

ISSN 2949-5873 (print)
ISSN 2949-5881 (online)

Реабилитология

2025 | Том 3 | № 4

<https://rehabilitology.com>



2025 | Vol 3 | No 4

Journal of Medical Rehabilitation

Данная интернет-версия статьи была скачана с сайта <https://rehabilitology.com>. Не предназначено для использования в коммерческих целях.
Информацию о репринтах можно получить в редакции. Тел.: +7 (495) 649-54-95; эл. почта: info@irbis-1.ru.

Место комплексов с биологической обратной связью в реабилитации пациентов с детским церебральным параличом: систематический обзор

Л.Р. Кадырова¹, А.Н. Караисаев²

¹ Казанская государственная медицинская академия – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Муштары, д. 11, Казань 420012, Российская Федерация)

² Государственное автономное учреждение здравоохранения Тюменской области «Областной лечебно-реабилитационный центр» (ул. Щорса, д. 11/2, Тюмень 625048, Российская Федерация)

Для контактов: Анар Нариман оглы Караисаев, e-mail: anarchik_2001@mail.ru

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Детский церебральный паралич (ДЦП) является ведущей причиной стойкой инвалидности в детском возрасте с распространенностью 2–3 случая на 1 тыс. живорожденных. Традиционные методы реабилитации часто не обеспечивают объективной обратной связи в режиме реального времени. Технологии биологической обратной связи (БОС) представляют собой перспективное направление, позволяющее активизировать нейропластичность через сознательный контроль физиологических параметров.

Цель: критический анализ и синтез имеющихся данных о месте и эффективности БОС-систем в структуре комплексной реабилитации пациентов с ДЦП.

Материал и методы. Систематический поиск публикаций за период с 1965 г. по ноябрь 2025 г. проведен в базах данных PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Cochrane Library, CINAHL, PEDro, Embase, КиберЛенинка и eLibrary. Критерии включения: исследования с применением БОС-технологий у пациентов с ДЦП, измеримые исходы моторных функций. Качество исследований оценивали по шкалам PEDro, Даунса и Блэка, SCED и Cochrane RoB 2.

Результаты. В анализ вошли 27 работ: 11 систематических обзоров и метаанализов, 7 рандомизированных контролируемых исследований и 9 первичных исследований других дизайнов, охватывающих в совокупности более 1 тыс. участников. Показано, что миографическая БОС статистически значимо улучшает скорость ходьбы ($p < 0,05$) и функцию верхних конечностей (уровень доказательности 1b–2a). Стабилометрические системы эффективны в коррекции постурального контроля (уровень 2a). Нейрофидбэк демонстрирует потенциал для модуляции нейропластичности у пациентов с тяжелыми формами ДЦП при ограниченной доказательной базе (уровень 2b–3).

Заключение. БОС-комплексы являются эффективным дополнением к традиционной физической терапии при ДЦП, обеспечивая объективизацию прогресса и высокую мотивацию пациентов. Приоритетами остаются стандартизация протоколов вмешательств и расширение доступа к портативным БОС-системам для домашнего применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

детский церебральный паралич, биологическая обратная связь, реабилитация, электромиография, стабилометрия, нейрофидбэк, систематический обзор

Для цитирования

Кадырова Л.Р., Караисаев А.Н. Место комплексов с биологической обратной связью в реабилитации пациентов с детским церебральным параличом: систематический обзор. *Реабилитология*. 2025; 3 (4): 252–262. <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.52>.

Role of biofeedback systems in rehabilitation of patients with cerebral palsy: a systematic review

L.R. Kadyrova¹, A.N. Karaisaev²

¹ Kazan State Medical Academy – branch of Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (11 Mushtari, Kazan 420012, Russian Federation)

² Regional Treatment and Rehabilitation Center (11/2 Shchors Str., Tyumen 625048, Russian Federation)

Corresponding author: Anar N. Karaisaev, e-mail: anarchik_2001@mail.ru

ABSTRACT

Background. Cerebral palsy (CP) is the leading cause of childhood disability with a prevalence of 2–3 cases per 1,000 live births. Traditional rehabilitation methods often fail to provide objective real-time feedback. Biofeedback (BF) technologies represent a promising approach that allows neuroplasticity to be activated through conscious control of physiological parameters.

Objective: Critical review and synthesis of available evidence on the role and effectiveness of BF systems in comprehensive rehabilitation of CP patients.

Material and methods. A systematic search was conducted across PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Cochrane Library, PEDro, Embase, CyberLeninka, and eLibrary databases. The search depth was from 1965 to November 2025. The inclusion criteria were: studies that employed BF technologies in CP patients and reported measurable motor outcomes. The quality of the conducted research was assessed using the PEDro, Downs and Black, SCED scales, as well as the Cochrane RoB 2 tool.

Results. In total, 27 publications were selected for analysis, including 11 systematic reviews and meta-analyses, 7 randomized controlled trials, and 9 primary studies of other designs, covering a total of more than 1,000 participants. EMG biofeedback statistically significantly improves gait velocity ($p < 0.05$) and upper extremity function (evidence level 1b–2a). Stabilometric systems are effective in correcting postural control (level 2a). Neurofeedback demonstrates potential for neuroplasticity modulation in patients with severe CP, albeit with a limited evidence base (level 2b–3).

Conclusion. BF systems are an effective adjunct to conventional physical therapy in CP, providing objective progress monitoring and high patient motivation. Standardization of intervention protocols and expanding access to portable BF systems for home-based use remain priority areas.

KEYWORDS

cerebral palsy, biofeedback, rehabilitation, electromyography, stabilometry, neurofeedback, systematic review

For citation

Kadyrova L.R., Karaisaev A.N. Role of biofeedback systems in rehabilitation of patients with cerebral palsy: a systematic review. *Reabilitologia / Journal of Medical Rehabilitation*. 2025; 3 (4): 252–262 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.52>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Детский церебральный паралич (ДЦП) представляет собой группу постоянных расстройств развития движения и поддержания позы, обусловленных непрогрессирующими повреждениями формирующегося головного мозга плода или младенца [1]. По данным систематического обзора и метаанализа, охватывающего популяционные регистры ряда стран, распространенность ДЦП составляет от 2,0 до 3,5 случая на 1 тыс. живорожденных, что соответствует статусу наиболее частой причины стойкой двигательной инвалидности в детском возрасте [2]. Это состояние характеризуется персистирующими нарушениями развития движений и поддержания позы, которые приводят к ограничению функциональной активности.

Несмотря на непрогрессирующий характер первичного поражения нервной системы, клинические проявления (спастичность (до 80% случаев), мышечная слабость, нарушения координации и баланса) имеют тенденцию

к трансформации по мере роста и развития ребенка, что требует непрерывного реабилитационного сопровождения на протяжении всей жизни [3].

Традиционные подходы к реабилитации, включая нейроразвивающую терапию, метод Бобат и Войта-терапию, долгое время доминировали в клинической практике. Однако в последние десятилетия в рамках доказательной медицины возникла дискуссия относительно их эффективности как изолированных методов воздействия.

Скопинг-обзор в области нейрофидбэка с применением интерфейса «мозг – компьютер» (англ. brain-computer interface, BCI) при непрогрессирующих неврологических расстройствах, включая ДЦП, свидетельствует о том, что задача-специфические протоколы с обратной связью в реальном времени демонстрируют потенциал для улучшения моторного контроля, хотя доказательная база по данной популяции все еще формируется [4].

Существенным ограничением традиционных техник является их часто пассивный характер, при котором ре-

бенок не получает объективной, количественно измеряемой информации о качестве выполнения моторной задачи в режиме реального времени [5]. В этой связи внедрение технологий биологической обратной связи (БОС) рассматривается как эволюционный шаг в детской нейрореабилитации.

Метод БОС базируется на принципах прикладной психофизиологии и теории моторного обучения [6]. Он заключается в регистрации физиологических параметров организма (электрической активности мышц, ритмов головного мозга, показателей походки или поструральных колебаний) с помощью специальных датчиков и преобразовании этой информации в доступные для восприятия пациента сигналы – зрительные, слуховые или тактильные [7]. Таким образом, БОС выступает в роли дополнительного сенсорного канала, замещая или дополняя дефицитарную внутреннюю проприоцептивную афферентацию у детей с церебральными поражениями [8].

БОС-терапия получила широкое распространение в реабилитации детей с ДЦП благодаря игровому формату выполнения упражнений, повышающему мотивацию к лечению, и возможности объективной регистрации прогресса [9, 10]. Методика прошла детальную клиническую апробацию за последние 15 лет и включена в профильные стандарты оказания медицинской помощи в ряде стран [11].

Цель – критический анализ и синтез имеющихся данных о месте и эффективности БОС-систем в структуре комплексной реабилитации пациентов с ДЦП.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ / MATERIAL AND METHODS

Исследовательский вопрос / Research question

В соответствии с методологией доказательной медицины сформулирован исследовательский вопрос в формате PICO (англ. Population, Intervention, Comparison, Outcome):

– P – пациенты детского и подросткового возраста (0–18 лет, с включением молодых взрослых до 47 лет в некоторых исследованиях) с подтвержденным диагнозом ДЦП различных клинических форм (спастическая диплегия, гемиплегия, квадриплегия, атактическая и дискинетическая формы) и уровней I–V по классификации двигательных нарушений (англ. Gross Motor Function Classification System, GMFCS);

– I – реабилитационные вмешательства, включающие применение различных модальностей БОС: электромиографической (ЭМГ), электроэнцефалографической (ЭЭГ), стабилметрической (БОС по опорной реакции) и кинематической (анализ движений и походки), в т.ч. роботизированные комплексы с БОС-компонентом;

– C – сравнение с контрольными группами, проходящими стандартную физическую терапию (англ. conventional physical therapy), лечебную физкультуру, массаж, медикаментозное лечение (включая ботулинотерапию) или без специфического вмешательства;

– O – первичные исходы, включающие показатели по тестам оценки моторной функции (англ. Gross Motor Function Measure, GMFM) и качества навыков верхней

конечности (англ. Quality of Upper Extremity Skills Test, QUEST), параметры походки (скорость, длина шага, кинематические углы), поструральный контроль (амплитуда и скорость колебаний центра давления) и уровень спастичности (шкалы Ашворта и Тардые); вторичные исходы, включающие оценку функции верхних конечностей, когнитивных функций, повседневной активности и качества жизни.

Таким образом, сформулирован исследовательский вопрос: какова эффективность БОС-комплексов в улучшении двигательных функций у детей с ДЦП по сравнению с традиционными методами реабилитации?

Дизайн исследования / Study design

Исследование выполнено в формате систематического обзора литературы в соответствии с рекомендациями PRISMA 2020 [12]. Синтез данных включал два уровня: первичный – анализ ранее опубликованных систематических обзоров и метаанализов по применению БОС-технологий при ДЦП; вторичный – дополнение полученных данных результатами первичных исследований высокого методологического качества (14 рандомизированных и клинических исследований, 2 когортных исследования), опубликованных после даты поиска ключевых обзоров, с целью актуализации выводов. Выбор такого дизайна обусловлен:

– наличием значительного массива опубликованных систематических обзоров и метаанализов по применению БОС-технологий при ДЦП, обеспечивающих основу для синтеза доказательств;

– необходимостью интеграции и сопоставления результатов, охватывающих различные модальности БОС (ЭМГ-БОС, стабилметрия, ЭЭГ-БОС/нейрофидбэк, виртуальная реальность (англ. virtual reality, VR), роботизированные системы);

– задачей оценки согласованности доказательной базы и выявления противоречий между существующими обзорами.

Базы данных / Databases

Для обеспечения максимального охвата релевантных публикаций проведен систематический поиск в международных и русскоязычных электронных базах данных без временных ограничений (до ноября 2025 г.). Основной массив высококачественных исследований по применению БОС-технологий при ДЦП опубликован в последнее десятилетие, что отражает относительно недавнее становление данного направления как доказательной практики.

Международные базы данных:

– PubMed/MEDLINE – основной ресурс по биомедицинской литературе;

– Scopus и Web of Science – для междисциплинарного охвата технологических аспектов БОС;

– Cochrane Central Register of Controlled Trials (CENTRAL) – для поиска высококачественных рандомизированных контролируемых исследований (РКИ);

– Cumulative Index to Nursing and Allied Health Literature (CINAHL) – специализированная база по реабилитации;

- Physiotherapy Evidence Database (PEDro) – ресурс, фокусирующийся на доказательной физиотерапии;
- Embase – для расширенного поиска клинических исследований.

Русскоязычные базы данных:

- КиберЛенинка;
- eLibrary.

Стратегия поиска / Search strategy

Стратегия поиска была адаптирована для каждой базы с использованием логических операторов (AND, OR) и метасимволов.

Англоязычные поисковые запросы:

- (cerebral palsy OR spastic diplegia OR CP) AND (biofeedback OR neurofeedback OR electromyography feedback OR EMG biofeedback) AND (rehabilitation OR therapy OR motor learning);
- (cerebral palsy) AND (stabilometry OR posturography OR balance training) AND (visual feedback OR auditory feedback);
- (cerebral palsy) AND (robot-assisted therapy OR robotic rehabilitation OR exoskeleton) AND (biofeedback);
- (cerebral palsy) AND (gait training OR locomotion) AND (real-time feedback OR kinematic feedback);

Русскоязычные поисковые запросы:

- «детский церебральный паралич» И «биологическая обратная связь»;
- «ДЦП» И «БОС-терапия» И «реабилитация»;
- «церебральный паралич» И («ЭМГ-БОС» ИЛИ «стабилометрия» ИЛИ «нейрореабилитация»);
- «роботизированная механотерапия» И «ДЦП»;
- «нейрофидбэк» И «детский церебральный паралич».

Дополнительно проводили ручной поиск в списках литературы включенных обзоров и оригинальных статей (метод «снежного кома»).

Критерии включения и исключения / Inclusion and exclusion criteria

Применяли следующие критерии включения:

- типы исследований: систематические обзоры и метаанализы, РКИ, нерандомизированные контролируемые исследования (квазиэкспериментальные и кроссоверные), проспективные когортные исследования, серии клинических случаев с числом участников более 3 (кросс-секционные исследования в анализ не включали ввиду невозможности оценки динамики вмешательства);
- участники: пациенты с подтвержденным диагнозом ДЦП любого возраста (преимущественно дети и подростки 0–18 лет) без ограничений по уровню GMFCS;
- вмешательство: применение технологий БОС (любой модальности) в качестве основного метода или компонента комплексной программы реабилитации продолжительностью не менее 4 нед;
- измеримые исходы: моторные функции, параметры походки, мышечный тонус, функциональная активность, качество жизни;
- языки: публикации на английском и русском языках.

Критерии исключения:

- исследования с участием животных;

- работы, в которых БОС использовалась только для диагностики, а не для тренировочного процесса;

- обзоры без оригинальных данных, редакционные статьи, письма редактору;

- отчеты о клинических случаях ($n \leq 3$) и тезисы конференций, не содержащие полных данных для анализа;

- наличие тяжелых сопутствующих когнитивных нарушений, препятствующих пониманию инструкций БОС-тренинга;

- исследования с комбинированными вмешательствами без возможности выделения эффекта БОС.

Процесс отбора исследований / Study selection process

Процесс отбора проводился в два этапа согласно PRISMA 2020:

- скрининг по названиям и аннотациям;
- оценка полнотекстовых статей по критериям включения/исключения.

Два независимых рецензента оценивали каждую публикацию. Все разногласия решали путем консенсуса. Для систематизации процесса использовали инструменты управления библиографией (Mendeley).

Процесс отбора исследований представлен на **рисунке 1**. В финальный анализ вошли данные систематических обзоров и метаанализов, первичных исследований (РКИ, квазиэкспериментальные исследования и серии клинических случаев).

Оценка риска систематической ошибки / Assessing the risk of systematic error

Качество включенных исследований оценивали по нескольким шкалам в зависимости от дизайна:

- шкала PEDro для оценки методологического качества РКИ в области физиотерапии (9–10 баллов – отличное качество, 6–8 баллов – хорошее, 4–5 баллов – удовлетворительное, <4 баллов – низкое) [13];

- контрольный список Downs and Black (англ. Downs and Black Checklist) для оценки как рандомизированных, так и нерандомизированных исследований [14];

- шкала SCED (англ. Single-Case Experimental Design Scale) для оценки исследований с единичными случаями или малых серий [15];

- версия 2 инструмента Cochrane Risk of Bias (RoB 2) для детального анализа систематических ошибок, связанных с рандомизацией, ослеплением и отчетностью [13];

- система GRADE (англ. Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation) для оценки достоверности доказательств по критериям дизайна исследования, риска систематической ошибки, несогласованности результатов, неточности, косвенности доказательств [1].

Метод качественного синтеза / Qualitative synthesis method

Ввиду выраженной гетерогенности протоколов (вариабельность частоты сеансов от 2 до 5 раз в неделю, длительности курсов от 4 до 20 нед, типов оборудования и целевых групп пациентов) формальный метаанализ не проводили. Выполнен качественный (нарративный)

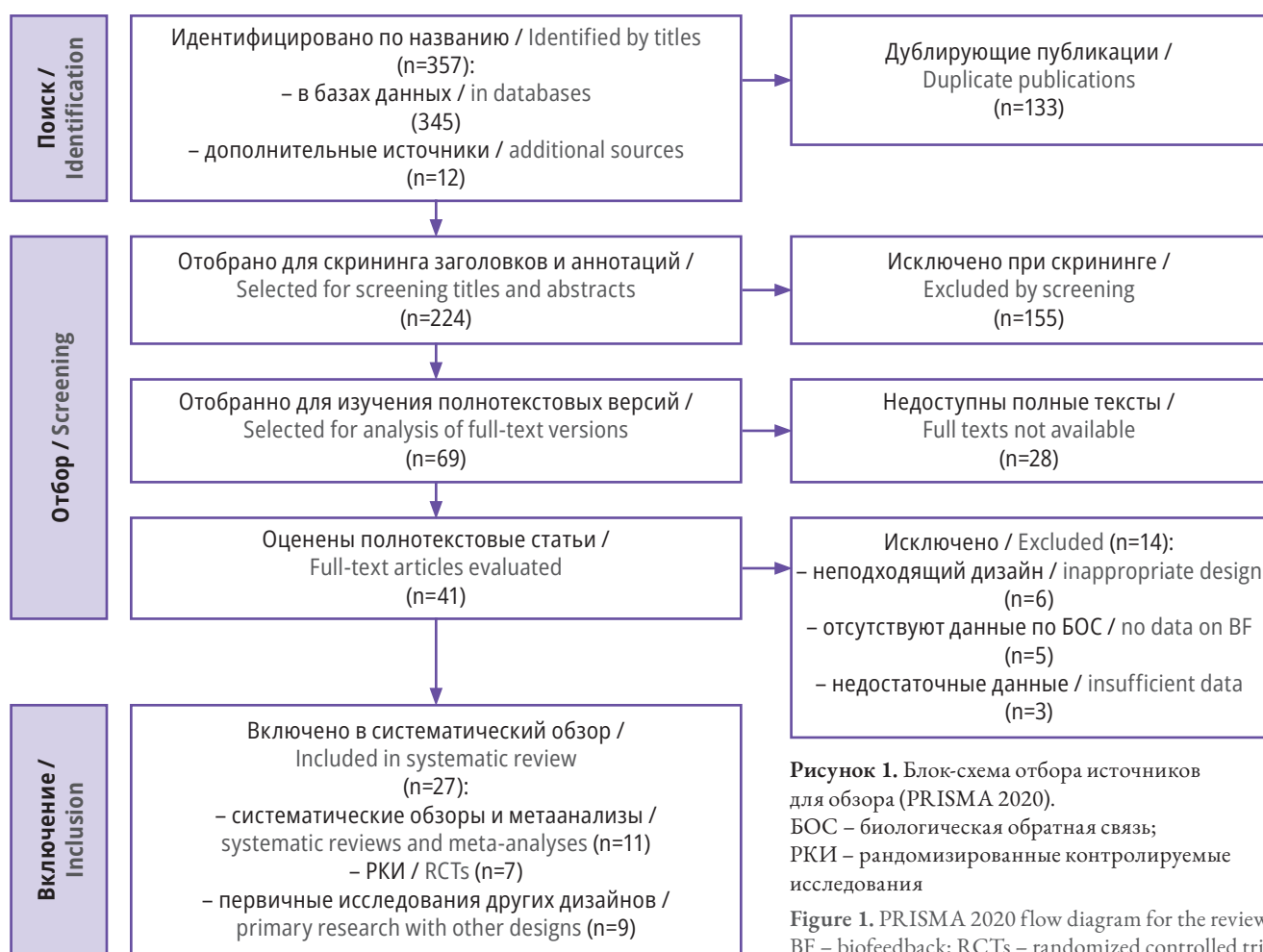


Рисунок 1. Блок-схема отбора источников для обзора (PRISMA 2020). БОС – биологическая обратная связь; РКИ – рандомизированные контролируемые исследования
Figure 1. PRISMA 2020 flow diagram for the review. BF – biofeedback; RCTs – randomized controlled trials

синтез, в рамках которого данные группировали по типам систем БОС и функциональным доменам Международной классификации функционирования (МКФ): «Функции и структуры организма» (сила, тонус, баланс), «Активность» (ходьба, самообслуживание) и «Участие» [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Характеристика включенных исследований / Characteristics of included studies

В финальный анализ вошли 27 работ: 11 систематических обзоров, метаанализов и скопинг-обзоров, 7 РКИ, а также 9 первичных исследований (5 нерандомизированных контролируемых исследований, 1 наблюдательное/ретроспективное исследование, 1 пилотное исследование, 1 серия случаев, 1 нарративный обзор), охватывающих в совокупности более 1 тыс. участников. В ключевом систематическом обзоре A. MacIntosh et al. (2019 г.) проанализировано 57 исследований БОС-вмешательств у пациентов с ДЦП, включающих 53 показателя активности и участия, а также 39 показателей функций организма [1]. Согласно общим результатам в 79% работ продемонстрировано улучшение после вмешательства, 63% оцениваемых показателей свидетельствовали о статистически значимом улучшении.

Демографический профиль участников характеризуется широким возрастным диапазоном (от 4 до 47 лет), однако

подавляющее большинство исследований сфокусировано на детях школьного возраста (7–12 лет) [17]. Типология ДЦП среди участников была представлена преимущественно спастическими формами: диплегия – около 60%, гемиплегия – 25%, квадриплегия – 15%. Распределение по классификации GMFCS варьировалось: в исследованиях походки и баланса доминировали пациенты I–III уровней, в то время как публикации по нейрофидбэку и ВСИ включали пациентов с тяжелыми нарушениями IV–V уровней [4].

Типы БОС-систем и технологические платформы / Types of BF systems and technology platforms

Анализ литературы позволил классифицировать современные комплексы БОС, используемые при ДЦП, на четыре основных кластера (**табл. 1**):

- нейрофидбэк (ЭЭГ-БОС);
- миографическая БОС (ЭМГ-БОС);
- стабилметрическая БОС;
- кинематическая и кинетическая БОС.

Сравнительный анализ эффективности по функциональным доменам / Comparative analysis of efficiency across functional domains

ЭМГ-БОС: управление тонусом и силой

ЭМГ-БОС остается наиболее изученным и клинически доступным методом.

Таблица 1. Технологическая классификация комплексов биологической обратной связи в нейрореабилитации пациентов с детским церебральным параличом**Table 1.** Technological classification of biofeedback systems in neurological rehabilitation of patients with cerebral palsy

Тип системы / Type	Регистрируемый биологический параметр / Biological parameter under registration	Применяемые технологии и устройства / Technologies and devices used	Клинические цели / Clinical targets
Нейрофидбэк (ЭЭГ-БОС) / Neurofeedback (EEG BF)	Электрическая активность коры головного мозга (альфа-, бета-, тета-, мю-ритмы) / Electrical activity of the cerebral cortex (alpha, beta, theta, mu rhythms)	ЭЭГ-сенсоры, интерфейсы «мозг – компьютер», роботизированные манипуляторы с нейроуправлением / EEG sensors, brain-computer interfaces, neuro- controlled robotic arms	Модуляция нейропластичности, когнитивная коррекция, управление вспомогательными устройствами, коррекция речевых функций [4, 18] / Modulation of neuroplasticity, cognitive correction, control of assistive devices, correction of speech functions [4, 18]
Миографическая БОС (ЭМГ-БОС) / Electromyographic BF (EMG BF)	Поверхностная ЭМГ (амплитуда и частота сокращений) / Surface EMG (amplitude and frequency of contractions)	Поверхностные электроды, портативные БОС-тренажеры для верхних конечностей, системы функциональной электростимуляции / Surface electrodes, portable biofeedback trainers for upper limbs, functional electrical stimulation systems	Снижение спастичности, активация паретичных мышц, улучшение селективного контроля [5, 19] / Reduction of spasticity, activation of paretic muscles, improvement of selective control [5, 19]
Стабилометрическая БОС / Stabilometric BF	Положение и колебания центра давления на платформе / Position and oscillations of the center of pressure on the platform	Стабилоплатформы с БОС- компонентом, тензометрические датчики, VR-дисплеи / Stabilizer platforms with a biofeedback component, strain gauges, VR displays	Постуральная устойчивость, симметрия опоры, снижение риска падений [20, 21] / Postural stability, symmetry of support, reduced risk of falls [20, 21]
Кинематическая и кинетическая БОС / Kinematic and kinetic BF	Углы в суставах, скорость, сила реакции опоры, длина шага / Joint angles, velocity, ground reaction force, step length	3D-видеоанализ, IMU, беговые дорожки с БОС-компонентом, роботизированные локомоторные комплексы, экзоскелеты, имитаторы подошвенной нагрузки / 3D video analysis, IMU, treadmills with BF components, robotic locomotor systems, exoskeletons, plantar load simulators	Коррекция паттерна ходьбы, увеличение скорости передвижения [22–24] / Correction of gait pattern, increase in the speed of movement [22–24]

Примечание. ЭЭГ – электроэнцефалография; ЭМГ – электромиография; BCI (англ. brain-computer interface) – интерфейс «мозг – компьютер»; VR (англ. virtual reality) – виртуальная реальность; IMU (англ. inertial measurement units) – инерциальные датчики.

Note. EEG – electroencephalography; EMG – electromyography; BCI – brain-computer interface; VR – virtual reality; IMU – inertial measurement units.

По данным систематических обзоров, включение ЭМГ-БОС в программу тренировки мышц голени (прежде всего, активация передней большеберцовой мышцы и релаксация трехглавой мышцы голени) обеспечивает статистически значимо большее увеличение скорости ходьбы по сравнению со стандартной физической терапией без БОС-компонента ($p < 0,05$) [1, 25].

Контролируемые исследования показали статистически значимые улучшения в группе БОС по следующим параметрам:

- тонус подошвенных сгибателей ($p < 0,001$);
- активная амплитуда движений голеностопного сустава ($p < 0,001$);
- параметры походки [1].

Особый интерес представляют результаты в отношении функций верхних конечностей. В РКИ с использованием теста Джебсена–Тейлора (англ. Jebsen-Taylor Hand Function Test, JHFT) в группе ЭМГ-БОС достигнуто статисти-

чески значимое преимущество в субтестах на манипуляцию тяжелыми предметами и стимуляцию кормления по сравнению с группой стандартной терапии [26]. Среднее снижение времени выполнения задач составило 15–20 с через 8 нед тренировок. Механизм успеха заключается в способности БОС визуализировать феномен ко-контракции (одновременного напряжения агонистов и антагонистов), что позволяет ребенку осознанно «выключать» спастичную мышцу во время активного движения.

Специализированные исследования ЭМГ-БОС верхних конечностей свидетельствуют о значительных улучшениях [1]:

- тонуса сгибателей локтя ($p < 0,001$);
- активной амплитуды движений разгибания локтя ($p = 0,018$);
- функции крупных мышц.

Применение роботизированной системы Diego® (Tyromotion GmbH, Австрия) в РКИ статистически значи-

мо увеличило амплитуду движений в плечевом суставе при разгибании ($p=0,0197$) и приведении ($p=0,0232$) [3]. Тренажер HandTutor® (MediTouch Ltd., Израиль) позволил увеличить мышечную силу и объем движений во всех крупных суставах рук у 100% участников, а также повысить показатели по шкале функциональной независимости (англ. Functional Independence Measure, FIM) и качество жизни по опроснику PedsQL (англ. Pediatric Quality of Life Inventory) [19, 27].

По данным систематического обзора A. MacIntosh et al., применение ЭМГ-БОС сопровождается увеличением пиковых значений мышечной активности целевых групп мышц и снижением фоновой активности в покое, что в совокупности свидетельствует об улучшении нервно-мышечного контроля у детей с ДЦП [1]:

- увеличение пиковых значений мышечной активности и снижение фоновой активности в покое;
- улучшение функции кисти по JHFT;
- изменение уровня III на II по системе классификации мануальных навыков (англ. Manual Ability Classification System, MACS).

Нейрофидбэк и ВСИ: на стыке когнитивной и моторики

Доказательная база в области нейрофидбэка при ДЦП пока еще формируется: на сегодняшний день отсутствуют опубликованные рецензированные систематические обзоры, посвященные исключительно данной популяции. Тем не менее скопинг-обзор A. Behboodi et al. (2022 г.), охватывающий ВСИ-нейрофидбэк при непрогрессирующих неврологических расстройствах (включая ДЦП), свидетельствует о том, что задачно-специфические протоколы с обратной связью в реальном времени демонстрируют более выраженный потенциал для восстановления двигательного контроля по сравнению с неспецифическими подходами [4]. Наиболее часто используемый протокол – модуляция сенсомоторного ритма (12–15 Гц) – ассоциирован с улучшением произвольного контроля верхней конечности.

При интеграции с ВСИ нейрофидбэк открывает возможности для пациентов с тяжелыми формами ДЦП (GMFCS IV–V): управление внешними устройствами посредством моторных образов позволяет существенно расширить уровень участия по МКФ. Данные ЭЭГ фиксируют модуляцию спектральной плотности мощности в сенсомоторных зонах в ходе ВСИ-тренинга, что указывает на реорганизацию кортикальных сетей [4]. Вместе с тем необходимо учитывать ограничения имеющейся базы: большинство исследований по нейрофидбэку при ДЦП представлены единичными случаями или малыми сериями, а протоколы существенно различаются по частоте и длительности сессий, что затрудняет обобщение результатов.

Применение неинвазивного ВСИ Экзокисть-2® (ООО «ДНК-Технология ТС», Россия) продемонстрировало эффективность в коррекции артикуляционной моторики и речевых функций ($p<0,001$) [18]. Это указывает на потенциал нейрофидбэка не только для моторной, но и для речевой реабилитации.

Постуральный контроль и стабилметрия

Использование стабилметрических платформ (например, Tetrax® – Sunlight Medical Ltd., Израиль) обеспечивает обратную связь по распределению веса между правой и левой ногами, а также между пяткой и носком [11, 20]. Исследования показывают, что 20-минутные сессии 3 раза в неделю в течение 1 мес приводят к значительному снижению площади колебаний центра давления и времени стабилизации после возмущений [20].

Применение 3D-тренажеров баланса с визуальной обратной связью (монитор) способствует стимуляции вестибулярной и проприоцептивной систем одновременно, что более эффективно для динамического баланса, чем традиционные упражнения на нестабильных опорах [21]. Стабилметрия с БОС получила широкое распространение в отечественной реабилитационной практике и применяется в специализированных центрах восстановительной медицины России в рамках комплексных программ нейрореабилитации [27, 28].

Динамическая БОС при тренировке походки

Кинематическая БОС в реальном времени, реализуемая через системы видеонализа или носимые датчики, позволяет корректировать такие параметры, как угол разгибания колена в фазе опоры и клиренс стопы [8]. Исследование A.T. Booth et al. (2019 г.) показало способность детей с ДЦП достигать клинически значимых улучшений различных параметров походки при использовании БОС в режиме реального времени [29]:

- увеличение пиковой мощности подошвенного сгибания на 36% ($p<0,001$);
- улучшение разгибания колена в момент начального контакта на 7° ($p<0,001$);
- увеличение длины шага на 13% ($p<0,001$).

В исследованиях с использованием VR-аватаров дети демонстрировали не только улучшение параметров шага, но и высокую эмоциональную вовлеченность [30]. Среднее улучшение по шкале клинического наблюдения ходьбы (англ. Observational Gait Scale, OGS) составило от 1 до 4 баллов после 5-летнего цикла комплексной реабилитации с включением БОС и ботулинотерапии [22].

Использование роботизированного комплекса Walkbot® (ООО «Стемфис», Россия) привело к приросту баллов по шкале GMFM-66 на 6,8% (против 4,1% в контроле; $p=0,006$) и улучшению индекса Хаузера ($p=0,05$) [23]. Сочетание применения системы Lokomat® (Hocoma, Швейцария) с чрескожной электростимуляцией спинного мозга показало более выраженную нормализацию паттерна ЭМГ-активности по сравнению с изолированной роботизированной ходьбой [24]. Метааналитические данные подтверждают, что как функциональная, так и роботизированная тренировка ходьбы с БОС-компонентом статистически значимо превосходят стандартную физическую терапию по показателям GMFM и скорости ходьбы у детей с ДЦП [19].

Уровень доказательности / Level of evidence

Методологическое качество исследований варьируется. По шкале PEDro большинство РКИ в области ЭМГ-БОС и походки имеют баллы от 5 до 8, что соответствует уров-

ню доказательности 1b или 2a по системе Оксфордского центра доказательной медицины (англ. Oxford Centre for Evidence-Based Medicine, CEBM) (табл. 2) [31].

По системе GRADE общая прочность доказательств для БОС-вмешательств оценена как «положительная, очень низкая» [1]. Причины снижения уровня доказательности:

- высокая доля неконтролируемых исследований (дизайн «до и после» без контрольной группы);
- гетерогенность оцениваемых показателей;
- малые размеры выборок;
- вариабельность протоколов вмешательства (продолжительность сеансов 15–30 мин, курс лечения 10–20 сеансов);

Большинство исследований роботизированных комплексов с БОС соответствуют уровням доказательности II–III, отмечается высокая эффективность БОС как дополнения к стандартной терапии (англ. add-on therapy) [32].

ОБСУЖДЕНИЕ / DISCUSSION

Интерпретация и механизмы нейропластичности / Interpretation and mechanisms of neuroplasticity

Результаты обзора свидетельствуют о том, что БОС-системы не просто «тренируют мышцы», а перенастраивают систему управления движением на уровне центральной нервной системы. При ДЦП внутренняя обратная связь искажена из-за повреждения проводящих путей или корковых центров. БОС создает временный «внешний контур» управления, замыкая контур обратной связи и предоставляя пациенту зрительную или звуковую информацию о физиологических параметрах в реальном времени [28].

Благодаря многократному повторению успешных попыток, подкрепляемых сигналом БОС, мозг начинает использовать альтернативные нейронные сети для реализации движения. Это подтверждается данными ЭЭГ о росте когерентности в альфа-диапазоне и модуляции спектральной плотности мощности в моторных зонах после курсов нейрофидбэка [4]. Механизм «двигательно-научения» особенно эффективен при раннем начале реабилитации и учете индивидуальных когнитивных возможностей ребенка [28].

Таблица 2. Уровень доказательности применения систем биологической обратной связи (по системе Оксфордского центра доказательной медицины)

Table 2. Level of evidence for application of biofeedback systems (according to Oxford Centre for Evidence-Based Medicine)

Модальность БОС / BF modality	Целевой показатель / Target parameter	Уровень доказательности / Evidence level	Сила рекомендации / Recommendation strength
ЭМГ-БОС / EMG BF	Скорость ходьбы, функция кисти / Gait velocity, hand fuction	1b–2a	Сильная [26] / Strong [26]
ЭЭГ-БОС (нейрофидбэк) / EEG BF (neurofeedback)	Моторный контроль, когниция / Motor control, cognition	2b–3	Средняя [4] / Medium [4]
Стабилометрия / Stabilometry	Статический баланс / Static balance	2a	Сильная [20] / Strong [20]
Кинематическая БОС / Kinematic BF	Паттерн походки (углы) / Gait pattern (angles)	2b	Средняя [8] / Medium [4]

Примечание. БОС – биологическая обратная связь; ЭМГ – электромиография; ЭЭГ – электроэнцефалография.

Note. BF – biofeedback; EMG – electromyography; EEG – electroencephalography.

Систематический анализ литературы демонстрирует перспективность БОС-технологий в реабилитации детей с ДЦП, несмотря на низкий уровень доказательности по GRADE. Положительная динамика отмечается в 79% исследований, что указывает на реальный клинический потенциал метода [1].

Практическое значение для реабилитационного процесса / Practical significance for rehabilitation process

Для специалистов по детской реабилитации БОС-технологии решают несколько критических задач:

- объективизация и точность (БОС позволяет работать с микроамплитудами мышечного сокращения, которые невозможно оценить визуально, что особенно важно для детей с низким реабилитационным потенциалом, когда даже минимальный прогресс в релаксации мышцы является клинически значимым [10]; объективная регистрация физиологических параметров позволяет отслеживать прогресс и корректировать программу реабилитации);

- мотивационный компонент (ДЦП требует многолетних, зачастую монотонных упражнений, а использование игровых VR-интерфейсов в комплексах БОС превращает терапию в игру, что критично для поддержания комплаенса в педиатрической практике [10]; повышение мотивации через игровые элементы и снижение эмоционального напряжения ребенка за счет виртуальной игровой среды является существенным преимуществом БОС-терапии [28]);

- интенсификация тренировок (традиционные методы часто не обеспечивают достаточной интенсивности для активации механизмов нейропластичности, а внедрение высокотехнологичных роботизированных комплексов с БОС обеспечивает контролируемую, интенсивную и мотивирующую тренировку [3]);

- минимальные противопоказания (острый психоз, фотосенситивная эпилепсия, острые инфекции) и отсутствие побочных эффектов при правильном применении [9].

Наиболее перспективные направления:

- ЭМГ-БОС для коррекции мышечного тонуса, улучшения нервно-мышечного контроля, функций верхних и нижних конечностей;

- стабилметрия с БОС для тренировки баланса, постурального контроля, координации;
- нейрофидбэк для пациентов с тяжелыми нарушениями (GMFCS IV–V) с целью коррекции когнитивных и речевых функций;
- комбинированные системы для комплексной коррекции параметров походки.

Ограничения / Limitations

Несмотря на оптимистичные данные, существует значительный разрыв между результатами исследований и рутинной клинической практикой. Основными препятствиями являются высокая стоимость оборудования, нехватка обученного персонала и необходимость дальнейших высококачественных исследований для укрепления доказательной базы БОС-методов.

Ограничения существующей доказательной базы:

- гетерогенность (различия в оборудовании, популяциях (разные формы ДЦП, уровни GMFCS) и протоколах) делают невозможным точное сопоставление результатов разных центров [4], а отсутствие унифицированных протоколов БОС-вмешательств и вариабельность оцениваемых исходов затрудняют метаанализ);
- отсутствие долгосрочных данных – недостаточная продолжительность катамнестического наблюдения (большинство исследований ограничивается оценкой эффекта сразу после курса, данные о сохранении навыка (англ. retention) через 6–12 мес единичны [4]);
- проблема «ослепления» (в исследованиях физической реабилитации невозможно полностью «ослепить» пациента и врача относительно проводимого вмешательства, что может вносить систематическую ошибку в субъективные оценки (GMFM и др.) [33]);
- методологические проблемы (большинство авторов не следовали рекомендациям теории моторного обучения относительно режима предоставления обратной связи – вопреки рекомендациям, они предоставляли обратную связь последовательно и одновременно на протяжении всего вмешательства независимо от желания или прогресса пациента, что может препятствовать автономному обучению) [1];
- недостаток высококачественных РКИ (высокая доля неконтролируемых исследований с малыми размерами выборок снижает общий уровень доказательности).

Рекомендации и направления будущих исследований / Recommendations and areas for future research

Для оптимизации применения БОС необходима постоянная и одновременная обратная связь для улучшения простых/специфических моторных активностей, а также терминальная и клиентонаправленная обратная связь для улучшения более сложных/общих моторных активностей [1].

Рекомендации для практики:

- БОС-терапия может быть рекомендована как компонент комплексной реабилитации детей с ДЦП;
- выбор типа БОС-системы должен соответствовать конкретным реабилитационным целям и уровню GMFCS;
- необходимы соблюдение противопоказаний и индивидуализация протоколов.

Направления будущих исследований:

- проведение высококачественных РКИ с достаточными размерами выборок;
- стандартизация протоколов БОС-вмешательств и набора оцениваемых исходов;
- оптимизация режимов обратной связи в соответствии с теорией моторного обучения;
- изучение долгосрочных эффектов (катамнез 6–12 мес) и оптимальной продолжительности курсов БОС-терапии;
- исследование эффективности для различных подгрупп пациентов (по формам ДЦП и уровням GMFCS).

Перспективные области исследований связаны с развитием носимых (англ. wearable) устройств и интеграцией искусственного интеллекта для автоматической адаптации сложности БОС-тренинга под текущее состояние ребенка [34]. Необходима разработка продуманной парадигмы БОС и стандартизированного набора исходов для укрепления доказательной базы [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Систематический обзор подтверждает, что БОС-комплексы являются эффективным и безопасным инструментом в реабилитации детей с ДЦП. Метод БОС занимает уникальное место, позволяя перевести процесс реабилитации из плоскости пассивных манипуляций в плоскость активного нейромоторного обучения. Выявлены положительные результаты в 79% исследований с улучшением моторных функций, параметров походки, мышечного тонуса и функциональной независимости. Различные типы БОС-систем (ЭМГ-БОС, стабилметрия, нейрофидбэк, кинематическая БОС) демонстрируют эффективность при специфических задачах реабилитации.

Наиболее выраженные результаты достигнуты в использовании ЭМГ-БОС для улучшения функции верхних конечностей и контроля спастичности (уровень доказательности 1b–2a), а также в применении стабилметрических платформ для коррекции баланса (уровень 2a). Нейрофидбэк и ВСИ-технологии представляют собой перспективное направление для наиболее тяжелых групп пациентов (GMFCS IV–V), расширяя их возможности коммуникации и взаимодействия с миром.

Интерпретация доказательной базы требует четкого разграничения двух уровней оценки. На уровне отдельных модальностей ЭМГ-БОС для улучшения скорости ходьбы и функции верхних конечностей, а также стабилметрические системы для коррекции постурального контроля демонстрируют уровень доказательности 1b–2a по Oxford CEBM, что соответствует сильной рекомендации для клинической практики. Эти эффекты подкреплены контролируемыми исследованиями с измеримыми и воспроизводимыми результатами.

Вместе с тем совокупная доказательная база по БОС при ДЦП в целом остается неоднородной: преобладание нерандомизированных дизайнов, гетерогенность протоколов и малые размеры выборок снижают общую достоверность выводов по системе GRADE. Таким образом, высокая доказанность эффекта для конкретных модальностей и низкое качество совокупной базы – не противоречие, а отражение реального состояния области, где отдельные

хорошо изученные вмешательства сосуществуют с широким массивом методологически слабых исследований.

Для успешной интеграции БОС в стандарты оказания помощи необходимы создание унифицированных протоколов тренировок и расширение доступа к современным портативным системам БОС, которые могут использовать-

ся не только в клиниках, но и в домашних условиях под дистанционным контролем специалистов. Реабилитация при ДЦП с использованием БОС – это не замена традиционной физиотерапии, а ее высокотехнологичное усиление, позволяющее максимально реализовать потенциал развития каждого ребенка.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
Поступила: 24.11.2025 В доработанном виде: 17.12.2025 Принята к печати: 26.12.2025 Опубликована: 30.12.2025	Received: 24.11.2025 Revision received: 17.12.2025 Accepted: 26.12.2025 Published: 30.12.2025
Вклад авторов	Authors' contribution
Авторы принимали равное участие в сборе, анализе и интерпретации данных. Авторы прочитали и утвердили окончательный вариант рукописи	The authors participated equally in the collection, analysis and interpretation of the data. The authors have read and approved the final version of the manuscript
Конфликт интересов	Conflict of interests
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	The authors declare no conflict of interests
Финансирование	Funding
Авторы заявляют об отсутствии финансовой поддержки	The authors declare no funding
Этические аспекты	Ethics declarations
Неприменимо	Not applicable
Комментарий издателя	Publisher's note
Содержащиеся в этой публикации утверждения, мнения и данные были созданы ее авторами, а не издательством ИРБИС (ООО «ИРБИС»). Издательство снимает с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или препаратов, упомянутых в публикации	The statements, opinions, and data contained in this publication were generated by the authors and not by IRBIS Publishing (IRBIS LLC). IRBIS LLC disclaims any responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred in the content
Права и полномочия	Rights and permissions
© 2025 Л.Р. Кадырова, А.Н. Карайсаев; ООО «ИРБИС» Статья в открытом доступе по лицензии CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)	© 2025 L.R. Kadyrova, A.N. Karaisaev. Publishing services by IRBIS LLC This is an open access article under CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- MacIntosh A., Lam E., Vigneron V., et al. Biofeedback interventions for individuals with cerebral palsy: a systematic review. *Disabil Rehabil.* 2019; 41 (20): 2369–91. <https://doi.org/10.1080/09638288.2018.1468933>.
- Oskoui M., Coutinho F., Dykeman J., et al. An update on the prevalence of cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Dev Med Child Neurol.* 2013; 55 (6): 509–19. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12080>.
- Егоров А.В., Яковлева С.К., Петрова Р.В., Преображенская Е.В. Эффективность комплекса с биологической обратной связью в лечении детей с детским церебральным параличом: рандомизированное контролируемое исследование. *Вестник восстановительной медицины.* 2025; 24 (2): 8–19. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-2-8-19>.
Egorov A.V., Yakovleva S.K., Petrova R.V., Preobrazhenskaya E.V. The effectiveness of the biofeedback complex in the treatment of children with cerebral palsy: a randomized controlled study. *Bulletin of Rehabilitation Medicine.* 2025; 24 (2): 8–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2025-24-2-8-19>.
- Behboodi A., Lee W.A., Hinchberger V.S., Damiano D.L. Determining optimal mobile neurofeedback methods for motor neurorehabilitation in children and adults with non-progressive neurological disorders: a scoping review. *J Neuroeng Rehabil.* 2022; 19: 104. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01082-6>.
- He M.X., Lei C.J., Zhong D.L., et al. 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.* 2019; 98 (33): e16786. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000016786>.
- Giggins O.M., Persson U.M., Caulfield B. Biofeedback in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil.* 2013; 10: 60. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-60>.
- Schless S.H., Sorek G., Schurr I., et al. Effectiveness of treadmill-based virtual-reality biofeedback training to improve gait function in children and adolescents with congenital and acquired brain injury. *Sci Rep.* 2025; 16 (1): 2133. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31852-y>.
- Tate J.J., Milner C.E. Real-time kinematic, temporospatial, and kinetic biofeedback during gait retraining in patients: a systematic review. *Phys Ther.* 2010; 90 (8): 1123–34. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080281>.
- Lerma-Castaño P.R., Chanaga-Gelves M.V., Llanos-Mosquera J.M., et al. Virtual reality in gait rehabilitation in children with spastic cerebral palsy. *Rev Mex Neurocienc.* 2022; 23 (1): 29–33. <https://doi.org/10.24875/rmn.21000001>.
- Liu C., Wang X., Chen R., Zhang J. The effects of virtual reality training on balance, gross motor function, and daily living ability in children with cerebral palsy: systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games.* 2022; 10 (4): e38972. <https://doi.org/10.2196/38972>.
- Mesa-Burbano A.E., Fernández-Polo M.A., Hurtado-Sánchez J.S., et al. Effects of virtual reality use on children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Healthcare.* 2025; 13 (20): 2571. <https://doi.org/10.3390/healthcare13202571>.
- Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021; 372: n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

13. Armijo-Olivo S., Stiles C.R., Hagen N.A., et al. PEDro or Cochrane to assess the quality of clinical trials? A meta-epidemiological study. *PLoS One*. 2015; 10 (7): e0132634. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132634>.
14. Downs S.H., Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *J Epidemiol Community Health*. 1998; 52 (6): 377–84. <https://doi.org/10.1136/jech.52.6.377>.
15. MacIntosh A., Vignais N., Biddiss E. Biofeedback interventions for people with cerebral palsy: a systematic review protocol. *Syst Rev*. 2017; 6 (1): 3. <https://doi.org/10.1186/s13643-017-0405-y>.
16. Ларина Н.В., Павленко В.Б., Корсунская Л.Л. и др. Возможности реабилитации детей с синдромом ДЦП с применением роботизированных устройств и биологической обратной связи. *Бюллетень сибирской медицины*. 2020; 19 (3): 156–65. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>.
- Larina N.V., Pavlenko V.B., Korsunskaya L.L., et al. Rehabilitation possibilities for children with cerebral palsy through the use of robotic devices and biofeedback. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2020; 19 (3): 156–65 (in Russ.). <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>.
17. Burchfield S.J., Shierk A., Truong C., Blankenship R. Wearable neurotechnology systems for upper extremity rehabilitation in children with cerebral palsy: a scoping review. *Front Neurol*. 2025; 16: 1663596. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1663596>.
18. Бирюкова Е.А., Орехова Л.С., Павленко В.Б. и др. Реабилитация речевых функций у детей с детским церебральным параличом. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2022; 8 (4): 29–39.
- Birukova E.A., Orekhova L.S., Pavlenko V.B., et al. Rehabilitation of speech functions in children with cerebral palsy. *Scientific Notes of the Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2022; 8 (4): 29–39 (in Russ.).
19. Carvalho I., Pinto S.M., Chagas D.D.V., et al. Robotic gait training for individuals with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2017; 98 (11): 2332–44. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.06.018>.
20. Shumway-Cook A., Hutchinson S., Kartin D., et al. Effect of balance training on recovery of stability in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2003; 45 (9): 591–602. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2003.tb00963.x>.
21. Yun C.K., Yoo J.N. The effects of visual biofeedback balance training on functional ability in children with cerebral palsy: a pilot study. *J Korean Soc Phys Med*. 2016; 11 (3): 133–9. <https://doi.org/10.13066/kspm.2016.11.3.133>.
22. Pyrzanowska W., Chrościńska-Krawczyk M., Bonikowski M. Long-term improvement of gait kinematics in young children with cerebral palsy treated with botulinum toxin injections and integrated/intensive rehabilitation: a 5-year retrospective observational study. *Toxins*. 2025; 17 (3): 142. <https://doi.org/10.3390/toxins17030142>.
23. Нефедьева Д.Л., Абдрахманова Л.И., Бодрова Р.А. Эффективность применения роботизированного комплекса Walkbot у пациентов с детским церебральным параличом. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2024; 6 (3): 253–62. <https://doi.org/10.36425/rehab631151>.
- Nefedeva D.L., Abdrakhmanova L.I., Bodrova R.A. Effectiveness of the Walkbot system in patients with infantile cerebral palsy. *Physical and Rehabilitation Medicine, Medical Rehabilitation*. 2024; 6 (3): 253–62 (in Russ.). <https://doi.org/10.36425/rehab631151>.
24. Икоева Г.А., Никитюк И.Е., Кивоенко О.И. и др. Клинико-неврологическая и нейрофизиологическая оценка эффективности двигательной реабилитации у детей с церебральным параличом при использовании роботизированной механотерапии и чрескожной электрической стимуляции спинного мозга. *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2016; 4 (4): 47–55. <https://doi.org/10.17816/PTORS4447-55>.
- Ikoeva G.A., Nikityuk I.E., Kivoenko O.I., et al. Clinical, neurological, and neurophysiological evaluation of the efficiency of motor rehabilitation in children with cerebral palsy using robotic mechanotherapy and transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2016; 4 (4): 47–55. <https://doi.org/10.17816/PTORS4447-55>.
25. Booth A.T.C., Buizer A.I., Meyns P., et al. The efficacy of functional gait training in children and young adults with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Dev Med Child Neurol*. 2018; 60 (9): 866–83. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13708>.
26. Rattanatharn R. Effect of EMG biofeedback to improve hand function in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *J Med Assoc Thai*. 2018; 101 (12): 1621–8.
27. Ашрафова У.Ш., Мамедьяров А.М., Кармазина Е.К. и др. Эффективность применения ручного тренажера HandTutor и стабилометрического постурального контроля с использованием метода биологической обратной связи у детей дошкольного и младшего школьного возраста с церебральным параличом. *Педиатрическая фармакология*. 2024; 21 (6): 481–91. <https://doi.org/10.15690/pf.v21i6.2839>.
- Ashrafova U.Sh., Mamedyarov A.M., Karmazina E.K., et al. The effectiveness of using the HandTutor hand simulator and stabilometric postural control using the biofeedback tear in preschool and primary school children with cerebral palsy. *Pediatric Pharmacology*. 2024; 21 (6): 481–91 (in Russ.). <https://doi.org/10.15690/pf.v21i6.2839>.
28. Бугун О.В., Машанская А.В., Аталян А.В. и др. Комплексная реабилитация пациентов с двигательными нарушениями при спастических формах ДЦП. *Acta Biomedica Scientifica*. 2021; 6 (6-2): 82–91. <https://doi.org/10.29413/ABS.2021-6.6-2.9>.
- Bugun O.V., Mashanskaya A.V., Atalyan A.V., et al. Comprehensive rehabilitation of patients with movement disorders with spastic forms of cerebral palsy. *Acta Biomedica Scientifica*. 2021; 6 (6-2): 82–91 (in Russ.). <https://doi.org/10.29413/ABS.2021-6.6-2.9>.
29. Booth A.T., Buizer A.I., Harlaar J., et al. Immediate effects of immersive biofeedback on gait in children with cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil*. 2019; 100 (4): 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.10.013>.
30. De Mulder T., Adams H., Dewit T., et al. A comparison of the immediate effects of verbal and virtual reality feedback on gait in children with cerebral palsy. *Children*. 2024; 11 (5): 524. <https://doi.org/10.3390/children11050524>.
31. Moreau N.G., Bodkin A.W., Bjornson K., et al. Effectiveness of rehabilitation interventions to improve gait speed in children with cerebral palsy: systematic review and meta-analysis. *Phys Ther*. 2016; 96 (12): 1938–54. <https://doi.org/10.2522/ptj.20150401>.
32. Ключкова О.А., Мамедьяров А.М., Ашрафова У.Ш. и др. Применение роботизированной механотерапии в комплексной реабилитации детей с церебральным параличом в раннем периоде после селективной дорзальной ризотомии: проспективное нерандомизированное исследование. *Педиатрическая фармакология*. 2025; 22 (5): 544–52. <https://doi.org/10.15690/pf.v22i5.2960>.
- Klochkova O.A., Mamedyarov A.M., Ashrafova U.Sh., et al. Robotic mechanotherapy in the comprehensive rehabilitation of children with cerebral palsy in the early period after selective dorsal rhizotomy: a prospective non-randomized study. *Pediatric Pharmacology*. 2025; 22 (5): 544–52 (in Russ.). <https://doi.org/10.15690/pf.v22i5.2960>.
33. Wang Y., Zhang P., Li C. Systematic review and network meta-analysis of robot-assisted gait training on lower limb function in patients with cerebral palsy. *Neural Sci*. 2023; 44 (11): 3863–75. <https://doi.org/10.1007/s10072-023-06964-w>.
34. Cardone D., Perpetuini D., Di Nicola M., et al. Robot-assisted upper limb therapy for personalized rehabilitation in children with cerebral palsy: a systematic review. *Front Neurol*. 2025; 15: 1499249. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1499249>.

Сведения об авторах / About the authors

Кадырова Лидия Ринадовна, к.м.н., доцент / **Lidia R. Kadyrova**, PhD, Assoc. Prof. – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9306-2715>. eLibrary SPIN-code: 6320-8627.

Карайсаев Анар Нариман оглы / **Anar N. Karaisaev** – ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9358-8897>. E-mail: anarchik_2001@mail.ru.