

Научная статья

УДК 612.766:616.831-009.12-053.7

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-499-509>

Оценка состояния пациентов подросткового возраста со спастическими формами церебрального паралича, поступивших на оперативное ортопедическое лечение: кросс-секционное исследование

Э.Р. Мингазов¹, О.Ф. Насипжанов¹, Т.И. Долганова¹, О.И. Гатамов², У.Ф. Мамедов¹, Д.А. Попков¹¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия² Клинская Областная больница, Клин, Московская область, Россия**Автор, ответственный за переписку:** Дмитрий Арнольдович Попков, dpopkov@mail.ru**Аннотация**

Введение. Детский церебральный паралич (ДЦП) является самым распространенным неврологическим заболеванием у детей, сопровождающимся двигательными нарушениями. Максимальным возрастом для выполнения реконструктивных вмешательств является граница двенадцати лет, но оптимальным возрастом для сохранения результата многоуровневых ортопедических вмешательств признается вторая половина подросткового периода. Анализ сформированных ортопедических нарушений и их влияния на походку, а также их особенностей в зависимости от ранее проведенных вмешательств представляет интерес с точки зрения определения оптимальных условий для выполнения реконструктивных операций на нижних конечностях у подростков.

Цель работы — в кросс-секционном сравнительном анализе оценить кинематические и кинетические параметры походки подростков с ДЦП (GMFCS I–III) перед ортопедической операцией; нулевая гипотеза — отсутствие различий в параметрах походки между пациентами с предшествующими ортопедическими операциями и теми, кто их не проходил.

Материалы и методы. В ретроспективное исследование включены 102 подростка 13–17 лет с ДЦП, разделенные на две группы: группа А (GMFCS I–II, $n = 63$) и группа Б (GMFCS III, $n = 39$). С учетом хирургического анамнеза в обеих группах выделено по три подгруппы. Всем пациентам проводили компьютерный видеоанализ походки. В анализе походки показатели представлены медианой с уровнем распределения процентилей 25 %–75 %. Для сравнения использовали непарный критерий Вилкоксона ($p \leq 0,05$). Взаимосвязь между параметрами оценивали с помощью ранговой корреляции Спирмена. Для сравнения встречаемости признака «паттерн crouch gait» применяли критерий хи-квадрат для бинарных выборов.

Результаты. Из характеристик походки отмечено преобладание нарушений движений в горизонтальной плоскости (вследствие торсионных деформаций) у ранее не оперированных пациентов уровня GMFCS I–II и возрастание доли паттерна crouch gait в остальных подгруппах. Зарегистрировано нарастание декомпенсированных типов crouch gait в подгруппах пациентов после ранних вмешательств на трицепсах голени. При этом выявлено достоверное отличие между группами 1А и 2А по признаку частоты встречаемости декомпенсированного crouch gait (критерий хи-квадрат, $p = 0,002$). Между прочими подгруппами достоверных различий по данному критерию не было.

Обсуждение. Системный характер нарушения двигательных функций у детей с ДЦП, а также возникающие ортопедические нарушения подразумевают не только оценку и наблюдение за отдельными ортопедическими нарушениями локомоторных цепей нижних конечностей, но и рассмотрение интегральных показателей движений (GPS), а также кинематических и кинетических данных во взаимосвязи.

Заключение. У пациентов уровня GMFCS I–II при отсутствии каких-либо ранее выполненных ортопедических вмешательств показания определяются контрактурами суставов и торсионными деформациями сегментов нижних конечностей, в то время как при уровне GMFCS III в подростковом возрасте преобладает паттерн crouch gait, остающийся компенсированным. У группы пациентов с выполненными в раннем возрасте удлиннениями трицепса голени наблюдали развитие компенсированных и декомпенсированных форм crouch gait с высокой энергоемкостью движений, что необходимо учитывать как при выборе тактики хирургического лечения, так и при проведении последующих реабилитационных мероприятий и ортезировании. При выполнении многоуровневых вмешательств в предыдущий период, у подростков показаниями к оперативному лечению оставались торсионные деформации, рецидивы контрактур, развитие сгибательной установки коленного сустава, однако пространственно-временные и силовые характеристики движений при этом оставались на сравнительно высоком уровне.

Ключевые слова: спастическая диплегия, кросс-секционное исследование, crouch gait, подростки

Для цитирования: Мингазов Э.Р., Насипжанов О.Ф., Долганова Т.И., Гатамов О.И., Мамедов У.Ф., Попков Д.А. Оценка состояния пациентов подросткового возраста со спастическими формами церебрального паралича, поступивших на оперативное ортопедическое лечение: кросс-секционное исследование. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):499–509. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-499-509.



Evaluation of the condition of adolescent patients with spastic types of cerebral palsy admitted for orthopedic surgery: a cross-sectional study

E.R. Mingazov¹, O.F. Nasipzhanov¹, T.I. Dolganova¹, O.I. Gatamov², U.F. Mamedov¹, D.A. Popkov¹✉

¹ Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

² Klin Regional Hospital, Klin, Moscow Region, Russian Federation

Corresponding author: Dmitry A. Popkov, dpopkov@mail.ru

Abstract

Introduction Cerebral palsy (CP) is the most common neurological disorder in children, associated with movement disorders. The maximum age for reconstructive surgery is twelve years, but the optimal age for maintaining the results of multi-level orthopedic interventions is considered to be the second half of the adolescence period. Analysis of established orthopedic impairments and their impact on gait, as well as their characteristics depending on previous interventions, is of interest for determining the optimal conditions for reconstructive surgery on the lower extremities in adolescents.

The **purpose** of this study was to evaluate the kinematic and kinetic gait parameters of adolescents with cerebral palsy (GMFCS I–III) before orthopedic surgery using a cross-sectional comparative analysis. The null hypothesis was the absence of differences in gait parameters between patients with previous orthopedic surgery and those who did not undergo it.

Materials and methods This retrospective study included 102 adolescents aged 13–17 years with cerebral palsy, divided into two groups: Group A (GMFCS I–II, $n = 63$) and Group B (GMFCS III, $n = 39$). Three subgroups were identified in each group based on surgical history. All patients underwent computer video gait analysis. The gait analysis presents the parameters as medians with a percentile distribution level of 25 %–75 %. The unpaired Wilcoxon test ($p \leq 0.05$) was used for comparison. The relationship between the parameters was assessed using Spearman's rank correlation. The chi-square test for binary samples was used to compare the incidence of the crouch gait pattern.

Results Gait characteristics revealed a predominance of horizontal movement disorders (due to torsional deformities) in previously unoperated GMFCS I–II patients, while the prevalence of crouch gait increased in the remaining subgroups. An increase in decompensated crouch gait patterns was observed in the subgroups of patients who underwent early triceps surae interventions. A significant difference was found between groups 1A and 2A in the incidence of decompensated crouch gait (chi-square test, $p = 0.002$). No significant differences were found between the other subgroups.

Discussion The systemic nature of motor impairments in children with cerebral palsy and the resulting orthopedic disorders, necessitate not only the assessment and monitoring of individual orthopedic impairments of the lower extremity locomotor chains but also the consideration of integrated movement indices (GPS), as well as kinematic and kinetic data in their interrelationships.

Conclusion In patients with GMFCS levels I–II and no previous orthopedic interventions, indications for surgical treatment are determined by joint contractures and torsional deformities of the lower extremity segments. In patients with GMFCS level III, the crouch gait pattern, which remains compensated, predominates in adolescence. In the group of patients with triceps surae lengthening performed at an early age, the development of compensated and decompensated types of crouch gait with high-energy movements was observed. This should be taken into account both when choosing a surgical treatment strategy and during subsequent rehabilitation measures and orthotics. In adolescents with previous multilevel interventions, torsional deformities, recurrent contractures, and the development of knee flexion remained indications for surgical treatment. However, the spatiotemporal and strength characteristics of movements remained relatively high.

Keywords: spastic diplegia, cross-sectional study, crouch gait, adolescents

For citation: Mingazov ER, Nasipzhanov OF, Dolganova TI, Gatamov OI, Mamedov UF, Popkov DA. Evaluation of the condition of adolescent patients with spastic types of cerebral palsy admitted for orthopedic surgery: a cross-sectional study. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):499–509. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-499-509.

ВВЕДЕНИЕ

Церебральный паралич (детский церебральный паралич, ДЦП) является самым распространенным неврологическим заболеванием у детей, сопровождающимся двигательными нарушениями [1]. Отмечается значимая гетерогенность симптомов ДЦП, включая аспекты этиологии, клинических проявлений, нарушений движений и позы, функциональной тяжести, эволюции нарушений, в т.ч. развитие ортопедических осложнений [2, 3]. Такая гетерогенность затрудняет мониторинг состояния пациентов, особенно с точки зрения эволюции нарушений на протяжении длительного временного периода.

В среднем 50–80 % детей с ДЦП развивают способность к ходьбе [4]. Однако у них наблюдается широкий спектр отклонений как кинематических, так и кинетических параметров. Суммирующим объективным исследованием в оценке походки признан компьютерный анализ походки, позволяющий достоверно отслеживать эволюцию движений на протяжении всего периода наблюдения [1, 5].

Фактором, ведущим к снижению двигательных возможностей детей с ДЦП вплоть до потери способности самостоятельного перемещения, является развитие вторичных ортопедических осложнений [6]. Метод многоуровневых хирургических вмешательств в настоящее время признан и остается наиболее эффективным способом коррекции этих вторичных ортопедических проблем [7, 8].

Н.К. Graham, резюмируя многолетний клинический опыт, выделяет два периода, совпадающих по возрасту (4–12 лет), когда место ортопедической хирургии становится обоснованным, — период контрактур и период костных деформаций [9]. В данные периоды характер ортопедической хирургии носит реконструктивный характер, а паллиативные элементы операций (артродезы, реориентирующие остеотомии) еще не находят свои показания. В публикациях B.J. Shore et al. [10], P. Thomason et al. [11], M. Gough et al. [12] подчеркивается, что предельным возрастом для реконструктивных ортопедических вмешательств на нижних конечностях является период не старше 12 лет. С другой стороны, оптимальным возрастом выполнения многоуровневых вмешательств признается период второй половины пубертатного ускорения роста (13–16 лет), когда риск рецидивов ортопедических проблем снижается [13, 14]. C. Putz et al. [15] указывают на существенное снижение эффекта от многоуровневых вмешательств при выполнении операции в детском возрасте. Другие авторы указывают на стабильность положительного эффекта от многоуровневых операций, но только после двухлетнего интервала [16]. Таким образом, существует диссонанс, когда максимальным возрастом для выполнения реконструктивных вмешательств является граница двенадцати лет, но оптимальным возрастом для сохранения результата многоуровневых ортопедических вмешательств признается вторая половина подросткового периода.

Кроме того, существует достаточно широкая когорта пациентов, выявления показаний к операциям у которых происходит достаточно поздно, уже в подростковом возрасте [17, 18]. Первоначальным этапом определения оптимальных условий для выполнения реконструктивных операций на нижних конечностях у подростков является анализ сформированных ортопедических нарушений и их влияния на походку, а также их особенностей в зависимости от ранее проведенных вмешательств.

Цель работы — в кросс-секционном сравнительном анализе оценить кинематические и кинетические параметры походки подростков с ДЦП (GMFCS I–III) перед ортопедической операцией; нулевая гипотеза — отсутствие различий в параметрах походки между пациентами с предшествующими ортопедическими операциями и теми, кто их не проходил.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данное ретроспективное исследование включены 102 пациента со спастической формой церебрального паралича, которым проводили двустороннее ортопедическое многоуровневое вмешательство.

Критерии включения:

- возраст второй половины подросткового периода (от 13 до 18 лет);
- возможность оценки результатов компьютерного анализа походки, уровни поражения глобальных моторных функций — I, II, III GMFCS;
- интервал не менее шести месяцев после сеанса ботулинотерапии;
- отсутствие в анамнезе выполнения селективной дорзальной ризотомии;
- интервал не менее трех лет после последней ортопедической операции на нижних конечностях.

Критерии не включения: более тяжелые уровни нарушения глобальных моторных функций; недостаточное проведение или отсутствие инструментального анализа походки; возраст на момент выполнения многоуровневого вмешательства младше 13 и старше 18 лет.

В соответствии с уровнем нарушения глобальных моторных функций пациенты разделены на две группы: группа А (GMFCS I–II, $n = 63$) и группа Б (GMFCS III, $n = 39$).

Внутри каждой группы, учитывая хирургический анамнез, пациенты разделены на три подгруппы:

- 1А и 1Б — пациенты, которым ранее не проводили хирургические вмешательства на мышечном аппарате нижних конечностей;
- 2А и 2Б — пациенты, которым выполняли вмешательства на трицепсах голени (удлинение ахиллова сухожилия или чрескожные «малоинвазивные» фибромиотенотомии) в раннем возрасте;
- 3А и 3Б — пациенты, которым выполняли многоуровневые ортопедические вмешательства.

Помимо клинко-лучевого обследования пациентам проводили компьютерный анализ походки, во время которого они ходили самостоятельно или придерживаясь за одну руку родителя босиком на семиметровой дорожке с привычной для них скоростью. Кинематические данные регистрировали оптическими камерами Qualisys 7+ с технологией видеозахвата пассивных маркеров; синхронизированными с шестью динамометрическими платформами KISTLER (Швейцария). При установке маркеров использовали модель IOR. Анализ кинематики и кинетики проводили в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений. В качестве нормы соответствующих возрастных параметров использовали результаты ранее проведенного анализа походки у когорты детей без двигательных нарушений [19].

Для статистической обработки данных применяли программу AtteStat 12.0.5 (© 2002–2025 Igor Gaydyshev). Популяционные показатели представлены средними значениями со стандартным отклонением. Исследование гипотезы соответствия количественных параметров походки нормальному распределению по критерию Колмогорова при уровне значимости $\leq 0,05$ показало, что гипотеза нормальности отвергается. Именно поэтому в выборочных совокупностях (выделенных подгруппах) показатели анализа походки представлены в виде медианы с уровнем распределения процентилей 25 %÷75 %. Статистическую значимость различий определяли с использованием непарного критерия Вилкоксона с принятием уровня значимости $p \leq 0,05$. Взаимосвязь между параметрами оценивали с помощью ранговой корреляции Спирмена. Для сравнения встречаемости признака «паттерн crouch gait» применяли критерий хи-квадрат для бинарных выборов.

На проведение исследований получено разрешение комитета по этике НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова. Исследования проводили в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г., «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 № 266. Родители детей, участвовавших в исследовании, давали информированное согласие на публикацию результатов и присутствовали при проведении исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение демографических признаков и типов походки пациентов по подгруппам представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика пациентов

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Количество пациентов	29	21	13	12	15	12
Возраст, лет	14,9 ± 1,2	15,2 ± 1,3	15,4 ± 1,98	14,6 ± 1,3	14,9 ± 1,5	15,1 ± 2,4
Пол, Ж/М	13/16	9/12	5/8	5/7	9/6	7/5
ИМТ	17,9 ± 3,9	19,4 ± 2,8	18,4 ± 3,22	19,3 ± 4,2	20,2 ± 3,7	19,6 ± 2,8
Тип/особенности походки						
Equinus gait с ротационными отклонениями	4	1	3	–	–	–
Jump gait с ротационными отклонениями	10	3	1	2	2	–
Apparent equinus	2	1	–	1	–	–
Crouch gait компенсированный	12	7	3	7	5	5
Crouch gait декомпенсированный	1	4	1	2	4	1
Crouch gait+stiff knee gait	–	5	–	–	2	1
Ротационные отклонения, изолированные	–	–	4	–	1	–
Пяточная установка и ротационные отклонения	–	–	1	–	–	–
Ротационные отклонения и stiff knee gait	–	–	–	–	1	2
Flexed knee и ротационные отклонения	–	–	–	–	–	3

Данные табл. 1 показывают отсутствие различий по возрасту, полу и индексу массы тела (ИМТ) между подгруппами пациентов. Из характеристик походки отметим преобладание нарушений движений в горизонтальной плоскости (вследствие торсионных деформаций) у ранее неоперированных пациентов уровня GMFCS I–II и возрастание доли паттерна crouch gait в остальных подгруппах. Очевидным является нарастание доли декомпенсированных типов crouch gait в подгруппах пациентов после ранних вмешательств на трицепсах голеней. При этом выявлено достоверное отличие между подгруппами 1А и 2А по признаку частоты встречаемости декомпенсированного crouch gait (критерий хи-квадрат, $p = 0,002$). Между прочими подгруппами достоверных различий по данному критерию не было.

При сравнении пространственно-временных характеристик походки (табл. 2) между подгруппами пациентов уровня GMFCS I–II становится очевидным, что наихудшие показатели параметров отмечаются в подгруппе 2А (ранние изолированные удлинения трицепса голени): достоверно ниже скорость походки и длина периода шага, увеличена ширина шага и длительность периода двуопорной фазы, что отражает неустойчивость положения тела.

Таблица 2

Индекс походки, пространственно-временные характеристика походки

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Индекс походки (GPS — gait profile score), °	12 (10,7÷15,6)	14,9 (13,68÷17,43)*	12,1 (11,4÷13,7)	20,2 (16,0÷23,9)	16,1 (15,0÷18,9)	14,5 (14,3÷15,9)* ¹
Скорость, м/сек	0,93 (0,67÷1,05)	0,65 (0,53÷0,84)*	0,84 (0,66÷1,0) ¹	0,71 (0,58÷0,78)	0,65 (0,44÷0,76)	0,42 (0,38÷0,49)* ¹
Длина периода шага, м	1,03 (0,85÷1,12)	0,84 (0,68÷0,95)*	0,95 (0,86÷1,07) ¹	0,8 (0,76÷0,91)	0,78 (0,56÷0,93)	0,74 (0,57÷0,79)
Ширина шага, м	0,13 (0,1÷0,18)	0,17 (0,14÷0,19)*	0,17 (0,14÷0,23)* ¹	0,14 (0,135÷0,16)	0,15 (0,14÷0,18)	0,19 (0,17÷0,20)* ¹
Количество циклов шага/мин	53,5 (48,4÷59)	51,5 (47,85÷55,45)	53,5 (51,65÷56,38)	51,4 (42,4÷55,6)	47,6 (41,6÷54,2)	39,8 (29,2÷46,3)* ¹
Длительность периода опоры от цикла шага, %	62,8 (61,85÷66,55)	65,7 (64,15÷72,35)*	64,1 (62,7÷67,45) ¹	64,1 (62,1÷68,9)	69,0 (66,3÷72,9)*	72,1 (68,0÷76,8)*
Длительность периода переноса от цикла шага, %	36,9 (33,13÷38,28)	33,9 (27,65÷35,48)*	35,9 (32,8÷37,6) ¹	35,4 (30,9÷38,3)	31,1 (27,4÷33,9)*	27,8 (22,4÷31,9)*
Длительность двойного двуопорного периода от цикла шага, %	25,9 (24,85÷31,23)	32,3 (28,18÷44,98)*	29,7 (26,7÷32,8)* ¹	29,8 (26,2÷35,9)	36,7 (30,4÷46)*	39,1 (36,4÷45,2)*

Примечание: * — достоверные отличия с подгруппой 1А по идентичному уровню GMFCS; ¹ — достоверные отличия между группами 2 и 3 по идентичному уровню GMFCS.

Параметры в подгруппе 2А (GMFCS III) отражают закономерную деградацию параметров ходьбы, коррелирующую с развитием паттерна crouch gait: значительное увеличение индекса нарушений движений (GPS), ширины шага и длительности двуопорного периода при сохранении сравнительно высокой скорости ходьбы.

В контексте сравнения скорости ходьбы и GPS интересным представляется сочетание низких значений GPS и сравнительно медленной скорости ходьбы у пациентов с ранее выполненными многоуровневыми вмешательствами (подгруппа 3Б). Можно сказать, что они ходят медленнее, но движения (амплитуда, ее распределение) в суставах нижних конечностей ближе к нормальным параметрам.

Кинематические данные (табл. 3) в группе 1 (GMFCS I–II) характеризуют развитие паттерна crouch gait преимущественно у пациентов после изолированного удлинения трицепса в раннем периоде, — постоянная позиция стопы в тыльной флексии, избыточное сгибание коленного сустава как в момент первичного контакта, так и в опорную фазу (с максимальным средним сгибанием 35,6° в точке Г1), что сопровождается значимым снижением амплитуды движений в суставе на протяжении всего цикла шага в сравнении с подгруппами 1А и 3А. Обращает внимание и снижение амплитуды подошвенного сгибания в момент толчка в подгруппе 3А и его отсутствие в подгруппе 2А. Установка стопы в положении подошвенной флексии при первичном контакте и достоверно увеличенная амплитуда ротационных движений в подгруппе 1А в сравнении с подгруппами 2А и 3А свидетельствуют о преобладании особенностей движений паттернов jump gait и equinus gait у пациентов, ранее не оперированных.

В группе 2 (GMFCS III) во всех подгруппах наблюдается избыточное сгибание коленного сустава в момент первичного контакта, однако наименее выраженное в подгруппе 3Б. Достаточное активное подошвенное сгибание стопы в момент пропульсии присутствует лишь в подгруппах 1Б и 3Б, что указывает на сохранение функции подошвенных флексоров в отличие от подгруппы 2Б. Максимальное разгибание коленного сустава в опорную фазу можно считать достаточным лишь в подгруппе 3Б,

что отражает эффективность ранее выполненных многоуровневых вмешательств для коррекции патологии движений в сагиттальной плоскости. Однако значимое увеличение ротационных движений тазом и бедром в этой же подгруппе указывает на сохранение торсионных деформаций сегментов нижних конечностей и присутствие показаний к их коррекции. Для неоперированных пациентов и пациентов после ранних вмешательств на трехглавых мышцах голени характерны значимые элементы паттерна crouch gait (избыточное сгибание в коленном суставе в опорную фазу) либо полноценное формирование данного паттерна.

Таблица 3

Отдельные кинематические параметры

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Позиция стопы при первичном контакте (Г0), °	–2,5 (–9,1÷4,4)	6,4 (1,7÷10,8)*	5,7 (0,3÷7,1)*	5,1 (–2,8÷9,75)	7,9 (2,6÷10,5)	–1,1 (–7,5÷3,1) ¹
Максимальная тыльная флексия в опорную фазу (Г2), °	13,1 (7,3÷15,9)	17,9 (13,7÷24,4)*	15,3 (10,7÷19,6)	19 (9,9÷24,14)	24,5 (14,9÷29,8)	11,7 (8,8÷13,98) ¹
Максимальное подошвенное сгибание при пропульсии (Г3), °	–7,4 (–17,7÷–0,6)	4,8 (–0,95÷9,95)*	0,3 (–6,9÷6,5)*	–5,3 (–11,2÷7,58)	1,8 (–4,4÷9,05)*	–3,1 (–7,4÷2,95)
Позиция стопы в фазу переноса (Г4), °	5,9 (–3,5÷13,9)	14,6 (9,7÷19)*	11,8 (6,2÷14,5)	11,4 (1,98÷15,95)	13,2 (7,7÷18,4)	3,3 (–0,6÷12,3) ¹
Позиция колена при первичном контакте (К0), °	21,7 (14÷30)	33 (28,3÷40,2)*	22,2 (16,6÷26,7) ¹	46,9 (29,85÷55,3)	45,9 (29,2÷48,7)	28,7 (25,1÷35,2)* ¹
Максимальное сгибание коленного сустава в опорную фазу (К1), °	28,6 (22,7÷33,2)	35,6 (31,9÷43,4)*	28,3 (19,2÷31,5) ¹	52,3 (30,8÷56,9)	47,9 (26,7÷52,0)	31,4 (29,2÷35,1)* ¹
Максимальное разгибание коленного сустава в опорную фазу (К2), °	9,5 (5,4÷15,4)	22,7 (14,8÷31,3)*	5,4 (1,6÷10,7) ¹	35,9 (22,8÷45,4)	33,7 (10,4÷41,7)	9,6 (1,38÷21,6)* ¹

Кинетические данные (табл. 4) показывают сохранение достаточного уровня силовых характеристик подошвенных сгибателей после многоуровневых вмешательств в подгруппе 3А, что не требует компенсаторного увеличения мощности движений коленным суставом в отличие от подгрупп 1А и 2А. В группах более тяжелого нарушения глобальных моторных функций (GMFCS III) отмечаются высокие значения генерируемой мощности для обеспечения походки в подгруппе 2Б, что отражает повышенную энергоёмкость ходьбы как таковой. Достоверно низкие усилия разгибания коленного сустава на фоне достаточной амплитуды разгибания в опорную фазу в подгруппе многоуровневых вмешательств вновь указывают на сравнительное благополучие движений в сагиттальной плоскости после многоуровневых вмешательств. Высокие значения момента разгибания тазобедренного сустава и генерируемой мощности движений бедром отражают увеличенный вклад в обеспечение походки мышц тазового пояса во всех подгруппах. Наконец, в подгруппе 2Б необходимость генерации высоких значений мощности движений в коленном и голеностопном суставах вновь свидетельствуют о повышенной энергоёмкости ходьбы после ранних изолированных вмешательств на трицепсах голени.

Выявлены некоторые умеренные и сильные корреляции между кинематическими, пространственно-временными и кинетическими параметрами во всех подгруппах, кроме подгруппы 1А. Отрицательная корреляция ИМТ–скорость ходьбы (–0,521) в подгруппе 2А закономерно отражает критичное значение массы тела для замедления передвижения при хирургическом ослаблении функции подошвенного толчка после ранних операций, даже у пациентов с умеренными неврологическими нарушениями. Во многих подгруппах сила подошвенного сгибания стопы имела положительную достоверную корреляцию со скоростью ходьбы: подгруппы 2А (0,631), 1Б (0,738), 2Б (0,797), 3Б (0,673). При этом скорость ходьбы снижается при увеличении амплитуды движений в голеностопном суставе, как следствие появления патологической избыточной тыльной флексии стопы у пациентов уровня GMFCS III, — корреляция становится отрицательной для подгрупп 1Б (–0,761) и 3Б (–0,689). На важность силы подошвенного сгибания указывает и отрицательная корреляция этого параметра с GPS (–0,522) в подгруппе 3А. Положительная корреляция между амплитудой разгибания коленного сустава (К1–К2) в опорную фазу и эффективностью генерируемой мощности при движениях в коленном суставе в подгруппе 2А отражает достаточный компенсаторный потенциал даже при раннем ослаблении подошвенных сгибателей. Однако при более тяжелом уровне нарушений глобальных моторных функций (GMFCS III) проявляется значимая положительная корреляция между GPS и кинематическими или кинетическими параметрами и в подгруппе 3Б. Это отражает развитие декомпенсации функциональных возможностей на фоне ортопедических нарушений: с силой разгибания тазобедренного сустава (0,522), с силой разгибания коленного сустава (0,533), с суммарной мощностью движений в коленном (0,739) и голеностопном (0,565) суставах. При этом для данной подгруппы выявлена положительная корреляция ИМТ с силой

разгибания коленного сустава (0,630) и подошвенной флексии стопы (0,649). Кроме того, обнаружена положительная корреляция значений ИМТ и суммарной генерируемой мощности движений в голеностопном суставе (0,543), что отражает сохранение адаптационных возможностей подошвенных флексоров у пациентов после многоуровневых вмешательств. Наконец, отметим важность выявленной значимой отрицательной корреляции «GPS-амплитуда движений в сагиттальной плоскости в тазобедренном суставе» (–0,619) в подгруппе 1Б, вероятно, отражающей возможность компенсации снижений двигательных возможностей коленного и голеностопного суставов увеличением двигательной активности мышц тазового пояса.

Таблица 4

Отдельные кинетические параметры

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Момент силы разгибания тазобедренного сустава, Nm/kg	0,9 (0,66÷1,07)	0,9 (0,76÷1,34)	0,8 (0,66÷0,98)	1,11 (0,79÷1,17)	0,94 (0,63÷1,18)	0,83 (0,49÷0,97)
Момент силы разгибания коленного сустава, Nm/kg	0,6 (0,38÷0,81)	0,7 (0,49÷0,96)*	0,7 (0,48÷0,84)	1,0 (0,61÷1,18)	0,89 (0,63÷1,15)	0,53 (0,33÷0,87)* ¹
Момент силы подошвенного сгибания, Nm/kg	1,04 (0,89÷1,2)	0,99 (0,71÷1,21)	1,12 (1,03÷1,29) ¹	0,81 (0,55÷0,88)	0,9 (0,74÷0,99)*	0,87 (0,85÷0,93)*
Полезная мощность, генерируемая на уровне тазобедренного сустава, W/kg	0,34 (0,06÷0,86)	0,48 (0,23÷0,86)	0,29 (0,04÷0,64)	0,47 (0,36÷0,85)	0,55 (0,4÷0,83)	0,27 (0,04÷0,57) ¹
Полезная мощность, генерируемая на уровне коленного сустава, W/kg	–0,45 (–0,74÷–0,09)	–0,24 (–0,69÷0,01)	–0,01 (–0,58÷0,02) ¹	–0,21 (–0,61÷0,01)	–0,34 (–0,71÷–0,03)	–0,02 (–0,23÷0,0) ¹
Полезная мощность, генерируемая на уровне голеностопного сустава, W/kg	0,17 (–0,01÷1,12)	0,2 (–0,06÷0,42)	0,17 (0,03÷0,63)	0,15 (–0,01÷0,38)	0,29 (0,01÷0,45)	0,01 (–0,06÷0,07) ¹

ОБСУЖДЕНИЕ

Крайне важным элементом патогенеза двигательных нарушений и вторичных ортопедических осложнений является прогрессирующее на протяжении взросления организма уменьшение объема пассивных движений [20]. Развитие дефицита длины мышц, первоначально обусловленное спастичностью, эволюционирует в направлении ретракции [21]. Отмечаемые морфологические изменения в мышцах сопровождаются увеличением длины саркомеров, снижением числа сателлитных клеток и увеличением содержания коллагеновых структур, что обуславливает уменьшение силы сокращения, снижение регенераторного потенциала и увеличение жесткости мышц, наблюдаемых на фоне других ортопедических осложнений ДЦП [22, 23].

В клинической практике выполнение многоуровневых вмешательств обычно проводят в возрасте 11–15 лет, что сопровождается стабильностью результата операции без его регрессии, особенно если вмешательство выполнено после пубертатного ускорения роста [24, 25]. В возрасте старше 12 лет часто уже невозможно полноценное анатомическое восстановление структур и взаимоотношений между сегментами конечностей, пропорциями мышц, а нередко единственным решением остается паллиативная ортопедическая хирургия при crouch gait [9, 26]. Именно поэтому Н.К. Graham et al. [9] выделяют возрастной период 4–12 лет (период контрактур и костных деформаций), когда место ортопедической хирургии становится обоснованным. В данные периоды характер ортопедической хирургии носит реконструктивный характер, а паллиативные вмешательства еще не находят своих показаний.

Подростковый возраст, после прохождения пика ускорения роста на нижних конечностях, еще относится к периоду детства и может интерпретироваться как старший школьный возраст [27, 28]. В этом возрасте по-прежнему существует немалая когорта пациентов, имеющих показания к хирургической коррекции осложнений ДЦП [17, 18]. Особенностью выполнения операций и прогноза их результата является отсутствие ремоделирующего потенциала в процессе резидуального роста и начало развития ранних артрозных изменений [9, 15]. Именно поэтому в подростковом возрасте, когда пубертатное ускорение роста замедляется, а у ребенка постепенно увеличивается ИМТ, оперативное лечение часто направлено уже на коррекцию паттерна crouch gait [9]. При этом результаты коррекции ввиду прекращения активного продольного роста длинных костей нижних конечностей остаются относительно стабильными в отдаленном периоде [7, 15].

Причиной сравнительно позднего выполнения ортопедического вмешательства, часто носящего уже паллиативный характер, могут являться различные факторы. Ряд авторов находит объяснение такой ситуации в недостаточной организации системы здравоохранения. Причинами отсутствия преим-

ственного и комплексного подхода лечения детей с ДЦП называют невысокую доступность медицинской помощи, недостаточную информированность врачей о методах лечения с высокой доказательной базой, позднюю диагностику заболевания и недостаточную информированность родителей пациентов о характере заболевания и эффективности различных методов лечения, а также отсутствие национальных регистров [29, 30, 31].

Неблагоприятным фактором, объединяющим возрастные и хирургические аспекты, является выполнение так называемых фибромиотенотомий, фибротомий, а также удлинений ахиллова сухожилия в раннем возрасте. Необоснованное ортопедическое вмешательство на спастичных мышцах, даже увеличивая пассивную амплитуду движений в суставах, ведет к их чрезмерному ослаблению, что проявляется ранней функциональной декомпенсацией и развитием ятрогенных нарушений, ортопедических осложнений в подростковом возрасте, имеющих результатом формирование ятрогенного паттерна crouch gait [5, 32, 33].

Отметим, что существует определенная группа пациентов, в которой коррекцию ортопедических осложнений ДЦП даже при выполнении многоуровневых вмешательств производили не в полном объеме, в частности, коррекция торсионных деформаций не была выполнена [34, 35, 36]. В некоторых случаях возможны рецидивы контрактур, что также может потребовать повторных вмешательств, частота которых (без учета удаления материала остеосинтеза) в отдаленном периоде после первичных многоуровневых операций достигает 39 %. Так, T. Terjesen et al. [25] указывают на развитие легкой эквинусной установки стопы через три–четыре года наблюдения при нормальных показателях кинематики в опорную фазу, что сопровождается прогрессивным уменьшением амплитуды тыльной флексии в процессе последующего роста со средним темпом 4° в год. Наконец, планирование объема многоуровневых вмешательств без использования компьютерного анализа походки повышает риск неполноценности, недостаточности или неточности величины хирургической коррекции, что требует в будущем выполнения повторных вмешательств [37, 38].

В нашем исследовании параметры движений при ходьбе существенно различались между подгруппами. У пациентов с нетяжелым уровнем нарушения глобальных моторных функций (GMFCS I–II) и при отсутствии каких-либо ранее выполненных ортопедических вмешательств доминирующими элементами нарушения походки являлись ротационные нарушения движений и контрактуры коленных и голеностопных суставов. При этом кинетические характеристики движений оставались сравнительно сохраненными. И, соответственно, оперативные вмешательства, которые показаны в данной ситуации, носили строго реконструктивный характер, так как отсутствовала декомпенсация движений в сагиттальной плоскости. В группе пациентов с такими же нетяжелыми двигательными нарушениями (GMFCS I–II), но с выполненными в раннем возрасте операциями изолированного удлинения трицепса, в большинстве случаев наблюдали декомпенсацию двигательных нарушений с развитием ятрогенного паттерна crouch gait, сопровождавшегося как ухудшением пространственно-временных характеристик походки, так и увеличением ее энергоемкости. В подгруппе многоуровневых вмешательств у пациентов GMFCS I–II показания к оперативному лечению были обусловлены отдельными нерешенными ортопедическими проблемами, — ротационными установками или рецидивами контрактур.

Мы полагаем, что в подгруппе уровня GMFCS III без ранее выполненных оперативных вмешательств двигательные расстройства естественным образом отражали финальную точку в формировании типичного паттерна crouch gait с полной характеристикой ухудшения пространственно-временных показателей и увеличения энергоемкости движений, но с преобладанием компенсированных форм. В подгруппе подростков с характеристикой нарушений глобальных движений этого же уровня (GMFCS III), но после изолированных вмешательств на трицепсе голени, преобладали декомпенсированные формы crouch gait. В подгруппе после ранее перенесенных многоуровневых вмешательств у пациентов уровня GMFCS III нарушения характеризовались ротационными отклонениями, сгибательной установкой коленного сустава без избыточной тыльной флексии стопы, компенсированным паттерном crouch gait. При этом сохранялись адаптационные возможности подошвенных флексоров у пациентов после многоуровневых вмешательств, а интегральный показатель GPS имел наименьшие значения для пациентов уровня GMFCS III.

В целом можно отметить, что наилучшие значения пространственно-временных показателей ходьбы и отсутствие паттерна crouch gait отмечается у пациентов, у которых сохранены достаточные силовые характеристики подошвенного сгибания и отсутствует избыточное тыльное сгибание стопы в опорную фазу. Подтверждением этому служит и достоверная отрицательная корреляция в подгруппе 2Б между ИМТ и скоростью ходьбы, а также отрицательная корреляция между суммарной амплитудой движений в голеностопном суставе и скоростью ходьбы.

Существует естественная эволюция двигательных нарушений в направлении паттерна crouch gait, развивающегося в подростковом возрасте у пациентов со спастической диплегией, обусловленная, среди прочего, торсионными деформациями бедренных костей, деформацией стоп и высокой позицией надколенников [9, 25, 35, 39]. Однако предиктором данной неблагоприятной эволюции,

как очевидно доказали исследования G. Pilloni et al. [32], является хирургическое ослабление подошвенных сгибателей, что ведет к увеличению минимального сгибания коленного сустава в опорную фазу. В исследовании N.M. Bernthal et al. [40] отмечено, что декомпенсация разгибательной функции нижней конечности первоначально проявлялась тенденцией избыточной тыльной флексии стопы в опорную фазу. В нашем исследовании очевидное неблагополучие параметров ходьбы у подростков, имеющих в анамнезе изолированное удлинение трицепса, подтверждает негативный эффект от чрескожных фибромиотенотомий, удлинений ахиллова сухожилия, который проявляется в старшем детском и подростковом возрасте.

Ограничениями нашего исследования являются: характере кросс-секционного исследования, отсутствии ретроспективного анализа кинематических и кинетических параметров походки у данной группы пациентов; сравнительно небольшое количество пациентов в сравниваемых группах; сравнение групп, разделенных по признаку уровня поражения глобальных моторных функций, но без углубленного неврологического анализа. Кроме того, в исследование не включены пациенты, которым ранее проводили многоуровневые вмешательства, но в отдаленном периоде не возникли показания к повторным хирургическим вмешательствам. Для получения исчерпывающего заключения о двигательном статусе изучаемых групп пациентов мы планируем в следующих работах провести сопоставления данных с параметрами ходьбы по шкале FMS, а также оценить качество жизни пациентов, что даст более полную картину состояния пациентов с ДЦП подросткового возраста, поступающих для ортопедического хирургического лечения. Наконец, отметим, что целью исследования было не сравнение групп пациентов, а именно выявление характерных особенностей двигательных нарушений, позволяющих описать и индивидуализировать категории нарушений походки у пациентов подросткового возраста, поступающих для оперативного лечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У пациентов со спастической диплегией, поступивших для оперативного лечения в подростковом возрасте, показания к ортопедическому вмешательству определяют уровнем нарушений глобальных моторных функций, а также типом и полнотой ранее выполненными оперативными вмешательствами. При отсутствии каких-либо ранее выполненных оперативных вмешательств у пациентов уровня GMFCS I–II показания определяют наличием контрактур суставов и торсионных деформаций сегментов нижних конечностей, в то время как при уровне GMFCS III в подростковом возрасте преобладает паттерн crouch gait, остающийся компенсированным. У группы пациентов с выполненными в раннем возрасте удлинениями трицепса голени в нашем исследовании наблюдалось развитие компенсированных и декомпенсированных форм crouch gait с высокой энергоемкостью движений, что необходимо учитывать при выборе тактики хирургического лечения, проведении последующих реабилитационных мероприятий и ортезировании. При выполненных многоуровневых вмешательствах в предыдущий период показаниями к оперативному лечению у подростков являлись торсионные деформации, рецидивы контрактур, развитие сгибательной установки коленного сустава, однако пространственно-временные и силовые характеристики движений при этом оставались на сравнительно высоком уровне.

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

Источник финансирования. Дополнительные источники финансирования не привлекались.

Этическая экспертиза. На проведение исследований получено разрешение комитета по этике НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова от 17.05.2018 № 2(57).

Информированное согласие. Пациенты или родители пациентов / уполномоченные сотрудники социальных учреждений подтверждали согласие на проведение исследования и публикацию результатов без идентификации личности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Valluri H, Mohanty M, Mongil CR, et al. Investigating the burden of cerebral palsy in low- and middle-income countries: Implications and priorities for pediatric neurology. *Semin Pediatr Neurol.* 2025;55:101225. doi: 10.1016/j.spen.2025.101225.
- Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, et al. A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl.* 2007;109:8-14.
- Томов А.Д., Бабайцев А.В., Кадырова М.А. и др. Паттерны роста у детей с церебральным параличом и спектр проводимого лечения: кросс-секционное исследование данных пяти реабилитационных центров. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2025;32(1):35-43. doi: 10.17816/vto626900.
- Armand S, Decoulon G, Bonnefoy-Mazure A. Gait analysis in children with cerebral palsy. *EFORT Open Rev.* 2016;1(12):448-460. doi: 10.1302/2058-5241.1.000052.
- Долганова Т.И., Долганов Д.В., Чибиров Г.М. и др. Количественные параметры кинетики и кинематики ятрогенного crouch паттерна. *Гений ортопедии.* 2022;28(5):675-683. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-675-683.
- Baird G, Chandler S, Shortland A, et al. Acquisition and loss of best walking skills in children and young people with bilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2022;64(2):235-242. doi: 10.1111/dmcn.15015.
- Lamberts RP, Burger M, du Toit J, Langerak NG. A Systematic Review of the Effects of Single-Event Multilevel Surgery on Gait Parameters in Children with Spastic Cerebral Palsy. *PLoS One.* 2016;11(10):e0164686. doi: 10.1371/journal.pone.0164686.

8. Попков Д.А., Змановская В.А., Губина Е.Б. и др. Результаты многоуровневых одномоментных ортопедических операций и ранней реабилитации в комплексе с ботулинотерапией у пациентов со спастическими формами церебрального паралича. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2015;115(4):41-48. doi: 10.17116/nevro20151154141-48.
9. Graham HK, Thomason P, Willoughby K, et al. Musculoskeletal Pathology in Cerebral Palsy: A Classification System and Reliability Study. *Children (Basel)*. 2021;8(3):252. doi: 10.3390/children8030252.
10. Shore BJ, White N, Kerr Graham H. Surgical correction of equinus deformity in children with cerebral palsy: a systematic review. *J Child Orthop*. 2010;4(4):277-290. doi: 10.1007/s11832-010-0268-4.
11. Thomason P, Selber P, Graham HK. Single Event Multilevel Surgery in children with bilateral spastic cerebral palsy: a 5 year prospective cohort study. *Gait Posture*. 2013;37(1):23-28. doi: 10.1016/j.gaitpost.2012.05.022.
12. Gough M, Schneider P, Shortland AP. The outcome of surgical intervention for early deformity in young ambulant children with bilateral spastic cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Br*. 2008;90(7):946-951. doi: 10.1302/0301-620X.90B7.20577.
13. Rutz E, Tirosh O, Thomason P, et al. Stability of the Gross Motor Function Classification System after single-event multilevel surgery in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2012;54(12):1109-1113. doi: 10.1111/dmcn.12011.
14. Edwards TA, Theologis T, Wright J. Predictors affecting outcome after single-event multilevel surgery in children with cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol*. 2018;60(12):1201-1208. doi: 10.1111/dmcn.13981.
15. Putz C, Döderlein L, Mertens EM, et al. Multilevel surgery in adults with cerebral palsy. *Bone Joint J*. 2016;98-B(2):282-288. doi: 10.1302/0301-620X.98B2.36122.
16. Гатамов О.И., Долганова Т.И., Томов А.Д., Попков Д.А. Эволюция походки после многоуровневых ортопедических операций, выполненных для коррекции ортопедических осложнений у детей дошкольного и младшего школьного возраста со спастической диплегией. *Гений ортопедии*. 2025;31(5):602-613. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-5-602-613.
17. Фатхулislamов Р.Р., Гатамов О.И., Мамедов У.Ф., Попков Д.А. Оценка состояния пациентов со спастическими формами церебрального паралича при переходе во взрослую сеть лечебно-профилактических учреждений: кросс-секционное исследование. *Гений ортопедии*. 2023;29(4):376-381. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-4-376-381.
18. Bonnefooy-Mazure A, De Coulon G, Lascombes P, Armand S. Follow-up of walking quality after end of growth in 28 children with bilateral cerebral palsy. *J Child Orthop*. 2020;14(1):41-49. doi: 10.1302/1863-2548.14.190125.
19. Долганова Т.И., Попков Д.А., Долганов Д.В., Чибиров Г.М. Показатели кинетики локомоторных стереотипов у здоровых детей в различных скоростных диапазонах передвижения. *Гений ортопедии*. 2022;28(3):417-424. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-3-417-424.
20. Nordmark E, Häglund G, Lauge-Pedersen H, et al. Development of lower limb range of motion from early childhood to adolescence in cerebral palsy: a population-based study. *BMC Med*. 2009;7:65. doi: 10.1186/1741-7015-7-65.
21. Cloodt E, Lindgren A, Rodby-Bousquet E. Knee and ankle range of motion and spasticity from childhood into adulthood: a longitudinal cohort study of 3,223 individuals with cerebral palsy. *Acta Orthop*. 2024;95:200-205. doi: 10.2340/17453674.2024.40606.
22. Wohlgenuth RP, Kulkarni VA, Villalba M, et al. Collagen architecture and biomechanics of gracilis and adductor longus muscles from children with cerebral palsy. *J Physiol*. 2024;602(14):3489-3504. doi: 10.1113/JP285988.
23. Mathewson MA, Lieber RL. Pathophysiology of muscle contractures in cerebral palsy. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2015;26(1):57-67. doi: 10.1016/j.pmr.2014.09.005.
24. Rutz E, Baker R, Tirosh O, Brunner R. Are results after single-event multilevel surgery in cerebral palsy durable? *Clin Orthop Relat Res*. 2013;471(3):1028-1038. doi: 10.1007/s11999-012-2766-9.
25. Terjesen T, Lofterød B, Skaaret I. Gait improvement surgery in ambulatory children with diplegic cerebral palsy. *Acta Orthop*. 2015;86(4):511-517. doi: 10.3109/17453674.2015.1011927.
26. Dreher T, Thomason P, Švehlík M, et al. Long-term development of gait after multilevel surgery in children with cerebral palsy: a multicentre cohort study. *Dev Med Child Neurol*. 2018;60(1):88-93. doi: 10.1111/dmcn.13618.
27. Ваганов П.Д., Яновская Э.Ю., Манджиева Э.Т. Периоды детского возраста. *Российский медицинский журнал*. 2018;24(4):185-190. doi: 10.18821/0869-2106-2018-24-4-185-190.
28. Clark R, Locke M, Bialocerkowski A. Paediatric terminology in the Australian health and health-education context: a systematic review. *Dev Med Child Neurol*. 2015;57(11):1011-1018. doi: 10.1111/dmcn.12803.
29. Leite HR, Jindal P, Malek SA, Rosenbaum P. Research on Children With Cerebral Palsy in Low- and Middle-Income Countries. *Pediatr Phys Ther*. 2022;34(4):551-555. doi: 10.1097/PEP.0000000000000949.
30. Karim T, Dossetor R, Huong Giang NT, et al. Data on cerebral palsy in Vietnam will inform clinical practice and policy in low and middle-income countries. *Disabil Rehabil*. 2022;44(13):3081-3088. doi: 10.1080/09638288.2020.1854872.
31. Al-Jabri BA, Al-Amri AS, Jawhari AA, et al. Prevalence, Types, and Outcomes of Cerebral Palsy at a Tertiary Center in Jeddah, Saudi Arabia. *Cureus*. 2022;14(8):e27716. doi: 10.7759/cureus.27716.
32. Pilloni G, Pau M, Costici PF, et al. Use of 3D gait analysis as predictor of Achilles tendon lengthening surgery outcomes in children with cerebral palsy. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2019;55(2):250-257. doi: 10.23736/S1973-9087.18.05326-1.
33. Ong CF, Geijtenbeek T, Hicks JL, Delp SL. Predicting gait adaptations due to ankle plantarflexor muscle weakness and contracture using physics-based musculoskeletal simulations. *PLoS Comput Biol*. 2019;15(10):e1006993. doi: 10.1371/journal.pcbi.1006993.
34. Ounpuu S, DeLuca P, Davis R, Romness M. Long-term effects of femoral derotation osteotomies: an evaluation using three-dimensional gait analysis. *J Pediatr Orthop*. 2002;22(2):139-145.
35. Theologis T. Lever arm dysfunction in cerebral palsy gait. *J Child Orthop*. 2013;7(5):379-382. doi: 10.1007/s11832-013-0510-y.
36. Ławniczak D, Józwiak M, Manikowska F. Assessment of absolute knee joint linear and angular velocity in patients with spastic cerebral palsy after operative treatment of lever arm disfunction deformities--prospective study. *Chir Narzadow Ruchu Ortop Pol*. 2010;75(2):92-97. (In Polish).
37. Ma N, Gould D, Camathias C, et al. Single-Event Multi-Level Surgery in Cerebral Palsy: A Bibliometric Analysis. *Medicina (Kaunas)*. 2023;59(11):1922. doi: 10.3390/medicina59111922.
38. Чибиров Г.И., 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;25(4):493-500. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-493-500.
39. Кольцов А.А., Аксенов А.Ю., Джомардлы Э.И. Сравнительная характеристика кинематических параметров ходьбы детей с ДЦП в зависимости от типа фиксации стопы и голеностопного сустава. *Травматология и ортопедия России*. 2022;28(4):102-113. doi: 10.17816/2311-2905-1682.
40. Bernthal NM, Gamradt SC, Kay RM, et al. Static and dynamic gait parameters before and after multilevel soft tissue surgery in ambulating children with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop*. 2010;30(2):174-179. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181d04fb5.

Статья поступила 22.01.2026; одобрена после рецензирования 10.03.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 22.01.2026; approved after reviewing 10.03.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Эдуард Рифович Мингазов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, заведующий отделением, <https://orcid.org/0000-0001-9096-9218>;

Орифжан Фарходжанович Насипжанов — аспирант 1 года, Onasipzanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4732-7816>;

Тамара Игоревна Долганова — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>;

Орхан Ильхам оглы Гатамов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, or-gatamov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4244-5774>;

Улви Фаиг Оглы Мамедов — врач — травматолог-ортопед, аспирант, <https://orcid.org/0009-0008-0266-6515>;

Дмитрий Арнольдович Попков — доктор медицинских наук, профессор РАН, Член-корр. Французской Академии медицинских наук, руководитель клиники, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Information about the authors:

Eduard R. Mingazov — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, Head of the Department, <https://orcid.org/0000-0001-9096-9218>;

Orifzhan F. Nasipzhanov — Postgraduate Student, Onasipzanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4732-7816>;

Tamara I. Dolganova — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>;

Orkhan I. Gatamov — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, or-gatamov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4244-5774>;

Ulvi F. Mamedov — Orthopaedic Surgeon, Postgraduate Student, <https://orcid.org/0009-0008-0266-6515>;

Dmitry A. Popkov — Doctor of Medical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the French Academy of Medical Sciences, Head of Clinic, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Вклад авторов:

Мингазов Э.Р. — создание моделей, оформления, проведение исследовательской деятельности.

Долганова Т.И. — применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования.

Насипжанов О.Ф. — подготовка и написание первоначального проекта (черновика) работы.

Гатамов О.И. — ответственность за управление и координацию планирования и проведения исследовательской деятельности.

Мамедов У.Ф. — проведение исследовательской деятельности.

Попков Д.А. — сбор данных/доказательств, подготовка и написание первоначального проекта работы, применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования.