

У.Ш. Ашрафова, О.С. Куприянова, Е.К. Кармазина, О.А. Клочкова,  
А.М. Мамедъяров, Е.В. Комарова, М.И. Ивардава, Г.А. Каркашадзе

НИИ педиатрии и охраны здоровья детей НКЦ №2 ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского»,  
Москва, Российская Федерация

# Персонализированный подход к применению методов роботизированной механотерапии у детей с церебральным параличом разных возрастных групп: обзор литературы

**Автор, ответственный за переписку:**

Ашрафова Ульвия Шахиновна, младший научный сотрудник отдела разработки научных подходов к ведению детей с двигательными нарушениями НИИ педиатрии и охраны здоровья детей НКЦ №2 ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» Минобрнауки России

**Адрес:** 119333, Москва, ул. Фотиевой, д. 10, стр. 1., **тел.:** +7 (968) 492-44-56, **e-mail:** doc.ashrafova@gmail.com

Реабилитация детей с двигательными нарушениями — непрерывный, многоэтапный и динамический процесс, осуществляемый на основе индивидуализации программы, эффективность которого зависит от многих важных факторов, начиная от сознательности и мотивации самого пациента, его реабилитационного потенциала и заканчивая применяемыми методами восстановительного лечения. В последние годы в реабилитации происходят глобальные изменения, связанные с внедрением роботизированной техники. Одним из современных методов является роботизированная механотерапия, преимущества которой заключаются в широких возможностях изменения параметров тренировок, непрерывном компьютерном анализе двигательных функций, возможности проведения тренировок с имитацией движений, близких к физиологическим. Современное представление о возможностях и ограничениях применения роботизированных комплексов в реабилитации детей с церебральным параличом позволит исключить ошибки и осложнения при проведении комплексного восстановительного лечения и оптимально использовать все преимущества данного метода.

**Ключевые слова:** роботизированная механотерапия, детская реабилитация, детский церебральный паралич, спастичность, двигательные нарушения, экзоскелеты

**Для цитирования:** Ашрафова У.Ш., Куприянова О.С., Кармазина Е.К., Клочкова О.А., Мамедъяров А.М., Комарова Е.В., Ивардава М.И., Каркашадзе Г.А. Персонализированный подход к применению методов роботизированной механотерапии у детей с церебральным параличом разных возрастных групп: обзор литературы. *Педиатрическая фармакология*. 2023;20(6):588–596. doi: <https://doi.org/10.15690/pf.v20i6.2668>

## ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI в. был сделан значительный про-рыв в разработке, развитии и использовании мето-дик роботизированной механотерапии при различных двигательных нарушениях. Механотерапия на сегодняшний день широко применяется в реабилитации преимущественно взрослых пациентов и подростков. Возможности применения данных методов реабили-тации у детей раннего и дошкольного возраста в настоящее время ограничены из-за минимальной представленности специализированных аппаратов, подходящих данной группе детей по параметрам физи-ческого развития, и недостатка персонализированных алгоритмов их применения. Вместе с тем использо-вание роботизированных тренажеров у детей раннего возраста способствует формированию физиологич-ного паттерна движений, подготовке ребенка к актив-ной вертикализации, самостоятельной ходьбе и само-обслуживанию, позволяет избежать необходимости переобучения в случае компенсаторных двигательных

нарушений. Это особенно актуально для пациентов с детским церебральным параличом (ДЦП), поскольку своевременное применение механотерапии позволяет скорректировать патологический стереотип движений и направить двигательное развитие ребенка по опти-мальной траектории с самых ранних этапов, что в итоге влияет не только на моторное развитие, но и на воз-можности психоречевого развития, обучения и соци-альной интеграции.

## МЕХАНОТЕРАПИЯ

Механотерапия — это одно из важнейших в настоящий момент направлений в реабилитации, в основу которого заложено выполнение дозированных упражнений (пре-имущественно для отдельных сегментов конечностей), осуществляемых с помощью специальных медицинских устройств, облегчающих движения или, наоборот, требу-ющих дополнительных усилий для их выполнения [1].

Возможности современной реабилитации расшири-лись благодаря появлению лечебных тренажеров [1].

Они представляют собой специальные устройства, действие которых направлено на коррекцию патологических установок туловища и конечностей, увеличение мышечной силы и подвижности в суставах, а также на повышение общей мобильности и выносливости больных путем выполнения дозированных движений [1].

Предложена следующая классификация тренажерных аппаратов механотерапии [2]:

- 1) тренажеры, способные учитывать и точно оценивать качество движения и двигательного восстановления, — диагностические аппараты и аппараты с биологической обратной связью;
  - 2) тренажеры, помогающие выделять отдельные фазы произвольных движений, — поддерживающие, фиксирующие аппараты;
  - 3) тренажеры, позволяющие дозировать механическую нагрузку при выполнении движений и упражнений, — тренировочные аппараты и тренажеры;
  - 4) комбинированные аппараты, позволяющие моделировать не только отдельные движения, но и целостные локомоторные акты, включая использование стабилографических платформ и обратной связи.
- По степени участия больного аппараты делятся на [1]:
- аппараты пассивного действия — движения больного осуществляются в принудительной форме за счет работы самого тренажера. Сюда относятся циклические тренажеры, их модификации и вертикализаторы [1,2];
  - аппараты смешанного типа — сочетание возможностей движения пациента и аппаратных возможностей, когда больной испытывает определенную физическую нагрузку, но активные упражнения для него невозможны, и часть усилий выполняет за него тренажер [1, 3]. Такие устройства направлены на восстановление силы мышц, вертикальной устойчивости, баланса тела при ходьбе [3];
  - аппараты активного действия — при работе с которыми больной использует имеющиеся двигатель-

ные навыки с прикладыванием собственных усилий для движений рычагов тренажера [1, 3].

Эффективность аппаратной тренировки зависит от локализации и уровня травмы, стадии восстановительного процесса, сопутствующих заболеваний, возраста, степени мотивации пациента [1].

### **ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ У ДЕТЕЙ С ДЦП И МЕХАНИЗМЫ НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТИ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ**

Повреждения головного мозга у детей с ДЦП возникают очень рано и затрагивают все сферы развития ребенка, особенно двигательную, что способствует отсутствию опыта нормальной проприоцепции. «Положительным аспектом» раннего повреждения головного мозга у детей является возможность использования изначально имеющихся ресурсов нейрональной пластичности — «резервных» нейронов и проводящих путей — для формирования центральной нервной системы (ЦНС) человека на ранних этапах [4]. Однако в последующем большая их часть «не используется» и постепенно утрачивается [5].

Поскольку процессы миелинизации и синаптогенеза после рождения остаются незавершенными, в результате воздействия функциональных нагрузок на организм запускаются механизмы формирования новых синаптических связей [4]. Так, путем образования «дополнительных» путей и с их сохранением развитие ЦНС после рождения ребенка продолжается [4]. Совершенствуя и корректируя имеющиеся двигательные навыки посредством различных методов нейрореабилитации, специалист воздействует на механизмы нейропластичности [4, 5]. Поэтому все представления о нейропластичности, говоря о детях с ДЦП, сводятся к ранней активации пострадавших конечностей с целью правильного развития имеющихся и освоения новых «дополнительных» проводящих путей [5].

**Ulviia Sh. Ashraphova, Olga S. Kupriianova, Elena K. Karmazina, Olga A. Klochkova, Aiaz M. Mamedieiarov, Elena V. Komarova, Marika I. Ivardava, George A. Karkashadze**

Research Institute of Pediatrics and Children's Health in Petrovsky National Research Centre of Surgery, Moscow, Russian Federation

## **A personalized approach to application of robotic mechanotherapy methods in children with cerebral palsy of different age groups (review)**

*Rehabilitation of children with motor disorders is a continuous, staged and dynamic process carried out on the basis of individualization of the program, the effectiveness of which depends on many important factors, starting from the consciousness and motivation of the patient, his rehabilitation potential and ending with the methods of medical rehabilitation used. In recent years, global changes have been taking place in rehabilitation related to the introduction of robotic technology. One of the modern methods is robotic mechanotherapy, with the advantages of the wide possibilities of changing training parameters, continuous computer analysis of motor functions, the possibility of training with simulated movements close to physiological ones. The modern introduction of the possibilities and limitations of the use of robotic complexes in the rehabilitation of children with cerebral palsy will eliminate errors and complications during complex medical rehabilitation and optimally use all the advantages of this method.*

**Keywords:** robotic mechanotherapy; children rehabilitation, infantile cerebral paralysis, spasticity, motor disorders, exoskeletons

**For citation:** Ashraphova Ulviia Sh., Kupriianova Olga S., Karmazina Elena K., Klochkova Olga A., Mamedieiarov Aiaz M., Komarova Elena V., Ivardava Marika I., Karkashadze George A. A personalized approach to application of robotic mechanotherapy methods in children with cerebral palsy of different age groups (review). *Pediatricheskaya farmakologiya — Pediatric pharmacology*. 2023;20(6):588–596. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.15690/pf.v20i6.2668>

Современные функциональные методы нейровизуализации позволяют проследить изменения, происходящие в головном мозге, что помогает подобрать и разработать эффективные стратегии реабилитационной программы [4, 6]. Так, было выявлено, что активация сенсомоторных областей коры головного мозга может вызываться путем наблюдения за каким-либо двигательным актом, его мысленным образом или же пассивной тренировкой [4, 6].

У пациентов, перенесших инсульт, сеансы тренировок способствуют расширению области коры головного мозга в зоне M1, отвечающей за определенный двигательный стереотип, что напрямую зависит от увеличения объема движений [6–8]. Первые 2 года жизни ребенка являются критическим периодом, в течение которого мероприятия по лечению ДЦП могут быть эффективнее, чем в более позднем возрасте [9]. Именно в это время пластичность мозга достигает своих максимальных возможностей [9]. Развивающийся на данном этапе опыт оказывает максимальное влияние на освоение и укрепление новых навыков и приспособление организма к конкретной среде [9, 10]. Например, критический период развития зрительной коры у детей с приобретенной амблиопией — до 7 лет. И аналогично — кохлеарный имплант при ранней глухоте имеет максимальную эффективность в течение первых 7 лет жизни [9, 10].

Критическим периодом для овладения естественным языком являются первые 6 лет жизни, после чего способность к овладению этим навыком постепенно снижается, а после 12 лет резко замедляется [10].

У детей нейропластичность выражена гораздо отчетливее, что позволяет им восстанавливаться после мозговых травм быстрее и эффективнее, чем большинству взрослых [4, 9]. Исходя из вышеизложенного, авторы считают, что в целях достижения максимального эффекта от реабилитации важно начинать лечение как можно раньше.

Согласно классификации Объединения по контролю ДЦП в Европе (Surveillance of Cerebral Palsy in Europe; SCPE), выделены основные формы ДЦП [11]: спастическая, дискинетическая и атаксическая, из которых основная доля приходится на спастические формы [5].

Современные данные свидетельствуют о том, что у около 80% детей с церебральным параличом основной разновидностью двигательных нарушений является спастичность, а у 7% — дискинезия (включая дистонию или атетоз) [12]. Спастичность и дистония вызывают произвольные движения и изменения положения тела, что влияет на двигательный контроль и может причинять боль [13].

Спастичность нарастает в период наиболее активного роста и освоения ребенком двигательных навыков (примерно к возрасту 4–6 лет) [14], именно поэтому своевременная коррекция мышечного тонуса является одним из определяющих реабилитационных вмешательств при спастическом и дискинетическом ДЦП [15]. Повышение мышечного тонуса и сухожильных рефлексов, снижение мышечной силы, нарушение селективного моторного контроля и удержания позы [16, 17] — все эти симптомы представляют собой проявления повреждения функций верхнего мотонейрона, что лежит в основе патофизиологии ДЦП [16]. Но именно мышечная слабость и гипотония выступают первичным проявлением поражения ЦНС при ДЦП, тогда как спастичность и высокие рефлексы вызваны вторичной реструктуризацией нервно-мышечной связи [16, 17].

Если спастичность отмечается лишь в 75–80% случаев, то наличие мышечной слабости присуще всем пациентам с ДЦП [15, 16].

Все больше фактов доказывают, что именно степень мышечной слабости, а не спастичности определяет двигательный дефицит и инвалидизацию у пациентов с ДЦП в долгосрочной перспективе [16, 18]. Рациональная расстановка акцентов при восстановительном лечении с учетом особенностей и проявлений двигательных нарушений, а также состояния мышечной ткани в разные периоды развития ребенка позволит выбрать правильную тактику реабилитации, минимизируя возможные вторичные осложнения [15, 16, 18].

### **РОЛЬ МЕХАНОТЕРАПИИ В РЕАБИЛИТАЦИИ ДЕТЕЙ С ДЦП**

Механотерапия — это составная часть комплексной реабилитации детей с церебральным параличом [1, 3], которая позволяет дополнить и повысить эффективность других методов, начиная со стандартной лечебной физкультуры и вплоть до оперативных вмешательств, ускоряя и улучшая послеоперационный период восстановления [3, 19].

Однако включая в процесс комплексной реабилитации данный метод (механотерапию), стоит помнить о некоторых противопоказаниях к работе с тренажерами [3]. Наличие мышечного гипертонуса, фиксированных костных контрактур конечностей и/или их деформаций значительно затрудняет выполнение упражнений [3, 19]. Например, спецификой тренажера Lokomat (Носота, Швейцария) является синхронность движений во многих суставах, а также возможность совершать движения в изокинетическом режиме согласно индивидуальному подбору параметров двигательного цикла для конкретного пациента [19].

Существуют консервативные и хирургические методы лечения спастичности и ее последствий [13]. Согласно данным систематического обзора I. Novak и соавт. (2020), эффективными фармакологическими препаратами и нейрохирургическими методами лечения спастичности являются следующие: ботулинотерапия, интратекальное введение баклофена, прием диазепама, селективная дорсальная ризотомия (СДР) и др. [13]. Для достижения максимального функционального эффекта любой из антиспастических методов должен быть дополнен двигательной реабилитацией [13, 19], в том числе индивидуальным подбором методов механотерапии, наиболее соответствующих возрасту и функциональному уровню пациента, а также проведенному антиспастическому лечению [13, 16, 19]. Например, к одним из определяющих факторов успеха СДР относятся соблюдение интенсивного режима послеоперационной реабилитации и постурального менеджмента, а также грамотно подобранный курс восстановительного лечения [20, 21].

Этим детям необходимы активные тренировки, направленные на поддержание силы, длины и эластичности мышц ног, а также формирование более физиологичного двигательного стереотипа и улучшение селективного мышечного контроля [22].

Доказано, что у детей после СДР в раннем послеоперационном периоде нередко отмечается изменение чувствительности в нижних конечностях — как поверхностной, так и глубокой (нарушения ощущения своего тела в пространстве) [22]. У пациентов с предшествующими сенсорными нарушениями это может вызвать стресс и ухудшение двигательной функции, не связанные напрямую с функцией опорно-двигательного аппарата [19, 22].

Наиболее эффективным способом у детей с ДЦП оказалось применение роботизированной механотерапии в более поздний послеоперационный период (через 1 мес и более после окончания иммобилизации и начала восстановительного лечения) [19, 22]. Эта закономерность касалась прежде всего общей двигательной активности [19, 22].

По наблюдениям авторов, одним из наиболее широко используемых в нейрореабилитационной практике аппаратов роботизированной механотерапии является роботизированная система локомоторной терапии для нижних конечностей Lokomat. Система предназначена для осуществления длительного передвижения ног с использованием специальных ортезов в сагиттальной плоскости [1, 3].

Моторизированный тренажер Innowalk Pro (Made for Movement, Норвегия), являющийся по своим функциям упрощенным аналогом Lokomat [1, 3], поддерживая ребенка в вертикальном положении и подготавливая скелетные мышцы к физическим нагрузкам, обеспечивает постепенное увеличение нагрузки на мышцы спины и ног, тем самым стимулируя развитие правильного двигательного стереотипа [3].

Основным недостатком таких роботизированных технологий, как Lokomat (Hocoma, Швейцария) и аналогичное ему устройство Reo Ambulator (Motorika Ltd, Израиль, США), зарегистрированное в США как Auto Ambulator (Health South, Бирмингем, США), является наличие только одной рабочей сагиттальной плоскости движений [1, 3]. В связи с отсутствием движений таза, бедра, голени в других плоскостях из-за жесткой фиксации в аппарате резко ограничивается эффективность тренировки по выработке баланса тела и координации движений, что снижает адаптацию к выбору траектории произвольного движения, перешагиванию препятствий, ходьбе по неровной поверхности [1].

Из достоинств вышеперечисленных аппаратов стоит отметить простоту выполнения упражнений и низкий риск травматизации пациента [1], которые позволяют использовать их на ранних стадиях восстановительного лечения, при сниженных когнитивных функциях у пациентов, а также для самостоятельных занятий и в качестве профилактики вторичных осложнений основных заболеваний [1–3].

Недостатком других современных роботизированных механотерапевтических аппаратов для детей, таких как MOTomed (RECK-Technik, Германия), THERA-vital (THERA-Trainer, Германия), Kinetec (Kinetec, Франция), ARTROMOT (Ormed gmbh, Германия), Erigo (Hocoma, Швейцария), является направленность на тренировку простого, жестко детерминированного движения, в основном в одной плоскости, что недостаточно стимулирует выработку двигательного навыка [1].

Разработанное недавно роботизированное терапевтическое устройство Motion Maker (Швейцария) совмещает программируемую ходьбу в ортезах с функциональной электростимуляцией [23].

Существует теория применения комбинации приборов Motion Maker и WalkTrainer в одном комплексе [24]. После достижения положительных результатов на аппарате Motion Maker пациент может переходить на терапию с помощью прибора WalkTrainer, позволяющего осуществлять стимуляцию в амбулаторном режиме [25].

Доказана терапевтическая эффективность роботизированной механотерапии на нейрореабилитационном роботе Motion Maker на основании проведенного исследования, куда были включены 56 пациентов в возрасте

от 9 до 18 лет с последствиями вирусных энцефалитов и ДЦП [26]. Клиническая эффективность терапии этим аппаратом представлена в виде нарастания мышечной силы, снижения патологического мышечного тонуса, увеличения объема активных и пассивных движений. Отмечено, что показатели клинических улучшений коррелировали с динамикой показателей транскраниальной магнитной стимуляции [26].

Нами было отмечено, что одновременно с роботизированными тренажерами развиваются динамические тренажеры — костюмы динамической проприоцепции. Существует несколько вариантов тренировочных костюмов, разработанных группой российских физиологов и клиницистов [27]. По величине аксиальной нагрузки они делятся на увеличивающие нагрузку и снижающие нагрузку [27]. Костюмы аксиальной нагрузки — «Адели» («Адели-М», Россия), «Гравистат»/«Гравитон» («Огонек», Россия), «Регент» («ЦАМ», Россия); костюмы антигравитационного действия — «Атлант» (Dynaforce, Россия), «Фазтон» (НПФ «Медтехника», Россия).

Костюмы «Адели» и «Гравистат» представляют собой мягкий нагрузочный ортез, состоящий из эластичных регулируемых тяг, расположенных соответственно местоположению мышц-антагонистов [27].

Костюмы антигравитационного действия осуществляют свою функцию путем поддува сжатого воздуха в камеры, проходящие вдоль туловища и конечностей по ходу мышц-антагонистов, объем наполнения которых индивидуально дозирует инструктор для каждого пациента [27].

В основе действия данного метода лежат усиление и коррекция проприоцептивного афферентного потока [28], что, в свою очередь, приводит к коррекции патологического стереотипа движений, сложившегося у больного ДЦП, и способствует формированию правильных позных и локомоторных установок, а также улучшению функции мышления и речи [27, 28]. Методика помогает ребенку быстрее адаптироваться к изменению положения тела в пространстве, поскольку костюм действует как эластичный внешний каркас. Тренировочные костюмы закрепляют физиологическую позу больного и корректируют траекторию его движений [28].

Не менее важна роль виброплатформы в комплексной реабилитации детей с ДЦП, особенно в раннем послеоперационном периоде [29]. В процессе вертикализации с постепенным увеличением нагрузки основная работа направлена на осуществление упражнений на поддержание длины и силы мышц, тренировку правильного паттерна движений и селективного мышечного контроля [22].

В основе действия вибрационных платформ, например Galileo (Novotec Medical, Германия), Takasima (Takasima, Тайвань), Power Plate (Power Plate, Германия), лежат синусоидальные колебания, которые имеют различную амплитуду и частоту [29]. Колебания виброплатформы стимулируют движения таза, имитируя естественную ходьбу, что вызывает сокращение мышц и уменьшение их спастичности [29]. Также посредством виброплатформ тренируется баланс тела, стимулируется походка и улучшаются координационные навыки [29].

Использование роботов, в том числе управляемых компьютером, в нынешнее время является одним из основных направлений в двигательной нейрореабилитации [30].

Особую актуальность в настоящее время в детской реабилитации приобретает применение биологической обратной связи (БОС) [30]. При выполнении повторяющихся двигательных актов с использованием зрительной

и звуковой информации о совершении движения в режиме реального времени при помощи компьютерных игр ребенок получает возможность сознательно корректировать выполняемое действие [31].

Исследование, проведенное в Республике Корея, в котором приняли участие 18 детей 7–15 лет со спастической формой ДЦП и 8 здоровых детей того же возраста, продемонстрировало преимущества применения БОС по параметрам электромиограммы [31]. По результатам исследования зафиксировано, что при использовании обратной связи в виде видеоигры увеличивались мотивация и позитивные эмоции ребенка, что отражалось на результатах [31], а также более эффективно проходил процесс мультисенсорной интеграции для планирования и исполнения движения [32].

В последние два десятилетия активно развивается технология интерфейса «мозг – компьютер» (ИМК), расширяются области ее применения, предлагаются новые типы датчиков для регистрации сигналов мозга, улучшается качество их распознавания, усовершенствуются методы тренировки испытуемых на управление ИМК [33].

Ученые из Южной Кореи в своем исследовании использовали ИМК, ассоциированный с электростимулятором мышц-разгибателей запястья [34]. Запуская электростимуляцию на основе анализа параметров электроэнцефалографии в режиме реального времени, выявляли изменения отношения мощности бета-ритма к тета-ритму при представлении пациентом разгибания кисти [34]. После ряда проведенных сеансов у детей с ДЦП отмечалось улучшение показателей мелкой моторики, а также данных концентрации внимания [34]. Согласно нескольким проведенным контролируемым исследованиям, наиболее эффективным в нейро-реабилитации является применение роботизированного комплекса, содержащего ИМК с управляемым им экзоскелетом [35–37].

На основании наблюдений и опыта применения все большее внимание детских реабилитологов привлекает экзорехабилитация — методика, сочетающая применение экзоскелетов с другими реабилитационными методами, которая приводит к частичному или полному восстановлению двигательных функций верхних и нижних конечностей [2].

Для коррекции двигательных функций рук детей с ДЦП разработан целый ряд роботизированных устройств [38]. Наиболее распространенными среди них являются три роботизированных устройства: In Motion 2, коммерческая версия MIT-MANUS (Interactive Motion Technologies USA, США), NJIT-RAVR (The New Jersey Institute of Technology Robot-Assisted Virtual Rehabilitation, США) и CosmoBot (AnthroTronix, США) [38].

MIT-MANUS — первый робот для тренировки паретичной руки, предложенный в середине 1990-х гг. [38]. Используемый в детской реабилитации тренажер In Motion 2 с помощью роботизированного ортеза руки обеспечивает тренировку движений, задачей которых является «дотянуться до предмета», переместиться из центральной позиции к мишени и обратно [38]. По результатам нескольких проведенных исследований отмечалась положительная динамика в виде улучшения кинематики движений — скорости и плавности [39–41].

Система NJIT-RAVR представляет собой адаптивную робототехнику со сложными моделями виртуальной реальности для реабилитации нарушений функций верхних конечностей у детей с гемипаретической формой ДЦП [42]. Подобно In Motion 2, система NJIT-RAVR может оказывать помощь или сопротивление движению

ребенка [42]. Проводимый в формате игры тренинг направлен на улучшение времени достижения цели, увеличение показателя точности движений и улучшение траектории движения [32, 42].

Система CosmoBot (AnthroTronix, США) разработана для обеспечения немедленной визуальной и слуховой обратной связи с пациентом при выполнении заданных двигательных задач [42]. Данная система анализирует изменения показателей движения предплечья в супинации и пронации и при сгибании и разгибании запястья [42].

Новейшим инструментом роботизированной механотерапии в детской реабилитации в настоящее время являются системы экзоскелетов [43]. Для формирования правильного паттерна ходьбы, начиная с раннего возраста [26] и проведения активной вертикализации ребенка [26], разработан целый ряд экзоскелетов, однако включать их в реабилитацию, на основании опыта авторов, целесообразней и эффективней (руководствуясь индивидуальным подбором программы реабилитации) после проведения курса механотерапии на системе Lokomat. В соответствии с заданными внешними параметрами экзоскелет обеспечивает ходьбу с низким, средним или высоким шагом (задается углами в тазобедренных и коленных суставах) и разной длиной шага (короткий, средний или длинный шаг) [44]. Ходьба в экзоскелете осуществляется за счет последовательного переноса массы тела пациента (пилота экзоскелета) с одной ноги на другую [44]. Действующие образцы экзоскелетов созданы в настоящее время в России, США, Японии и Израиле [45].

Разработкой российских экзоскелетов «ЭкзоАтлет» (ExoAtlet) занимается команда ученых, сформированная на базе Института механики при МГУ им. М.В. Ломоносова и работающая по заказу МЧС России. Медицинский экзоскелет нового поколения ExoAtlet Albert рекомендован для использования людьми с полной или частичной утратой движений нижних конечностей [45].

ExoAtlet Bambini — детская версия аппарата ExoAtlet (Россия), специально разработанная для детей с нарушениями опорно-двигательной системы, оснащена более мягкими материалами и упругими элементами для уменьшения нагрузки на тело ребенка [44]. Сочетание ходьбы в экзоскелете с различными видами нейрофизиологических стимуляций позволяет существенно ускорить процесс обучения детей ходьбе, создавая синергический реабилитационный эффект [44].

Испанская компания Marsi Bionics, занимающаяся разработкой экзоскелетов с 2013 г., выпустила педиатрический экзоскелет ATLAS 2030 (Marsi Bionics S.L., Мадрид, Испания), оптимизированный для детей с серьезными нервно-мышечными заболеваниями, такими как ДЦП, расщепление позвоночника и др. [46]. Данное устройство способно самостоятельно поддерживать баланс ходьбы без необходимости использования второстепенных средств поддержки (например, костыли или ходунки) [46]. Экзоскелет рассчитан на применение у детей в возрасте от 3 до 14 лет [46] и протестирован у пациентов с церебральным параличом, получив хорошие результаты в отношении диапазона движений: нарастание силы всех групп мышц и снижение пластичности (улучшилось разгибание в тазобедренном и коленном суставах и тыльное сгибание голеностопного сустава) после 10 сеансов использования экзоскелета по сравнению с исходным состоянием [47].

Позже клинические преимущества этого экзоскелета были доказаны и у детей со спинальной мышечной атрофией [48].

По результатам нескольких пилотных случаев зарегистрирован рост показателей изометрической силы — увеличился диапазон движений на 12,6% в тазобедренном и на 34,1% в голеностопном суставах, в то время как показатели коленного сустава оставались стабильными после исследования [48].

### **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МЕХАНОТЕРАПИИ У ДЕТЕЙ С ДЦП В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА И УРОВНЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ**

Говоря о детях, важно учитывать возраст ребенка, тяжесть двигательных нарушений (например, при ДЦП это уровни поражения ЦНС, согласно классификации Gross Motor Function Classification System (GMFCS), I–V [49]), а также наличие тех или иных ортопедических осложнений.

У детей раннего возраста (0–3 лет) основными целями реабилитации являются обучение моторным навыкам (повороты, сидение, ползание, стояние) в зависимости от степени их утраты или недоразвития и индивидуальная психолого-педагогическая помощь. Именно в этот период у детей с незначительными поражениями ЦНС начинаются самостоятельная вертикализация и ходьба, а неправильно сформированные двигательные навыки могут сказаться на дальнейшем развитии двигательного стереотипа [50, 51].

В данной группе применение механотерапии значительно ограничено из-за малого возраста детей, отсутствия оборудования, подходящего по параметрам, и недостаточно развитой когнитивной сферы для использования сложных компьютерных задач или игр, однако для пациентов с установленным диагнозом ДЦП и уровнями I–IV по шкале GMFCS могут применяться экзоскелеты, виброплатформы, аппараты Корвит, тренажеры Гросса, позволяющие уже с раннего возраста подготовить ребенка к последовательной вертикализации и начать формирование правильного паттерна ходьбы.

В младшей возрастной группе (3–5 лет) и с оценкой по шкале GMFCS I–IV более активно подключаются занятия на механизированных аппаратах, однако они несут преимущественно характер пассивной тренировки, поскольку в этом возрасте у детей недостаточно сформированы пространственные представления, имеются особенности коммуникативной и эмоционально-волевой сферы. Тренинг с использованием роботизированной системы вызывает мощный положительный психоэмоциональный всплеск, что существенно повышает мотивацию к самостоятельным движениям [52]. У детей этой возрастной группы эффективность двигательной реабилитации во многом зависит от способности инструктора, проводящего занятия, заинтересовать ребенка, а также посредством игры сформировать правильные двигательные стереотипы [53].

В этом возрасте возможно использовать виброплатформы, экзоскелет, беговые дорожки, велотренажеры, Lokomat, Hand Tutor.

У детей средней возрастной группы (6–10 лет) и с оценкой по шкале GMFCS I–III с большей эффективностью можно применять активно-пассивные и полностью активные режимы тренировок, особенно у пациентов, у которых ранее были сформированы правильные стереотипы движений. Актуальным становится визуальный контроль ребенка за показателями, отражаемыми на дисплее тренажера в процессе тренировок. Дети с сохраненным интеллектом следят за симметричностью работы правой и левой нижней конечности, произвольно меняют силу

мышц. Функциональные целеориентированные тренировки подразумевают активное включение и мотивацию самого ребенка, способность понимать и выполнять задания, достаточную сохранность сенсорных систем (в первую очередь зрительной и слуховой) [54].

Дети старшей возрастной группы (11–17 лет) и с оценкой по шкале GMFCS I–III с сохраненным интеллектом становятся активными участниками реабилитационного процесса. У них достаточно высока мотивация к освоению или улучшению навыка ходьбы, что значительно упрощает и ускоряет процесс двигательной реабилитации с использованием роботизированных систем.

В группах детей 6–10 лет и 11–17 лет с оценкой по шкале GMFCS I–III целесообразно применение виброплатформ, экзоскелета, беговых дорожек, велотренажеров, тренажера Lokomat, аппарата Hand Tutor, различных тренажеров для восстановления функций верхних и нижних конечностей, например линии Kinetek Pablo и Luna.

Отдельно стоит уделить внимание пациентам V уровня по шкале GMFCS. Таким пациентам роботизированная механотерапия (виброплатформа, велотренажер) должна проводиться очень ограниченно и с большой осторожностью ввиду наличия большого количества сопутствующей ортопедической патологии и явных когнитивных нарушений. Наличие же выраженного спастического синдрома и нарушение проприоцепции, свойственные не только пациентам с V уровнем по шкале GMFCS, ведут к дефициту координации и равновесия, что значительно затрудняет выполнение упражнений на тренажерах [19].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Современная механотерапия в настоящее время представлена довольно широким спектром методик и тренажеров, которые могут быть подобраны индивидуально для каждого пациента с учетом особенностей заболевания, поставленных реабилитационных целей, возраста, двигательного дефицита, индивидуальных особенностей и сопутствующих ортопедических осложнений.

Персонализированная технология применения роботизированной механотерапии может значительно расширить возможности восстановления двигательных навыков и обеспечить наилучшую социализацию детей раннего возраста, в том числе пациентов с ДЦП, для которых вертикализация была доступна до настоящего времени только с помощью взрослого или стационарных аппаратов и вертикализаторов без коррекции стереотипа движения.

Необходимость обязательного включения механотерапии в комплекс реабилитационных мероприятий в настоящий момент не вызывает сомнения, поскольку с ее помощью может быть значительно повышен реабилитационный потенциал пациентов и значительно расширены возможности детей с двигательными нарушениями.

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

У.Ш. Ашрафова — концепция работы, написание статьи, редактирование.

О.С. Куприянова — разработка дизайна, подготовка черновика рукописи.

Е.К. Кармазина — сбор данных, систематизация полученных результатов.

О.А. Клочкова — формулировка и развитие ключевых целей и задач, редактирование.

А.М. Мамедьяров — изучение и анализ данных, итоговая переработка статьи.

Е.В. Комарова — выводы и заключение.

М.И. Ивардава — выводы и заключение.

Г.А. Каркашадзе — выводы и заключение, итоговая переработка статьи.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION

Ulvia Sh. Ashraphova — conception, writing, editing.

Olga S. Kupriianova — design, preparation of a draft manuscript.

Elena K. Karmazina — data analyzing, final revision of the article.

Olga A. Klochkova — data collecting, systematization of the results obtained.

Aiaz M. Mamedieiarov — formulation and development of key goals and objectives, editing.

Elena V. Komarova — findings and conclusion.

Marika I. Ivardava — findings and conclusions.

George A. Karkashadze — findings and conclusion, edition.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Отсутствует.

#### FINANCING SOURCE

Not specified.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Макарова М.Р., Лядов К.В., Кочетков А.В. Тренажерные аппараты и устройства в двигательной реабилитации неврологических больных // *Доктор.ру.* — 2012. — № 10. — С. 54–62. [Makarova MR, Lyadov KV, Kochetkov AV. The role of exercise equipment and devices in motor rehabilitation of patients with neurological disorders. *Doctor.ru.* 2012;(10):54–62. (In Russ).]
- Довгань В.И., Темкин И.Б. *Механотерапия.* — М.: Медицина; 1981. — 128 с. [Dovgan' VI, Temkin IB. *Mekhanoterapiya.* Moscow: Meditsina; 1981. 128 p. (In Russ).]
- Герцик Ю.Г., Иванова Г.А., Суворов А.Ю. Методики и аппаратура для активно-пассивной механотерапии в здоровые сберегающих технологиях // *Гуманитарный вестник.* — 2013. — Вып. 4. — С. 1–10. [Gertsik YuG, Ivanova GE, Suvorov AYU. Methods and instruments for active-passive mechanotherapy in health-saving technologies. *Humanities Bulletin of BMSTU.* 2013;4:1–10. (In Russ).]
- Adkins DL, Boychuk J, Remple MS, Kleim JA. Motor training induces experience-specific patterns of plasticity across motor cortex and spinal cord. *J Appl Physiol* (1985). 2006;101(6):1776–1782. doi: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00515.2006>
- Клочкова О.А., Куренков А.Л. *Ботулинотерапия при детском церебральном параличе: практические советы и ультразвуковой контроль.* — М.: МЕДпресс-информ; 2020. — 248 с. [Klochkova OA, Kurenkov AL. *Botulinoterapiya pri detskom tserebral'nom paraliche: prakticheskie sovety i ul'trazvukovoi kontrol'.* Moscow: MEDpress-inform; 2020. 248 p. (In Russ).]
- Живолупов С.А., Самарцев И.Н. Нейропластичность: патофизиологические аспекты и возможности терапевтической модуляции // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* — 2009. — Т. 109. — № 4. — С. 78–85. [Zhivolupov CA, Samartsev IN. Neuroplasticity: pathophysiological patterns and perspectives of therapeutic modulation. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2009;109(4):78–85. (In Russ).]
- Johansson BB. Brain plasticity and stroke rehabilitation. The Willis lecture. *Stroke.* 2000;31(1):223–230. doi: <https://doi.org/10.1161/01.str.31.1.223>
- Liepert J, Graef S, Uhde I, et al. Training-induced changes of motor cortex representations in stroke patients. *Acta Neurol Scand.* 2000;101(5):321–326. doi: <https://doi.org/10.1034/j.1600-0404.2000.90337a.x>
- Reid LB, Rose SE, Boyd RN. Rehabilitation and neuroplasticity in children with unilateral cerebral palsy. *Nat Rev Neurol.* 2015;11(7):390–400. doi: <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2015.97>
- Mundkur N. Neuroplasticity in children. *Indian J Pediatr.* 2005;72(10):855–857. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02731115>
- Christine C, Dolk H, Platt MJ, et al. Recommendations from the SCPE collaborative group for defining and classifying cerebral palsy.

#### РАСКРЫТИЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### DISCLOSURE OF INTEREST

Not declared.

#### ORCID

У.Ш. Ашрафова

<https://orcid.org/0000-0003-1721-5609>

О.С. Куприянова

<https://orcid.org/0000-0002-9816-6919>

Е.К. Кармазина

<https://orcid.org/0000-0003-1849-0979>

О.А. Клочкова

<https://orcid.org/0000-0002-4079-3450>

А.М. Мамедъяров

<https://orcid.org/0000-0003-0818-6906>

Е.В. Комарова

<https://orcid.org/0000-0001-6000-5418>

М.И. Ивардава

<https://orcid.org/0000-0002-4669-9510>

Г.А. Каркашадзе

<https://orcid.org/0000-0002-8540-3858>

*Dev Med Child Neurol Suppl.* 2007;109:35–38. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.tb12626.x>

12. Register ACPR. *Report of the Australian Cerebral Palsy Register: birth years 1995–2012.* November 2018. Available online: <https://cpregister.com/wp-content/uploads/2019/02/Report-of-the-Australian-Cerebral-Palsy-Register-Birth-Years-1995-2012.pdf>. Accessed on December 11, 2023.

13. Novak I, Morgan C, Fahey M, et al. State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2020;20(2):3. doi: <https://doi.org/10.1007/s11910-020-1022-z>

14. Hägglund G, Wagner P. Development of spasticity with age in a total population of children with cerebral palsy. *BMC Musculoskelet Disord.* 2008;9:150. doi: <https://doi.org/10.1186/1471-2474-9-150>

15. Wissel J, Ward AB, Erztgaard P, et al. European consensus table on the use of botulinum toxin type A in adult spasticity. *J Rehabil Med.* 2009;41(1):13–25. doi: <https://doi.org/10.2340/16501977-0303>

16. Клочкова О.А., Куренков А.Л. Мышечная слабость и утрата двигательных навыков у пациентов с детским церебральным параличом // *Вопросы современной педиатрии.* — 2020. — Т. 19. — № 2. — С. 107–115. — doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v19i2.2103> [Klochkova OA, Kurenkov AL. Muscular weakness and loss of motor skills in patients with cerebral palsy. *Voprosy sovremennoi pediatrii — Current Pediatrics.* 2020;19(2):107–115. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v19i2.2103>]

17. Inspieler C, Marschik PB. Early markers for cerebral palsy. In: *Cerebral palsy: a multidisciplinary approach.* Panteliadis CP, ed. Cham: Springer Cham; 2018. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-67858-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67858-0_9)

18. Mockford M, Caulton JM. The pathophysiological basis of weakness in children with cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther.* 2010;22(2):222–233. doi: <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e3181dbaf96>

19. Баиндурашвили А.Г., Кенис В.М., Иванов С.В., Икоева Г.А. Реабилитация детей с нейроортопедической патологией на этапах хирургического лечения с применением роботизированной механотерапии // *Вестник восстановительной медицины.* — 2012. — № 2. — С. 57–60. [Baindurashvili AG, Kenis VM, Ivanov SV, Ikoeva GA. Reabilitatsiya detei s neuroortopedicheskoj patologiei na etapakh khirurgicheskogo lecheniya s primeneniem robotizirovannoi mekhanoterapii. *Bulletin of Rehabilitation Medicine.* 2012;(2):57–60. (In Russ).]

20. Tedroff K, Löwing K, Jacobson DN, Åström E. Does loss of spasticity matter? A 10-year follow-up after selective dorsal rhizotomy in cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2011;53(8):724–729. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2011.03969.x>

21. Tedroff K, Löwing K, Åström E. A prospective cohort study investigating gross motor function, pain, and health-related quality of life

- 17 years after selective dorsal rhizotomy in cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2015;57(5):484–490. doi: <https://doi.org/10.1111/dmcn.12665>
22. Ключкова О.А., Колесникова Е.П., Зиненко Д.Ю., Бердичевская Е.М. Селективная дорзальная ризотомия в лечении спастичности у пациентов с детским церебральным параличом // *Вопросы современной педиатрии.* — 2022. — Т. 21. — № 1. — С. 19–28. — doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v21i1.2382> [Klochkova OA, Kolesnikova EP, Zinenko DYU, Berdichevskaya EM. Selective Dorsal Rhizotomy in Treatment of Spasticity in Patients with Cerebral Palsy. *Voprosy sovremennoi pediatrii* — *Current Pediatrics.* 2022;21(1):19–28. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.15690/vsp.v21i1.2382>]
23. Reynard F, Gerber F, Favre C, Al-Khodairy A. Movement analysis with a new robotic device — The MotionMaker™: A case report. *Gait & Posture.* 2009;30(2):S149–S150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.08.224>
24. De Mauro A, Carrasco E, Oyarzun D, et al. Advanced Hybrid Technology for Neurorehabilitation: The HYPER Project. In: *Advances in Robotics and Virtual Reality.* Gulrez T, Hassanien AE, eds. Intelligent Systems Reference Library. Vol. 26. Heidelberg: Springer Berlin; 2012. pp. 89–108. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23363-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23363-0_4)
25. Bouri M, Clavel R. *Risk analysis of a rehabilitation medical robot.* IMT-2011. Lausanne; 2011. p. 348
26. Лобзин Ю.В., Иванова М.В., Скрипченко Н.В. и др. Опыт применения роботизированной механотерапии в реабилитации детей с двигательными нарушениями различного генеза // *Медицина экстремальных ситуаций.* — 2015. — № 1. — С. 22–26. [Lobzin YuV, Ivanova MV, Skripchenko NV, et al. Experience of using robotic mechanotherapy in rehabilitation of children with motor disorders of various genesis // *Medicine of Extreme Situations.* 2015;1:22–26. (In Russ.)]
27. Лисовский Е.В., Кусаинова К.К. Метод динамической проприоцептивной коррекции в реабилитации пациентов с детским церебральным параличом // *Клиническая Медицина Казахстана.* — 2016. — № 2. — С. 31–35. [Lisovskiy YeV, Kussainova KK. The method of dynamic proprioceptive correction in the rehabilitation of patients with children's cerebral palsy. *Journal of Clinical Medicine of Kazakhstan.* 2016;(2):31–35. (In Russ.)]
28. Молчанова Т.В., Кохан С.Т. Анализ опыта применения метода динамической проприоцептивной коррекции в центре медико-социальной реабилитации инвалидов «Росток» Забайкальского края // *Состояние здоровья: медицинские, психолого-педагогические и социальные аспекты: материалы IX Международной научно-практической интернет-конференции, Чита, 23–29 апреля 2018 г.* — Чита: Забайкальский государственный университет; 2018. — С. 113–117. [Molchanova TV, Kokhan ST. Analysis of the experience of application of a method of dynamic proprioceptive correction in the center of medico-social rehabilitation of disabled people “Rostok” of Zabaykalsky Krai. *Sostoyanie zdorov'ya: meditsinskije, psixologo-pedagogicheskie i sotsial'nye aspekty: Materials of the IX International Scientific and Practical Internet Conference, Chita, April 23–29, 2018.* Chita: Transbaikal State University; 2018. pp. 113–117. (in Russ.)]
29. Кирьянова В.В., Герасименко М.Ю., Шорохова М.Н., Горбачева К.В. Вибротерапия в лечебной практике // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация.* — 2020. — Т. 19. — № 3. — С. 171–177. — doi: <https://doi.org/10.17816/1681-3456-2020-19-3-5> [Kir'yanova VV, Gerasimenko MY, Shorokhova MN, Gorbacheva KV. Vibrotherapy in medical practice. *Russian Journal of Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation.* 2020;19(3):171–177. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.17816/1681-3456-2020-19-3-5>]
30. Котов С.В., Лиждвой В.Ю., Секирин А.Б., и др. Эффективность применения экзоскелета ExoAtlet для восстановления функции ходьбы у больных рассеянным склерозом // *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* — 2017. — Т. 117. — № 10-2. — С. 41–47. — doi: <https://doi.org/10.17116/jnevro201711710241-47> [Kotov SV, Ljzdvoj VYu, Sekirin AB, et al. The efficacy of the exoskeleton ExoAtlet to restore walking in patients with multiple sclerosis. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry.* 2017;117(10-2):41–47. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.17116/jnevro201711710241-47>]
31. Yoo JW, Lee DR, Cha YJ, You SH. Augmented effects of EMG biofeedback interfaced with virtual reality on neuromuscular control and movement coordination during reaching in children with cerebral palsy. *NeuroRehabilitation.* 2017;40(2):175–185. doi: <https://doi.org/10.3233/NRE-161402>
32. 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. — Т. 19. — № 3. — С. 156–165. — doi: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165> [Larina NV, Pavlenko VB, Korsunskaya LL, et al. Rehabilitation possibilities for children with cerebral palsy through the use of robotic devices and biofeedback. *Bulletin of Siberian Medicine.* 2020;19(3):156–165. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>]
33. Фролов А.А., Бобров П.Д. Интерфейс мозг-компьютер: нейрофизиологические предпосылки и клиническое применение // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова.* — 2017. — Т. 67. — № 4. — С. 365–376. — doi: <https://doi.org/10.7868/S0044467717040013> [Frolov AA, Bobrov PD. Brain-computer interface: neurophysiological background, clinical application. *Zhurnal vysshei nervnoi deyatelnosti imeni I.P. Pavlova.* 2017;67(4):365–376. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.7868/S0044467717040013>]
34. Kim TW, Lee BH. 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(9):2491–2494. doi: <https://doi.org/10.1589/jpts.28.2491>
35. Фролов А.А., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х. и др. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки // *Вестник РГМУ.* — 2016. — № 2. — С. 17–25. [Frolov AA, Mokienko OA, Lyukmanov RKH, et al. Preliminary results of a controlled study of BCI-exoskeleton technology efficacy in patients with poststroke arm paresis. *Bulletin of RSMU.* 2016;(2):17–25. (In Russ.)]
36. Ang KK, Chua KS, Phua KS, et al. Randomized Controlled Trial of EEG-Based Motor Imagery Brain – Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke. *Clin EEG Neurosci.* 2015;46(4):310–320. doi: <https://doi.org/10.1177/1550059414522229>
37. Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, et al. Brain – machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Ann Neurol.* 2013;74(1):100–108. doi: <https://doi.org/10.1002/ana.23879>
38. Chen YP, Howard AM. Effects of robotic therapy on upper-extremity function in children with cerebral palsy: A systematic review. *Dev Neurorehabil.* 2016;19(1):64–71. doi: <https://doi.org/10.3109/17518423.2014.899648>
39. Fasoli SE, Fragala-Pinkham M, Hughes R, et al. Upper limb robotic therapy for children with hemiplegia. *Am J Phys Med Rehabil.* 2008;87(11):929–936. doi: <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e31818a6aa4>
40. Frascarelli F, Masia L, Di Rosa G, et al. The impact of robotic rehabilitation in children with acquired or congenital movement disorders. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2009;45(1):135–1341.
41. Krebs HI, Fasoli SE, Dipietro L, et al. Motor learning characterizes habilitation of children with hemiplegic cerebral palsy. *Neurorehabil Neural Repair.* 2012;26(7):855–860. doi: <https://doi.org/10.1177/1545968311433427>
42. Qiu Q, Ramirez DA, Saleh S, et al. 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: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-40>
43. Мосина М.О., Тихонов С.В., Селиванова Е.А. и др. Роботизированные технологии в комплексной реабилитации детей с двигательными нарушениями // *Детская и подростковая реабилитация.* — 2021. — № 2. — С. 66–69. [Mosina MO, Tikhonov SV, Selivanova EA, et al. Robotic technologies in the complex rehabilitation of children with movement disorders. *Detskaya i podrostkovaya reabilitatsiya.* 2021;(2):66–69. (In Russ.)]
44. Ковина М.В., Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Батышева Т.Т. Комплексная абилитация детей раннего возраста с гемипаретической формой ДЦП с применением экзоскелета ExoAtlet Bambini-Mini // *Детская и подростковая реабилитация.* — 2022. — № 3. — С. 5–12. [Kovina MV, Pismennaya EV, Petrushanskaya KA, Batysheva TT. Complex abilitation of children of

- the early age with hemiparetic form of infantile cerebral palsy with application of the exoskeleton ExoAtlet Bambini-Mini. *Detskaya i podrostkovaya reabilitatsiya*. 2022;(3):5–12. (In Russ.)
45. Федоров А.В. Краткая история создания экзоскелетов // *Наука, техника и образование*. — 2017. — № 3. — С. 71–73. [Fedorov AV. Brief history of exoskeletons. *Science, Technology and Education*. 2017;(3):71–73. (In Russ).]
46. Белова А.Н., Борзиков В.В., Кузнецов А.Н., Рукина Н.Н. Роботизированные устройства в нейрореабилитации: состояние вопроса // *Вестник восстановительной медицины*. — 2018. — № 2(84). — С. 94–107. [Belova AN, Borzikov VV, Kuznetsov AN, Rukina NN. Robotic Devices in Neurorehabilitation: Review. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2018;(2):94–107. (In Russ).]
47. Delgado E, Cumplido C, Ramos J, et al. ATLAS2030 Pediatric Gait Exoskeleton: Changes on Range of Motion, Strength and Spasticity in Children With Cerebral Palsy. A Case Series Study. *Front Pediatr*. 2021;9:753226. doi: <https://doi.org/10.3389/fped.2021.753226>
48. Cumplido-Trasmonte C, Ramos-Rojas J, Delgado-Castillejo E, et al. Effects of ATLAS 2030 gait exoskeleton on strength and range of motion in children with spinal muscular atrophy II: a case series. *J Neuroeng Rehabil*. 2022;19(1):75. doi: <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01055-x>
49. Palisano R, Rosenbaum P, Walter S, et al. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 1997;39(4):214–223. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1997.tb07414.x>
50. Приходько О.Г., Югова О.В. Система ранней помощи детям с ограниченными возможностями здоровья и их родителям / АНО «Совет по вопросам управления и развития». — М.: ООО «Деловые и юридические услуги “ЛексПраксис”»; 2015. — 144 с. [Prikhod'ko OG, Yugova OV. *Sistema rannei pomoshchi detyam s ogranichennymi vozmozhnostyami zdorov'ya i ikh roditelyam*. ANO “Sovet po voprosam upravleniya i razvitiya”. Moscow: ООО “Delovye i yuridicheskie uslugi ‘LeksPraksis’”; 2015. 144 p. (In Russ).]
51. Бутко Г.А., Кательсон Т.А., Олту С.П. Развитие системы ранней комплексной помощи детям с ограниченными возможностями здоровья в учреждениях образования и здравоохранения // *Вестник Мининского университета*. — 2019. — Т. 7. — № 4. — С. 1–18. [Butko GA, Katelson TA, Oltu SP. Development of an early comprehensive care system for children with disabilities in educational and healthcare institutions. *Vestnik of Minin University*. 2019;7(4):1–18. (In Russ).]
52. Кочубей Г.Н., Устинова А.В., Меньшикова Т.Н. Опыт применения комплекса Lokomat у детей с ДЦП // *Вестник физиотерапии и курортологии*. — 2015. — Т. 21. — № 2. — С. 134. [Kochubei GN, Ustinova AV, Men'shikova TN. Опыт primeneniya kompleksa Lokomat u detei s DTsP. *Vestnik fizioterapii i kurortologii*. 2015;21(2):134. (In Russ).]
53. Меркушева Е.П. Развитие двигательной сферы — важное условие эффективной коррекции детей с ограниченными возможностями здоровья // *Образование и воспитание*. — 2018. — № 5. — С. 54–60. [Merkusheva EP. Razvitie dvigatel'noi sfery — vazhnoe uslovie effektivnoi korrektsii detei s ogranichennymi vozmozhnostyami zdorov'ya. *Obrazovanie i vospitanie*. 2018;(5):54–60. (In Russ).]
54. Graham D, Aquilina K, Mankad K, Wimalasundera N. Selective dorsal rhizotomy: current state of practice and the role of imaging. *Quant Imaging Med Surg*. 2018;8(2):209–218. doi: <https://doi.org/10.21037/qims.2018.01.08>

Статья поступила: 28.09.2023, принята к печати: 18.12.2023

The article was submitted 28.09.2023, accepted for publication 18.12.2023

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / ABOUT THE AUTHORS

**Ашрафова Ульвия Шахиновна [Ulviia Sh. Ashraphova, MD]; адрес:** 119333, г. Москва, ул. Фотиевой, д 10, стр. 1. [address: 10 Fotievoy Str., build 1, Moscow, 119333, Russian Federation]; **телефон:** +7 (968) 492-44-56; **e-mail:** doc.ashrafova@gmail.com; **e-Library SPIN:** 1711-8463

**Куприянова Ольга Сергеевна [Olga S. Kupriianova, MD]; e-mail:** makarenok-kuprik@yandex.ru; **e-Library SPIN:** 8919-1526

**Кармазина Елена Константиновна [Elena K. Karmazina, MD]; e-mail:** lekarma@mail.ru

**Клочкова Ольга Андреевна, к.м.н. [Olga A. Klochkova, MD, PhD]; e-mail:** dc.klochkova@gmail.com; **e-Library SPIN:** 2999-4404

**Мамедъяров Аяз Магеррамович, к.м.н. [Aiaz M. Mamedieiarov, MD, PhD]; e-mail:** ayaz.mamedyarov@yandex.ru

**Комарова Елена Владимировна, д.м.н. [Elena V. Komarova, MD, PhD]; eLibrary SPIN:** 2581-8021

**Ивардава Марика Индикоевна, к.м.н. [Marika I. Ivardava, MD, PhD]; eLibrary SPIN:** 4865-4688

**Каркашадзе Георгий Арчилович, к.м.н. [George A. Karkashadze, MD, PhD]; e-mail:** karkaga@mail.ru; **eLibrary SPIN:** 6248-0970