

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОХОДКИ И ПОСТРОЕНИЕ  
ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ МЕДИЦИНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ  
ПРИ ДЕТСКОМ ЦЕРЕБРАЛЬНОМ ПАРАЛИЧЕ  
НА ОСНОВЕ БЕЗМАРКЕРНОГО ВИДЕОАНАЛИЗА**

<sup>1</sup>Батышева Т. Т. ORCID ID 0000-0003-0928-2131,

<sup>1</sup>Тихонов С. В. ORCID ID 0000-0002-5489-3516,

<sup>1</sup>Алексеева М. В. ORCID ID 0000-0001-8448-8493,

<sup>1</sup>Климов Ю. А. ORCID ID 0000-0001-5946-094X,

<sup>2,3</sup>Пеганский Д. А. ORCID ID 0009-0006-1723-1800,

<sup>2,4</sup>Куликова О. М. ORCID ID 0000-0001-9082-9848,

<sup>2,5</sup>Усачева Е. В. ORCID ID 0000-0002-6134-1533

<sup>1</sup>Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы  
«Научно-практический центр детской психоневрологии Департамента здравоохранения города Москвы»,  
Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Агентство «АСТ»,  
Омск, Российская Федерация, e-mail: science@ast.agency;

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья имени  
П. Ф. Лесгафта», Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Владивостокский государственный университет», Владивосток, Российская Федерация;

<sup>5</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Омский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской  
Федерации, Омск, Российская Федерация

Медицинская реабилитация детей с неврологическими двигательными нарушениями – одна из приоритетных задач восстановительной медицины. Особую клиническую сложность представляет ведение пациентов, у которых неврологически обусловленный патологический локомоторный паттерн усугубляется биомеханической перегрузкой опорно-двигательного аппарата в силу наличия ожирения. Цель исследования: на основании количественного инструментального видеоанализа походки обосновать и разработать индивидуальную этапную программу медицинской реабилитации у ребенка с неврологическими двигательными нарушениями центрального характера в виде двустороннего crouch-паттерна и ожирением. Представлен клинический вариант обоснования индивидуальной программы медицинской реабилитации на основании видеоанализа походки у ребенка с детским церебральным параличом и сопутствующим ожирением. Выполнен двухкамерный видеоанализ ходьбы с обработкой алгоритмом MediaPipe Pose, расчетом спатиотемпоральных и кинематических параметров, клинических шкал (Эдинбургская визуальная оценка походки, индекс отклонения походки, система классификации больших моторных функций); полученные значения сопоставлены с данными маркерной системы Qualisys. У ребенка с детским церебральным параличом и ожирением установлено снижение скорости ходьбы, каденции, увеличение продолжительности двойной опоры, ограничение объема движений в коленном суставе и голеностопном суставе, crouch-паттерн. На основании полученных данных разработана 12-недельная индивидуальная программа медицинской реабилитации. Безмаркерный видеоанализ походки позволяет выявить и количественно оценить паттерн двигательных нарушений, на основании которого становится возможным создание персонализированной программы реабилитации; повторный видеоанализ обеспечивает количественную оценку динамики показателей и объективный контроль эффективности реабилитационных мероприятий, что подтверждает клиническую состоятельность метода.

Ключевые слова: медицинская реабилитация, восстановительная медицина, неврологические двигательные нарушения, безмаркерный видеоанализ походки, эдинбургская визуальная оценка походки, индекс отклонения походки, система классификации больших моторных функций, управляемая реабилитация.

# QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GAIT AND THE CONSTRUCTION OF AN INDIVIDUAL PROGRAM OF MEDICAL REHABILITATION FOR CEREBRAL PALSY BASED ON MARKER-FREE VIDEO ANALYSIS

<sup>1</sup>Batysheva T. T. ORCID ID 0000-0003-0928-2131,  
<sup>1</sup>Tikhonov S. V. ORCID ID 0000-0002-5489-3516,  
<sup>1</sup>Alekseeva M. V. ORCID ID 0000-0001-8448-8493,  
<sup>1</sup>Klimov Yu. A. ORCID ID 0000-0001-5946-094X,  
<sup>2,3</sup>Peganskiy D. A. ORCID ID 0009-0006-1723-1800,  
<sup>2,4</sup>Kulikova O. M. ORCID ID 0000-0001-9082-9848,  
<sup>2,5</sup>Usacheva E. V. ORCID ID 0000-0002-6134-1533

<sup>1</sup>State Budgetary Healthcare Institution of the City of Moscow "Scientific and Practical Center for Children's Psychoneurology of the Moscow City Health Department", Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>LLC "AST Agency", Omsk, Russian Federation, e-mail: science@ast.agency;

<sup>3</sup>National State University of Physical Education, Sport and Health named after P. F. Lesgaft, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>4</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladivostok State University", Vladivostok, Russian Federation;

<sup>5</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Omsk, Russian Federation

Medical rehabilitation of children with neurological motor disorders is one of the priority tasks of rehabilitation medicine. Of particular clinical difficulty is the management of patients whose neurologically determined pathological locomotor pattern is aggravated by biomechanical overload of the musculoskeletal system due to the presence of obesity. The purpose of the study: based on quantitative instrumental video analysis of gait, to substantiate and develop an individual step-by-step program of medical rehabilitation in a child with neurological motor disorders of a central nature in the form of a bilateral crouch pattern and obesity. A clinical version of the justification of an individual medical rehabilitation program based on a video analysis of gait in a child with cerebral palsy and concomitant obesity is presented. A two-chamber video analysis of walking was performed with processing by the MediaPipe Pose algorithm, calculation of spatiotemporal and kinematic parameters, clinical scales; the obtained values were compared with data from the Qualisys marker system. In a child with cerebral palsy and obesity, a decrease in walking speed, cadence, an increase in the duration of double support, limited range of motion in the knee and ankle joints, and a crouch pattern were found. Based on the data obtained, a 12-week individual medical rehabilitation program has been developed. Marker-free video analysis of gait makes it possible to identify and quantify a pattern of motor disorders, on the basis of which it becomes possible to create a personalized rehabilitation program; repeated video analysis provides a quantitative assessment of the dynamics of indicators and objective monitoring of the effectiveness of rehabilitation measures, which confirms the clinical viability of the method.

Keywords: medical rehabilitation, medical rehabilitation, neurological motor disorders, markerless gait video analysis, edinburgh visual gait score, gait deviation index, gross motor function classification system, guided rehabilitation.

## Введение

Медицинская реабилитация детей с неврологическими двигательными нарушениями центрального характера занимает одно из ведущих мест в структуре задач восстановительной медицины, лечебной физкультуры, физиотерапии и курортологии [1-3]. Нарушения походки и постуральной устойчивости у этой категории пациентов требуют длительного мультидисциплинарного сопровождения и объективной количественной оценки двигательной функции как основы планирования и контроля эффективности реабилитационных мероприятий [4].

Центральный двигательный дефицит у детей проявляется характерными патологическими локомоторными паттернами, среди которых наиболее распространены спастический stiff-knee, эквинус и сгибательный (crouch) паттерн [5]. Формирование crouch-паттерна сопровождается избыточным сгибанием в коленных суставах в фазе опоры, ограничением разгибания бедра, относительным укорочением задней группы мышц бедра и икроножной мышцы, снижением скорости ходьбы и увеличением энергозатрат. Снижение двигательной активности и гиподинамия, характерные для детей с центральным двигательным дефицитом, нередко приводят к формированию коморбидного алиментарно-конституционального ожирения, которое в свою очередь отягощает биомеханику походки, увеличивает нагрузку на коленные и тазобедренные суставы и ускоряет декомпенсацию локомоторной функции [6; 7].

Обоснованное назначение и объективный контроль эффективности программ медицинской реабилитации у этой категории пациентов невозможны без количественной оценки двигательной функции [8]. Классический визуальный анализ походки, несмотря на клиническую ценность, обладает ограниченной воспроизводимостью и не позволяет документировать тонкие изменения кинематики на фоне проводимой терапии. «Золотым стандартом» количественного анализа походки остаются трехмерные оптико-электронные маркерные системы (Vicon, Qualisys), однако их применение в рутинной практике отделений лечебной физкультуры, физиотерапии, восстановительной медицины и санаторно-курортных учреждений ограничено высокой стоимостью оборудования, необходимостью специализированной лаборатории и участия инженера-биомеханика [9; 10].

Развитие алгоритмов компьютерного зрения на основе глубоких нейронных сетей (MediaPipe Pose, OpenPose, BlazePose) открыло возможность выполнения количественного инструментального анализа походки по обычной видеозаписи, без наложения маркеров и в условиях типового реабилитационного кабинета [11; 12]. Данный подход в сочетании со стандартизованными клиническими шкалами (такими, как Edinburgh Visual Gait Score, EVGS; Gait Deviation Index, GDI; Gross Motor Function Classification System, GMFCS и другие) позволяет получить объективную количественную основу для планирования и мониторинга индивидуальной программы медицинской реабилитации [13-15].

**Цель исследования:** на основании количественного инструментального видеоанализа походки обосновать и разработать индивидуальную этапную программу медицинской реабилитации у ребенка с неврологическими двигательными нарушениями центрального характера в виде двустороннего crouch-паттерна и ожирением, а также сформулировать методические выводы для практики специалистов восстановительной медицины, лечебной физкультуры, физиотерапии, курортологии и спортивной медицины.

**Материалы и методы исследования.** Под наблюдением находился пациент П., 12 лет, мужского пола, направленный в отделение медицинской реабилитации из детской поликлиники по месту жительства для оценки двигательной функции и подбора индивидуальной программы восстановительного лечения. На момент обследования ребенок состоял под диспансерным наблюдением у невролога по поводу резидуальных двигательных нарушений центрального характера с вовлечением нижних конечностей и формированием патологического локомоторного паттерна. Основные жалобы: повышенная утомляемость при ходьбе, снижение толерантности к физической нагрузке в условиях школьных занятий, характерные особенности стереотипа ходьбы с элементами сгибательной установки в коленных суставах. Детальные сведения об анамнезе заболевания, результатах предшествующих этапов лечения и нейровизуализационных данных в настоящей статье не приводятся в связи с тем, что они выходят за рамки задач исследования, сфокусированного на количественной инструментальной оценке походки и обосновании программы медицинской реабилитации.

*Клинический статус на момент обследования.* Общее состояние удовлетворительное, сознание ясное, пациент контактен, ориентирован, интеллектуальное развитие соответствует возрасту. Телосложение правильное, гиперстеник, подкожно-жировая клетчатка развита избыточно, распределена равномерно. Антропометрические данные: рост 152 см, масса тела 65,5 кг, индекс массы тела 28,4 кг/м<sup>2</sup>, что соответствует 98,3-му перцентилю по стандартам Всемирной организации здравоохранения (Z-score +2,1) и квалифицируется как ожирение. Клинически верифицированы резидуальные двигательные нарушения центрального характера с вовлечением нижних конечностей. Передвижение самостоятельное, без вспомогательных средств; визуально отмечены сгибательная установка в коленных суставах в фазе опоры, снижение скорости ходьбы, расширение базы опоры. Сопутствующая патология: алиментарно-конституциональное ожирение. Информированное согласие на проведение инструментального обследования и публикацию обезличенных результатов получено у законного представителя; работа выполнена в соответствии с принципами Хельсинкской декларации.

*Протокол инструментального видеоанализа походки.* Обследование проводилось в кабинете функциональной диагностики отделения медицинской реабилитации. Пациент выполнял ходьбу по размеченной дорожке с калибровочной базой 2,4 м, общая пройденная дистанция составила 16,8 м за 7 проходов. Использовалась синхронизированная двухкамерная видеосъемка в сагиттальной (файл sag\_158.mp4) и фронтальной (front\_158.mp4) проекциях; частота кадров 30 в секунду, разрешение 1920 × 1080 пикселей, расстояние от камер до объекта 3,0 м, угол обзора 60°. Параллельно та же ходьба регистрировалась оптико-

электронной маркерной системой Qualisys с использованием набора пассивных светоотражающих маркеров нижних конечностей, таза и туловища; отчет данной системы рассматривался как референсный.

*Обработка данных.* Извлечение двумерных координат ключевых точек тела выполнялось алгоритмом MediaPipe Pose. Полученные траектории подвергались последовательной обработке: фильтрация Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 6 Гц, сглаживание методом Савицкого – Голея и медианная фильтрация. Сегментация цикла походки осуществлялась по событиям initial contact (первоначальный контакт) и toe-off (схождение с места). Рассчитывались: спатиотемпоральные параметры (скорость ходьбы шаговым (stride-метод) и дистанционными (distance-метод) методами, каденция, длина и ширина шага, фазы опоры и переноса, продолжительность двойной опоры, индексы симметрии); кинематика тазобедренного, коленного и голеностопного суставов в сагиттальной плоскости (амплитуда движений, пиковые углы сгибания и разгибания в фазах опоры и переноса); параметры энергетической стоимости ходьбы ( $O_2$  cost, метаболическая мощность, MET, Walking Ratio, оценочный Physiological Cost Index).

*Клинические шкалы и интегральные индексы.* В автоматическом режиме вычислялись: шкала Edinburgh Visual Gait Score (EVGS) по 17 параметрам; классификация Gross Motor Function Classification System (GMFCS); Gait Quality Index (GQI); Gait Deviation Index (GDI). Дополнительно рассчитывались два композитных индекса: интегральный EVGS-индекс (ЕИ) с нормализацией в шкалу 0–100 и весами сегментов тела (стопа/голеностоп 30%, коленный сустав 30%, тазобедренный сустав и таз 25%, туловище 15%) и Gait Quality Composite Index (GQCI) на основе семи компонентов (EVGS, Gait Profile Score, симметрия, спатиотемпоральный блок, GQI, GDI) с весами 25/20/15/15/10/10/5% соответственно.

*Критерии клинической интерпретации.* Интерпретация результатов осуществлялась в сопоставлении с возрастными нормативами для группы 6–12 лет с расчетом Z-score и перцентилей. Для целей планирования программы медицинской реабилитации учитывались: степень отклонения по EVGS и ЕИ, уровень функциональной мобильности по GMFCS, интегральное качество походки по GQI, GDI и GQCI, тип выявленного патологического локомоторного паттерна. Валидация результатов безмаркерного видеоанализа проводилась путем попарного сопоставления с данными системы Qualisys по ключевым спатиотемпоральным и кинематическим параметрам с расчетом абсолютной разницы.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

*Спатиотемпоральные параметры.* Установлено снижение скорости ходьбы до 0,97 м/с ( $Z = -1,18$ ; 12-й перцентиль возрастной нормы) при расчете stride-методом и до 0,82 м/с при расчете distance-методом. Каденция составила 107,7 шаг./мин. ( $Z = -1,48$ ; 7-й перцентиль).

Длина цикла - 1,093 м, длина шага: слева 0,556 м, справа 0,537 м, коэффициент асимметрии 3,5%. Увеличение ширины шага до 0,110 м (93-й перцентиль) отражает компенсаторное расширение базы опоры, характерное как для центрального двигательного дефицита, так и для пациентов с ожирением. Продолжительность опорной фазы составила 68,6% слева и 63,9% справа, фазы двойной опоры - 32,5% ( $Z=+10,0$ ), что значительно превышает возрастную норму и свидетельствует о снижении динамической устойчивости.

*Кинематика суставов нижних конечностей в сагиттальной плоскости.* Амплитуда движений в тазобедренных суставах находилась в пределах возрастной нормы: слева  $40,9^\circ$ , справа  $47,1^\circ$  (норма  $38-50^\circ$ ). Амплитуда движений в коленных суставах значимо снижена: справа  $35,5^\circ$  ( $Z = -5,16$ ), слева  $42,9^\circ$  при референсном диапазоне  $50-60^\circ$ . Амплитуда движений в голеностопных суставах уменьшена с обеих сторон: слева  $18,1^\circ$ , справа  $20,1^\circ$  (норма  $25-35^\circ$ ;  $Z = -2,58$ ). Принципиальное значение имело пиковое сгибание в коленных суставах в фазе опоры, составившее  $L = 37,4^\circ$ ,  $R = 39,8^\circ$ , что квалифицируется как двусторонний crouch-паттерн умеренной степени выраженности и соответствует характерному проявлению резидуальной спастической формы двигательных нарушений. Пиковое сгибание в коленных суставах в фазе переноса оставалось в пределах нормы ( $L = 67,5^\circ$ ,  $R = 57,2^\circ$ ), что отличает наблюдаемый у пациента паттерн от классического stiff-knee gait (походка «тугоподвижное колено»).

Количественные параметры походки пациента П., 12 лет, в сопоставлении с возрастной нормой (дети 6–12 лет)

Параметр	Измерено	Референсный диапазон для данного возраста	Z-score	Статус
Скорость ходьбы, м/с	0,97	$1,10 \pm 0,20$	-1,18	легкое отклонение
Каденция, шаг./мин.	107,7	$115 \pm 12$	-1,48	легкое отклонение
Длина цикла, м	1,09	-	+0,95	норма
Ширина шага, м	0,11	-	+1,50	легкое отклонение
Опорная фаза, % (средн.)	66,3	$60 \pm 2$	+3,13	выраженное отклонение

Двойная опора, %	32,5	20 ± 2	+10,0	выраженное отклонение
Амплитуда движений в ТБС, °	44,0	38–50	–0,21	норма
Амплитуда движений в КС, °	39,2	50–60	–5,16	выраженное отклонение
Амплитуда движений в ГСС, °	19,1	25–35	–2,58	умеренное отклонение

Примечание: ТБС - тазобедренный сустав, КС - коленный сустав, ГСС - голеностопный сустав. Составлено авторами по результатам исследования.

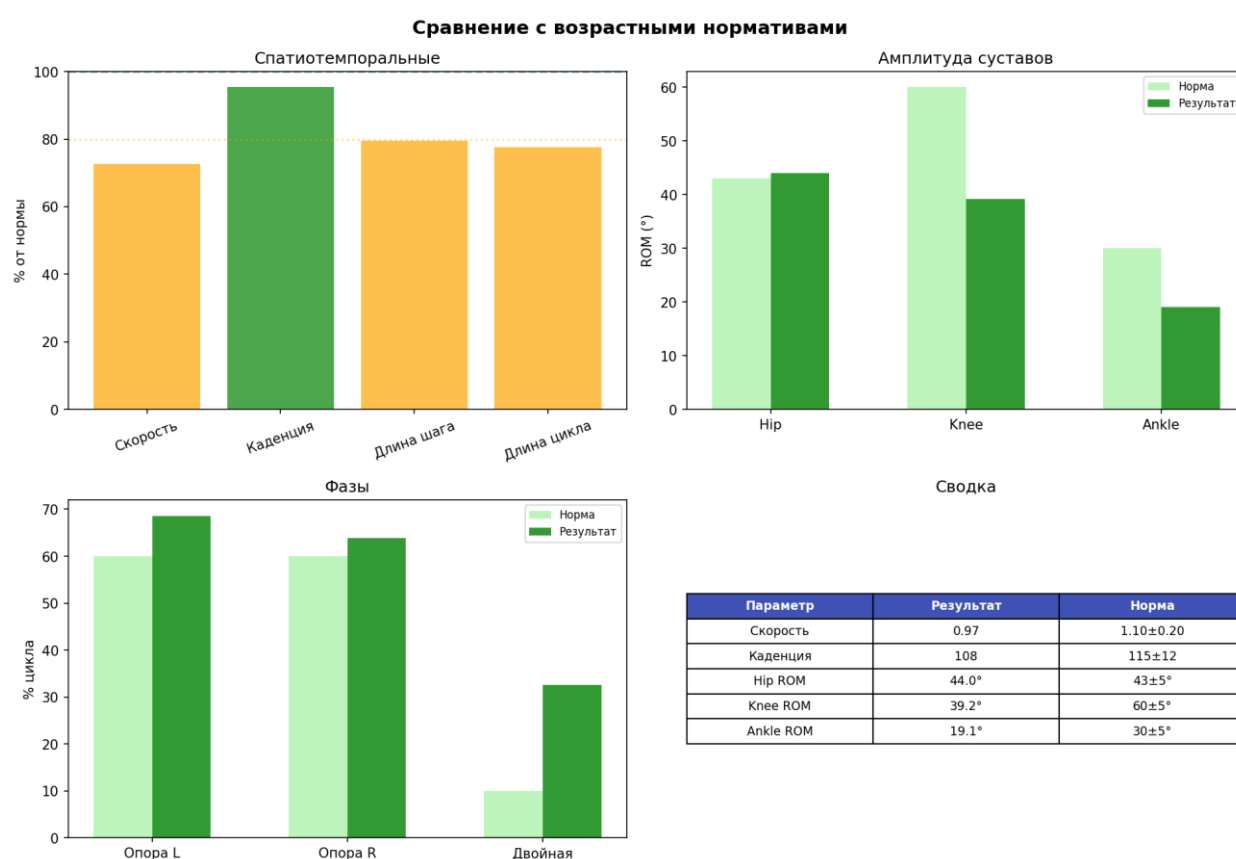
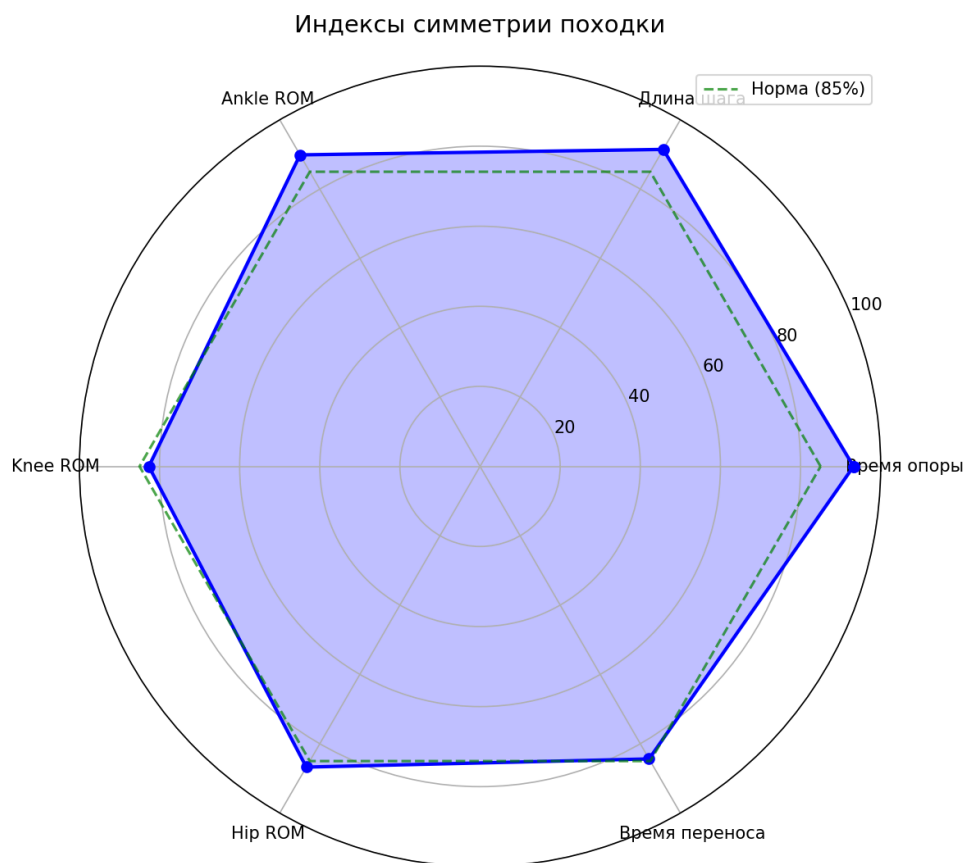


Рис. 1. Сопоставление ключевых количественных параметров походки пациента с возрастной нормой для детей 6–12 лет. Диаграмма желтого цвета – отклонение от нормы, диаграмма темно-зеленого цвета – соответствует норме, Hip - тазобедренный сустав, Knee – коленный сустав, Ankle – голеностопный сустав, ROM - максимальная амплитуда движений в суставе во время движения, L – слева, R - справа.

Составлено авторами по результатам исследования

На рисунке 1 в виде сгруппированных столбчатых диаграмм представлено сопоставление ключевых количественных параметров походки пациента с возрастной нормой для детей 6–12 лет: скорости ходьбы, каденции, длины цикла, продолжительности фазы двойной опоры, а также амплитуды движений (ROM) в тазобедренных, коленных и голеностопных суставах отдельно для левой (L) и правой (R) сторон. Желтым цветом выделены параметры, выходящие за пределы возрастного норматива, темно-зеленым - соответствующие норме. Графически наглядно продемонстрировано, что наиболее выраженный дефицит зарегистрирован в амплитуде движений в коленных суставах (особенно справа) и в продолжительности фазы двойной опоры; параметры скорости и каденции находятся ниже возрастной нормы умеренно, а амплитуда движений в тазобедренных суставах сохранена с обеих сторон. Такое визуальное представление позволяет одновременно оценить профиль количественных дефицитов походки и определить приоритетные мишени реабилитационного воздействия.



*Рис. 2. Радарная диаграмма индексов симметрии походки (длина шага, опорная фаза, фаза переноса). Составлено авторами по результатам исследования*

На рисунке 2 в форме радарной диаграммы представлены индексы симметрии походки по трем ключевым параметрам: длине шага, продолжительности опорной фазы и

продолжительности фазы переноса, рассчитанные как отношение значений правой и левой стороны. Идеальная симметрия соответствует правильной окружности с единичным радиусом по каждой оси; чем ближе фактическая фигура к этой окружности, тем выше симметричность локомоторного паттерна, и наоборот, отклонения вершин внутрь или наружу указывают на асимметрию соответствующего параметра. У представленного пациента диаграмма имеет умеренно деформированную конфигурацию с наибольшим отклонением по оси опорной фазы, что согласуется с зарегистрированной асимметрией продолжительности опоры (68,6% слева против 63,9% справа) и отражает преимущественную опорную нагрузку на левую конечность при относительной разгрузке правой.

*Клинико-функциональные шкалы.* По шкале EVGS получено: слева 5/34 балла, справа 4/34 балла, что при классическом подсчете соответствует «минимальным отклонениям». Расширенная по сегментной оценке выявила 9/34 балла слева и 10/34 балла справа с преобладанием дефицитов в сегментах «коленный сустав» (3/8 слева и 4/8 справа, умеренные отклонения) и «стопа - голеностопный сустав» (3/14 с обеих сторон, легкие отклонения). По классификации GMFCS пациент отнесен к уровню I (уверенность классификатора 96%). Индекс GDI - 79,6/100 (отклонение от нормативной кинематики), GQI - 75,6/100 (категория/уровень C, удовлетворительное качество походки). Интегральный EVGS-индекс EI составил 72,3/100 слева и 68,6/100 справа, общий - 70,4/100 (умеренные отклонения). Композитный индекс GQCI - 54,9/100 (выраженные отклонения, преимущественно за счет компонента фазовых характеристик цикла походки).

*Энергетические параметры ходьбы.* Стоимость кислорода при ходьбе составила 0,236 мл/кг/м, метаболическая мощность - 4,61 Вт/кг, расчетный расход энергии - 4,35 ккал/мин., MET 3,9, эффективность ходьбы 91%, Walking Ratio 111 (шаг./мин.)/(м/с), оценочный Physiological Cost Index - 0,38 уд/м. Указанные значения интерпретированы как умеренное повышение энергозатрат ходьбы, что патогенетически обусловлено сочетанием центрального двигательного дефицита и ожирения и является дополнительным обоснованием для включения лечебной физкультуры с аэробным компонентом в программу реабилитации.

*Сопоставление с данными маркерной системы.* При попарном сравнении результатов безмаркерного видеоанализа с отчетом маркерного видеоанализа Qualisys наибольшее согласие зарегистрировано по каденции (разница 0,01 шаг./мин., рис. 1), скорости ходьбы при расчете distance-методом (разница 0,02 м/с) и амплитуде движений в коленном суставе справа (разница 3,3°). Умеренные расхождения выявлены по длительности опорной фазы справа (разница 4,4%), амплитуде движений в тазобедренном суставе справа (8,3°) и голеностопных суставах (7,2–7,4°). Значительные расхождения отмечены по абсолютной длине шага (до 0,11 м) и ширине шага (0,08 м), что объясняется известными ограничениями моноплоскостной

двумерной реконструкции при регистрации во фронтальной плоскости. В целом согласие методов по интегральным параметрам оценено как клинически приемлемое для задач медицинской реабилитации.

#### *Индивидуальная программа медицинской реабилитации*

На основании результатов инструментального видеоанализа походки, данных клиничко-неврологического обследования и антропометрических показателей для пациента П., 12 лет, разработана индивидуальная программа медицинской реабилитации продолжительностью 12 недель. Программа построена в соответствии с современными принципами восстановительной медицины: комплексностью, этапностью, патогенетической обоснованностью и индивидуализацией, и включает взаимодополняющее применение методов лечебной физкультуры, физиотерапии, массажа, гидрокинезотерапии, санаторно-курортного лечения.

*Цели программы.* Основные задачи реабилитационного вмешательства сформулированы на основании количественно выявленных дефицитов и предусматривают к окончанию 12-недельного курса: увеличение скорости ходьбы не менее чем на 0,1 м/с; снижение продолжительности двойной опоры не менее чем на 3%; увеличение пикового разгибания в коленных суставах в фазе опоры не менее чем на 10° с каждой стороны; увеличение амплитуды движений в голеностопных суставах не менее чем на 5°; повышение индекса GDI на 5 и более баллов; повышение интегрального EVGS-индекса на 7 и более баллов; снижение массы тела на 5% от исходной.

*Первый этап - подготовительный (1–2-я недели).* Задачи этапа: адаптация пациента к нагрузке, снижение спастичности, подготовка опорно-двигательного аппарата к основному блоку тренировок. Лечебная физкультура назначалась индивидуально, 5 занятий в неделю продолжительностью 30 минут, интенсивность - до 60% от максимальной возрастной частоты сердечных сокращений; включались дыхательные упражнения, изометрические упражнения для четырехглавой мышцы бедра и ягодичных мышц, пассивное и активно-пассивное растяжение задней группы мышц бедра, икроножной и подвздошно-поясничной мышц (по 3 подхода с удержанием 30 секунд). Назначен классический массаж нижних конечностей и пояснично-крестцового отдела позвоночника по расслабляющей методике, курс № 10, ежедневно. Физиотерапия: низкочастотная магнитотерапия на область коленных суставов (индукция 20–25 мТл, продолжительность 15 минут, курс № 10), парафино-озокеритовые аппликации на область икроножных мышц (температура 50 °С, 20 минут, курс № 10).

*Второй этап - основной (3–10-я недели).* Задачи этапа - целенаправленная коррекция выявленных количественных дефицитов походки. Лечебная физкультура с преимущественной направленностью на укрепление разгибателей коленных и тазобедренных суставов:

приседания у стены с контролируемой амплитудой сгибания (начиная с 45° с постепенным увеличением до 90°) - 3 подхода по 12 повторений; «мостик» в положении лежа на спине на двух и поочередно на одной ноге - 3 подхода по 10–12 повторений; подъемы на носки - 3 подхода по 15 повторений; упражнения с эластичной лентой на приводящие и отводящие мышцы бедра - 3 подхода по 12 повторений. Растяжение - активно-пассивное растяжение задней группы мышц бедра, подвздошно-поясничной и икроножной мышц ежедневно с удержанием 30–45 секунд (3 подхода). Аэробный блок низкой ударности - велотренажер, скандинавская ходьба, ходьба на беговой дорожке с контролем частоты сердечных сокращений в диапазоне от 60 до 75% от максимальной возрастной нормы, 4 занятия в неделю по 30–40 минут. Физиотерапия: амплипульстерапия на четырехглавые мышцы бедра (режим IV, род работы II, частота модуляции 70 Гц, глубина 75%, продолжительность 10 минут с каждой стороны, курс № 10); подводный душ-массаж на нижние конечности и пояснично-крестцовый отдел (давление 1,5–2,0 атм, продолжительность 10 минут, курс № 10); электростимуляция антагонистов спастичных мышц, курс № 10. Гидрокинезотерапия в лечебном бассейне (температура воды 30–32 °С), 2 занятия в неделю по 30 минут, с преимущественным использованием плавания на спине и упражнений с отягощением в воде. Механотерапия - занятия на беговой дорожке со зрительной биологической обратной связью и коррекцией стереотипа ходьбы перед зеркалом.

*Третий этап - санаторно-курортный и поддерживающий (11–12-я недели и далее).* На третьем этапе пациенту рекомендовано санаторно-курортное лечение в специализированном детском реабилитационном санатории неврологического профиля. Курортные факторы: климатотерапия в щадяще-тренирующем режиме (аэротерапия, дозированная гелиотерапия), терренкур по маршрутам нарастающей протяженности (от 500 до 1500 м) и сложности рельефа; бальнеотерапия - йодобромные или хлоридно-натриевые ванны (температура 36–37 °С, продолжительность 10–15 минут, через день, курс № 10); пелоидотерапия - грязевые аппликации на область коленных суставов и поясничного отдела (температура 38–40 °С, продолжительность 15 минут, курс № 8). Продолжение занятий лечебной физкультурой после возвращения по поддерживающему протоколу, 3 занятия в неделю. На протяжении всех этапов реабилитации проводилось плановое наблюдение у врача-невролога, врача-педиатра и врача - детского эндокринолога для коррекции соматического и нутритивного статуса.

*Протокол количественного контроля эффективности мероприятий медицинской реабилитации.* Контрольный инструментальный видеоанализ походки проводится на 6-й и 12-й неделях программы по протоколу, полностью идентичному исходному обследованию, с повторным расчетом всего набора спатиотемпоральных и кинематических параметров, клинических шкал и композитных индексов. Динамика показателей анализируется в

абсолютных и относительных значениях, а также в виде изменения Z-score относительно возрастной нормы. Критериями клинически значимого улучшения приняты: прирост скорости ходьбы на 0,1 м/с и более; снижение продолжительности двойной опоры на 3% и более; увеличение пикового разгибания в коленных суставах в фазе опоры на 10° и более; повышение индекса GDI на 5 и более баллов. Результаты контрольных исследований фиксируются в медицинской документации, служат основой для коррекции программы медицинской реабилитации и формируют объективную базу доказательности проводимых мероприятий медицинской реабилитации.

*Оценка показателей эффективности медицинской реабилитации в рассматриваемом клиническом случае.* По результатам контрольного инструментального видеоанализа походки, проведенного на 12-й неделе разработанной персонафицированной программы медицинской реабилитации по протоколу, идентичному исходному обследованию, зарегистрирована умеренная положительная динамика по ряду количественных параметров. Скорость ходьбы возросла с 0,97 до 1,05 м/с ( $\Delta = +0,08$  м/с; Z изменился с  $-1,18$  до  $-0,72$ , переход с 12-го в 23-й перцентиль возрастной нормы), каденция увеличилась со 107,7 до 112,3 шаг./мин. ( $\Delta = +4,6$  шаг./мин.), длина цикла приросла с 1,093 до 1,124 м. Продолжительность фазы двойной опоры сократилась с 32,5 до 29,8% ( $\Delta = -2,7\%$ ), что отражает улучшение динамической устойчивости и пропульсивной функции нижних конечностей; коэффициент межсторонней асимметрии длины шага снизился с 3,5 до 2,8%, ширина шага уменьшилась с 0,110 до 0,102 м, что свидетельствует о начальной редукции компенсаторного расширения базы опоры. На уровне кинематики суставов нижних конечностей зафиксировано частичное уменьшение выраженности двустороннего crouch-паттерна за счет целенаправленного укрепления разгибателей коленных и тазобедренных суставов в сочетании с растяжением задней группы мышц бедра и трехглавой мышцы голени. Пиковое сгибание в коленных суставах в фазе опоры уменьшилось справа с 39,8° до 33,6° ( $\Delta = -6,2^\circ$ ), слева с 37,4° до 31,9° ( $\Delta = -5,5^\circ$ ); амплитуда движений в коленных суставах возросла справа с 35,5° до 42,1° ( $\Delta = +6,6^\circ$ ; Z улучшился с  $-5,16$  до  $-3,41$ ), слева с 42,9° до 47,3°, оставаясь ниже нижней границы возрастной нормы. Амплитуда тыльного сгибания в голеностопных суставах увеличилась слева с 18,1° до 21,4°, справа с 20,1° до 23,2° ( $\Delta \approx +3,2^\circ$ ), не достигнув возрастного норматива.

Композитные индексы качества походки также продемонстрировали положительную, но умеренную динамику: GDI повысился на 4 балла (с 79,6 до 83,6), GQI и GQCI сохранились в пределах исходной категории качества походки, оценочные энергетические показатели улучшились:  $O_2$  cost снизился с 0,236 до 0,218 мл/кг/м, Walking Ratio уменьшился со 111 до 107 (шаг./мин.)/(м/с), что отражает повышение энергетической эффективности локомоции.

На уровне активности и участия по МКФ отмечено умеренное повышение функциональной мобильности и толерантности к физической нагрузке, на фоне чего индекс массы тела снизился на 3,2% от исходного за счет сочетанного воздействия дозированной физической нагрузки и нутритивной коррекции. Достигнутая динамика по приоритетным критериям приблизилась к пороговым значениям клинически значимого улучшения, заданным протоколом контроля: прирост скорости ходьбы (0,08 м/с) близок к целевому значению  $\geq 0,1$  м/с, снижение продолжительности двойной опоры (-2,7%) - к целевому  $\geq 3\%$ , прирост GDI (4 балла) - к целевому  $\geq 5$  баллов. Полученные результаты подтверждают принципиальную эффективность предложенной персонализированной программы медицинской реабилитации и обосновывают ее продолжение на санаторно-курортном и поддерживающем этапах с регулярным количественным мониторингом походки и возможной интенсификацией отдельных компонентов реабилитационного воздействия.

*Обсуждение.* Представленное клиническое наблюдение демонстрирует практическую значимость количественного инструментального анализа походки в задачах медицинской реабилитации ребенка с неврологическими двигательными нарушениями центрального характера и ожирением. Ключевое преимущество использованного подхода заключается в том, что количественные данные позволили не только документировать характер и степень выраженности двигательного дефицита, но и перевести планирование индивидуальной программы лечебной физкультуры, физиотерапии и санаторно-курортного лечения на объективную основу, соответствующую современным требованиям доказательной физической и реабилитационной медицины, принципам Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ), а также концепции персонализированной медицины [16].

Выявленные изменения походки у пациента имеют сочетанный патогенез. Центральный двигательный дефицит, обусловленный резидуальной неврологической патологией, проявляется типичным двусторонним crouch-паттерном: избыточным сгибанием в коленных суставах в фазе опоры, ограничением амплитуды движений в коленных и голеностопных суставах, нарушением фазовой структуры цикла походки и снижением пропульсивной функции нижних конечностей. Патогенетической основой данного паттерна служит дисбаланс мышечного тонуса по спастическому типу с относительным укорочением задней группы мышц бедра, икроножной и подвздошно-поясничной мышц, функциональная недостаточность разгибателей коленных и тазобедренных суставов, а также нарушение реципрокной иннервации антагонистических мышечных групп. Коморбидное ожирение существенно отягощает клиническую картину: увеличивает биомеханическую нагрузку на хрящевые поверхности и связочный аппарат коленных и тазобедренных суставов, повышает

энергетическую стоимость ходьбы (что количественно подтверждено повышением оценочного  $O_2$  cost до 0,236 мл/кг/м и Walking Ratio до 111 (шаг./мин.)/(м/с)), способствует снижению скорости передвижения, увеличению продолжительности фазы двойной опоры и компенсаторному расширению базы опоры. Формируется самоусиливающийся патогенетический круг: центральный двигательный дефицит ограничивает повседневную физическую активность и способствует нарастанию массы тела, избыточная масса тела, в свою очередь, усугубляет локомоторные нарушения, ускоряет декомпенсацию опорно-двигательного аппарата и ограничивает возможности лечебной физкультуры. Разрыв этого круга возможен только при комплексном мультидисциплинарном подходе с одновременным воздействием на неврологический, ортопедический, кардиореспираторный и нутритивно-метаболический компоненты, что и реализовано в предложенной программе медицинской реабилитации.

Методически важно, что использованная панель клинических шкал и композитных индексов (EVGS, GMFCS, GDI, GQI, EII, GQCI) позволяет получить многоосевое описание двигательной функции пациента, согласующееся с принципами Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ). Каждая из шкал характеризует свой аспект локомоции: EVGS и GDI - кинематический профиль цикла походки; GMFCS - уровень функциональной независимости при передвижении; GQI и GQCI - интегральное качество походки. Такой многоосевой подход обеспечивает выбор целевых показателей программы реабилитации не по одному, а по нескольким согласованным метрикам, что повышает клиническую надежность оценки эффективности воздействия.

Особого внимания заслуживает сопоставление данных безмаркерного видеоанализа с референсными значениями маркерной системы Qualisys. Высокое согласие по каденции (разница 0,01 шаг./мин.), скорости ходьбы и длительности опорной фазы указывает на клиническую состоятельность безмаркерного метода для оценки интегральных параметров ходьбы. Расхождения, выявленные по абсолютной длине и ширине шага, а также по амплитуде движений в голеностопных суставах, объясняются известными ограничениями моноплоскостной двумерной реконструкции и должны учитываться врачом при интерпретации. Тем не менее, с точки зрения задач текущего мониторинга эффективности программы реабилитации - где ключевое значение имеет не абсолютная точность, а воспроизводимость внутри одного и того же пациента между визитами - метод следует признать полностью пригодным.

Разработанная 12-недельная программа медицинской реабилитации построена как патогенетически обоснованный ответ на выявленные количественные дефициты. Укрепление

разгибателей коленных и тазобедренных суставов направлено непосредственно на коррекцию crouch-паттерна и увеличение пикового разгибания в коленных суставах в фазе опоры. Растяжение задней группы мышц бедра и икроножных мышц уменьшает вклад относительного укорочения мышц в формирование сгибательной установки. Аэробный компонент низкой ударности (велотренажер, скандинавская ходьба, гидрокинезотерапия) обеспечивает повышение толерантности к нагрузке при минимизации риска перегрузки суставов при наличии ожирения. Физиотерапевтические процедуры (магнитотерапия, амплипульстерапия, подводный душ-массаж, электростимуляция) дополняют лечебную физкультуру, оказывая противоспастическое, трофическое и миостимулирующее действие. Санаторно-курортный этап с применением бальнео- и пелоидотерапии закрепляет достигнутый результат и обеспечивает длительное последствие. Все компоненты программы соответствуют современным клиническим рекомендациям по восстановительному лечению детей с центральным двигательным дефицитом.

Важной характеристикой представленного подхода является возможность объективного количественного контроля эффективности реабилитационного вмешательства в динамике. Повторный инструментальный видеоанализ на 6-й и 12-й неделях программы позволяет выявлять достижение или недостижение заданных целевых показателей, обоснованно модифицировать содержание программы и фиксировать результаты в медицинской документации. Такой подход полностью соответствует современной концепции «терапии, управляемой данными» (data-driven rehabilitation) и принципам доказательной восстановительной медицины.

Ограничения работы связаны с форматом клинического наблюдения и не позволяют экстраполировать количественные оценки на популяцию пациентов с неврологическими двигательными нарушениями центрального характера. Требуется дальнейшая валидация протокола на расширенной выборке с включением пациентов различных уровней GMFCS, различных нозологических форм и степеней выраженности коморбидной соматической патологии, а также оценка отдаленных исходов реабилитационного вмешательства по показателям функциональной независимости, качества жизни и социальной адаптации. Перспективными направлениями развития являются переход к трехкамерной схеме регистрации с увеличением частоты кадров до 60–120 в секунду, что позволит расширить анализ на фронтальную и трансверсальную плоскости и повысить точность оценки высокоамплитудных движений, а также интеграция инструментального видеоанализа с данными поверхностной электромиографии, стабилотрии и кардиореспираторного мониторинга для формирования комплексного функционального профиля пациента.

## **Выводы**

На основании проведенного клинико-инструментального исследования, соответствующего паспорту специальности 3.1.33 «Восстановительная медицина, спортивная медицина, лечебная физкультура, курортология и физиотерапия», сформулированы следующие выводы.

1. Безмаркерный видеоанализ походки на основе алгоритма MediaPipe Pose с двухкамерной регистрацией, фильтрацией сигнала и автоматическим расчетом клинических шкал и композитных индексов представляет собой клинически состоятельный метод количественной оценки двигательной функции у детей с неврологическими двигательными нарушениями центрального характера. Метод обеспечивает клинически приемлемое согласие с маркерной системой Qualisys по ключевым интегральным параметрам (разница по каденции 0,01 шаг./мин., по скорости ходьбы 0,02 м/с), при этом не требует обустройства специализированной биомеханической лаборатории.

2. Многоосевая оценка двигательной функции с применением шкал EVGS, GMFCS, GDI и GQI и композитных индексов EI и GQCI позволяет получить целостное клиническое описание пациента, соответствующее принципам Международной классификации функционирования: GMFCS - уровень I, GDI 79,6/100, EI 70,4/100, GQCI 54,9/100.

3. Предложенный алгоритм контроля эффективности программы реабилитации на основе повторного инструментального видеоанализа походки потенциально может обеспечить переход от субъективной к объективно-количественной оценке результативности реабилитационных мероприятий, а для формирования доказательной базы и стандартизации применения метода в программах медицинской реабилитации необходимы дальнейшие исследования на расширенных клинических выборках.

### Список литературы

1. Пак Л. А., Фисенко А. П., Кузенкова Л. М., Макарова С. Г. Обоснование расширения перечня профильных специалистов для оказания специализированной помощи больным детским церебральным параличом // Российский педиатрический журнал. 2019. Т. 22. № 2. С. 68-74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38162673> (дата обращения 15.04.2026). DOI: 10.18821/1560-9561-2019-22-2-68-74.
2. Воловик М. Г., Шейко Г. Е., Кузнецов А. Н. Эффективность реабилитации детей 5-8 лет со спастическими формами ДЦП, по данным клинической оценки и тепловидения // Медицинский алфавит. 2019. Т. 4. № 39 (414). С. 14-22. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_42375225\\_36375100.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_42375225_36375100.pdf) (дата обращения 15.04.2026). DOI: 10.33667/2078-5631-2019-4-39(414)-14-22.

3. Сняtkова Е. А. Обзор современных технологий физической реабилитации детей с двигательными нарушениями (ДЦП) // Вестник магистратуры. 2024. № 8 (155). С. 43-45.
4. Pierret J., Beyaert C., Vasa R., Rumilly E., Paysant J., Caudron S. Rehabilitation of Postural Control and Gait in Children with Cerebral Palsy: the Beneficial Effects of Trunk-Focused Postural Activities // Dev Neurorehabil. 2023. Vol. 26. Is. 3. P. 180-192. DOI: 10.1080/17518423.2023.2193269.
5. Pandey R. A., Johari A. N., Shetty T. Crouch Gait in Cerebral Palsy: Current Concepts Review // Indian J Orthop. 2023. Vol. 57. Is. 12. P. 1913-1926. DOI: 10.1007/s43465-023-01002-5.
6. Conklin M. J., Pearson J. M. The Musculoskeletal Aspects of Obesity in Neuromuscular Conditions // Orthop Clin North Am. 2018. Vol. 49. Is. 3. P. 325-333. DOI: 10.1016/j.ocl.2018.02.006.
7. Рахмаева Р. Ф., Камалова А. А. Саркопеническое ожирение у детей с детским церебральным параличом // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2025. № 70 (5). С. 36-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83185064> (дата обращения 15.04.2026). DOI: 10.21508/1027-4065-2025-70-5-36-41.
8. Чибиpов Г. М., Долганова Т. И., Попков Д. А., Смолькова Л. В., Трофимов А. О., Долганов Д. В. Анализ кинематических и кинетических параметров походки у больных детским церебральным параличом с внутренней торсионной деформацией бедра // Сибирский научный медицинский журнал. 2022. Т. 42. № 3. С. 83-93. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48674917> (дата обращения 15.04.2026). DOI: 10.18699/SSMJ20220311.
9. States R. A., Salem Y., Krzak J. J., Godwin E. M., McMulkin M. L., Kaplan S. L. Three-Dimensional Instrumented Gait Analysis for Children With Cerebral Palsy: An Evidence-Based Clinical Practice Guideline // Pediatr Phys Ther. 2024. Vol. 36. Is. 2. P. 182-206. DOI: 10.1097/PEP.0000000000001101. PMID: 38568266.
10. Cheng X., Jiao Y., Meiring R.M., Sheng B., Zhang Y. Reliability and validity of current computer vision based motion capture systems in gait analysis: A systematic review // Gait Posture. 2025. Vol. 120. P. 150-160. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2025.04.016.
11. Anderson J. T., Stenum J., Roemmich R. T., Wilson R. B. Validation of markerless video-based gait analysis using pose estimation in toddlers with and without neurodevelopmental disorders // Front Digit Health. 2025. Vol. 7. P. 1542012. DOI: 10.3389/fdgth.2025.1542012.
12. Чибиpов Г. М., Долганова Т. И., Долганов Д. В., Попков Д. А. Анализ причин патологических паттернов кинематического локомоторного профиля по данным компьютерного анализа походки у детей со спастическими формами ДЦП // Гений ортопедии.

2019. Т. 25. № 4. С. 493-500. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41547204> (дата обращения 15.04.2026). DOI: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-493-500.

13. Abe H., Koyanagi S., Kusumoto Y., Himuro N. Intra-rater and inter-rater reliability, minimal detectable change, and construct validity of the Edinburgh Visual Gait Score in children with cerebral palsy // *Gait Posture*. 2022. Vol. 94. P. 119-123. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2022.03.004.

14. Глазкин Л. С., Михович М. С., Соколовский О. А., Климов Р. В. Результаты одномоментной многоуровневой коррекции SEMLS у детей с детским церебральным параличом // *Медицинские новости*. 2020. № 1 (304). С. 23-25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42479184> (дата обращения 15.04.2026). eLIBRARY ID: 42479184.

15. Massaad A., Assi A., Skalli W., Ghanem I. Repeatability and validation of gait deviation index in children: typically developing and cerebral palsy // *Gait Posture*. 2014. Vol. 39. Is. 1. P. 354-358. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2013.08.001.

16. Пеганский Д. А., Соколова Ф. М., Кузнецова Е. Ю., Галактионова Е. С. Применение искусственного интеллекта и нейронных сетей в комплексной реабилитации детей с ДЦП // В сборнике: Тридцатилетний путь развития адаптивной физической культуры. Материалы Международного научного конгресса. Санкт-Петербург, 2025. С. 370-373. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82837647> (дата обращения 15.04.2026).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках договора от 29.04.2025 №0608-28\_25-2НИР на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Система сбора данных на основе метода безмаркерного видеоанализа на базе технологии искусственного интеллекта для оценки выраженности двигательных нарушений ходьбы пациентов в системе комплексной управляемой реабилитации», заключенного между Автономной некоммерческой организацией «Московский центр инновационных технологий в здравоохранении» и Обществом с ограниченной ответственностью «Агентство «АСТ», на основании Соглашения № 0608-28/25 от «20» марта 2025 года, заключенного между Автономной некоммерческой организацией «Московский центр инновационных технологий в здравоохранении» и Государственным бюджетным учреждением здравоохранения города Москвы «Научно-практический центр детской психоневрологии Департамента здравоохранения города Москвы» о предоставлении гранта на реализацию научно-практического проекта в сфере медицины: «Система комплексной управляемой реабилитации детей с двигательными нарушениями на примере детей с ДЦП».

**Financing:** The work was performed within the framework of the contract dated 04/29/2025 No. 0608-28\_25-2NIR for research on the topic "A data collection system based on the method of marker-free video analysis based on artificial intelligence technology to assess the severity of motor walking disorders in patients in a comprehensive guided rehabilitation system", concluded between the Autonomous Non-profit Organization Moscow Center for Innovative Technologies in Healthcare and the AST Agency Limited Liability Company, based on Agreement No. 0608-28/25 dated March 20, 2025, the agreement concluded between the Autonomous Non-profit Organization "Moscow Center for Innovative Technologies in Healthcare" and the State Budgetary Healthcare Institution of Moscow "Scientific and Practical Center for Pediatric Neuropsychiatry of the Moscow Department of Health" on the grant for the implementation of a scientific and practical project in the field of medicine: "A system of integrated guided rehabilitation of children with motor disorders using the example of children with cerebral palsy".