

УЛУЧШЕНИЕ РЕЧИ У ДЕТЕЙ С ДЦП НА ФОНЕ РЕАБИЛИТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА "МОЗГ–КОМПЬЮТЕР–ЭКЗОСКЕЛЕТ КИСТИ"

В. Б. Павленко , С. В. Власенко, Л. С. Орехова, Е. А. Бирюкова

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

Как было показано ранее, сеансы нейрореабилитации с применением неинвазивного интерфейса «мозг–компьютер–экзоскелет кисти» снижают у детей с детским церебральным параличом (ДЦП) спастичность мышц кисти и улучшают двигательные навыки. Однако изменение речевых функций пациентов и их связь с подвижностью верхних конечностей не анализировали. Целью исследования было проанализировать связь между двигательными и речевыми функциями детей с ДЦП, а также выявить изменения моторной реализации высказывания у пациентов в результате комплексного лечения, включающего сеансы нейрореабилитации. В исследовании приняли участие дети с ДЦП в возрасте 6–15 лет. Основная группа ($n = 40$, 16 девочек, 24 мальчика) проходила комплексное санаторно-курортное лечение с курсом нейрореабилитации, а группа сравнения ($n = 20$, 10 девочек, 10 мальчиков) — стандартное санаторно-курортное лечение. Выявлена статистически значимая ($p < 0,001$) взаимосвязь между величиной суммарного показателя шкалы «Возможности кисти — дети» («ABILHANDKids») и показателями моторной реализации высказывания. Комплексная терапия с курсом нейрореабилитации привела у пациентов основной группы к статистически значимым изменениям ($p < 0,001$): снижению спастичности кистей рук, росту суммарного показателя «ABILHANDKids» и показателей речи. У детей группы сравнения статистически значимых изменений данных показателей не выявлено. Основой позитивных эффектов нейрореабилитации может быть усиление пластичности нейронных цепей, контролирующих выполнение сложных движений рук, а также речевые процессы. Полученные данные могут быть использованы при разработке новых методов коррекции двигательной и когнитивной сферы детей с ДЦП.

Ключевые слова: дети, церебральный паралич, речь, интерфейс мозг–компьютер

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

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

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского» (протокол № 1 от 25 января 2022 г.). Получено информированное согласие от родителей на участие детей в исследовании.

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

Статья получена: 17.06.2023 **Статья принята к печати:** 14.07.2023 **Опубликована онлайн:** 28.07.2023

DOI: 10.24075/vrgmu.2023.026

SPEECH IMPROVEMENT IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY BY "BRAIN–COMPUTER–HAND EXOSKELETON" NEUROINTERFACE REHABILITATION

Pavlenko VB , Vlasenko SV, Orekhova LS, Biryukova EA

Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

As explained earlier, neurorehabilitation sessions involving the use of the non-invasive “brain – computer – hand exoskeleton” interface reduce hand muscle spasticity and improve motor skills in children with cerebral palsy (CP). However, the changes in the patients’ speech functions and their relationship with the upper limb mobility have not been analyzed. The study was aimed to assess the correlation between the motor and speech functions of children with CP, as well as to detect the changes in motor realization of speech production following complex treatment of patients including sessions of neurorehabilitation. The study involved children with CP aged 6–15. The index group ($n = 40$, 16 girls, 24 boys) received complex resort treatment with the course of neurorehabilitation, while the comparison group ($n = 20$, 10 girls, 10 boys) received standard resort treatment. A significant ($p < 0.001$) correlation between the total ABILHAND-Kids score and the indicators of speech production motor realization was revealed. In patients of the index group, complex treatment with the course of neurorehabilitation resulted in the significant ($p < 0.001$) decrease in hand spasticity and the increase in the total ABILHAND-Kids score and speech scores. No significant changes of these indicators were revealed in children of the comparison group. Beneficial effects of neurorehabilitation may be based on the enhanced plasticity of the neural circuits responsible for planning and execution of complex hand movements, as well as speech processes. The findings can be used to develop new methods for correction of motor and cognitive spheres in children with CP.

Keywords: children, cerebral palsy, speech, brain–computer interface

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, Vlasenko SV — study planning, data analysis and interpretation, manuscript writing; Orekhova LS, Biryukova EA — data acquisition and analysis, manuscript writing.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University (protocol № 1 of 25 January 2022). The informed consent to the children’s enrollment was obtained from their parents.

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

Received: 17.06.2023 **Accepted:** 14.07.2023 **Published online:** 28.07.2023

DOI: 10.24075/brsmu.2023.026

В настоящее время признается, что детский церебральный паралич (ДЦП) представляет собой гораздо больше, чем «нарушение осанки и движений», и часто связан с широким спектром дисфункций, включая когнитивные, языковые и сенсорно-перцептивные нарушения [1]. Как указано в недавней обзорной работе, расстройствами речи при ДЦП страдают 30–87% больных [2]. Степень речевых расстройств выражена сильнее при более тяжелых нарушениях двигательной сферы [1, 3–5]. Корреляционный анализ позволил выявить взаимосвязь между степенью нарушений моторики и выраженностью расстройств речи у больных с ДЦП в возрасте 10–12 лет [6].

Общность двигательных и речевых нарушений при ДЦП объясняют анатомической близостью в расположении корковых речевых и двигательных зон, а также их проводящих путей. Отмечается также функциональная общность речевой и двигательной системы, поскольку для организации любого речевого и двигательного акта необходима сохранность четкого кинестетического восприятия, которое сопровождает любое движение как артикуляционных, так и других мышц [2]. Исходя из этого, для развития речевых функций детей рекомендуют упражнения, направленные на преодоление моторной недостаточности (особенно моторики рук).

Особую актуальность в настоящее время приобретают методы реабилитации двигательных функций конечностей у пациентов с ДЦП, основанные на применении неинвазивных интерфейсов «мозг–компьютер» (НИМК) и принципов биологической обратной связи. Такие методы позволяют активизировать природные физиологические ресурсы головного мозга ребенка [7]. Первоначально в ряде исследований была показана потенциальная возможность использования НИМК у детей с ДЦП для выявления на основе анализа динамики электроэнцефалограммы (ЭЭГ) представления пациентом движения конечности или намерения его совершить [8–10]. С помощью НИМК дети управляли движением курсора или различными игровыми объектами на экране компьютера. Основываясь на результатах этих и других работ, исследователи из Южной Кореи использовали НИМК, интегрированный с электростимулятором мышц разгибателей запястья [11]. Электростимуляция запускалась на основе онлайн-анализа параметров ЭЭГ при представлении пациентом движения разгибания кисти. После серии сеансов у детей с ДЦП улучшались параметры выполнения движений рук, а также показатели концентрации внимания.

В дальнейшем для реабилитации детей с ДЦП были использованы НИМК «мозг – компьютер – экзоскелет кисти», которые выявляли характерные паттерны ЭЭГ, сопровождающие кинестетическое воображение движений, и запускали движения «рукавиц» экзоскелета [12, 13]. Было установлено, что сеансы нейрореабилитации с применением таких НИМК повышают эффективность реабилитационных мероприятий на санаторно-курортном этапе лечения. В результате снижается спастичность мышц кисти, увеличиваются сила мышц и объем движений кисти, улучшается выполнение ряда двигательных тестов, растет объем бытовых навыков, что способствует социализации пациентов с ДЦП. Однако в указанных работах не анализировали изменение речевых функций пациентов. В связи с этим цели настоящего исследования — анализ связи между двигательными и речевыми функциями детей с ДЦП, а также выявление изменений моторной реализации высказывания у пациентов в результате комплексного санаторно-курортного лечения, включающего сеансы нейрореабилитации.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика выборки

Исследования проводили на базе центра «Технологии здоровья и реабилитации» Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, а также Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Санаторий для детей и детей с родителями «Чайка» им. Гелиловичей» для детей с неврологическими нарушениями. В исследовании приняли участие 60 детей в возрасте 6–15 лет, проходящие курс санаторно-курортной реабилитации. Критерии включения пациентов: наличие установленного диагноза «ДЦП» в соответствии с критериями МКБ-10; наличие у пациента в структуре неврологических нарушений гемипареза с уровнем двигательной активности не выше III по критериям классификации больших моторных функций (Gross Motor Function Classification System for Cerebral Palsy, GMFCS). Критерии исключения: отказ от участия в исследовании пациентов, родителей или их законных представителей; 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 основную группу вошли 40 человек (16 девочек, 24 мальчика) в возрасте 6–15 лет, которые прошли комплексное санаторно-курортное лечение с курсом нейрореабилитации с применением интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти» «Экзокисть-2». В группу сравнения (контрольную) были включены 20 детей (10 девочек, 10 мальчиков) в возрасте от 7 до 13 лет, которые проходили комплексное санаторно-курортное лечение по стандартным методикам. Нужно отметить, что на курс нейрореабилитации родители чаще записывали детей, которые имели более выраженные нарушения моторных функций. Таким образом, ограничением данного исследования служит отсутствие рандомизации при формировании групп пациентов. Комплексное санаторно-курортное лечение, которое получали обе группы больных, включало: лечебную физкультуру, массаж паретичных мышц, пелоидотерапию, гидрокинезиотерапию в термально-минеральной воде, электростимуляцию мышц, являющихся антагонистами паретичным.

Оценка показателей двигательных и речевых функций

Для оценки объема движений верхних конечностей были использованы следующие шкалы.

1. Модифицированная шкала спастичности Эшворта (Modified Ashworth Scale, MAS) для оценки врачом-неврологом уровня спастичности при определении степени сопротивления пассивным движениям по 5-балльной шкале (от 0 до 4).

2. Шкала «Возможности кисти – дети» (ABILHANDKids) — тест оценки родителями двигательной функции верхней конечности ребенка в быту (3 степени возможности выполнения навыка: «невозможно», «трудно», «легко»). Данная шкала продемонстрировала быстроту реагирования и высокую чувствительность при обнаружении изменений после интенсивных тренировок у детей с ДЦП и рекомендована для мониторинга функционального состояния пациентов в клинических

исследованиях [14]. Для оценки функций в целом, кроме стандартных показателей выполнения действий (выполнить невозможно – X0, трудно – X1 и легко – X2), использовался суммарный показатель X, рассчитываемый по формуле $X = X1 + 2X2$, диапазон которого составляет от 0 до 42 [12].

Нейропсихологическая диагностика речевой патологии у детей проводилась в соответствии с руководством [15]. Оценивался уровень моторной реализации высказывания по трем методикам.

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

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

3. Составление предложений по картинкам (ребенку демонстрируется ряд картинок, например, «мальчик моет руки», которые ему необходимо описать одним предложением). При этом учитывается правильность порядка слов, аграмматизмы и параграмматизмы. Максимальная оценка – 45 баллов.

Проведение реабилитационных процедур

Каждый ребенок основной группы проходил по 10 сеансов реабилитационных процедур с помощью комплекса, включающего НИМК и экзоскелет кисти «Экзокисть-2» (производства ООО «Экзопласт», г. Москва, по РУ № РЗН 2018/7681). Работа НИМК основана на анализе паттернов ЭЭГ, возникающих при воображении разгибания кисти. Программа обеспечивает выявление кинестетического воображения движения на основе анализа паттерна ЭЭГ, генерацию визуального сигнала обратной связи и формирование команд управления экзоскелетом кисти руки.

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 воображать 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 точном выполнении пациентом задания фиксирующая взор метка окрашивалась в зеленый цвет (интенсивность цвета зависела от параметров ЭЭГ), экзоскелет выполнял соответствующее движение, и кисть руки пассивно разгибалась. Таким образом, генерировался комбинированный зрительный и кинестетический сигнал обратной связи.

Первичную оценку объема движений верхних конечностей и показателей речевых функций у детей основной и контрольной групп проводили на второй день после поступления в санаторий. Начиная с третьего дня санаторно-курортного лечения пациенты основной группы проходили курс нейрореабилитации из 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 воображение движений каждой руки повторяли

24 раза. Доля правильных ответов классификатора (при которых срабатывал экзоскелет и пассивно разгибалась кисть) в первом–втором сеансе составляла около 60%, достигая, по мере тренировки пациента, к концу курса уровня 75–80%. На следующий день после окончания курса (14–15-й день пребывания в санатории) данные о двигательной и речевой активности у пациентов основной группы собирали вторично. На 14–15-й день санаторно-курортного лечения оценивали и показатели пациентов контрольной группы.

Остальные подробности методики описаны ранее [12, 16].

Статистическая обработка данных

Статистическую обработку данных выполняли с помощью программы Statistica 12 (StatSoft Inc.; США). Распределение исследуемых показателей оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. В случае нормального распределения данные представляли в виде среднего арифметического и стандартной ошибки среднего, а для оценки межгрупповых различий использовали *t*-критерий Стьюдента. В случае, если распределение отличалось от нормального, статистические данные представляли в виде медианы и интерквартильного размаха $Me [Q_1; Q_3]$, а для оценки межгрупповых различий использовали *U*-критерий Манна–Уитни, внутригрупповых — *T*-критерий Уилкоксона. Коэффициенты корреляции рассчитывали с применением критерия Спирмена. Различия и коэффициенты корреляции считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показатели двигательных и речевых функций до реабилитационных процедур

Средний возраст детей основной и контрольной групп составил $10,2 \pm 0,4$ и $10,1 \pm 0,3$ года соответственно, и значительно не различался ($p = 0,92$). У больных основной группы левосторонний гемипарез выявлен у 11, правосторонний — у 29 участников исследования. В группе сравнения (контрольной) у семи детей выявлен левосторонний, у 13 — правосторонний гемипарез. У пациентов с левосторонним гемипарезом показатели по суммарному показателю «Возможности кисти — дети» составили 27 [19; 34] баллов, а у детей с правосторонним гемипарезом они были несколько ниже — 23 [12; 32] баллов. Однако различия по данному показателю между пациентами с лево- и правосторонним гемипарезом не достигали уровня статистической значимости ($p = 0,27$). Также у пациентов с правосторонним гемипарезом были ниже показатели звукопроизнесения, орального праксиса и составления предложений, чем у детей с левосторонним нарушением моторики, но и в этих случаях различия не являлись статистически значимыми ($p = 0,18–0,93$).

Показатели уровня спастичности кистей рук у пациентов основной группы и группы сравнения представлены в табл. 1, выполнение бытовых навыков по шкале «Возможности кисти — дети» (баллы) — в табл. 2, а характеристики уровня моторной реализации высказывания — в табл. 3. До лечения статистически значимых различий между показателями групп не было.

Расчет коэффициентов корреляции по Спирмену показал, что показатель спастичности левой кисти, установленный до лечения у всех обследованных детей

Таблица 1. Показатели уровня спастичности кистей рук по шкале Эшворт у пациентов основной группы и группы сравнения до и после лечения (Me [Q₁; Q₃])

Спастичность (баллы)	До лечения	После лечения	<i>p</i>
Основная группа, <i>n</i> = 40			
Левая кисть	2,0 [1,5; 2,0]	1,0 [1,0; 2,0]	<i>p</i> < 0,001
Правая кисть	2,0 [2,0; 3,0]	2,0 [1,0; 2,0]	<i>p</i> < 0,001
Группа сравнения, <i>n</i> = 20			
Левая кисть	2,0 [1,0; 3,0]	1,0 [1,0; 2,0]	<i>p</i> = 0,028
Правая кисть	2,5 [1,0; 3,0]	2,0 [1,0; 2,5]	<i>p</i> = 0,018

(*n* = 60), отрицательно связан со значениями показателей орального праксиса и артикуляционной моторики, звукопроизнесения, составления предложений по картинкам ($r = -0,37, -0,36, -0,30$ при $p = 0,004, 0,005$ и $0,019$ соответственно). Показатель спастичности правой кисти был статистически значимо связан с показателями звукопроизнесения ($r = -0,49$ при $p < 0,001$), т. е. чем выше уровень спастичности кистей рук, тем ниже уровень моторной реализации высказывания. Величина суммарного показателя «Возможности кисти — дети», с одной стороны, и значения показателей орального праксиса, звукопроизнесения и составления предложений по картинкам, с другой, статистически значимо (во всех случаях $p < 0,001$) позитивно связаны — $r = 0,69, 0,62, 0,62$ соответственно, т. е. чем сохраннее функции верхних конечностей, тем выше уровень моторной реализации высказывания. Пример такой взаимосвязи между показателем функций рук и способностью к адекватному звукопроизнесению представлен на рисунке.

Показатели двигательных и речевых функций после реабилитационных процедур

Как после стандартного санаторно-курортного лечения, так и после комплексной терапии с курсом нейрореабилитации в обеих группах детей обнаружено статистически значимое снижение спастичности кисти левой и правой рук (табл. 1). Однако анализ выполнения бытовых навыков по оценкам родителей (суммарный показатель «Возможности кисти — дети») позволил выявить статистически значимое улучшение лишь в основной группе (табл. 2). Статистически значимое улучшение уровня моторной реализации высказывания тоже выявлено только у детей основной группы (табл. 3). Оральный праксис, звукопроизнесение и составление предложений по картинкам являются компонентами речевых способностей и могут быть рассмотрены как

повторяющиеся измерения, что требует применения поправки Бонферрони для четырех сравнений. Однако статистическая значимость изменений (как видно из значений *p*) сохраняется и с учетом данной поправки.

Нужно отметить, что статистически значимых различий между группами по анализируемым показателям после лечения не обнаружено. Возможной причиной является то, что, исходя из желания родителей, в основную группу, где использовалось более сложное лечение с курсом нейрореабилитации, вошли дети с несколько более низкими показателями бытовых навыков и моторной реализации высказывания. Даже после лечения их показатели не превысили статистически значимо уровень показателей группы сравнения.

В то же время об эффективности комплексного санаторно-курортного лечения, включающего реабилитационные процедуры с применением курса нейрореабилитации, дополнительно свидетельствуют следующие факты. В основной группе из 40 детей улучшение орального праксиса и артикуляции наблюдалось у 33 (83%), звукопроизнесения — у 24 (60%), составления предложений — у 31 (78%) пациента. Из 20 детей группы сравнения, прошедших лишь стандартное санаторно-курортное лечение, улучшение показателей орального праксиса и артикуляции или звукопроизнесения установлено лишь у трех (15%), а составления предложений — у четырех (20%) пациентов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами получены данные, свидетельствующие о связи показателей функционирования верхних конечностей и уровня моторной реализации высказывания. Результаты исследования подтверждают теорию о том, что действия, включающие последовательность элементов мелкой моторики, и действия, обеспечивающие производство речи, задействуют общую когнитивно-

Таблица 2. Выполнение бытовых навыков по шкале «Возможности кисти — дети» у пациентов основной группы и группы сравнения до и после лечения (Me [Q₁; Q₃])

Выполнение бытовых навыков (баллы)	До лечения	После лечения	<i>p</i>
Основная группа, <i>n</i> = 40			
Невозможно	1,5 [0,0; 7,0]	0,0 [0,0; 6,0]	<i>p</i> = 0,001
Трудно	8,0 [3,5; 14,0]	7,0 [3,0; 13,0]	<i>p</i> = 0,055
Легко	6,0 [0,0; 12,0]	7,0 [0,0; 16,0]	<i>p</i> < 0,001
Суммарный показатель	23,0 [14,0; 33,0]	27,0 [16,0; 37,0]	<i>p</i> < 0,001
Группа сравнения, <i>n</i> = 20			
Невозможно	2,0 [0,5; 4,5]	2,0 [0,0; 3,0]	<i>p</i> = 0,068
Трудно	9,0 [6,0; 13,0]	8,0 [6,0; 13,5]	<i>p</i> = 0,593
Легко	7,0 [4,0; 12,0]	7,0 [4,0; 12,0]	<i>p</i> = 0,593
Суммарный показатель	27,5 [13,5; 33,0]	27,5 [15,5; 32,5]	<i>p</i> = 0,593

Таблица 3. Уровень моторной реализации высказывания у пациентов основной группы и группы сравнения до и после лечения (Me [Q₁; Q₃])

Речевой показатель (баллы)	До лечения	После лечения	<i>p</i>
Основная группа, <i>n</i> = 40			
Оральный праксис и артикуляция	20,0 [13,0; 25,0]	24,0 [16,0; 27,0]	<i>p</i> < 0,001
Звукопроизнесение	18,0 [12,0; 26,0]	20,0 [12,0; 28,0]	<i>p</i> < 0,001
Составление предложений	22,0 [5,0; 35,0]	25,0 [6,0; 40,0]	<i>p</i> < 0,001
Группа сравнения, <i>n</i> = 20			
Оральный праксис и артикуляция	23,0 [14,0; 27,0]	23,0 [15,5; 26,0]	<i>p</i> = 0,800
Звукопроизнесение	21,5 [12,0; 25,0]	21,5 [13,0; 25,0]	<i>p</i> = 0,109
Составление предложений	24,0 [18,5; 36,0]	25,5 [19,0; 37,0]	<i>p</i> = 0,237

моторную нейронную сеть [3]. Показано, что улучшение функций рук детей с ДЦП после серии сеансов нейрореабилитации сопровождается ростом показателей орального праксиса и артикуляции, звукопроизнесения и составления предложений по картинкам. Основой таких сочетанных изменений может быть усиление процессов пластичности не только нейронных цепей моторных и сенсомоторных зон неокортекса, контролирующих планирование и выполнение сложных движений рук у пациентов, но и находящихся в непосредственной близости классических зон речеобразования (например, зоны Брока), которые демонстрируют повышенную активацию во время выполнения последовательных движений верхних конечностей [17]. Интересно отметить, что совершенствование мелкой моторики у здоровых испытуемых в недавних экспериментах по обучению изготовлению каменных орудий также приводило к развитию нервных центров и путей, участвующих в генерации речи [18, 19].

Одной из причин усиления пластичности нервной ткани может быть перестройка синтеза и связывания нейротрофических факторов, секретируемых преимущественно нейронами и глией. Показано, что успешная реабилитация детей с ДЦП с применением

интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти» тесно ассоциирована с уменьшением концентрации нейротрофического фактора мозга (Brain-Derived Neurotrophic Factor, BDNF) в периферической крови после завершения восстановительного лечения [16]. В указанной работе уменьшение концентрации BDNF можно расценивать как следствие сеансов нейрореабилитации. Считают, что такое уменьшение свидетельствует об активном связывании и интернализации данного фактора непосредственно в нервной ткани, что ведет к множественным эффектам: росту аксонов, созреванию дендритов и повышению синаптической пластичности.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило наличие у детей с ДЦП статистически значимой (*p* < 0,001) взаимосвязи между величиной суммарного показателя «Возможности кисти — дети» и значениями показателей моторной реализации высказывания (орального праксиса, звукопроизнесения и составления предложений по картинкам). Комплексная терапия с применением интерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти» привела у пациентов с ДЦП к статистически значимым (*p* < 0,001)

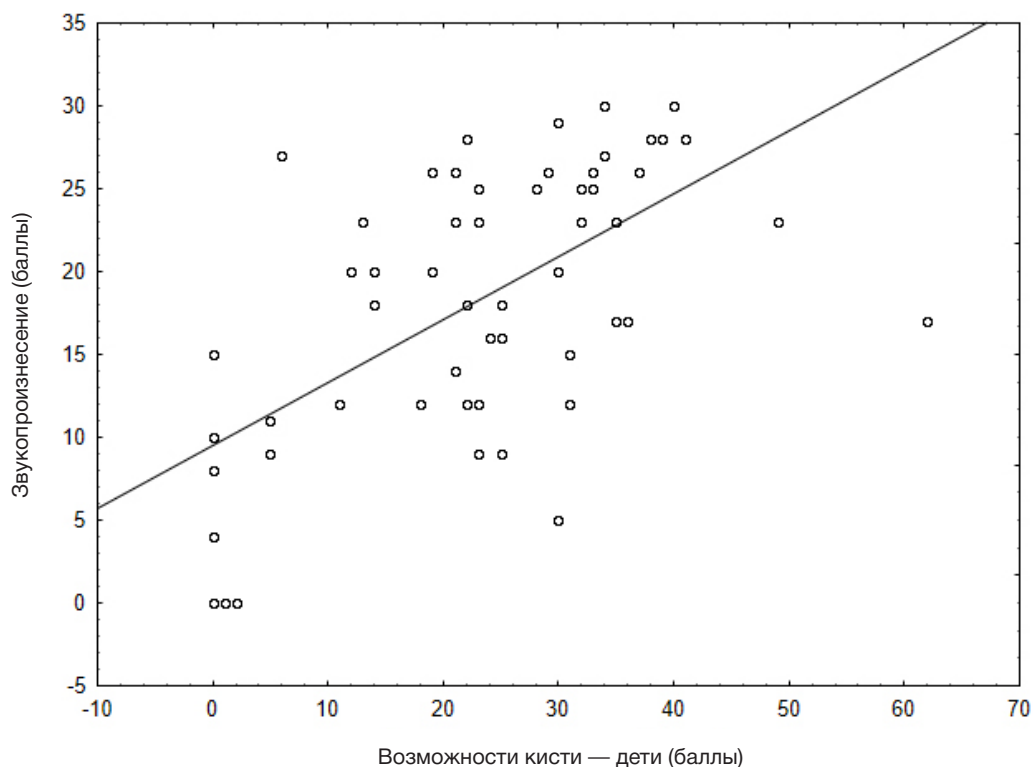


Рис. Взаимосвязь между показателями шкалы «Возможности кисти — дети» (ABILHANDKids) и звукопроизнесением у 60 детей с ДЦП

снижению спастичности кисти рук, росту суммарного показателя «Возможности кисти — дети» и показателей моторной реализации высказывания. Основой таких сочетанных изменений может быть усиление процессов пластичности нейронных цепей неокортекса,

контролирующих планирование и выполнение сложных движений рук, а также речевые процессы. Полученные данные могут быть использованы при разработке новых методов коррекции двигательной и когнитивной сферы детей с ДЦП.

Литература

- Fluss J, Lidzba K. Cognitive and academic profiles in children with cerebral palsy: A narrative review. *Ann Phys Rehabil Med.* 2020; 63 (5): 447–56. DOI: 10.1016/j.rehab.2020.01.005.
- Немкова С. А. Речевые нарушения при детском церебральном параличе: диагностика и коррекция. *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова.* 2019; 119 (5): 112–9. DOI: 10.17116/jnevro2019119051112.
- Pirila S, van der Meere J, Pentikainen T, Ruusu-Niemi P, Korpela R, Kilpinen J, et al. Language and motor speech skills in children with cerebral palsy. *J Commun Disord.* 2007; 40 (2): 116–28. DOI: 10.1016/j.jcomdis.2006.06.002.
- Koopmans C, Sakash A, Soriano J, Long HL, Hustad KC. Functional communication abilities in youth with cerebral palsy: association with impairment profiles and school-based therapy goals. *Lang Speech Hear Serv Sch.* 2022; 53 (1): 88–103. DOI: 10.1044/2021_LSHSS-21-00064.
- Vaillant E, Geytenbeek JJM, Oostrom KJ, Beckerman H, Vermeulen RJ, Buizer AI. Determinants of spoken language comprehension in children with cerebral palsy. *Disabil Rehabil.* 2023; 45 (10): 1667–79. DOI: 10.1080/09638288.2022.2072960.
- Soriano JU, Hustad KC. Speech-language profile groups in school aged children with cerebral palsy: nonverbal cognition, receptive language, speech intelligibility, and motor function. *Dev Neurorehabil.* 2021; 24 (2): 118–29. DOI: 10.1080/17518423.2020.1858360.
- 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.
- Daly I, Billinger M, Laparra-Hernández J, Aloise F, Lloria García M, Faller J, Scherer R, Müller-Putz G. On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy. *Clin Neurophysiol.* 2013; 124 (9): 1787–97. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.02.118.
- Jochumsen M, Shafique M, Hassan A, Niazi IK. Movement intention detection in adolescents with cerebral palsy from single-trial EEG. *J Neural Eng.* 2018; 15(6): 066030. DOI: 10.1088/1741-2552/aae4b8.
- Jadavji Z, Zhang J, Pafrrath B, Zewdie E, Kirton A. Can Children With Perinatal Stroke Use a Simple Brain Computer Interface? *Stroke.* 2021; 52 (7): 2363–70. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.030596.
- Kim T-W, Lee B-H. Clinical usefulness of brain-computer interface-controlled functional electrical stimulation for improving brain activity in children with spastic cerebral palsy: a pilot randomized controlled trial. *J Phys Ther Sci.* 2016; 28: 2491–94. DOI: 10.1589/jpts.28.2491.
- 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. DOI: 10.17650/2222-8721-2019-9-4-44-50.
- 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.
- Bleyenheuft Y, Gordon AM, Rameckers E, Thonnard JL, Arnould C. Measuring changes of manual ability with ABILHAND-Kids following intensive training for children with unilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2017; 59 (5): 505–11. DOI: 10.1111/dmcn.13338.
- Фотекова Т. А., Ахутина Т. В. Нейропсихологическая диагностика речевой патологии у детей. *Школьный психолог.* 2001; 37: 3–14.
- Ларина Н. В., Гордиенко А. И., Власенко С. В., Химич Н. В., Корсунская Л. Л., Павленко В. Б. Динамика концентрации нейротрофического фактора мозга в крови как предиктор долгосрочной эффективности применения программно-аппаратного интерфейса в реабилитации детей с детским церебральным параличом. *Медицинский вестник Северного Кавказа.* 2020; 15 (4): 496–9. DOI: 10.14300/mnnc.2020.15116.
- Hodgson JC, Hirst RJ, Hudson JM. Hemispheric speech lateralisation in the developing brain is related to motor praxis ability. *Dev Cogn Neurosci.* 2016; 22: 9–17. DOI: 10.1016/j.dcn.2016.09.005.
- Станкова Е. П., Кручинина О. В., Шеповальников А. Н., Гальперина Е. И. Эволюция центральных механизмов устной речи. *Журнал эволюционной биохимии и физиологии.* 2020; 56 (3): 171–84. DOI: 10.31857/S0044452920030079.
- Hecht EE, Pargeter J, Khreisheh N, Stout D. Neuroplasticity enables bio-cultural feedback in Paleolithic stone-tool making. *Sci Rep.* 2023; 13 (1): 2877. DOI: 10.1038/s41598-023-29994-y.

References

- Fluss J, Lidzba K. Cognitive and academic profiles in children with cerebral palsy: A narrative review. *Ann Phys Rehabil Med.* 2020; 63 (5): 447–56. DOI: 10.1016/j.rehab.2020.01.005.
- Nemkova SA. Rechevye narusheniya pri detskom cerebral'nom paraliche: diagnostika i korrekciya. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova.* 2019; 119 (5): 112–9. DOI: 10.17116/jnevro2019119051112. Russian.
- Pirila S, van der Meere J, Pentikainen T, Ruusu-Niemi P, Korpela R, Kilpinen J, et al. Language and motor speech skills in children with cerebral palsy. *J Commun Disord.* 2007; 40 (2): 116–28. DOI: 10.1016/j.jcomdis.2006.06.002.
- Koopmans C, Sakash A, Soriano J, Long HL, Hustad KC. Functional communication abilities in youth with cerebral palsy: association with impairment profiles and school-based therapy goals. *Lang Speech Hear Serv Sch.* 2022; 53 (1): 88–103. DOI: 10.1044/2021_LSHSS-21-00064.
- Vaillant E, Geytenbeek JJM, Oostrom KJ, Beckerman H, Vermeulen RJ, Buizer AI. Determinants of spoken language comprehension in children with cerebral palsy. *Disabil Rehabil.* 2023; 45 (10): 1667–79. DOI: 10.1080/09638288.2022.2072960.
- Soriano JU, Hustad KC. Speech-language profile groups in school aged children with cerebral palsy: nonverbal cognition, receptive language, speech intelligibility, and motor function. *Dev Neurorehabil.* 2021; 24 (2): 118–29. DOI: 10.1080/17518423.2020.1858360.
- Fedotova IR, Bobrov PD. Predposylki i osobennosti ispol'zovaniya voobrazheniya dvizheniya i interfejsa mozg-komp'yuter v reabilitacii pri detskom cerebral'nom paraliche. *Zhurnal vysshej nervnoj deyatelnosti im. I. P. Pavlova.* 2022; 72 (1): 87–99. DOI: 10.31857/S004446772201004X. Russian.

8. Daly I, Billinger M, Laparra-Hernández J, Aloise F, Lloria García M, Faller J, Scherer R, Müller-Putz G. On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy. *Clin Neurophysiol.* 2013; 124 (9): 1787–97. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.02.118.
9. Jochumsen M, Shafique M, Hassan A, Niazi IK. Movement intention detection in adolescents with cerebral palsy from single-trial EEG. *J Neural Eng.* 2018; 15(6): 066030. DOI: 10.1088/1741-2552/aae4b8.
10. Jadavji Z, Zhang J, Paffrath B, Zewdie E, Kirton A. Can Children With Perinatal Stroke Use a Simple Brain Computer Interface? *Stroke.* 2021; 52 (7): 2363–70. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.030596.
11. Kim T-W, Lee B-H. Clinical usefulness of brain-computer interface-controlled functional electrical stimulation for improving brain activity in children with spastic cerebral palsy: a pilot randomized controlled trial. *J Phys Ther Sci.* 2016; 28: 2491–94. DOI: 10.1589/jpts.28.2491.
12. Larina NV, Korsunskaya LL, Vlasenko SV. Комплекс «Экзокист'-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с испол'зованием неинвазивного интерфейса «mozg-komp'yuter». *Nervno-myshechnye bolezni.* 2019; 11 (4): 12–20. DOI: DOI: 10.17650/2222-8721-2019-9-4-44-50. Russian.
13. 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.
14. Bleyenheuft Y, Gordon AM, Rameckers E, Thonnard JL, Arnould C. Measuring changes of manual ability with ABILHAND-Kids following intensive training for children with unilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2017; 59 (5): 505–11. DOI: 10.1111/dmcn.13338.
15. Fotekova TA, Ahutina TV. Nejropsihologicheskaya diagnostika rechevoj patologii u detej. *Shkol'nyj psiholog.* 2001; (37): 3–14. Russian.
16. Larina NV, Gordienko AI, Vlasenko SV, Himich NV, Korsunskaya LL, Pavlenko VB. Dinamika koncentracii nejrotroficheskogo faktora mozga v krvi kak prediktor dolgosrochnoj effektivnosti primeneniya programmno-apparatnogo kompleksa v rehabilitacii detej s detskim cerebral'nym paralichom. *Medicinskij vestnik Severnogo Kavkaza.* 2020; 15 (4): 496–9. DOI: 10.14300/mnnc.2020.15116. Russian.
17. Hodgson JC, Hirst RJ, Hudson JM. Hemispheric speech lateralisation in the developing brain is related to motor praxis ability. *Dev Cogn Neurosci.* 2016; 22: 9–17. DOI: 10.1016/j.dcn.2016.09.005.
18. Stankova EP, Kruchinina OV, Shepovnikov AN, Galperina EI. Evolyuciya central'nyh mekhanizmov ustnoj rechi. *Zhurnal evolyucionnoj biohimii i fiziologii.* 2020; 56 (3): 171–184. DOI: 10.31857/S0044452920030079. Russian.
19. Hecht EE, Pargeter J, Khreisheh N, Stout D. Neuroplasticity enables bio-cultural feedback in Paleolithic stone-tool making. *Sci Rep.* 2023; 13 (1): 2877. DOI: 10.1038/s41598-023-29994-y.