-Hujar B, Kopyta I* (2020) Cerebral Palsy: Current Opinions on Definition, Epidemiology, Risk Factors, Classification and Treatment Options. *Neuropsychiatr Dis Treat* 16: 1505–1518.
<https://doi.org/10.2147/NDT.S235165>
5. *Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, Merrick J* (2020) Cerebral palsy in children: a clinical overview. *Transl Pediatr* 9(1): 125–135.
<https://doi.org/10.21037/tp.2020.01.01>
6. *Аурафова УШ, Куприянова ОС, Кармазина ЕК, Клочкова ОА, Мамедьяров АМ, Комарова ЕВ, Иварова МИ, Каркашадзе ГА* (2023) Персонализированный подход к применению методов роботизированной механотерапии у детей с церебральным параличом разных возрастных групп: обзор литературы. *Педиатр фармакол* 20(6): 588–596. [*Ashraphova USh, Kupriianova OS, Karmazina EK, Klochkova OA, Mamedieiarov AM, Komarova EV, Ivardava MI, Karkashadze GA* (2023) A personalized approach to application of robotic mechanotherapy methods in children with cerebral palsy of different age groups (review). *Pediatr farmakol* 20(6): 588–596. (In Russ)].
<https://doi.org/10.15690/pf.v20i6.2668>
7. *Errante A, Di Cesare G, Pinardi C, Fasano F, Sghedoni S, Costi S, Ferrari A, Fogassi L* (2019) Mirror Neuron System Activation in Children With Unilateral Cerebral Palsy During Observation of Actions Performed by a Pathological Model. *Neurorehabil Neural Repair* 33(6): 419–431.
<https://doi.org/10.1177/1545968319847964>
8. *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* (2021) Rehabilitation of motor function in children with cerebral palsy based on motor imagery. *Cogn Neurodyn* 15(6): 939–948.
<https://doi.org/10.1007/s11571-021-09672-3>
9. *Xie YL, Yang YX, Jiang H, Duan XY, Gu LJ, Qing W, Zhang B, Wang YX* (2022) Brain-machine interface-based training for improving upper extremity function after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Front Neurosci* 16: 949575.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2022.949575>
10. *Fedotova IR, Bobrov PD* (2022) Foundation and aspects of using motor imagery and brain computer interfaces in rehabilitation of children with cerebral palsy. *IP Pavlov J Higher Nerv Activity* 72(1): 87–99.
<https://doi.org/10.31857/S004446772201004X>.
11. *Ларина НВ, Корсунская ЛЛ, Власенко СВ* (2019) Комплекс «Экзокисть-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с использованием неинвазивного интерфейса «мозг-компьютер». *Нервно-мышечн болезни* 11(4): 12–20. [*Larina NV, Korsunskaya LL, Vlasenko SV* (2019) The “Exo hand-2” complex in the rehabilitation of the upper limb in cerebral palsy using the non-invasive interface “brain-computer”. *Nervno-myshechn bolezni* 11(4): 12–20. (In Russ)].
<https://doi.org/10.17650/2222-8721-2019-9-4-44-50>
12. *Bobrov PD, Biryukova EV, Polyayev BA, Lajsheva OA, Usachjova EL, Sokolova AV, Mikhailova DI, Dement'eva KN, Fedotova IR* (2020) Rehabilitation of patients with cerebral palsy using hand exoskeleton controlled by brain-computer interface. *Bull RSMU4*: 33–40.
<https://doi.org/10.24075/brsmu.2020.047>
13. *Pavlenko VB, Vlasenko SV, Orekhova LS, Biryukova EA* (2023) Speech improvement in children with cerebral palsy by "brain-computer-hand exoskeleton" neurointerface rehabilitation. *Bull RSMU* (4): 62–67.
<https://doi.org/10.24075/brsmu.2023.026>
14. *Kulak W, Sobaniec W, Kuzia JS, Boćkowski L* (2006) Neurophysiologic and neuroimaging studies of brain plasticity in children with spastic cerebral palsy. *Exp Neurol* 198(1): 4–11.
<http://doi.org/10.1016/j.expneurol.2005.11.014>

15. *Jenson D, Bowers AL, Hudock D, Saltuklaroglu T* (2020) The Application of EEG Mu Rhythm Measures to Neurophysiological Research in Stuttering. *Front Hum Neurosci* 10(13): 458. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00458>
16. *Hari R, Salmelin R* (1997) Human cortical oscillations: a neuromagnetic view through the skull. *Trends Neurosci* 20: 44–49. [http://doi.org/10.1016/S0166-2236\(96\)10065-5](http://doi.org/10.1016/S0166-2236(96)10065-5)
17. *Stolk A, Brinkman L, Vansteensel MJ, Aarnouse E, Leijten FS, Dijkerman CH, Knight RT, de Lange FP, Toni I* (2019) Electrocoricographic dissociation of alpha and beta rhythmic activity in the human sensorimotor system. *Elife* 8: e48065. <https://doi.org/10.7554/eLife.48065>
18. *Angelini M, Fabbri-Destro M, Lopomo NF, Gobbo M, Rizzolatti G, Avanzini P* (2018) Perspective-dependent reactivity of sensorimotor mu rhythm in alpha and beta ranges during action observation: an EEG study. *Scient Rep* 8(1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30912-w>
19. *Larionova EV, Garakh ZhV, Zaytseva YS* (2022) Mu-rhythm in contemporary research: theoretical and methodological aspects. *IP Pavlov J Higher Nerv Activity* 72(1): 11–35. <https://doi.org/10.31857/S0044467722010051>
20. *Kukke SN, de Campos AC, Damiano D, Alter KE, Patronas N, Hallett M* (2015) Cortical activation and inter-hemispheric sensorimotor coherence in individuals with arm dystonia due to childhood stroke. *Clin Neurophysiol* 126(8): 1589–98. <http://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.11.002>
21. *Hinchberger V, Kang SH, Kline J, Stanley CJ, Bulea TC, Damiano DL* (2023) Investigation of brain mechanisms underlying upper limb function in bilateral cerebral palsy using EEG. *Clin Neurophysiol* 151: 116–127. <http://doi.org/10.1016/j.clinph.2023.04.006>
22. *Phillips C, Kline J, Stanley CJ, Bulea TC, Damiano DL* (2023) Children With Bilateral Cerebral Palsy Exhibit Bimanual Asymmetric Motor Deficits and EEG Evidence of Dominant Sensorimotor Hemisphere Overreliance During Reaching. *Neurorehabil Neural Repair* 37(9): 617–627. <https://doi.org/10.1177/15459683231195044>
23. *Galli J, Garofalo G, Brunetti S, Loi E, Portesi M, Pelizzari G, Rossi A, Fazzi E, Buccino G* (2022) Children with Cerebral Palsy can imagine actions like their normally developed peers. *Front Neurol* 6(13): 951152. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.951152>
24. *Larina NV, Nacharova MA, Korsunskaya LL, Vlasenko SV, Pavlenko VB* (2020) Changes in EEG patterns in the α -frequency band following BCI-based therapy in children with cerebral palsy. *Bull RSMU* (4): 41–46. <http://doi.org/10.24075/brsmu.2020.043>
25. *Congedo M, Barachant A, Bhatia R* (2017) Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces: a primer and a review. *Brain-Comput Interfac* 4(3): 155–174. <https://doi.org/10.1080/2326263X.2017.1297192>
26. *Raymaekers R, Wiersema JR, Roeyers H* (2009) EEG study of the mirror neuron system in children with high functioning autism. *Brain Res* 1304: 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.09.068>
27. *Mahoney FI, Barthel DW* (1965) Functional evaluation: The Barthel index. *Md State Med J* 14: 61–65.
28. *Супонева НА, Юсупова ДГ, Ильина КА, Мельченко ДА, Бутковская АА, Жирова ЕС, Таратухина АС, Зимин АА, Зайцев АБ, Клочков АС, Люкманов РХ, Котов-смоленский АМ, Хижникова АЕ, Гатина ГА, Кутлубаев МА, Пирадов МА* (2020) Валидация Модифицированной шкалы Эшворта (Modified Ashworth Scale) в России. *Анналы клин эксперим неврол* 14(1): 89–96. [*Suponeva NA, Yusupova DG, Ilyina KA, Melchenko DA, Butkovskaya AA, Zhirova ES, Taratukhina AS, Zimin AA, Zaitsev AB, Klochkov AS, Lyukmanov RKH, Kotov-Smolensky AM, Khizhnikova AE, Gatina GA, Kutlubayev MA, Piradov MA* (2020) Validation of the Modified Ashworth scale in Russia. *Ann klin eksper nevrolog* 14(1): 89–96. (In Russ)]. <https://doi.org/10.25692/acen.2020.1.10>
29. *Eliasson AC, Krumlind-Sundholm L, Rösblad B, Beckung E, Arner M, Ohrvall AM, Rosenbaum P* (2006) The Manual Ability Classification System (MACS) for children with cerebral palsy: scale development and evidence of validity and reliability. *Dev Med Child Neurol* 48(7): 549–554.
30. *Miziara IM, Lopes JBP, Lazzari RD, de Moura RCF, Albuquerque MB, Oliveira C, Naves ELM* (2019) 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): 306–307. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.07.176>

31. *Jongsma MLA, Steenbergen B, Baas CM, Aarts PB, van Rijn CM* (2020) Lateralized EEG mu power during action observation and motor imagery in typically developing children and children with unilateral Cerebral Palsy. *Clin Neurophysiol* 131(12): 2829–2840.
<http://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.08.022>
32. *Koessler L, Maillard L, Benhadid A, Vignal JP, Felblinger J, Vespignani H, Braun M* (2009) Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10–10 system. *Neuroimage* 46(1): 64–72.
<http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.02.006>
33. *Shin YK, Lee DR, Hwang HJ, You SJ, Im CH* (2012) A novel EEG-based brain mapping to determine cortical activation patterns in normal children and children with cerebral palsy during motor imagery tasks. *NeuroRehabil* 31(4): 349–355.
<https://doi.org/10.3233/NRE-2012-00803>
34. *Dordevic M, Hoelzer S, Russo A, Garcia Alanis JC, Müller NG* (2022) The Role of the Precuneus in Human Spatial Updating in a Real Environment Setting – A cTBS Study. *Life* 12(8): 1239.
<https://doi.org/10.3390/life12081239>
35. *Ogawa T, Shimobayashi H, Hirayama JI, Kawanabe M* (2022) Asymmetric directed functional connectivity within the frontoparietal motor network during motor imagery and execution. *Neuroimage* 247: 118794.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118794>
36. *Araneda R, Dricot L, Ebner-Karestinis D, Paradis J, Gordon AM, Friel KM, Bleyenheuft Y* (2021) Brain activation changes following motor training in children with unilateral cerebral palsy: An fMRI study. *Ann Phys Rehabil Med* 64(3): 101502.
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2021.101502>
37. *Putzolu M, Samogin J, Cosentino C, Mezzarobba S, Bonassi G, Lagravinese G, Vato A, Mantini D, Avanzino L, Pelosin E* (2022) Neural oscillations during motor imagery of complex gait: an HdEEG study. *Sci Rep* 12(1): 4314.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-07511-x>
38. *Putzolu M, Samogin J, Bonassi G, Cosentino C, Mezzarobba S, Botta A, Avanzino L, Mantini D, Vato A, Pelosin E* (2024) Motor imagery ability scores are related to cortical activation during gait imagery. *Sci Rep* 14(1): 5207.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-54966-1>

EEG Sensorimotor Rhythms Dynamics in Children with Cerebral Palsy During the Course of Neurorehabilitation, Depending in the Success of Their Imagination of Movements

V. B. Pavlenko^{a,*}, S. V. Vlasenko^{a,b}, E. N. Chuyan^a, A. I. Kaida^a, L. S. Orekhova^a,
E. A. Birukova^a, D. V. Pavlenko^a and S. E. Tataris^a

^aVernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

^bResearch institute of children's balneology, physiotherapy and medical rehabilitation, Evpatoria, Russia

*e-mail: vpav55@gmail.com

An analysis of changes in sensorimotor rhythms of the electroencephalogram (EEG) and features of the restoration of motor functions during a course of neurorehabilitation using a non-invasive brain-computer-hand exoskeleton interface was carried out in 50 children aged 7–15 years of both sexes suffering from cerebral palsy (CP). EEG was recorded in 32 leads under conditions of rest and kinesthetic imagination of hand extension movements. Depending on the success of the classifier program in determining imaginary states based on the EEG pattern, the children were divided into two groups – with high and low success when imagining movements. In children of the studied groups, when undergoing a course of neurorehabilitation, differences were revealed in the nature of changes in EEG amplitude in the sensorimotor mu (8–13 Hz) and beta (15–25 Hz) rhythms frequency ranges. When imagining movements of the right hand, intergroup differences for the mu rhythm reached the level of statistical significance in the medial electrodes of the fronto-central and parietal areas of the neocortex, for the beta rhythm – in the medial lead of the parietal region. Children in the group with high success showed a decrease or slight increase in the amplitude of the mu- and beta rhythm in these brain areas at the last session of the course compared to the first. We hypothesize that children in this group are not only better able to kinesthetically imagine movements throughout the course of neurorehabilitation, but also, based on feedback signals, learn to effectively adjust their strategies for movement imagination. Children in the group with low success showed an increase in the amplitude of sensorimotor rhythms in these brain areas, indicating the development of inhibition in the frontoparietal motor network. Patients, whose conditions were determined more accurately by the classifier, achieved higher rates of motor rehabilitation. The results of the study are important for clarifying the brain mechanisms of motor functions restoration in patients with cerebral palsy under the influence of a course of neurorehabilitation.

Keywords: cerebral palsy, electroencephalogram, brain-computer interface, mu- and beta rhythm, neurorehabilitation