

УДК 616.831-009.11-053.2-036.8:[615.825.6:004.358]

<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>

## Возможности реабилитации детей с синдромом ДЦП с применением роботизированных устройств и биологической обратной связи

Ларина Н.В., Павленко В.Б., Корсунская Л.Л., Дягилева Ю.О., Фалалеев А.П., Михайлова А.А., Орехова Л.С., Пономарева И.В.

Крымский федеральный университет (КФУ) им. В.И. Вернадского  
Россия, 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

### РЕЗЮМЕ

Обзор литературы посвящен систематизации имеющихся данных о применении методики биологической обратной связи, роботизированных устройств и интерфейсов «мозг – компьютер» в реабилитации детей с синдромом детского церебрального паралича (ДЦП).

**Цель** – изучить опыт применения, клиническую эффективность реабилитационных технологий у пациентов с ДЦП и возможные нейрофизиологические механизмы, лежащие в их основе. Поиск по ключевым словам (дети, ДЦП, биологическая обратная связь, роботизированные устройства, интерфейс «мозг – компьютер», экзоскелеты) был проведен с использованием баз научной литературы Pubmed, Web of Science, eLIBRARY.ru.

**Результаты.** Проведенный анализ данных литературы показывает, что в настоящее время в реабилитации детей с синдромом ДЦП активно развивается применение роботизированных устройств и интерфейсов «мозг – компьютер» с биологической обратной связью по параметрам электроэнцефалограммы и электромиограммы. Получены первые доказательства эффективности указанных методов и подходов. В то же время не полностью разработаны стандарты использования таких методов в реабилитационной практике и протоколы работы с детьми. Не всегда создавались контрольные группы из детей с ДЦП. Во многих исследованиях не оценивалась динамика нейрофизиологических и нейрохимических показателей до и после курса реабилитации. Такие данные позволили бы уточнить физиологические механизмы восстановления моторных функций и более корректно подходить к назначению реабилитационных процедур и медикаментозного лечения.

**Ключевые слова:** дети, ДЦП, биологическая обратная связь, роботизированные устройства, интерфейс «мозг – компьютер», экзоскелеты.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Обзор подготовлен в рамках выполнения темы «Разработка комплекса экзоскелета кисти с внешним программным управлением и биологической обратной связью для процедуры реабилитации детей с синдромом ДЦП» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (RFMEFI60519X0186).

**Для цитирования:** Ларина Н.В., Павленко В.Б., Корсунская Л.Л., Дягилева Ю.О., Фалалеев А.П., Михайлова А.А., Орехова Л.С., Пономарева И.В. Возможности реабилитации детей с синдромом ДЦП с применением роботизированных устройств и биологической обратной связи. *Бюллетень сибирской медицины*. 2020; 19 (3): 156–165. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>.

✉ Павленко Владимир Борисович, e-mail: [vpav55@gmail.com](mailto:vpav55@gmail.com).

## Rehabilitation possibilities for children with cerebral palsy through the use of robotic devices and biofeedback

Larina N.V., Pavlenko V.B., Korsunskaya L.L., Dyagileva Yu.O., Falaleev A.P., Mikhailova A.A., Orekhova L.S., Ponomareva I.V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University  
4, Academic Vernadsky Av., Simferopol, 295007, Crimea, Russian Federation

### ABSTRACT

This article overviews and systemizes published data on the ways of implementing different methods of biofeedback, robotic devices, and brain-computer interfaces (BCI) for rehabilitation of children with cerebral palsy (CP).

**Aim.** To survey implementation practices and clinical outcomes of rehabilitation technologies and possible neurophysiological mechanisms underlying their efficacy in patients with CP. We searched PubMed, Web of Science and eLIBRARY.ru databases for relevant publications using specified keywords.

**Results.** The analysis of relevant literature has shown that robotic technologies and BCIs with biofeedback based on electroencephalography and electromyography parameters are rapidly developing and implemented for the rehabilitation of children with CP. The first evidence of effectiveness for such methods and approaches has been found. However, there is a lack of fully developed conventional standards for the use of such rehabilitation methods and protocols in children. Control groups comprising of children with CP are often absent in such studies. In many cases, the variations of neurophysiological and neurochemical parameters before and after a course of rehabilitation are not evaluated. Having such data would help clarify physiological mechanisms underlying effective rehabilitation of motor functions and then design more adequate rehabilitation procedures and medication protocols.

**Keywords:** children, cerebral palsy, biofeedback, robotic exoskeleton, brain-computer interfaces.

**Conflict of interest.** The authors declare that there are no obvious and potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

**Source of financing.** The review was supported by the Federal Target Program of the Ministry of Science and Higher Education “Development of hand exoskeleton with external programmed control and biofeedback for rehabilitation of children with cerebral palsy” (RFMEFI60519X0186).

**For citation:** Larina N.V., Pavlenko V.B., Korsunskaya L.L., Dyagileva Yu.O., Falaleev A.P., Mikhailova A.A., Orekhova L.S., Ponomareva I.V. Rehabilitation possibilities for children with cerebral palsy through the use of robotic devices and biofeedback. *Bulletin of Siberian Medicine*. 156–165. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди заболеваний нервной системы главной причиной детской инвалидности является детский церебральный паралич [1, 2]. В Российской Федерации распространенность зарегистрированных случаев ДЦП составляет 2,2–3,3 случая на 1 000 новорожденных [3].

В современной литературе ДЦП характеризуют как группу непрогрессирующих синдромов, широко варьирующих по этиологии, манифестации клинических проявлений, их тяжести и прогнозу, обусловленных нарушением развития или повреждением двигательных центров головного мозга ребенка в антенатальном, интранатальном или неонатальном пе-

риоде [4–6]. Причины развития данного заболевания множественны. Выявлено несколько факторов риска беременности, родов и перинатального периода, среди которых – преждевременные роды, многоплодная беременность, нарушение внутриутробного развития, внутриутробное инфицирование, плацентарная патология, врожденные пороки развития, асфиксия, перинатальная инфекция, перинатальный инсульт, травмы шейного отдела позвоночника и ряд других [7].

Для клинической картины заболевания характерным является нарушение двигательной функции, связанное с неправильным развитием статокинетических рефлексов, патологией тонуса, парезами. Кроме того, вторично в течение жизни возникают изменения в нервных и мышечных волокнах, суставах,

связках, хрящах. Также нередко наблюдаются различные когнитивные и психические расстройства [8]. Выраженность таких расстройств может варьировать от легких отклонений в эмоциональной сфере до тяжелых интеллектуальных нарушений. Двигательные нарушения при ДЦП часто сочетаются с умственной отсталостью, эпилептическими припадками, трудностями обучения. Иногда у ребенка параллельно отмечаются патологические изменения со стороны зрения, слуха, чувствительности и со стороны внутренних органов, которые усугубляют степень задержки психомоторного развития [9].

В связи с разнообразием клинических проявлений ДЦП существующие медикаментозные и физиотерапевтические методы помощи таким детям оказываются не всегда эффективными. Многие авторы отмечают важность поиска и оценки эффективности новых восстановительных методик [10]. Особую актуальность в настоящее время приобретают методы реабилитации с применением биологической обратной связи (БОС), роботизированных устройств и интерфейсов «мозг – компьютер», поскольку такие методы позволяют активизировать природные физиологические ресурсы головного мозга ребенка.

## **БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРОМИОГРАММЫ**

БОС по параметрам электромиограммы (ЭМГ), или функциональное биоуправление, применяется для лечения ДЦП с 1980-х гг. [11]. Сущность метода заключается в организации тренировок активных движений с использованием зрительной и звуковой информации о выполняемом движении в режиме реального времени. Ориентируясь на такую информацию, пациент получает возможность сознательно корректировать выполняемое движение [12, 13]. В ранних исследованиях использованы автоматизированные устройства, которые звуковыми или цветовыми сигналами информировали пациентов об оптимальном уровне активации или расслабления мышц. В качестве управляющих устройствами сигналов у детей с ДЦП при выполнении движений использовалась ЭМГ мышц антагонистов (сгибателей и разгибателей кисти и пальцев, двуглавой и трехглавой мышц плеча, большеберцовой и икроножной мышц и т.д.).

В одной из таких работ [11] автоматизированное устройство было применено при лечении 53 больных в возрасте 8–14 лет со спастической диплегией. Контрольная группа насчитывала 15 человек с той же формой заболевания. В результате серии занятий (в среднем 20 сеансов по 10–30 мин) с применением БОС по ЭМГ у детей значительно улучшились функ-

циональные свойства пораженных мышц, их регуляция и координация движений, чего не наблюдалось в контрольной группе.

Недавнее исследование, проведенное в Республике Корея [14], продемонстрировало преимущества применения БОС по ЭМГ в том случае, когда сигнал обратной связи представлен наглядным изображением в среде виртуальной реальности. В исследовании приняло участие 18 детей 7–15 лет со спастической формой ДЦП и восемь здоровых детей того же возраста, показатели движений и ЭМГ-активность которых использовались в качестве контрольных значений. Все дети с ДЦП сначала прошли один сеанс БОС по ЭМГ (30 мин), в котором ЭМГ-активность бицепса или трицепса руки при сгибании и разгибании ее в локте отражалась в виде простого графика на мониторе компьютера.

После недельного перерыва проводился аналогичный по длительности сеанс БОС по ЭМГ, в котором в качестве сигнала обратной связи использована компьютерная игра, – персонаж надувает воздушный шарик. Увеличение объема шарика зависело от мощности ЭМГ-сигналов мышц антагонистов при движении рук. Такой вариант БОС приводил к значимому большему улучшению параметров движений и контроля нервно-мышечного баланса в локтевом суставе, чем использование в качестве обратной связи простого графика ЭМГ-активности. Авторы исследования считают, что при обратной связи в виде параметров видеоигры увеличивались мотивация и позитивные эмоции ребенка, а также более эффективно проходил процесс мультисенсорной интеграции для планирования и исполнения движения.

## **ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ХОДЬБЫ**

В последнее время для коррекции двигательных функций человека и помощи пациентам в социальной адаптации широко используются роботизированные устройства. Основным принципом реабилитации при использовании таких устройств является двигательное научение [15]. Наиболее физиологически адекватным средством реабилитации при двигательных нарушениях считают экзоскелеты, непосредственно управляющие движениями в суставах конечностей [16]. Такие устройства облегчают длительные тренировки, улучшают схему движений, повышают двигательную активность и выносливость. Несмотря на то, что характер движений задается извне, без биологических сигналов от тела пациента, в результате перемещений конечностей возникает поток обратной афферентации, благоприятно влияющий на состояние неокортекса.

Для коррекции ходьбы детей, страдающих ДЦП, разработаны носимые экзоскелеты ног со встроенными электродвигателями, управляемые сигналами тела ребенка. Они позволяют скорректировать нарушенную при ДЦП походку пациента с чрезмерным сгибанием в колене (crouch-ходьба). Запуск двигателей обеспечивается собственными движениями конечности ребенка с помощью механодатчиков. Такой экзоскелет был сначала протестирован на одном шестилетнем испытуемом со спастической диплегией. Результаты исследования показали, что характеристики походки ребенка улучшились. Использование экзоскелета не привело к неблагоприятным побочным эффектам – активность мышц разгибателей колена при этом не снизилась [17]. В продолжении данного исследования приняло участие шесть участников с подобной патологией в возрасте 6–19 лет [18].

После шести занятий по 2–4 ч у половины участников улучшились параметры разгибания колена. Анализ активности мозга показал, что при движениях экзоскелета сохраняется паттерн изменений электроэнцефалограммы (ЭЭГ) неокортекса ребенка, соответствующий самоинициируемому запуску и выполнению движения. Таким образом, вовлеченность коры мозга в организацию двигательных актов, по крайней мере, не снижается. Отметим, что исследования с применением данного устройства носят пока пилотный, предварительный характер, и в них приняло участие лишь небольшое количество детей с ДЦП.

В настоящее время достаточно широко применяются стационарные роботизированные устройства Lokomat (Швейцария), в состав которых входят система поддержки тела, автоматически движущиеся ортезы ног и беговая дорожка. Группа итальянских исследователей (Университет Вероны) использовала Lokomat в сочетании с традиционными методами терапии (20 сеансов роботизированной ходьбы и 20 – физиотерапии, по 60 мин каждый) в лечении небольшой группы детей – 16 мальчиков и девочек 4–18 лет [19]. После лечения выявлено повышение выносливости детей при шестиминутной ходьбе, но тест Gross Motor Function Measure (GMFM) и модифицированная шкала Эшворта не показали значимого улучшения состояния.

Наиболее представительным по количеству пациентов было ретроспективное исследование группы итальянских авторов из научно-исследовательского института IRCCS E. Medea коммуны Лекко и Детского госпиталя г. Рима [20]. Они проанализировали эффекты роботизированной реабилитации, проводимой с помощью Lokomat в 2012–2017 гг., у 72 детей

с ДЦП и 110 – с приобретенными после рождения повреждениями головного мозга, вызвавшими двигательные нарушения (возраст больных 4–18 лет). В течение 1 мес дети проходили 20 сеансов роботизированной ходьбы и 20 сеансов физиотерапии продолжительностью по 45 мин. Оценка двигательных функций с помощью теста шестиминутной ходьбы показала значимое улучшение у детей обеих групп. Однако применение теста GMFM выявило статистически значимое улучшение по сравнению с исходным состоянием лишь для группы детей с приобретенными повреждениями мозга.

В исследовании сотрудников Мюнхенского университета [21] применялась последняя версия Lokomat, позволяющая выводить на экран параметры движения в среде виртуальной реальности. Это дало возможность увеличить степень вовлеченности ребенка в контролирование своей ходьбы. В течение 24 мес 20 детей с ДЦП (средний возраст 5,9 лет) проходили три блока по 12 сеансов (продолжительность 30–60 мин) роботизированной ходьбы. При этом сохранялись все виды традиционной терапии, которые были назначены ребенку. Тест Gross Motor Function Classification System (GMFCS) показал значимое улучшение моторных функций как после каждого блока, так и после всего курса лечения.

Следует отметить, что в описанных выше исследованиях применение роботизированных устройств проводилось в комплексе с другими, традиционными методами лечения, в частности с физиотерапией. Контрольная группа из детей с ДЦП не создавалась. Для оценки реальной эффективности роботизированной ходьбы в лечении ДЦП предлагают применить рандомизированный перекрестный дизайн [22]. При этом должны сравниваться эффекты традиционной терапии и роботизированных устройств, применяемых изолированно. Однако, насколько нам известно, такие исследования пока не проводились.

## ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ДВИЖЕНИЙ РУК

Для коррекции двигательных функций рук детей с ДЦП разработан целый ряд роботизированных устройств. Наиболее популярными являются три роботизированных устройства: InMotion 2 (коммерческая версия MIT MANUS), NJIT-RAVR и CosmoBot [23].

При использовании системы InMotion 2 (рис. 1) дети с ДЦП с помощью роботизированного ортеза руки повышают точность выполнения движений по достижению цели. Ребенок обучается тренировать движения «тянуть руку к предмету» в определенных

направлениях с заданным уровнем поддержки со стороны устройства [24–26]. Сразу в нескольких исследованиях [27–29] отмечается положительная динамика после 6–8-недельного курса использования системы InMotion 2 у детей с ДЦП. Выявлено снижение мышечного тонуса и улучшение кинематических показателей: увеличение скорости и улучшение плавности движений руки.



Рис. 1. Система InMotion 2 (коммерческая версия MIT MANUS) [26]

Система NJIT-RAVR сочетает в себе роботизированную руку с играми виртуальной реальности для тренировки движений у детей с гемиплегией. Подобно InMotion2, система NJIT-RAVR может оказывать помощь или сопротивление движениям ребенка. В исследовании [30] использовалось несколько игр виртуальной реальности, например игра «достань кружку». В этой игре на экране отображается трехмерная комната с особым образом оформленными полками и столом (рис. 2).

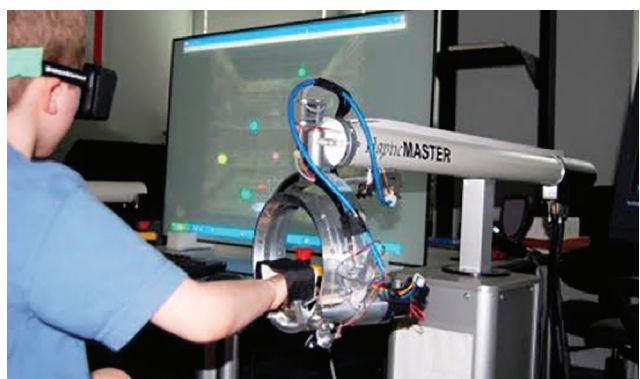


Рис. 2. Система NJIT-RAVR [30]

Цель игры – выполнять движения по размещению кружек на полках. В исследовании приняли участие четыре ребенка с ДЦП и четыре здоровых ребенка. После реабилитационного курса, состоящего из 1-часового тренинга 3 раза в неделю в течение

3 нед, отмечена положительная динамика таких показателей, как время достижения цели, увеличение показателя точности движений и улучшение траектории движения [30].

Еще одним вариантом роботизированной реабилитационной системы является система CosmoBot (рис. 3), разработанная фирмой AnthroTronix (США). Эта бесконтактная система служит для обеспечения автоматической визуальной и слуховой обратной связи с пациентом при достижении поставленных двигательных задач. Система оценивает изменение угла движения (супинацию и пронацию) по отношению к нейтральному первичному положению, которое настраивается индивидуально для каждого пациента.



*a*



*b*

Рис. 3. Система с обратной связью CosmoBot: *a* – графический интерфейс пользователя позволяет терапевтам устанавливать пороги движения ребенка, необходимые для активации движения робота; *b* – ребенок со светоотражающими маркерами для одновременного измерения движения правого плеча, локтя, предплечья и запястья во время выполнения задачи «тянуться вверх» [31]

В исследовании с помощью данной системы приняли участие шесть детей с различной степенью спастической квадриплегии и гемиплегии в возрасте 5–18 лет. Дети проходили физиотерапию и роботизированную терапию.

зированной реабилитации (перекрестный дизайн). Реабилитация с использованием системы CosmoBot проводилась в течение 20 мин 2 раза в неделю на протяжении 5 нед. После роботизированной терапии у детей улучшались показатели выполнения тренируемых движений в большей степени, чем после традиционного лечения [31].

Несмотря на положительные эффекты, выявленные при применении каждого из описанных выше роботизированных устройств, сравнить их по эффективности между собой на сегодняшний день не представляется возможным. Протоколы экспериментов в каждом исследовании были различными как по длительности сеанса, так и по продолжительности всего курса. Кроме того, некоторые исследования проводились только с использованием роботизированной терапии InMotion 2 [27–29, 32] или NJIT-RAVR с играми виртуальной реальности [30, 33, 34], другие – с использованием комбинированной роботизированной терапии InMotion 2 и инъекций ботулинического токсина типа А (ВТХ-А) [35]. В большинстве исследований дети имели разный диагноз, а объем выборки был крайне незначительным (до 10 человек). Все это накладывает существенные ограничения на возможность сопоставления результатов существующих исследований.

## **ИНТЕРФЕЙСЫ «МОЗГ – КОМПЬЮТЕР» И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ**

Эффективность реабилитационных процедур, как отмечают А.А. Фролов и соавт. [16], зависит от той степени, в которой они запускают пластические механизмы мозга по перестройке сенсомоторной системы. Для этого движения экзоскелета должны совершаться в моменты, когда мозг наиболее восприимчив к принятию периферических сигналов, а именно когда пациент пытается совершить движение. Однако такой подход не может использоваться у полностью парализованных больных или при нарушении нормальной коактивации мышц, что встречается у многих пациентов с ДЦП. В ряде работ, направленных на реабилитацию больных, перенесших инсульт [36–38], для распознавания намерений пациента использовались интерфейсы «мозг – компьютер» (ИМК), основанные на кинестетическом воображении движений.

ИМК – это программно-аппаратный комплекс, позволяющий управлять внешними техническими системами с помощью сигналов, отводимых от мозга. Общая схема ИМК включает систему для регистрации биопотенциалов и ввода их в компьютер; средства фильтрации сигналов и выбора показателей

активности, наиболее значимых для распознавания намерений человека; классификатор активности и средство сопряжения классификатора с внешним техническим устройством, которым может быть протез, экзоскелет или экран монитора [38]. При управлении ИМК испытуемый должен иметь обратную связь от технического устройства, позволяющую сравнить его действие со своим намерением. Это обеспечивает концентрацию внимания испытуемого на управлении ИМК и подкрепляет успешное выполнения задания. В качестве сигналов обратной связи обычно используется зрительная информация, и, если ИМК управляет экзоскелетом, дополнительно используется проприоцептивная афферентация.

ИМК классифицируют по необходимости проведения хирургической операции для регистрации сигналов мозга (инвазивный – неинвазивный ИМК). В качестве сигналов электрофизиологической активности для инвазивных ИМК отводят электрокортикограмму или нейронную активность. Для неинвазивных ИМК используют ЭЭГ и магнитоэнцефалограмму. По типу используемых паттернов неинвазивные ИМК делят на синхронные и асинхронные [38]. Синхронные ИМК основаны на анализе паттернов ЭЭГ-активности, возникающих в ответ на внешние стимулы, асинхронные – на анализе паттернов ЭЭГ, возникающих произвольно в соответствии с интенциями испытуемых. Большинство ИМК, управляющих движением внешнего технического устройства, в качестве ментальных задач используют воображение движений в ответ на внешнюю команду. Управление таким ИМК является эффективной процедурой восстановления двигательных функций у постинсультных и посттравматических больных [15].

Многие современные ИМК, входящие в состав систем для восстановления двигательных функций, основаны на анализе динамики сенсомоторного ритма ЭЭГ. Данный ритм включает альфа- и бета-компоненты [39]. Альфа-компонент (10–12 Гц у взрослых), или мю-альфа-ритм, предположительно отражает уровень активации постцентральной соматосенсорной коры, в то время как мю-бета-компонент (частота пика около 20 Гц) является индикатором активности прецентральной моторной коры. Реакция десинхронизация мю-ритма ЭЭГ считается признаком активации соответствующих зон коры больших полушарий. Такая реакция проявляется при выполнении движений, а также при их представлении, при наблюдении за движением другого человека, восприятии звуков, сопровождающих движения. Десинхронизация мю-ритма начинается примерно за 1,5–2 с до начала собственного движения. Частота

мю-ритма зависит от возраста испытуемых. На протяжении 1-го года жизни детей частота пика данного ритма возрастает от 3 до 8 Гц. В последующие годы рост частоты замедляется и ко взрослому возрасту стабилизируется в районе 10 Гц [40].

Считают, что существуют, по меньшей мере, две составляющие мю-альфа-ритма. Низкочастотная (8–10 Гц) – демонстрирует «неспецифическую» десинхронизацию при разных двигательных задачах. Десинхронизация ритма в диапазоне частот 10–12 Гц сфокусирована и специфически локализована, отчетливо различается при движениях пальцев руки и стопы [41]. Поскольку представительства различных органов (например, руки и ноги, правой и левой стороны тела) разнесены по коре на довольно большие расстояния, по локализации данной составляющей мю-ритма можно достаточно точно определить, движение какого исполнительного органа воображает испытуемый [38]. Классификатор активности мозга при этом активирует внешнее роботизированное устройство или запускает движения экзоскелета. Исследования показали, что намерение пациента, перенесшего инсульт, совершить движение удается успешно связать с реальными движениями, производимыми экзоскелетом [42].

Возможны два типа клинического применения ИМК: нейрореабилитация и социальная реабилитация. Нейрореабилитация предполагает восстановление двигательных функций в результате тренировки с ИМК, в то время как социальная реабилитация способствует адаптации к реальной жизни, включая самообслуживание в быту и взаимодействие с другими людьми [16, 43].

Несмотря на то, что ряд авторов [44, 45] указывает на огромную перспективу использования ИМК в реабилитации детей с ДЦП, в настоящее время имеются лишь единичные экспериментальные работы в этой области. Одной из первых исследовательских работ явилось исследование, в котором показана потенциальная возможность использования ИМК у пациентов с ДЦП на основе анализа динамики сенсомоторного ритма или зрительных вызванных ЭЭГ-потенциалов, запущенных внешней стимуляцией [46]. Выполнение пациентами заданий на представление движений верхних и нижних конечностей приводило к таким изменениям мощности мю- и бета-ритмов, которые адекватно оценивались программ-классификатором.

В работе исследователей из Южной Кореи [47] использовался ИМК, интегрированный с электростимулятором мышц разгибателей запястья. Электростимуляция запускалась на основе on-line анализа параметров ЭЭГ – при увеличении отношения мощности

бета-ритма к тета-ритму во фронтальных отведениях (рост так называемого индекса внимания) и представлении пациентом движения разгибания кисти. После серии сеансов у детей с ДЦП улучшались параметры выполнения движений рук, а также показатели концентрации внимания. Результаты данного исследования показывают, что электростимуляция, контролируемая с помощью ИМК, может эффективно использоваться в нейрореабилитации пациентов с ДЦП.

В рамках социальной реабилитации имеются данные об успешном применении ИМК, управляемого по параметрам потенциала Р300, для выполнения когнитивных заданий на компьютере у детей с тяжелыми формами ДЦП, имеющими не только моторные, но и речевые нарушения [48]. Подобные данные получены и при использовании гибридной системы ИМК, управляемой одновременно связанным с событием потенциалом Р300 и параметрами ЭМГ у людей с тяжелыми двигательными нарушениями. Такая система была разработана для управления программой-помощником для написания слов [49]. Авторы работы показали, что использование алгоритма обработки двух сигналов повышает точность написания слов и снижает количество ошибок.

Как уже отмечалось, наиболее оптимальным для нейрореабилитации считают применение ИМК вместе с управляемым им экзоскелетом [38]. В этом случае центральная моторная команда подкрепляется афферентными кинестетическими сигналами о ее исполнении экзоскелетом, т.е. дополнена БОС. Однако, насколько нам известно, подобная система применена для коррекции двигательных функций верхних конечностей у детей с ДЦП пока лишь в одном клиническом исследовании, выполненном сотрудниками Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского [50]. В этой работе применялся комплекс «Экзокисть-2» с неинвазивным ИМК (рис. 4), отводящим ЭЭГ от фронтальных, центральных и париетальных областей коры.



Рис. 4. Сеанс реабилитации с использованием комплекса «Экзокисть-2»

Данный комплекс произведен консорциумом в составе НПО «Андрюидная техника» (Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова и Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН).

В исследовании участвовали 50 мальчиков и девочек с ДЦП (основная группа – 30, группа контроля – 20) с уровнем двигательной активности по критериям классификации больших моторных функций (GMFCS) не больше III. Всем пациентам в течение 21 дня проводили стандартный курс санаторно-курортной реабилитации. Пациентам основной группы дополнительно проводили реабилитацию с использованием комплекса «Экзокисть-2» с неинвазивным ИМК. Результаты использования комплекса показали, что у 70% пациентов основной группы достоверно снижается спастичность по шкалам Эшворта (MAS) и Тардье (MTS). У половины пациентов значимо выросла сила мышц паретичной руки по шкале оценки силы мышц Британского совета медицинских исследований (MRC-SS). По модифицированной шкале Френчай (MFS) выявлено улучшение манипуляторных возможностей руки. Наиболее значимо увеличилась способность пациентов выполнять повседневные действия в быту по шкале ABILHAND-Kids. Изменение двигательных функций у пациентов группы контроля на фоне стандартной терапии не были статистически значимыми. Нужно отметить, что динамика параметров ЭЭГ и ЭМГ детей в процессе применения комплекса «Экзокисть-2» в данной публикации не анализировалась.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ данных литературы показывает, что в настоящее время повышается интерес к применению роботизированных устройств в реабилитации детей с синдромом ДЦП. Показана возможность управления роботизированными устройствами на основе анализа активности головного мозга таких пациентов. Получены доказательства эффективности различных методов и подходов, использующих принцип биологической обратной связи. В то же время не полностью разработаны стандарты использования таких методов в реабилитационной практике и протоколы работы с детьми. Во многих исследованиях не оценивается динамика нейрофизиологических показателей (ЭЭГ, ЭМГ) и нейрохимических показателей до и после курса реабилитации с применением роботизированных устройств. Такие данные позволили бы анализировать физиологические механизмы восстановления моторных функций и более корректно подходить к назначению реабилитационных процедур и медикаментозного лечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson A. Prevalence and characteristics of children with cerebral palsy in Europe. *Dev. Med. Child Neurol.* 2002; 44 (9): 633–640.
2. Батышева Т.Т., Быкова О.В., Виноградов А.В. Детский церебральный паралич – современные представления о проблеме (обзор литературы). *Русский медицинский журнал.* 2012; 8: 401–405.
3. Детский церебральный паралич у детей. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации; 2016. <https://www.pediatr-russia.ru>.
4. Бадалян Л.О., Журба Л.Т., Тимонина О.В. Детские церебральные параличи. Киев: Здоровье, 1988: 328.
5. Peacock J. Cerebral palsy. Mankato MN: Capstone Press, 2000: 64.
6. Комфорт А.В., Семенова Ж.Б. Селективная дорсальная ризотомия в коррекции спастического синдрома у больных ДЦП: исторические аспекты (обзор литературы). *Нейрохирургия и неврология детского возраста.* 2016; 3 (49): 75–86.
7. Исаева Р.Б., Сейсебаева Р.Ж., Жакупова М.Н., Каржаубаева Ш.Е., Мырзабекова Г.Т., Нурбақыт А.Н., Ансабай К.Р., Рахимова А.Г., Болат А.Н., Калдаров С.О., Нурымбетова З.С. Факторы риска ДЦП в неонатальном периоде. *Вестник КазНМУ.* 2018; (3): 69–74.
8. Немкова С.А., Маслова О.И. Эффективность применения метода динамической проприоцептивной коррекции у больных детским церебральным параличом с когнитивными нарушениями. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2013; 8: 26–32.
9. Bjornson K., Zhou C., Fatone S., Orendurff M., Stevenson R., Rashid S. The Effect of Ankle Foot Orthoses on Community Based Walking in Cerebral Palsy: A Clinical Pilot Study. *Pediatr. Phys. Ther.* 2016; 28 (2): 179–186. DOI: 10.1097/PEP.0000000000000242.
10. Варфоломеева З.С., Подоляка О.Б., Панова Н.А., Добрякова В.А. Оценка двигательных умений подростков с ДЦП в процессе гидрореабилитации. *Здоровье и образование в 21 веке.* 2017; 19 (11): 203–234. DOI: 10.26787/nyd-ha-2226-7425-2017-19-11-230-234.
11. Богданов О.В., Варман Б.Г., Алиев А.Т. Восстановление двигательных расстройств с помощью приемов функционального биоуправления. *Журнал невропатологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 1985; 85 (3): 359–365.
12. Тупиков М.В., Тупиков В.А., Чурилов Н.М. Применение метода функционального биоуправления при хирургическом лечении двигательных нарушений у детей с ДЦП. *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2014; 10 (159): 135–144.
13. He M.X., Lei C.J., Zhong D.L., Liu Q.C., Zhang H., Huang Y.J., Li Y.X., Liu X.B., Li J., Jin R.J., Wan L. The effectiveness and safety of electromyography biofeedback therapy for motor dysfunction of children with cerebral palsy: A protocol for systematic review and meta-analysis. *Medicine (Balt.).* 2019; 98 (33): e16786. DOI: 10.1097/MD.00000000000016786.
14. Yoo J.W., Lee D.R., Cha Y.J., You S.H. Augmented effects of EMG biofeedback interfaced with virtual reality on neuromuscular control and movement coordination during reaching in children with cerebral palsy. *NeuroRehab.* 2017; 40 (2): 175–185. DOI: 10.3233/NRE-161402.



15. Королева Е.С., Алифирова В.М., Латыпова А.В., Чебан С.В., Отт В.А., Бразовский К.С., Толмачев И.В., Бразовская Н.Г., Сёмкина А.А., Катаева Н.Г. Принципы и опыт применения роботизированных реабилитационных технологий у пациентов после инсульта. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019; 18 (2): 223–233. DOI: 10.20538/1682-0363-2019-2-223–233.
16. Фролов А.А., Козловская И.Б., Бирюкова Е.В., Бобров П.Д. Роботизированные устройства в реабилитации после инсульта. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2017; 67 (4): 394–413. DOI: 10.7868/S004446771704-0017.
17. Lerner Z.F., Damiano D.L., Park H.S., Gravunder A.J., Bulea T.C. A robotic exoskeleton for treatment of crouch gait in children with cerebral palsy: design and initial application. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.* 2017; 25 (6): 650–659. DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2595501.
18. Bulea T.C., Lerner Z.F., Gravunder A.J., Damiano D.L. Exergaming with a pediatric exoskeleton: facilitating rehabilitation and research in children with cerebral palsy. *Int. Conf. Rehabil. Robot. (ICORR)*. 2017: 1087–1093. DOI: 10.1109/ICORR.2017.8009394.
19. Digiacoimo F., Tamburin S., Tebaldi S., Pezzani M., Tagliaferro M., Casale R., Bartolo M. Improvement of motor performance in children with cerebral palsy treated with exoskeleton robotic training: A retrospective explorative analysis. *Restor. Neurol. Neurosci.* 2019; 37 (3): 239–244. DOI: 10.3233/RNN-180897.
20. Beretta E., Storm F.A., Strazzer S., Frascarelli F., Petrarca M., Colazza A., Cordone G., Biffi E., Morganti R., Maghini C., Piccinini L., Reni G., Castelli E.E. Effect of robot-assisted gait training in a large population of children with motor impairment due to cerebral palsy or acquired brain injury. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2020; 101 (1): 106–112. DOI: 10.1016/j.apmr.2019.08.479.
21. Weinberger R., Warken B., König H., Vill K., Gerstl L., Borggraefe I., Heinen F., von Kries R., Schroeder A.S. Three by three weeks of robot-enhanced repetitive gait therapy within a global rehabilitation plan improves gross motor development in children with cerebral palsy – a retrospective cohort study. *Eur. J. Paediatr. Neurol.* 2019; 23 (4): 581–588. DOI: 10.1016/j.ejpn.2019.05.003.
22. Ammann-Reiffer C., Bastiaenen C.H., Meyer-Heim A.D., van Hedel H.J. Effectiveness of robot-assisted gait training in children with cerebral palsy: a bicenter, pragmatic, randomized, cross-over trial (PeLoGAIT). *BMC Pediatrics*. 2017; 17(1): 64. DOI: 10.1186/s12887-017-0815-y.
23. Chen Y.P., Howard A.M. Effects of robotic therapy on upper-extremity function in children with cerebral palsy: A systematic review. *Dev. Neurorehabil.* 2016; 19(1): 64–71. DOI: 10.3109/17518423.2014.899648.
24. Krebs H.I., Ladenheim B., Hippolyte C., Monterosso L., Mast J. Robot-assisted task-specific training in cerebral palsy. *Dev. Med. Child Neurol.* 2009; 51(4): 140–145. DOI: 10.1111/j.1469-8749.2009.03416.x.
25. Fasoli S.E., Ladenheim B., Mast J., Krebs H.I. New horizons for robotassisted therapy in pediatrics. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 2012; 91 (11): S280–S289. DOI: 10.1097/PHM.0b013e31826bcff4.
26. Seth D., Vardhan Varma V.K.H., Anirudh P., Kalyan P. Preliminary design of soft exo-suit for arm rehabilitation. *Lect. Notes Comput. Sci.* 2019; 284–294. DOI: 10.1007/978-3-030-22219-2\_22
27. Fasoli S.E., Fragala-Pinkham M., Hughes R., Hogan N., Krebs H.I., Stein J. Upper limb robotic therapy for children with hemiplegia. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 2008; 87 (11): 929–936. DOI: 10.1097/PHM.0b013e31818a6aa4.
28. Frascarelli F., Masia L., Di Rosa G., Cappa P., Petrarca M., Castelli E., Krebs H.I. The impact of robotic rehabilitation in children with acquired or congenital movement disorders. *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.* 2009; 45 (1): 135–141.
29. Krebs H.I., Fasoli S.E., Dipietro L., Fragala-Pinkham M., Hughes R., Stein J., Hogan N. Motor learning characterizes habilitation of children with hemiplegic cerebral palsy. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2012; 26 (7): 855–860. DOI: 10.1177/1545968311433427.
30. Qiu Q., Ramirez D.A., Saleh S., Fluet G.G., Parikh H.D., Kelly D., Adamovich S.V. The New Jersey Institute of Technology Robot-Assisted Virtual Rehabilitation (NJIT-RAVR) system for children with cerebral palsy: A feasibility study. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2009; 6: 40. DOI: 10.1186/1743-0003-6-40.
31. Wood K.C., Lathan C.E., Kaufman K.R. Feasibility of gestural feedback treatment for upper extremity movement in children with cerebral palsy. *IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng.* 2013; 21 (2): 300–305. DOI: 10.1109/TNSRE.2012.2227804.
32. Masia L., Frascarelli F., Morasso P., Di Rosa G., Petrarca M., Castelli E., Cappa P. Reduced short term adaptation to robot generated dynamic environment in children affected by cerebral palsy. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2011; 8: 28. DOI: 10.1186/1743-0003-8-28.
33. Fluet G.G., Qiu Q., Kelly D., Parikh H.D., Ramirez D., Saleh S., Adamovich S.V. Interfacing a haptic robotic system with complex virtual environments to treat impaired upper extremity motor function in children with cerebral palsy. *Dev. Neurorehabil.* 2010; 13 (5): 335–345. DOI: 10.3109/17518423.2010.501362.
34. Qiu Q., Adamovich S., Saleh S., Lafond I., Merians A.S., Fluet G.G. A comparison of motor adaptations to robotically facilitated upper extremity task practice demonstrated by children with cerebral palsy and adults with stroke. *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.* 2011; 2011: 5975431. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975431.
35. Fasoli S.E., Fragala-Pinkham M., Hughes R., Krebs H.I., Hogan N., Stein J. Robotic therapy and botulinum toxin type A: A novel intervention approach for cerebral palsy. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* 2008; 87 (12): 1022–1025. DOI: 10.1097/PHM.0b013e31817fb346.
36. Котов С.В., Турбина Л.Г., Бобров П.Д., Фролов А.А., Павлова О.Г., Курганская М.Е., Бирюкова Е.В. Реабилитация больных, перенесших инсульт, с помощью биоинженерного комплекса «интерфейс мозг–компьютер + экзоскелет». *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2014; 114 (12–2): 66–72.
37. Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А., Супонева Н.А., Пирадов М.А., Фролов А.А. Интерфейс мозг–компьютер: первый опыт клинического применения в

- России. *Физиология человека*. 2016; 42 (1): 31–39. DOI: 10.7868/S0131164616010136.
38. Фролов А.А., Бобров П.Д. Интерфейс мозг-компьютер: нейрофизиологические предпосылки и клиническое применение. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2017; 67 (4): 365–376. DOI: 10.7868/S0044467717040013.
39. Démas J., Bourguignon M., Périvier 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.* 2019; S18770657(19): 30094–30096. DOI: 10.1016/j.rehab.2019.06.007.
40. Berchicci M., Zhang T., Romero L., Peters A., Annett R., Teuscher U. Development of mu rhythm in infants and pre-school children. *Dev. Neurosci.* 2011; 33: 130–143. DOI: 10.1159/000329095.
41. Pfurtscheller G., Neuper C., Krausz G. Functional dissociation of lower and upper frequency mu rhythms in relation to voluntary limb movement. *Clin. Neurophysiol.* 2000; 111: 1873–1879. DOI: 10.1016/s1388-2457(00)00428-4.
42. Frolov A.A., Biryukova E.V., Bobrov P.D., Alexandrov A.V., Húsek D., Mokienko O.A. Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Netw. World.* 2017; 27(1): 107–137. DOI: 10.14311/NNW.2017.27.006.
43. Котов С.В., Бирюкова Е.В., Турбина Л.Г., Кондур А.А., Зайцева Е.В. Динамика восстановления у пациентов с постинсультными двигательными нарушениями при повторных курсах нейрореабилитации с применением экзоскелета кисти, управляемого интерфейсом мозг-компьютер. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2017; 67(4): 445–452. DOI: 10.7868/S0044467717040062.
44. Ponce P., Molina A., Balderas D.C., Grammatikou D. Brain computer interfaces for cerebral palsy. In book «Cerebral palsy challenges for the future»; ed. by Emira Suraka. 2014. DOI: 10.5772/57084.
45. Jochumsen M., Shafique M., Hassan A., Niazi I.K. 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.
46. 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: 1787–1797. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.02.118.
47. 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: 2491–2494. DOI: 10.1589/jpts.28.2491.
48. Alcaide-Aguirre R.E., Warschawsky S.A., Brown D., Aref A., Huggins J.E. Asynchronous brain-computer interface for cognitive assessment in people with cerebral palsy. *J. Neural Eng.* 2017; 14: 066001. DOI: 10.1088/1741-2552/aa7fc4.
49. Riccio A., Holz E.M., Arico P., Leotta F., Aloise F., Desideri L., Rimondini M., Kubler A., Mattia D., Cincotti F. Hybrid P300-Based Brain-Computer Interface to Improve Usability for People With Severe Motor Disability: Electromyographic Signals for Error Correction During a Spelling Task. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2015; 96: 54–61. DOI: 10.1016/j.apmr.2014.05.029.
50. 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». *Неврологические болезни*. 2019; 9 (4): 44–50. DOI: 10.17650 / 2222-8721-2019-9-4-44-50.

## Сведения об авторах

**Ларина Наталья Валерьевна**, канд. мед. наук, ассистент, кафедра нервных болезней и нейрохирургии, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0002-6996-4823.

**Павленко Владимир Борисович**, д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой общей психологии и психофизиологии, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0003-3311-3688.

**Корсунская Лариса Леонидовна**, д-р мед. наук, зав. кафедрой нервных болезней и нейрохирургии, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0003-0958-130X.

**Дягилева Юлия Олеговна**, канд. биол. наук, доцент, кафедра общей психологии и психофизиологии, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0002-8906-7740.

**Фалалеев Андрей Павлович**, д-р техн. наук, и.о. ректора КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0003-3624-4544.

**Михайлова Анна Андреевна**, канд. биол. наук, ст. преподаватель, кафедра физиологии человека и животных и биофизики, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0002-6386-9147.

**Орехова Лилия Сергеевна**, вед. специалист по научно-аналитической работе, Таврическая академия, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0003-0353-641X.

**Пономарева Ирина Валерьевна**, аспирант, кафедра нервных болезней и нейрохирургии, КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь. ORCID 0000-0003-4092-4534.

(✉) Павленко Владимир Борисович, e-mail: vpav55@gmail.com.

Поступила в редакцию 04.03.2020

Подписана в печать 16.06.2020