

КОГЕРЕНТНОСТЬ ЭЭГ У ДЕТЕЙ С ДЦП НА ФОНЕ РЕАБИЛИТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА «МОЗГ – КОМПЬЮТЕР – ЭКСОСКЕЛЕТ КИСТИ»

В. Б. Павленко¹✉, С. В. Власенко^{1,2}, Е. Н. Чуян¹, Д. В. Павленко¹, Л. С. Орехова¹, Е. А. Бирюкова¹

¹ Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

² Научно-исследовательский институт детской курортологии, физиотерапии и медицинской реабилитации, Евпатория, Россия

Ранее было показано, что сеансы нейрореабилитации с применением неинвазивного интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти» в сочетании с традиционным курортным лечением снижают у детей с детским церебральным параличом (ДЦП) спастичность мышц кисти и улучшают двигательные навыки. Однако когерентность показателей электроэнцефалограммы (ЭЭГ) при проведении таких сеансов не анализировали. Целью работы было провести анализ изменений когерентности в частотных диапазонах θ -, α - и β -ритмов ЭЭГ при проведении комплексного санаторно-курортного лечения детей с ДЦП с курсом нейрореабилитации, а также оценить взаимосвязь этих изменений с показателями двигательной активности больных. Коэффициенты когерентности внутри- и межполушарных связей фронтальных, центральных и теменных областей больших полушарий определяли во время кинестетического представления движений у 23 детей обоего пола в возрасте 7–15 лет, имевших диагноз «спастическая диплегия». Выявлен статистически значимый ($p < 0,05$) рост когерентности внутриполушарных связей в диапазоне α -ритмов и снижение в диапазонах θ -, β 1-ритмов, сопровождающийся статистически значимым ($p < 0,001$) улучшением двигательных функций по шкале Бартел. Обнаружена связь между когерентностью α -ритма в паре отведений C4–CP4 и величиной индекса Бартел ($r = 0,52$; $p = 0,04$). Выявленные особенности изменений когерентности внутриполушарных связей в диапазонах исследованных ритмов ЭЭГ могут быть использованы в качестве индикаторов нейропластичности у детей с ДЦП при проведении реабилитационных мероприятий, а также для разработки новых версий программ-классификаторов для нейроинтерфейсов.

Ключевые слова: дети, церебральный паралич, интерфейс мозг–компьютер, когерентность ЭЭГ

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда и Республики Крым № 22-15-20035, <https://rscf.ru/project/22-15-20035/>

Вклад авторов: В. Б. Павленко, Е. Н. Чуян — планирование исследований, анализ и интерпретация данных, подготовка черновика рукописи; С. В. Власенко — планирование исследований, сбор данных, анализ и интерпретация данных, подготовка черновика рукописи; Д. В. Павленко — сбор данных, анализ и интерпретация данных, подготовка черновика рукописи; Е. А. Бирюкова, Л. С. Орехова — сбор данных, анализ данных, подготовка черновика рукописи.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского» (протокол № 1 от 25.01.2022). Получено добровольное информированное согласие от родителей на участие детей в эксперименте.

✉ **Для корреспонденции:** Владимир Борисович Павленко
пр. Вернадского, д. 4, г. Симферополь, 295007, Россия; vpav55@gmail.com

Статья получена: 08.05.2024 **Статья принята к печати:** 29.05.2024 **Опубликована онлайн:** 23.06.2024

DOI: 10.24075/vrgmu.2024.020

EEG COHERENCE IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY AGAINST THE BACKGROUND OF REHABILITATION EMPLOYING A BRAIN-COMPUTER-HAND EXOSKELETON NEUROINTERFACE

Pavlenko VB¹✉, Vlasenko SV^{1,2}, Chuyan EN¹, Pavlenko DV¹, Orekhova LS¹, Birukova EA¹

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

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

Neurorehabilitation courses employing a non-invasive brain-computer-hand exoskeleton interface in combination with traditional balneotherapy have been shown to reduce spasticity of hand muscles and improve motor skills in children with cerebral palsy. However, the coherence of the electroencephalogram (EEG) parameters have never been analyzed during such sessions. This study aimed to analyze the coherence changes in the bands of θ , α and β rhythms recorded in the EEG as part of balneotherapy combined with a course of neurorehabilitation prescribed to children with cerebral palsy, and to investigate the relationship of these changes with the indicators of motor activity. The study involved 23 children aged 7 through 15 years, both genders, diagnosed with spastic diplegia; we established coherence coefficients for the intra- and interhemispheric connections of the frontal, central, and parietal regions of the large hemispheres in the context of actions provoking kinesthetic imagery. A significant ($p < 0.05$) growth of the intrahemispheric connections coherence was registered for α rhythms, decline thereof — for θ , β 1 rhythms, the fluctuations accompanied by a significant ($p < 0.001$) improvement of the motor functions on the Barthel scale. We identified a relationship between — rhythm coherence in the pair of C4–CP4 leads and the value of the Barthel index ($r = 0.52$; $p = 0.04$). The specifics of changes in the coherence of intrahemispheric connections within the studied rhythms can be used as indicators of neuroplasticity in children with cerebral palsy during rehabilitation, and support development of the new versions of the neurointerfaces classifier programs.

Keywords: children, cerebral palsy, brain–computer interfaces, EEG coherence

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation and the Republic of Crimea grant No. 22-15-20035, <https://rscf.ru/en/project/22-15-20035/>

Author contribution: Pavlenko VB, Chuyan EN — study planning, data analysis and interpretation, manuscript drafting; Vlasenko SV — study planning, data collection, data analysis and interpretation, manuscript drafting; Pavlenko DV — data collection, data analysis and interpretation, manuscript drafting; Birukova EA, Orekhova LS — data collection, data analysis, manuscript drafting.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the V.I. Vernadsky Crimean Federal University ethics committee (Minutes #1 of January 25, 2022). Parents submitted signed informed consent forms allowing their children to participate in the experiment.

✉ **Correspondence should be addressed:** Vladimir B. Pavlenko
pr. Vernadskogo, 4, Simferopol, 295007, Russia; vpav55@gmail.com

Received: 08.05.2024 **Accepted:** 29.05.2024 **Published online:** 23.06.2024

DOI: 10.24075/brsmu.2024.020

Детский церебральный паралич (ДЦП) представляет собой группу стойких нарушений развития движений и позы [1, 2], однако свойство пластичности мозга создает потенциальную возможность для лечения этого заболевания. На феномене пластичности основаны методы нейрореабилитации, активно развиваемые в последнее время. Больным дают задания на многократное повторение или представлении определенных движений. Отмечают, что представление движений может вызывать даже более высокую когнитивную нагрузку, чем их физическая реализация, что активизирует восстановительные процессы нервной ткани [3]. Один из подходов нейрореабилитации — применение комплексов, включающих неинвазивные интерфейсы мозг–компьютер (НИМК) и экзоскелет кисти руки [4]. Получены доказательства эффективности данного подхода в улучшении двигательных функций верхних конечностей [5, 6] и показателей моторной реализации речи [7] у детей со спастическими формами ДЦП.

Для оценки функционального состояния головного мозга больных ДЦП и динамики нейропластичности в процессе реабилитации используют анализ амплитуды сенсомоторных ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [6, 8, 9]. Перспективен также анализ особенностей структурной и функциональной связности нейронных сетей головного мозга в процессе лечения. Структурную связность определяют как совокупность нервных путей головного мозга, которые соответствуют устоявшимся анатомическим представлениям [10]. Применение диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии (МРТ) выявило у больных с ДЦП нарушение архитектуры кортикоспинального тракта и соматосенсорных таламокортикальных проекций. Отмечены также изменения структурной целостности комиссуральных и ассоциативных путей больших полушарий [11]. Функциональную связность определяют как совокупность взаимосвязей динамической активности нейронов разных регионов мозга. Репертуар функциональных конфигураций отражает лежащие в их основе анатомические связи. Для исследований в этой области применяют функциональную МРТ (фМРТ) и электрофизиологические методы, такие как электро- и магнитоэнцефалография [10].

Анализируя данные фМРТ, для оценки функциональной связности применяют расчет коэффициентов корреляции между показателями активности регионов мозга у больных в состоянии покоя. Было установлено, что нарушения функциональной связности широко распространены у детей с ДЦП, причем в зависимости от формы заболевания и выбора анализируемых областей наблюдались как пониженные, так и повышенные значения данного показателя по сравнению с контрольной группой [11]. Особое внимание обращает на себя выявленное снижение взаимосвязи активности лобных и теменных регионов, что может способствовать двигательным и когнитивным нарушениям при ДЦП [12].

Однако результаты, полученные с применением фМРТ в состоянии покоя, не являются надежным индикатором нарушений двигательных способностей при ДЦП [2]. Кроме того, фМРТ не обладает достаточным временным разрешением, так как измеряет метаболический (вторичный) ответ на активацию нейронов [13]. Записи ЭЭГ обеспечивают высокое временное разрешение и, таким образом, важны для описания как пространственно распределенных, так и временных динамических закономерностей нейронной активации и связности. При этом анализируется спектральная когерентность,

которая является аналогом парной взаимной корреляции во временной области [10]. Спектральную когерентность обычно рассчитывают в полосах традиционно выделяемых ритмов ЭЭГ. Ее показателем является коэффициент когерентности, который варьирует от нуля до единицы в зависимости от степени синхронизации активности функционально связанных регионов коры [13, 14].

Анализ когерентности ЭЭГ у детей с ДЦП к настоящему времени проведен лишь в единичных работах. Первоначально когерентность ритмов ЭЭГ у детей с ДЦП оценивали только в состоянии покоя. У детей с диплегией, имеющих двусторонние поражения мозга, в диапазоне α -ритма выявлено более низкое, по сравнению с контролем, значение межполушарной когерентности в затылочной области. В диапазонах δ -, θ - и β -ритмов для меж- и внутриволушарных пар отведений обнаружили повышенный уровень когерентности, что было интерпретировано как отражение компенсационных процессов [15]. У детей с гемипарезом также обнаружены более высокие значения межполушарной когерентности в δ - и θ -диапазоне, и пониженные — для α - и β -ритмов [16]. Значения когерентности в пораженном полушарии были ниже, чем в относительно сохранном, что, по мнению авторов, являлось следствием локальных нарушений в неокортексе и подкорковом белом веществе.

В более позднем исследовании анализировали межполушарную когерентность ЭЭГ над центральной областью коры у больных с унилатеральным ДЦП как в покое, так и при выполнении движений разгибания запястья [17]. Когерентность в диапазоне α -ритма ЭЭГ в покое оказалась снижена, и снижение было тем больше, чем выше степень нарушений двигательных функций. В недавней работе оценили внутриволушарную когерентность между центральными и лобными областями неокортекса в диапазоне μ -ритма ЭЭГ у детей с унилатеральным ДЦП при спокойном стоянии и ходьбе [18]. В отличие от результатов представленных выше исследований [14, 15], при стоянии у больных в пораженном полушарии когерентность была выше, а в сохранном — ниже, чем у контрольной группы.

Оценку когерентности ЭЭГ как индикатора нейропластичности в процессе реабилитации применяли при лечении взрослых больных после инсульта. При этом отмечена важность ее динамики в качестве показателя восстановления функций неокортекса [19]. Однако, насколько нам известно, оценку когерентности ЭЭГ у больных с ДЦП в процессе лечения выполняли лишь в одной работе. У детей с ДЦП, имеющих нарушения подвижности нижних конечностей, определяли функциональную связность областей коры при проведении серии тренировок на представление движений [20]. При представлении больными поднятия конечности программа-классификатор выявляла изменения паттерна ЭЭГ и выводила на экран изображения, служившие в качестве визуальной обратной связи. Курс реабилитации привел к росту коэффициента кластеризации ЭЭГ в частотном диапазоне 8–15 Гц, что рассматривалось как повышение эффективности сетевых свойств неокортекса. Однако данные о результатах двигательной реабилитации в работе не представлены.

В связи с этим цель нашей работы — провести анализ изменений когерентности в частотных диапазонах θ -, α - и β -ритмов ЭЭГ при проведении комплексного санаторно-курортного лечения детей с ДЦП с курсом нейрореабилитации на основе применения комплекса «НИМК — экзоскелет кисти», а также взаимосвязи этих изменений с показателями двигательной активности больных.

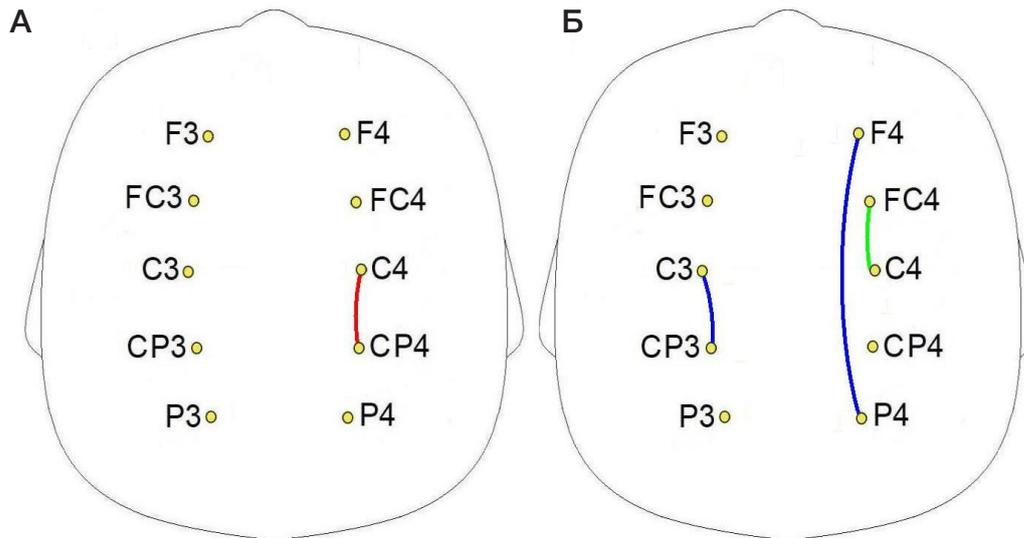


Рис. 1. Изменения показателей когерентности при представлении движений левой (А) и правой (Б) рук. Пара отведений, для которых выявлен статистически значимый рост когерентности в диапазоне α -ритма, отмечена красным цветом; пары, показавшие значимое падение в диапазоне θ - и β_1 -ритмов — зеленым и синим соответственно

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика выборки

Исследования проводили в 2022–2023 гг. 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». В них приняли участие 30 детей 6–15 лет, проходящих санаторно-курортное лечение с курсом нейрореабилитации на основе применения НИМК. Критерии включения пациентов: наличие установленного диагноза «ДЦП» в соответствии с критериями МКБ-10; наличие у пациента в структуре неврологических нарушений спастической диплегии с уровнем моторного развития I–III по критериям классификации больших моторных функций (Gross Motor Function Classification System for Cerebral Palsy, GMFCS). Критерии исключения: уровень двигательной активности по критериям GMFCS больше III; афатические нарушения; медикаментозно некорректируемая эпилепсия; нарушения зрения, не позволяющие различать инструкцию на экране; умственная отсталость умеренной, тяжелой и глубокой степеней (F71–73 по МКБ-10).

В итоговую группу для анализа не включены дети, ЭЭГ которых содержали большое количество артефактов из-за чрезмерной двигательной активности ребенка. Таким образом были отобраны записи 23 детей (7 девочек, 16 мальчиков) в возрасте от 7 до 15 лет. У 15 из них преобладали нарушения движений правой руки, у шести — левой, у двух — нарушения движений обеих рук были выражены в равной степени.

Оценка показателей двигательных функций

Для оценки двигательных функций пациентов был использован индекс Бартел, характеризующий возможности самостоятельного передвижения или самообслуживания пациента на основе результатов заполнения соответствующего опросника [21]. Чем выше возможности, тем выше значения индекса (диапазон от 0 до 100 баллов). Индекс Бартел применяют как для оценки состояния взрослых пациентов, так и для определения

способности детей с ДЦП участвовать в повседневных действиях [22]. Первичную оценку двигательных возможностей детей проводили на второй день после поступления в санаторий. На следующий день после окончания курса (14–15-й день пребывания в санатории) данные о двигательной активности собирали вторично.

Проведение реабилитационных процедур

Комплексное санаторно-курортное лечение включало: ежедневные процедуры аэро- и гелиотерапии, гидрокинезиотерапии в термально-минеральной воде (продолжительность — 10–15 мин), лечебную физкультуру, массаж паретичных мышц, электростимуляцию мышц, являющихся антагонистами паретичным. Раз в два дня назначали пелоидотерапию. Ботулинотерапию на этапе санаторно-курортного лечения не применяли. Курс нейрореабилитации проводили с помощью комплекса «мозг — компьютер — экзоскелет кисти» «Экзокисть-2» («Экзопласт», Россия; по РУ № РЗН 2018/7681). Работа НИМК основана на выявлении программно-классификатором паттернов ЭЭГ, возникающих при кинестетическом представлении разгибания кисти. Программа обеспечивает генерацию визуального сигнала обратной связи и формирование команд управления экзоскелетом кисти руки.

ЭЭГ регистрировали монополярно с помощью электроэнцефалографа БММ-52 (усилитель NVX-52, Москва, Зеленоград, «МКС») в 32 отведениях. Electroды были расположены по неполной международной схеме 10–10. В качестве референтного использовали усредненный электрод. В процессе записи частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли 4 и 30 Гц соответственно. Частота оцифровки ЭЭГ-сигналов — 500 Гц.

В процессе нейрореабилитационного тренинга пациенты сидели в кресле перед компьютерным монитором, на котором им предъявляли визуальные инструкции. Кисти рук размещались внутри «рукавиц» экзоскелета. В центре экрана находилась округлая метка белого цвета, служившая для фиксации взгляда, и расположенные вокруг нее три стрелки, менявшие цвет для обозначения инструкций. Пациент выполнял следующие команды: расслабиться, кинестетически представить движение

разгибания кисти левой или правой руки. Для создания конкретного кинестетического образа при воображении движения детям давали инструкцию: «Представь, что у тебя в руке маленький мячик, ты раскрываешь кисть и роняешь его. Почувствуй это движение». При успешном выполнении пациентом команды и выявлении программно-классификатором определенных паттернов ЭЭГ, 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. Курс нейрореабилитации начинался с третьего дня санаторно-курортного лечения. Пациенты проходили по 10 сеансов (ежедневно, за исключением выходного дня в воскресенье) по одинаковой схеме: три сессии в сеанс по 8 мин с перерывом на отдых не менее 5 мин. В течение сеанса задание на представление движений каждой руки повторяли 24 раза. Доля правильных ответов классификатора (при которых срабатывал экзоскелет и пассивно разгибалась кисть) в первом сеансе у разных пациентов составляла 0,18–0,66, достигая, по мере тренировки, к концу курса уровня 0,30–0,84. Остальные подробности реабилитационной методики описаны ранее [7].

Для оценки перестройки взаимосвязей корковых регионов под влиянием нейрореабилитации анализировали когерентность ЭЭГ θ -, α -, β_1 - и β_2 -ритмов в частотных диапазонах 4–8, 8–13, 14–20 и 20–30 Гц соответственно. Участки записей ЭЭГ с амплитудой более 250 мкВ, а также отрезки, содержащие большое количество артефактов, исключали из обработки. Анализировали не менее 10 безартефактных эпох (общая продолжительность записи ЭЭГ не менее 50 с). Поскольку реализация движений и их представление обеспечиваются взаимодействиями внутри лобно-теменной нейронной сети [3], внутриполушарную когерентность биопотенциалов рассчитывали для десяти пар отведений лобных, центральных и теменных областей левого (F3–C3, FC3–C3, C3–CP3, C3–P3, F3–P3) и правого (F4–C4, FC4–C4, C4–CP4, C4–P4, F4–P4) полушарий, а межполушарную — для пяти пар (F3–F4, FC3–FC4, C3–C4, CP3–CP4, P3–P4). При этом использовали программное обеспечение фирмы «Нейрософт» (Россия), входящее в комплект электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-5».

Значения коэффициентов когерентности преобразовали с применением функции натурального логарифма. Числовые значения, выходявшие за пределы 3σ , отбрасывали. В результате показатели когерентности имели распределения, близкие к нормальным, что позволило анализировать их средствами параметрической статистики.

Статистическая обработка данных

Статистический анализ данных проводили с использованием программы STATISTICA v.12 (StatSoft Inc.; США). Значения когерентности ЭЭГ для каждого из исследуемых ритмов подвергали дисперсионному анализу ANOVA с повторными измерениями (repeated measures) с факторами ТРЕНИНГ (первый и десятый сеансы) и ПАРЫ (10 или 5 пар отведений). Для оценки изменений когерентности в каждой из пар отведений использовали метод линейных контрастов. Поскольку величины исходных значений коэффициентов корреляции, которые не подвергали логарифмированию, также могут представлять интерес, а их распределение отличалось

от нормального (критерий Шапиро–Уилка), конкретные показатели приводили в тексте в виде медианы и интерквартильного размаха $Me [Q_1; Q_3]$. Распределение индекса Бартел также отличалось от нормального, в связи с чем статистические данные представляли аналогичным образом. Для оценки различий индекса Бартел до и после комплексного лечения использовали Т-критерий Уилкоксона, а расчет корреляций проводили с помощью критерия Спирмена. Различия и коэффициенты корреляции считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показатели двигательных функций до и после реабилитационных процедур

До начала комплексного лечения с курсом нейрореабилитации значения индекса Бартел составляли 70 [60; 85] баллов, после — 77,5 [74,0; 95,0] баллов (различия достоверны при $p < 0,001$). Таким образом, возможности самостоятельного передвижения и самообслуживания детей существенно выросли.

Динамика когерентности ЭЭГ в результате реабилитационных процедур

Применение ANOVA для анализа изменений внутрислошарной когерентности при представлении движений левой руки выявило эффект фактора ТРЕНИНГ в диапазоне α -ритма: $F_{1,14} = 7,21$; $p = 0,02$. Уровень когерентности во время проведения последнего сеанса вырос по сравнению с первым, особенно в правом, контрлатеральном по отношению к представляемому движению, полушарии. Метод линейных контрастов показал достоверные различия в паре C4–CP4, где рост показателя был значим при $p = 0,004$ (рис. 1А; красная линия). Значение коэффициента когерентности в этой паре увеличилось с 0,38 [0,36; 0,45] до 0,43 [0,39; 0,47].

При представлении движений правой руки выявлен эффект взаимодействия факторов ТРЕНИНГ и ПАРЫ: $F_{9,90} = 2,37$; $p = 0,02$ в диапазоне θ -ритма ЭЭГ. Уровень когерентности в данном частотном диапазоне снижался в парах правого, ипсилатерального полушария. Метод линейных контрастов подтвердил различия в паре C4–FC4, где снижение когерентности оказалось значимым при $p = 0,01$ (рис. 1Б; зеленая линия). В этой паре значения коэффициента когерентности снизились с 0,41 [0,36; 0,42] до 0,36 [0,33; 0,38]. Также при представлении движений правой руки выявлен эффект фактора ТРЕНИНГ в диапазоне β_1 -ритма ЭЭГ: $F_{1,7} = 24,091$ при $p = 0,002$. Уровень когерентности в данном частотном диапазоне также снижался. Метод линейных контрастов подтвердил значимые различия в паре C3–CP3 контрлатерального полушария при $p = 0,03$ и F4–P4 ипсилатерального полушария при $p = 0,01$ (рис. 1Б; синие линии). В этих парах значения коэффициентов когерентности снизились с 0,39 [0,37; 0,42] до 0,37 [0,34; 0,41] и с 0,40 [0,37; 0,43] до 0,38 [0,36; 0,40] соответственно.

В диапазоне β_2 -ритма статистически значимых влияний фактора ТРЕНИНГ и его взаимодействия с фактором ПАРЫ при анализе динамики внутрислошарной когерентности ЭЭГ не обнаружено.

Анализ динамики межполушарной когерентности в диапазоне θ -, α -, β_1 - и β_2 -ритмов ЭЭГ при представлении

детьми движений левой и правой рук, а также внутри- и межполушарной когерентности в состоянии расслабления не выявил влияния фактора ТРЕНИНГ и его взаимодействия с фактором ПАРЫ.

Связь когерентности с показателями двигательных функций

Для оценки взаимосвязей между когерентностью и характеристиками двигательных функций использовали показатели ЭЭГ в процессе завершающего сеанса курса нейрореабилитации, а также величины индекса Бартел, отражающие двигательные функции детей по окончании данного курса. Для анализа отобраны только те пары отведений, для которых выявлены статистически значимые изменения (приведены выше). Обнаружена связь между когерентностью α -ритма в паре C4–CP4 и величиной индекса Бартел ($r = 0,52$; $p = 0,04$), т. е. чем выше когерентность α -ритма в данной паре отведений правого полушария при представлении движений левой руки, тем выше способность пациентов к передвижению и самообслуживанию. Для других частотных диапазонов ЭЭГ значимых корреляций не выявлено.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

После прохождения курса нейрореабилитации нами обнаружены статистически значимые изменения внутриполушарной когерентности θ -, α - и β_1 -ритмов ЭЭГ в отдельных звеньях лобно-теменных цепей, которые сочетались с улучшением двигательных функций пациентов. В завершающем сеансе представление движения левой руки сопровождалось значимо большим уровнем когерентности α -ритма, чем в начале реабилитации. Каким может быть значение усиления взаимосвязей на частоте данного ритма? Ряд авторов предполагают, что синхронизированные ЭЭГ-осцилляции служат механизмом, обеспечивающим быстрое и избирательное взаимодействие между областями мозга [23–25]. По их мнению, именно α -ритм обеспечивает крупномасштабную синхронизацию, поскольку α -волны присутствуют в коре головного мозга повсеместно и отражают чередование периодов торможения и возбуждения. Синхронизация таких периодов в разных областях мозга позволяет им взаимодействовать более эффективно, что, в частности, необходимо для функционирования лобно-теменной сети. Важно отметить, что активность в частотном диапазоне α -ритма, зарегистрированная нами в центральных и прилегающих к ним отведениях, соответствует низкочастотному компоненту μ -ритма, генерируемого в этих областях неокортекса. Динамика μ -ритма отражает процессы реализации или представления движений и рекомендована в качестве электрофизиологического маркера пластичности кортикальной сенсомоторной системы [8]. В нашем исследовании метод контрастов показал статистическую значимость роста когерентности α -ритма в паре отведений C4–CP4 (рис. 1А), находящихся над постцентральной сенсомоторной корой и нижней теменной долькой [26]. Указанные области у здоровых испытуемых активировались во время задач на представление движений и являлись центрами нейронных сетей, чьи показатели когерентности коррелировали с результатами таких задач [27].

Необходимо добавить, что кинестетическое представление движений требует актуализации информации,

содержащейся в памяти ребенка. Сообщалось, что фазовые взаимодействия в диапазоне α -ритма, выявляемые в центральной и теменной коре, лежат в основе нисходящей модуляции амплитуд локальных осцилляций в сенсорных областях, поддерживая функции внимания и памяти [23]. Таким образом, рост когерентности ЭЭГ в диапазоне α -ритма улучшает взаимодействие областей мозга, актуализирующих двигательные образы в памяти и поддерживающих внимание к ним. В результате кинестетическое представление движений становится более успешным, что отражается в увеличении доли правильных ответов программы-классификатора. Поскольку во время представления движений люди задействуют те же нейронные структуры, что участвуют в реальном выполнении действий [28, 29], успешное представление движений усиливает процессы нейропластичности корковых и подкорковых структур. Все это приводит к улучшению координации реальных движений конечностей, что и отражается в значимом росте индекса Бартел.

Нами выявлено также снижение уровня когерентности θ - и β_1 -ритмов при представлении движения правой руки в последнем сеансе, по сравнению с первым. Ранее у детей с ДЦП были обнаружены повышенные значения когерентности θ -ритма [15, 16], что рассматривалось как проявление компенсаторного механизма при нарушении функциональной связности в диапазоне α -ритма. Таким образом, снижение когерентности θ -ритма может быть расценено как проявление определенных положительных изменений в функционировании неокортекса.

Снижение когерентности β_1 -ритма может быть обусловлено спецификой выполняемой задачи. Частотный диапазон указанного ритма соответствует высокочастотному компоненту μ -ритма. Его динамика отражает активность первичной моторной коры в процессе реального выполнения движений [8]. В условиях наших тренингов детям было необходимо лишь представлять, но не выполнять движение, что вовлекало в основном сенсомоторные области неокортекса. Следует добавить, что когерентность β -ритма растет в условиях выполнения движений, нуждающихся в усиленном контроле [30]. Задача на кинестетическое представление движений такого контроля очевидно не требовала. Можно предположить, что в условиях первого сеанса представление движений давалось сложнее и требовало дополнительной активации первичной моторной области. В дальнейшем представление движений происходило с меньшими усилиями, а активация коры была более локальной.

В заключение отметим следующее. Как было показано ранее, дисфункция лобно-теменной сети у детей с ДЦП способствует двигательным и когнитивным нарушениям [12]. Выявленные нами изменения когерентности ритмов ЭЭГ в звеньях этой сети можно расценить как показатели позитивных сдвигов в функциональном состоянии неокортекса пациентов.

К ограничениям исследования можно отнести отсутствие контрольной группы детей с ДЦП, у которых была бы зарегистрирована ЭЭГ при представлении движений в начале и конце стандартного санаторно-курортного лечения без курса нейрореабилитации на основе НИМК. Временные рамки санаторно-курортного лечения (21 день) не позволяли прибегнуть к перекрестному дизайну исследования, который был бы в этом случае наиболее адекватен и этичен.

ВЫВОДЫ

Комплексная терапия с применением интерфейса «мозг — компьютер — экзоскелет кисти» привела у детей с ДЦП к статистически значимому росту индекса Бартел ($p < 0,001$), свидетельствующему об улучшении показателей подвижности и способности к самообслуживанию. Выявлено статистически значимое ($p < 0,05$) изменение когерентности внутриволновых связей в диапазонах θ -, α - и β 1-ритмов. Основой таких изменений может быть усиление процессов пластичности в нейронных

сетях неокортекса, контролирующих планирование, представление и выполнение сложных движений. Полученные данные могут быть использованы для оценки функционального состояния головного мозга больных в процессе реабилитации и разработки новых методов коррекции двигательной сферы детей с ДЦП. В будущих исследованиях представляется целесообразным провести анализ ЭЭГ пациентов с использованием перекрестного дизайна при прохождении ими курса нейрореабилитации на базе центра «Технологии здоровья и реабилитации» Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского.

Литература

- Sadowska M, Sarecka-Hujar B, Kopyta I. Cerebral palsy: current opinions on definition, epidemiology, risk factors, classification and treatment options. *Neuropsychiatr Dis Treat.* 2020; 16: 1505–18. DOI: 10.2147/NDT.S235165.
- Vallinoja J, Nurmi T, Jaatela J, Wens V, Bourguignon M, Mäenpää H, et al. Functional connectivity of sensorimotor network is enhanced in spastic diplegic cerebral palsy: a multimodal study using fMRI and MEG. *Clinical Neurophysiology.* 2024; 157: 4–14. DOI: 10.1016/j.clinph.2023.10.014.
- Ogawa T, Shimobayashi H, Hirayama JI, Kawanabe M. Asymmetric directed functional connectivity within the frontoparietal motor network during motor imagery and execution. *Neuroimage.* 2022; 247: 118794. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2021.118794.
- Федотова И. Р., Бобров П. Д. Предпосылки и особенности использования воображения движения и интерфейса мозг–компьютер в реабилитации при детском церебральном параличе. *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова.* 2022; 72 (1): 87–99. DOI: 10.31857/S004446772201004X.
- Ларина Н. В., Корсунская Л. Л., Власенко С. В. Комплекс «Экзокисть-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с использованием неинвазивного интерфейса «мозг–компьютер». *Нервно-мышечные болезни.* 2019; 11 (4): 12–20.
- Бобров П. Д., Бирюкова Е. В., Поляев Б. А., Лайшева О. А., Усачёва Е. Л., Соколова А. В. и др. Реабилитация больных с детским церебральным параличом с помощью экзоскелета кисти, управляемого интерфейсом «мозг–компьютер». *Вестник РГМУ.* 2020; (4): 34–41. DOI: 10.24075/vrgmu.2020.047.
- Павленко В. Б., Власенко С. В., Орехова Л. С., Бирюкова Е. А. Улучшение речи у детей с ДЦП на фоне реабилитации с применением нейроинтерфейса «мозг–компьютер–экзоскелет кисти». *Вестник РГМУ.* 2023; (4): 66–72. DOI: 10.24075/vrgmu.2023.026.
- 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.* 2020; 63 (5): 439–46. DOI: 10.1016/j.rehab.2019.06.007.
- Ларина Н. В., Начарова М. А., Корсунская Л. Л., Власенко С. В., Павленко В. Б. Изменение ЭЭГ в частотном диапазоне α -ритма у детей с детским церебральным параличом при применении роботизированной терапии. *Вестник РГМУ.* 2020; (4): 42–8. DOI: 10.24075/vrgmu.2020.043.
- Chiarion G, Sparacino L, Antonacci Y, Faes L, Mesin L. Connectivity analysis in EEG data: a tutorial review of the state of the art and emerging trends. *Bioengineering (Basel).* 2023; 10 (3): 372. DOI: 10.3390/bioengineering10030372.
- Jacobs N, Pouwels P, van der Krogt M, Meyns P, Zhu K, Nelissen L, et al. Brain structural and functional connectivity and network organization in cerebral palsy: A scoping review. *Dev Med Child Neurol.* 2023; 65 (9): 1157–73. DOI: 10.1111/dmcn.15516.
- Qin Y, Li Y, Sun B, He H, Peng R, Zhang T, et al. Functional connectivity alterations in children with spastic and dyskinetic cerebral palsy. *Neural Plast.* 2018; 2018: 7058953. DOI: 10.1155/2018/7058953.
- Bowyer SM. Coherence a measure of the brain networks: past and present. *Neuropsychiatr Electrophysiol.* 2016; 2: 1–12. DOI: 10.1186/S40810-015-0015-7.
- Schneider M, Broggin AC, Dann B, Tzanou A, Uran C, Sheshadri S, et al. A mechanism for inter-areal coherence through communication based on connectivity and oscillatory power. *Neuron.* 2021; 109 (24): 4050–67. DOI: 10.1016/j.neuron.2021.09.037.
- Koeda T, Takeshita K. Electroencephalographic coherence abnormalities in preterm diplegia. *Pediatr Neurol.* 1998; 18 (1): 51–6. DOI: 10.1016/S0887-8994(97)00155-0.
- Kuřak W, Sobaniec W, Boćkowski L. EEG spectral analysis and coherence in children with hemiparetic cerebral palsy. *Med Sci Monit.* 2005; 11 (9): CR449–55.
- Kukke SN, de Campos AC, Damiano D, Alter KE, Patronas N, Hallett M. Cortical activation and inter-hemispheric sensorimotor coherence in individuals with arm dystonia due to childhood stroke. *Clin Neurophysiol.* 2015; 126 (8): 1589–98. DOI: 10.1016/j.clinph.2014.11.002.
- George KA, Damiano DL, Kim Y, Bulea TC. Mu rhythm during standing and walking is altered in children with unilateral cerebral palsy compared to children with typical development. *Dev Neurorehabil.* 2021; 24 (1): 8–17. DOI: 10.1080/17518423.2020.1756005.
- Wu J, Quinlan EB, Dodakian L, McKenzie A, Kathuria N, Zhou RJ, et al. Connectivity measures are robust biomarkers of cortical function and plasticity after stroke. *Brain.* 2015; 138 (Pt 8): 2359–69. DOI: 10.1093/brain/aww156.
- Xie J, Jiang L, Li Y, Chen B, Li F, Jiang Y, et al. Rehabilitation of motor function in children with cerebral palsy based on motor imagery. *Cogn Neurodyn.* 2021; 15 (6): 939–48. DOI: 10.1007/s11571-021-09672-3.
- Mahoney FI, Barthel DW. Functional evaluation: The Barthel index. *Md State Med J.* 1965; 14: 61–5.
- Wolan-Nieroda A, Łukasiewicz A, Leszczak J, Druźbicki M, Guzik A. Assessment of functional performance in children with cerebral palsy receiving treatment in a day care facility: an observational study. *Med Sci Monit.* 2022; 28:e936207. DOI: 10.12659/MSM.936207.
- Palva S, Palva JM. Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks. *Front Psychol.* 2011; 2: 204. DOI: 10.3389/fpsyg.2011.00204.
- Chapeton JI, Haque R, Wittig JH Jr, Inati SK, Zaghoul KA. Large-scale communication in the human brain is rhythmically modulated through alpha coherence. *Curr Biol.* 2019; 29 (17): 2801–11. DOI: 10.1016/j.cub.2019.07.014.
- Myers JC, Smith EH, Leszczynski M, O'Sullivan J, Yates MJ, McKhann G, et al. The spatial reach of neuronal coherence and spike-field coupling across the human neocortex. *J Neurosci.* 2022; 42 (32): 6285–94. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0050-22.2022.
- Koessler L, Maillard L, Benhadid A, Vignal JP, Felblinger J, Vespignani H, et al. Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10-10 system. *Neuroimage.* 2009; 46 (1): 64–72. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.02.006.
- Drapkina O, Savosenkov A, Gordleeva S, Kurkin S A, Badarin A, Grigor'ev N, et al. Characteristics of the specific brain functional network correlate with the latency of motor imagery. *Eur Phys J*

- Spec Top. 2023; DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-01058-2.
28. Jongsma MLA, Steenbergen B, Baas CM, Aarts PB, van Rijn CM. Lateralized EEG mu power during action observation and motor imagery in typically developing children and children with unilateral Cerebral Palsy. *Clin Neurophysiol.* 2020; 131 (12): 2829–40. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.08.022.
 29. Galli J, Garofalo G, Brunetti S, Loi E, Portesi M, Pelizzari G, et al. Children with Cerebral Palsy can imagine actions like their normally developed peers. *Front Neurol.* 2022; 13: 951152. DOI: 10.3389/fneur.2022.951152.
 30. Chung JW, Ofori E, Misra G, Hess CW, Vaillancourt DE. Beta-band activity and connectivity in sensorimotor and parietal cortex are important for accurate motor performance. *Neuroimage.* 2017; 144: 164–73. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2016.10.008.
- ## References
1. Sadowska M, Sarecka-Hujar B, Kopyta I. Cerebral palsy: current opinions on definition, epidemiology, risk factors, classification and treatment options. *Neuropsychiatr Dis Treat.* 2020; 16: 1505–18. DOI: 10.2147/NDT.S235165.
 2. Vallinoja J, Nurmi T, Jaatela J, Wens V, Bourguignon M, Mäenpää H, et al. Functional connectivity of sensorimotor network is enhanced in spastic diplegic cerebral palsy: a multimodal study using fMRI and MEG. *Clinical Neurophysiology.* 2024; 157: 4–14. DOI: 10.1016/j.clinph.2023.10.014.
 3. Ogawa T, Shimobayashi H, Hirayama JI, Kawanabe M. Asymmetric directed functional connectivity within the frontoparietal motor network during motor imagery and execution. *Neuroimage.* 2022; 247: 118794. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2021.118794.
 4. Fedotova IR, Bobrov PD. Predposylki i osobennosti ispol'zovaniya vobrazheniya dvizheniya i interfejsa mozg-komp'yuter v reabilitacii pri detskom cerebral'nom paraliche. *Zhurnal vysshej nervnoj deyatel'nosti im. I. P. Pavlova.* 2022; 72 (1): 87–99. DOI: 10.31857/S004446772201004X. Russian.
 5. Larina NV, Korsunskaya LL, Vlasenko SV. Kompleks «Egzokist'-2» v reabilitacii verhnej konechnosti pri detskom cerebral'nom paraliche s ispol'zovaniem neinvazivnogo interfejsa «mozg-komp'yuter». *Nervno-myshechnye bolezni.* 2019; 11 (4): 12–20. DOI: DOI: 10.17650/2222-8721-2019-9-4-44-50. Russian.
 6. Bobrov PD, Biryukova EV, Polyayev BA, Lajsheva OA, Usachjova EL, Sokolova AV, et al. Rehabilitation of patients with cerebral palsy using hand exoskeleton controlled by brain-computer interface. *Bulletin of RSMU.* 2020; (4): 33–40. DOI: 10.24075/brsmu.2020.047.
 7. Pavlenko VB, Vlasenko SV, Orekhova LS, Biryukova EA. Speech improvement in children with cerebral palsy by "brain-computer-hand exoskeleton" neurointerface rehabilitation. *Bulletin of RSMU.* 2023; (4): 62–67. DOI: 10.24075/brsmu.2023.026.
 8. 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.* 2020; 63 (5): 439–46. DOI: 10.1016/j.rehab.2019.06.007.
 9. Larina NV, Nacharova MA, Korsunskaya LL, Vlasenko SV, Pavlenko VB. Changes in EEG patterns in the α -frequency band following BCI-based therapy in children with cerebral palsy. *Bulletin of RSMU.* 2020; (4): 41–6. DOI: 10.24075/brsmu.2020.043.
 10. Chiarion G, Sparacino L, Antonacci Y, Faes L, Mesin L. Connectivity analysis in EEG data: a tutorial review of the state of the art and emerging trends. *Bioengineering (Basel).* 2023; 10 (3): 372. DOI: 10.3390/bioengineering10030372.
 11. Jacobs N, Pouwels P, van der Krogt M, Meyns P, Zhu K, Nelissen L, et al. Brain structural and functional connectivity and network organization in cerebral palsy: A scoping review. *Dev Med Child Neurol.* 2023; 65 (9): 1157–73. DOI: 10.1111/dmcn.15516.
 12. Qin Y, Li Y, Sun B, He H, Peng R, Zhang T, et al. Functional connectivity alterations in children with spastic and dyskinetic cerebral palsy. *Neural Plast.* 2018; 2018: 7058953. DOI: 10.1155/2018/7058953.
 13. Bowyer SM. Coherence a measure of the brain networks: past and present. *Neuropsychiatr Electrophysiol.* 2016; 2: 1–12. DOI: 10.1186/S40810-015-0015-7.
 14. Schneider M, Brogini AC, Dann B, Tzanou A, Uran C, Sheshadri S, et al. A mechanism for inter-areal coherence through communication based on connectivity and oscillatory power. *Neuron.* 2021; 109 (24): 4050–67. DOI: 10.1016/j.neuron.2021.09.037.
 15. Koeda T, Takeshita K. Electroencephalographic coherence abnormalities in preterm diplegia. *Pediatr Neurol.* 1998; 18 (1): 51–6. DOI: 10.1016/S0887-8994(97)00155-0.
 16. Kułak W, Sobaniec W, Boćkowski L. EEG spectral analysis and coherence in children with hemiparetic cerebral palsy. *Med Sci Monit.* 2005; 11 (9): CR449-55.
 17. Kukke SN, de Campos AC, Damiano D, Alter KE, Patronas N, Hallett M. Cortical activation and inter-hemispheric sensorimotor coherence in individuals with arm dystonia due to childhood stroke. *Clin Neurophysiol.* 2015; 126 (8): 1589–98. DOI: 10.1016/j.clinph.2014.11.002.
 18. George KA, Damiano DL, Kim Y, Bulea TC. Mu rhythm during standing and walking is altered in children with unilateral cerebral palsy compared to children with typical development. *Dev Neurorehabil.* 2021; 24 (1): 8–17. DOI: 10.1080/17518423.2020.1756005.
 19. Wu J, Quinlan EB, Dodakian L, McKenzie A, Kathuria N, Zhou RJ, et al. Connectivity measures are robust biomarkers of cortical function and plasticity after stroke. *Brain.* 2015; 138 (Pt 8): 2359–69. DOI: 10.1093/brain/aww156.
 20. Xie J, Jiang L, Li Y, Chen B, Li F, Jiang Y, et al. Rehabilitation of motor function in children with cerebral palsy based on motor imagery. *Cogn Neurodyn.* 2021; 15 (6): 939–48. DOI: 10.1007/s11571-021-09672-3.
 21. Mahoney FI, Barthel DW. Functional evaluation: The Barthel index. *Md State Med J.* 1965; 14: 61–5.
 22. Wolan-Nieroda A, Łukasiewicz A, Leszczak J, Druzbicki M, Guzik A. Assessment of functional performance in children with cerebral palsy receiving treatment in a day care facility: an observational study. *Med Sci Monit.* 2022; 28:e936207. DOI: 10.12659/MSM.936207.
 23. Palva S, Palva JM. Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks. *Front Psychol.* 2011; 2: 204. DOI: 10.3389/fpsyg.2011.00204.
 24. Chapeton JI, Haque R, Wittig JH Jr, Inati SK, Zaghoul KA. Large-scale communication in the human brain is rhythmically modulated through alpha coherence. *Curr Biol.* 2019; 29 (17): 2801–11. DOI: 10.1016/j.cub.2019.07.014.
 25. Myers JC, Smith EH, Leszczynski M, O'Sullivan J, Yates MJ, McKhann G, et al. The spatial reach of neuronal coherence and spike-field coupling across the human neocortex. *J Neurosci.* 2022; 42 (32): 6285–94. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0050-22.2022.
 26. Koessler L, Maillard L, Benhadid A, Vignal JP, Felbinger J, Vespignani H, et al. Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10-10 system. *Neuroimage.* 2009; 46 (1): 64–72. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.02.006.
 27. Drapkina O, Savosenkov A, Gordleeva S, Kurkin S A, Badarin A, Grigor'ev N, et al. Characteristics of the specific brain functional network correlate with the latency of motor imagery. *Eur Phys J Spec Top.* 2023; DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-01058-2.
 28. Jongsma MLA, Steenbergen B, Baas CM, Aarts PB, van Rijn CM. Lateralized EEG mu power during action observation and motor imagery in typically developing children and children with unilateral Cerebral Palsy. *Clin Neurophysiol.* 2020; 131 (12): 2829–40. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.08.022.
 29. Galli J, Garofalo G, Brunetti S, Loi E, Portesi M, Pelizzari G, et al. Children with Cerebral Palsy can imagine actions like their normally developed peers. *Front Neurol.* 2022; 13: 951152. DOI: 10.3389/fneur.2022.951152.
 30. Chung JW, Ofori E, Misra G, Hess CW, Vaillancourt DE. Beta-band activity and connectivity in sensorimotor and parietal cortex are important for accurate motor performance. *Neuroimage.* 2017; 144: 164–73. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2016.10.008.