

Научная статья

УДК 616.009.11-031.4:612.766(086.8)-053.2

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-2-194-201>



Кинематические и кинетические особенности невовлеченной конечности при ходьбе у детей со спастической гемиплегией

У.Ф. Мамедов✉, Т.И. Долганова, Л.В. Смолькова, А.О. Трофимов, О.И. Гатамов, Д.А. Попков

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Улви Фаиг оглы Мамедов, ulvi.mamedof@gmail.com

Аннотация

Введение. Изучение функциональных особенностей непораженной стороны опорно-двигательной системы у больных со спастическими гемипарезами способствует разработке различных аспектов медицинской реабилитации.

Цель работы — определить особенности компенсаторно-приспособительного поведения при ходьбе невовлеченной в патогенез конечности у детей с гемиплегией в зависимости от возраста и ранее проводившихся хирургических вмешательств на трицепсе голени.

Материалы и методы. Локомоторные характеристики 78 детей до 16 лет со спастической гемиплегией и двигательными нарушениями, соответствующими уровням I–II по GMFCS (*англ.*: Gross Motor Function Classification System), сопоставлены с 77 здоровыми сверстниками. В зависимости от возраста и проведения операции удлинения трицепса голени все дети разделены на 6 групп. Кинематические данные регистрировали с помощью оптических камер Qualisys 7+ и динамометрических платформ KISTLER. Для анализа видеоматериала использовали программы QTM и Visual3D, для статистической обработки данных — программы Microsoft EXCEL-2013 и AtteStat 12.0.5.

Результаты. На невовлеченной конечности у детей со спастической гемиплегией наблюдали сгибательную установку в суставах ног, при этом кинематика её голеностопного сустава по сравнению со здоровыми сверстниками статистически значимо не отличалась. Кроме того, движения в суставах невовлеченной конечности у детей с гемиплегией статистически значимо осуществлялись с большими энергетическими затратами, особенно в коленных и тазобедренных суставах, в то время как мощностные характеристики в голеностопных суставах у них статистически значимо ниже, чем у здоровых сверстников.

Обсуждение. Статистически значимое повышение по сравнению с нормой и перераспределение мощностных локомоторных характеристик, а также увеличение по показателю GPS общей суммарной суставной кинематической вариативности невовлеченной в патогенез конечности подтверждают исключительно компенсаторный характер её поведения. О компенсаторном поведении свидетельствуют и увеличенные углы сгибания в суставах, и сагиттальный наклон таза, которые постурально устраняют разницу в длине ног. Ротационные установки таза и бедра, по-видимому, также служат для сохранения ориентации стопы.

Заключение. Компенсаторное поведение невовлеченной конечности у детей с гемиплегией при ходьбе проявляется в кинетической и кинематической активности. По сравнению с нормой статистически значимо перераспределяются мощностные локомоторные характеристики: мощностные показатели возрастают в коленном и тазобедренном суставах, но значимо снижаются в голеностопном. По показателю GPS значимо возрастает общая суммарная суставная кинематическая вариативность, а также для компенсации разницы высоты ног увеличиваются углы сгибания в суставах и сагиттальный наклон таза. Процедура раннего хирургического удлинения трицепса голени не оказывала значимого влияния на двигательные характеристики невовлеченной конечности.

Ключевые слова: анализ походки, компенсаторное поведение, дети, спастическая гемиплегия, кинематика, кинетика

Для цитирования: Мамедов У.Ф., Долганова Т.И., Смолькова Л.В., Трофимов А.О., Гатамов О.И., Попков Д.А. Кинематические и кинетические особенности невовлеченной конечности при ходьбе у детей со спастической гемиплегией. *Гений ортопедии*. 2025;31(2):194-201. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-2-194-201.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-2-194-201>

Kinematic and kinetic features of an unaffected limb during walking in children with spastic hemiplegia

U.F. Mamedov✉, T.I. Dolganova, L.V. Smolkova, A.O. Trofimov, O.I. Gatamov, D.A. Popkov

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

Corresponding author: Ulvi F. Mammadov, ulvi.mamedov@gmail.com

Abstract

Introduction The study of the functional characteristics of the unaffected side of the musculoskeletal system in patients with spastic hemiparesis contributes to the development of various aspects of medical rehabilitation.

Objective To determine the features of compensatory and adaptive behavior of the limb not involved in the pathogenesis in children with hemiplegia during walking and their dependence on age and previous surgical interventions on the triceps surae.

Materials and methods Locomotor characteristics of 78 children under 16 years of age with spastic hemiplegia and motor disorders corresponding to levels I–II GMFCS (Gross Motor Function Classification System) were compared with 77 healthy peers. Based on age and the triceps surae lengthening surgery, all children were divided into 6 groups. Kinematic data were recorded using Qualisys 7+ optical cameras and KISTLER dynamometric platforms. The video material was analyzed using QTM and Visual3D programs, and statistical data processing was performed using Microsoft EXCEL-2013 and AtteStat 12.0.5.

Results In the unaffected limb of children with spastic hemiplegia, a flexion position in the limb joints was observed, while the kinematics of its ankle joint did not differ significantly compared to healthy peers. Moreover, movements in the joints of the unaffected limb in children with hemiplegia were performed at greater energy consumption, especially in the knee and hip joints, while the power characteristics in the ankle joints were statistically lower than in healthy peers.

Discussion Significant increase, in comparison with the norm, and redistribution of power locomotor characteristics, as well as an increase in the GPS indicator of the total joint kinematic variability of the limb not involved in the pathogenesis indicate exclusively the compensatory nature of its behavior. Compensatory behavior is also shown by increased flexion angles in the joints and the sagittal tilt of the pelvis, which posturally eliminate the difference in leg length. Rotational positions of the pelvis and the femur, apparently, also serve to maintain the orientation of the foot.

Conclusion Compensatory behavior of the unaffected limb in children with hemiplegia during walking is manifested in kinetic and kinematic activity. Power locomotor characteristics are significantly redistributed compared to the normal values. Power indicators in the knee and hip joints increase, but power characteristics in the ankle significantly decrease. According to the GPS index, the total joint kinematic variability significantly increases, and the joint flexion angles and sagittal pelvic tilt increase to compensate for the difference in leg height. The procedure of early surgical lengthening of the triceps surae did not have a significant effect on the motor characteristics of the uninvolved limb.

Keywords: gait analysis, children, spastic hemiplegia, kinematics, kinetics

For citation: Mamedov UF, Dolganova TI, Smolkova LV, Trofimov AO, Gatamov OI, Popkov DA. Kinematic and kinetic features of an unaffected limb during walking in children with spastic hemiplegia. *Genij Ortopedii*. 2025;31(2):194-201. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-2-194-201.

ВВЕДЕНИЕ

Гемипаретические формы церебрального паралича, как правило, характеризуются сохраненными функциональными двигательными возможностями в сочетании со способностью к самостоятельному передвижению [1, 2, 3]. Частота встречаемости спастической гемиплегии в структуре ДЦП не превышает 15,3 % [4, 5]. При этом преобладают формы с нетяжелыми двигательными нарушениями по классификации Gross Motor Function Classification System [6]: 87,8 % — уровень I GMFCS; 7,1 % — уровень II GMFCS.

Кинематические и кинетические нарушения, ортопедические проблемы спастической гемиплегии на вовлеченной стороне достаточно хорошо описаны и классифицированы [7, 8, 9]. В то же время имеются лишь отдельные публикации, посвященные биомеханическим исследованиям особенности движений невовлеченной нижней конечности при ходьбе [10, 11, 12, 13]. Известные изменения амплитуды движений в сагиттальной плоскости, ротационные особенности движений таза считаются компенсаторными, отражающими степень нарушения функции на контралатеральной, вовлеченной конечности [14, 15, 16, 17]. Тем не менее, в публикациях указывается на возникновение ортопедических нарушений на стопе невовлеченной конечности [18, 19, 20].

Изучение проблем локомоторных нарушений обеих сторон у больных со спастическим гемипарезами должно способствовать разработке различных аспектов медицинской реабилитации [21]. Кроме того, неизвестно, существует ли изменение адаптационных механизмов невовлеченной конечности по мере увеличения возраста пациента, а также неясно влияние ранних изолированных операций коррекции контрактур голеностопных суставов на кинематические и кинетические параметры невовлеченной конечности.

Цель работы — определить особенности компенсаторно-приспособительного поведения при ходьбе невовлеченной в патогенез конечности у детей с гемиплегией в зависимости от возраста и ранее проводившихся хирургических вмешательств на трицепсе голени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для данного исследования отобраны пациенты детского возраста со спастической гемиплегией, которым планировали оперативное лечение в нашем учреждении. Всем пациентам перед операцией проводили исследование в лаборатории анализа движений.

Критерии включения: возраст до 16 лет (открытые зоны роста), уровни I–II GMFCS, спастическая гемиплегия.

Критерии не включения: диагноз спастической диплегии, уровень выше GMFCS II, возраст до 5 лет, 16 лет и старше, ранее выполненные многоуровневые вмешательства.

Группы исследования сформированы по возрастному критерию (интервалы 5–9 лет и 10–15 лет), а также по критерию выполнения в раннем возрасте удлинения трицепса или так называемых чрескожных фибротомий (фибромиотомий).

Во время обследования пациенты ходили самостоятельно или придерживаясь за одну руку родителя босиком на 7-метровой 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 [17].

Для статистической обработки данных применяли программы Microsoft EXCEL-2013 и AtteStat 12.0.5. Количественные характеристики выборочных совокупностей представлены в таблицах в виде медианы с уровнем распределения процентилей 25 % ÷ 75 %. Учитывая количество наблюдений в группах, для обработки результатов использована непараметрическая статистика с принятием уровня значимости $p \leq 0,05$. Статистическую значимость различий показателей между группами сравнения определяли с использованием непарного критерия Вилкоксона.

На проведение исследований получено разрешение локального комитета по этике (протокол от 07.10.2022 № 2(72)). Исследования проводили в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 года, «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 года № 266. Родители обследуемых, уполномоченные родственники или сотрудники социальных учреждений подтверждали согласие на проведение исследования и публикацию результатов без идентификации личности.

Локомоторные характеристики 78 детей до 16 лет со спастической гемиплегией и двигательными нарушениями, соответствующими уровням I–II по GMFCS, сопоставляли с данными 77 здоровых сверстников. В зависимости от возраста и проведения операции удлиннения трицепса голени все дети разделены на 6 групп:

группа 1: 21 человек (21 конечность); возраст — 5–9 лет, средний возраст — $(7,2 \pm 1,5)$ года; удлиннения трицепса голени не проводили;

группа 2: 8 человек (8 конечностей); возраст — 5–9 лет, средний возраст — $(7,7 \pm 2,0)$ года; ранее проводили удлиннение трицепса;

группа 3: 25 человек (25 конечностей); возраст — 10–15 лет, средний возраст — $(13,9 \pm 1,6)$ года; удлиннения трицепса голени не проводили;

группа 4: 24 человека (24 конечности); возраст — 10–15 лет, средний возраст — $(12,4 \pm 1,9)$ года; ранее проводили удлиннение трицепса;

группа 5: 38 человек (76 конечностей); возраст — 5–9 лет, средний возраст — $(6,9 \pm 1,7)$ года; дети без патологии походки;

группа 6: 39 человек (78 конечностей); возраст — 10–15 лет, средний возраст — $(12,7 \pm 1,9)$ года; дети без патологии походки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные пространственно-временных характеристик ходьбы и gait profile score показывают существенные отличия показателей невовлеченной конечности от здоровых сверстников (табл. 1). Кроме того, можем отметить значимое увеличение ширины шага в группе 2 (дети до 10 лет с выполненными удлиннениями трицепса) как от неоперированных сверстников, так и от здоровых.

Таблица 1

Пространственно-временные характеристики ходьбы, GPS

Параметр	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5	Группа 6
GPS, конечности	12 (9,7 ÷ 13,7)	11 (8,7 ÷ 13)	10,2 (8,9 ÷ 11,1)	12,1 (10,2 ÷ 14,2)	8,3* (6,4 ÷ 9,7)	7,8* (6,6 ÷ 9,0)
Скорость ходьбы общая, м/с	0,95 (0,78 ÷ 1,05)	0,9 (0,88 ÷ 0,97)	0,97 (0,9 ÷ 1,05)	0,91 (0,77 ÷ 1,05)	1,07 (0,81 ÷ 1,18)	1,2 (1,12 ÷ 1,31)
Ширина шага, м	0,11 (0,09 ÷ 0,12)	0,15¹ (0,13 ÷ 0,18)	0,13 (0,11 ÷ 0,16)	0,14 (0,11 ÷ 0,16)	0,09 (0,07 ÷ 0,1)	0,1 (0,08 ÷ 0,12)
Длина шага, м	0,45 (0,42 ÷ 0,52)	0,44 (0,4 ÷ 0,48)	0,51 (0,47 ÷ 0,55)	0,49 (0,42 ÷ 0,53)	0,5 (0,45 ÷ 0,53)	0,62* (0,56 ÷ 0,67)
Длительность шага, с	0,47 (0,42 ÷ 0,5)	0,46 (0,43 ÷ 0,51)	0,52 (0,48 ÷ 0,54)	0,51 (0,45 ÷ 0,55)	0,47 (0,44 ÷ 0,49)	0,52 (0,49 ÷ 0,55)
% опорной фазы от длительности шага	63,8 (61 ÷ 65,7)	62 (59 ÷ 64)	64,2 (62,2 ÷ 65,6)	65,2 (63,7 ÷ 66,4)	61,1 (60,7 ÷ 62,2)	61,7 (60,8 ÷ 62,6)
% фазы переноса от длительности шага	36,3 (34,3 ÷ 39,2)	37,9 (36,5 ÷ 40,5)	35,7 (34,4 ÷ 37,8)	35 (34 ÷ 36,9)	38,5 (37,9 ÷ 39,3)	38,3 (37,4 ÷ 39,2)

Примечание: * — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами здоровых детей и группами соответствующего возраста с ДЦП; ¹ — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 1 и 2.

В таблицах 2 и 3 представлены показатели кинематики нижней конечности в сравниваемых группах. В группах детей со спастической гемиплегией можем отметить выраженную сгибательную установку в тазобедренных и коленных суставах с момента первичного контакта до середины опорной фазы цикла шага и высокие значения угла сгибания в тазобедренном суставе в фазу переноса. Однако отличия кинематики голеностопного сустава в сравнении со здоровыми сверстниками не обнаружено. Значимое отличие угла ориентации стопы относительно вектора движения между группами здоровых детей отражает физиологический механизм торсионного развития бедра по мере роста ребенка. Важной находкой является увеличение угла ротационной установки и амплитуды ротации таза со стороны невовлеченной конечности, при том что данные показатели, отличающиеся от здоровой популяции, присутствуют в обеих группах и во всех изучаемых возрастных интервалах.

Показатели моментов сил, возникающих при движениях в суставах, а также генерируемая мощность движений указывают на повышенную энергоёмкость походки со стороны невовлеченной конечности, особенно при движениях в коленном и тазобедренном суставах (табл. 4). Кроме того, генерируемая мощность движений в голеностопных суставах невовлеченной конечности у детей со спастической ге-

миоплегией значительно ниже, чем у сверстников без патологии движений.

Таблица 2

Кинематика голеностопного и коленного суставов

Параметр	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5	Группа 6
Мах тыльная флексия стопы в опорную фазу	11,04 (5,7 ÷ 16,5)	12,2 (11,2 ÷ 15,9)	14,8 (13,0 ÷ 17,0)	18,7 (15,1 ÷ 21,95)	11,9 (9,7 ÷ 14,5)	13,3 (10,5 ÷ 16,0)
Мах подошвенная флексия	-19,8 (-28,6 ÷ -12,0)	-11,6 (-14,3 ÷ -8,9)	-11,2 (-13,5 ÷ -7,6)	-9,5 (-13,8 ÷ -5,1)	-15,1 (-18,7 ÷ -10,9)	-13,4 (-16,9 ÷ -8,8)
Позиция стопы в период переноса	4,8 (0,0 ÷ 10,7)	5,7 (5,5 ÷ 8,7)	8,3 (7,2 ÷ 12,3)	8,7 (5,98 ÷ 10,3)	5,6 (2,7 ÷ 8,1)	7,3 (5,2 ÷ 8,8)
Инверсия стопы, тах значения	16,1 (11,3 ÷ 21,1)	17,7 (14,4 ÷ 22,3)	14,8 (11,2 ÷ 18,7)	17,1 (10 ÷ 23,96)	15,8 (11,8 ÷)	13,3 (8,7 ÷ 15,7)
Амплитуда	15,6 (12,7 ÷ 17,6)	15,7 (12,5 ÷ 17,3)	14,3 (12 ÷ 16,3)	15,1 (12,6 ÷ 17,7)	15,2 (12,4 ÷ 17,5)	13,3 (11,3 ÷ 15,5)
Клиренс шага по пяточному отделу стопы, см	16,8 (15,7 ÷ 17,7)	16,2 (15,4 ÷ 17,8)	18,2 (16,6 ÷ 19,7)	18,6 (16,8 ÷ 19,95)	17,5 (16,4 ÷ 18,5)	20,8 (19,0 ÷ 23,0)
Позиция коленного сустава в момент контакта, °	15,6 (12,0 ÷ 18,4)	15,7 (11,7 ÷ 17,4)	14,5 (11,6 ÷ 17,4)	22,981 (18,0 ÷ 30,8)	7,0* (2,7 ÷ 11,2)	7,1* (4,0 ÷ 9,6)
Мах сгибание коленного сустава в опорную фазу, °	29,3 (21,2 ÷ 34,2)	27,8 (22,1 ÷ 35,3)	27,6 (24,0 ÷ 31,5)	32,5 (26,3 ÷ 39,8)	19,8* (13,7 ÷ 26,7)	18,5* (14,7 ÷ 23,5)
Min угол сгибания в опорную фазу, °	5,9 (1,4 ÷ 10,9)	11,0 (7,4 ÷ 15,1)	9,4 (6,4 ÷ 12,3)	13,8 (10,1 ÷ 18,98)	6,4 (3,4 ÷ 10,3)	5,0² (1,2 ÷ 8,7)
Сгибание коленного сустава в фазу переноса, °	62,4 (54,5 ÷ 68,3)	63,0 (58,5 ÷ 67,3)	63,6 (58,7 ÷ 69,5)	68,3 (58,7 ÷ 71,8)	64,5 (60,7 ÷ 69,1)	60,9 (57,4 ÷ 65,1)

Примечание: * — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами здоровых детей и группами соответствующего возраста с ДЦП; ¹ — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 3 и 4; ² — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 4 и 6.

Таблица 3

Кинематика тазобедренного сустава и таза

Параметр	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5	Группа 6
Положение бедра в момент первичного контакта, °	36,5 (30,1 ÷ 44,1)	33,5 (28,9 ÷ 37,5)	36,7 (30,0 ÷ 41,6)	38,1 (33,9 ÷ 44,2)	27,9¹ (20,6 ÷ 34,3)	24,5* (16,9 ÷ 29,7)
Мах разгибание бедра, °	-10,4 (-13,6 ÷ -6,3)	-7,3 (-10,6 ÷ -6,5)	-7,0 (-10,9 ÷ -2,7)	-6,4 (-13,0 ÷ -1,8)	-14,0 (-21,4 ÷ -8,0)	-14,1* (-20,95 ÷ -10,2)
Мах сгибание бедра в фазу переноса, °	39,1 (31,8 ÷ 45,0)	37,3 (34,9 ÷ 39,6)	38,2 (31,3 ÷ 44,4)	41,4 (35,3 ÷ 46,7)	30,8 (25,6 ÷ 36,8)	26,6* (21,1 ÷ 31,1)
Сагиттальный наклон таза, ° Мах значения / амплитуда	16,5 (12,3 ÷ 20,4) 9,1 (6,5 ÷ 10,6)	14,0 (11,4 ÷ 16,8) 8,1 (6,6 ÷ 8,9)	15,8 (11,4 ÷ 19,9) 8,0 (5,9 ÷ 9,3)	14,4 (11,6 ÷ 19,4) 9,7 (7,6 ÷ 12,6)	7,8* (3,7 ÷ 12,7) 4,8 (4,2 ÷ 5,3)	6,5* (0,9 ÷ 10,2) 4,2 (3,4 ÷ 4,6)
Фронтальный наклон таза, ° Мах значения / амплитуда	2,5 (0,5 ÷ 4,2) 8,97 (7,0 ÷ 10,4)	3,0 (1,9 ÷ 5,0) 7,3 (6,5 ÷ 7,7)	3,7 (1,9 ÷ 6,1) 7,9 (6,0 ÷ 9,1)	4,0 (1,4 ÷ 6,3) 7,8 (6,2 ÷ 9,1)	3,5 (2,5 ÷ 4,6) 7,1 (5,8 ÷ 8,2)	3,3 (2,0 ÷ 4,5) 6,9 (5,2 ÷ 8,2)
Ротация таза, ° Мах значение / амплитуда	21,6 (14,9 ÷ 26,3) 21,8 (16,9 ÷ 29,0)	20,95 (15,0 ÷ 26,8) 19,9 (18,2 ÷ 22,2)	17,8 (13,8 ÷ 21,4) 17,96 (14,3 ÷ 20,8)	18,0 (12,5 ÷ 25,7) 20,6 (16,4 ÷ 26,1)	8,4* (5,5 ÷ 10,95) 15,51 (12,1 ÷ 18,8)	7,2* (5,2 ÷ 9,3) 13,42 (10,1 ÷ 15,1)
Приведение бедра, ° Мах значение / амплитуда	9,3 (4,7 ÷ 13,7) 17,8 (15,5 ÷ 18,8)	7,2 (5,4 ÷ 10,2) 15,2 (13,3 ÷ 16,95)	8,8 (5,3 ÷ 11,4) 14,5 (11,7 ÷ 16,5)	7,9 (6,6 ÷ 9,8) 15,5 (13,1 ÷ 17,95)	9,0 (6,6 ÷ 11,2) 13,3 (11,7 ÷ 14,9)	7,5 (5,7 ÷ 9,8) 11,5 (9,6 ÷ 13,4)
Ротация бедра, ° Мах значение / амплитуда	11,2 (9,1 ÷ 15,4) 21,1 (17,0 ÷ 23,7)	4,8 (0,1 ÷ 11,5) 19,8 (16,5 ÷ 20,95)	6,2 (-1,7 ÷ 11,7) 21,8 (14,2 ÷ 28,6)	11,8 (5,5 ÷ 22,3) 23,7 (19,5 ÷ 27,3)	9,6 (3,5 ÷ 15,2) 17,3 (14,7 ÷ 19,6)	11,3 (7,5 ÷ 15,8) 16,8 (13,7 ÷ 20,2)
Ориентация стопы, ° Мах / Min значения	15,6 (7,4 ÷ 21,1) -5,1 (-10,2 ÷ -0,8)	14,2 (7,1 ÷ 21,7) -4,8 (-11,5 ÷ 0,55)	5,2 (-0,7 ÷ 14,6) -12,5 (-17,2 ÷ -4,0)	10,3 (3,9 ÷ 15,4) -8,3 (-14,7 ÷ -2,1)	23,5 (21,0 ÷ 26,8) -11,3 (-14,95 ÷ -6,5)	3,7³ (-0,3 ÷ 7,8) -11,6 (-16,2 ÷ -6,5)

Примечание: * — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами здоровых детей и группами соответствующего возраста с ДЦП; ¹ — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 1 и 5; ³ — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 1 и 6.

отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 5 и 6.

Таблица 4

Момент сил, полезная мощность

Параметр	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5	Группа 6
Разгибание т/б сустава, Н×м	0,94 (0,73 ÷ 1,18)	0,78 (0,57 ÷ 0,93)	0,87 (0,7 ÷ 0,98)	0,88 (0,64 ÷ 1,17)	0,73¹ (0,55 ÷ 0,99)	0,77 (0,58 ÷ 0,92)
Приведение бедра, Н×м	0,61 (0,6 ÷ 0,72)	0,56 (0,47 ÷ 0,68)	0,76 (0,7 ÷ 0,88)	0,7 (0,59 ÷ 0,87)	0,67 (0,59 ÷ 0,71)	0,85 (0,76 ÷ 0,92)
Разгибание коленного сустава, Н×м	0,66 (0,47 ÷ 0,79)	0,7 (0,42 ÷ 0,96)	0,66 (0,41 ÷ 0,84)	0,87 (0,61 ÷ 1,17)	0,51 (0,31 ÷ 0,68)	0,65² (0,43 ÷ 0,87)
Подошвенная флексия, Н×м	1,02 (0,87 ÷ 1,22)	1,1 (0,95 ÷ 1,28)	1,2 (1,09 ÷ 1,36)	1,25 (1,05 ÷ 1,45)	1,08 (0,91 ÷ 1,22)	1,45 (1,32 ÷ 1,55)
Мощность т/б сустава, Вт/кг	0,44 (0,24 ÷ 0,71)	0,27 (0,06 ÷ 0,38)	0,45 (0,19 ÷ 0,62)	0,36 (0,19 ÷ 0,47)	0,27¹ (0,04 ÷ 0,42)	0,21 (0,03 ÷ 0,34)
Мощность коленного сустава, Вт/кг	-0,49 (-0,81 ÷ -0,12)	-0,86 (-1,27 ÷ -0,3)	-0,71 (-1,07 ÷ -0,39)	-0,87 (-1,13 ÷ -0,48)	-0,54³ (-0,8 ÷ -0,26)	-0,69 (-0,90 ÷ -0,45)
Мощность г/с сустава, Вт/кг	0,95 (0,56 ÷ 1,62)	1,1 (0,67 ÷ 1,99)	1,49 (1,09 ÷ 1,97)	1,84 (1,10 ÷ 2,43)	1,8* (1,24 ÷ 2,26)	2,3 (1,60 ÷ 2,81)
Суммарная полезная мощность, Вт/кг	0,86 (0,17 ÷ 1,35)	0,60 (0,13 ÷ 1,74)	1,23 (0,57 ÷ 1,89)	1,34 (0,83 ÷ 2,195)	1,53 (0,82 ÷ 2,01)	1,83 (1,23 ÷ 2,39)

Примечание: * — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами здоровых детей и группами соответствующего возраста с ДЦП; ¹ — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 1 и 5; ² — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 4 и 6; ³ — достоверные отличия по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) между группами 2 и 5.

ОБСУЖДЕНИЕ

Патология движений конечностей на стороне поражения при спастической гемиплегии изучена и классифицирована достаточно хорошо [7, 8, 22, 23].

Результаты исследований движений и ортопедического состояния невовлеченной конечности при спастической гемиплегии у детей представлены лишь в отдельных работах [10, 11, 12, 13, 24]. В то же время существует риск развития ортопедической патологии на неврологически непораженной стороне [18, 19, 20], а коррекция неравенства длины требует вмешательства в виде применения методики управляемого роста на здоровой конечности [25, 26, 27, 28].

Известны и хорошо описаны увеличения углов сгибания в коленном и тазобедренном суставах в опорную фазу цикла шага и в фазу переноса. Авторы считают объяснением такой особенности кинематики развитие адаптационного механизма для компенсации неравенства длины конечностей [10, 24, 29]. Наши исследования также выявили такую особенность артикуляции в суставах при том, что отличия движений в голеностопном суставе в сравнении со сверстниками без патологии движений отсутствуют. Мы также считаем большие углы сгибания в коленном и тазобедренном суставах, избыточный сагитальный наклон таза механизмом компенсации неравенства длины ног, тем более что он не исчезает и после устранения в раннем возрасте контрактуры голеностопного сустава (группа 2 нашего исследования). При этом движения в тазобедренном и коленном суставах сопровождались повышенными значениями возникающих моментов сил и генерируемой мощности, что отражает высокие энергозатраты такого механизма адаптации. Что касается кинетики движений голеностопного сустава, то в отличие от данных V. Cimolin et al. [24] об отсутствии различий со здоровыми детьми, мы отметили снижение силовых характеристик артикуляции в голеностопном суставе в сравнении со здоровой популяцией. Данное отличие в исследованиях может быть объяснено малой выборкой в работе V. Cimolin et al., что затрудняет интерпретацию результатов. Объяснение же обнаруженного нами феномена мы видим в общем снижении двигательной активности таких детей вследствие неврологической патологии в отличие от здоровой популяции [30].

Ротационные установки таза и бедра, повышенная амплитуда движений как со стороны вовлеченной, так и непораженной конечностей объясняются компенсаторными механизмами для сохранения ориентации стопы, близкой вектору движения [11, 14, 15]. Наши исследования подтверждают данное положение, тем более что высокие значения разворота таза и бедра сопровождаются девиацией оси стопы в пределах физиологической нормы.

Наконец, отметим, что наше исследование не выявило изменений в двигательном статусе невовлеченной конечности между группами без раннего оперативного вмешательства и при удлинении в раннем возрасте трицепса голени. Прогрессирование торсионных деформаций происходило в равной степени в обеих группах, а компенсаторная сгибательная установка в коленном и тазобедренном суставах при-

существовала во всех четырех изучаемых группах детей со спастической гемиплегией во всех возрастных категориях.

Мы полагаем, что изменения кинематики и кинетики невовлеченной конечности, являясь компенсаторными, отражают степень выраженности патологии движений со стороны поражения, и их динамика может служить показателем успешности лечения и/или прогрессирования двигательных нарушений.

Результаты и выводы, представленные в данном исследовании, следует принимать во внимание с учетом кросс-секционного характера исследования групп, несвязанных между собой и без динамического наблюдения. Изучение результатов лечения после многоуровневых вмешательств в сочетании с уравниванием длины конечностей может подтвердить гипотезу о снижении степени выраженности компенсаторных показателей кинематики невовлеченной конечности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компенсаторное поведение невовлеченной конечности при ходьбе детей с гемиплегией проявляется в кинетической и кинематической активности. По сравнению с нормой статистически значимо перераспределяются мощностные локомоторные характеристики. Возрастают мощностные показатели в коленном и тазобедренном суставах, но значимо снижаются в голеностопном. По показателю GPS значимо возрастает общая суммарная суставная кинематическая вариативность, а также для компенсации разницы высоты ног увеличиваются углы сгибания в суставах и сагиттальный наклон таза. Процедура раннего хирургического удлинения трицепса голени не оказывала значимого влияния на двигательные характеристики невовлеченной конечности.

Конфликт интересов. Отсутствует.

Источник финансирования. Отсутствует.

Этическая экспертиза. На проведение исследований получено разрешение локального комитета по этике (протокол от 07.10.2022 № 2(72)).

Информированное согласие. Родители обследуемых, уполномоченные родственники или сотрудники социальных учреждений подтвердили согласие на проведение исследования и публикацию результатов без идентификации личности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Liptak GS, Murphy NA; Council on Children With Disabilities. Providing a primary care medical home for children and youth with cerebral palsy. *Pediatrics*. 2011;128(5):e1321-1329. doi: 10.1542/peds.2011-1468.
- Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, Merrick J. Cerebral palsy in children: a clinical overview. *Transl Pediatr*. 2020;9(Suppl 1):S125-S135. doi: 10.21037/tp.2020.01.01.
- Michael-Asalu A, Taylor G, Campbell H, Lelea LL, Kirby RS. Cerebral Palsy: Diagnosis, Epidemiology, Genetics, and Clinical Update. *Adv Pediatr*. 2019;66:189-208. doi: 10.1016/j.yapd.2019.04.002.
- Mushta SM, King C, Goldsmith S, et al. Epidemiology of Cerebral Palsy among Children and Adolescents in Arabic-Speaking Countries: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Brain Sci*. 2022 29;12(7):859. doi: 10.3390/brainsci12070859.
- Gorter JW, Rosenbaum PL, Hanna SE, et al. Limb distribution, motor impairment, and functional classification of cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2004;46(7):461-467. doi: 10.1017/s0012162204000763.
- Palisano RJ, Hanna SE, Rosenbaum PL, et al. Validation of a model of gross motor function for children with cerebral palsy. *Phys Ther*. 2000;80(10):974-985. doi: 10.1093/ptj/80.10.974.
- Winters TF Jr, Gage JR, Hicks R. Gait patterns in spastic hemiplegia in children and young adults. *J Bone Joint Surg Am*. 1987;69(3):437-441.
- Rodda J, Graham HK. Classification of gait patterns in spastic hemiplegia and spastic diplegia: a basis for a management algorithm. *Eur J Neurol*. 2001;8 Suppl 5:98-108. doi: 10.1046/j.1468-1331.2001.00042.x.
- Wagenaar RC, Beek WJ. Hemiplegic gait: a kinematic analysis using walking speed as a basis. *J Biomech*. 1992;25(9):1007-1015. doi: 10.1016/0021-9290(92)90036-z.
- Eek MN, Zügner R, Stefansdottir I, Tranberg R. Kinematic gait pattern in children with cerebral palsy and leg length discrepancy: Effects of an extra sole. *Gait Posture*. 2017;55:150-156. doi: 10.1016/j.gaitpost.2017.04.022.
- Salazar-Torres JJ, McDowell BC, Kerr C, Cosgrove AP. Pelvic kinematics and their relationship to gait type in hemiplegic cerebral palsy. *Gait Posture*. 2011;33(4):620-624. doi: 10.1016/j.gaitpost.2011.02.004.
- Витензон А.С., Петрушанская К.А., Гриценко Г.П. и др. Биомеханическое и нейрофизиологическое обоснование применения фазовой электрической стимуляции мышц у детей с гемипаретической формой детского церебрального паралича. *Российский журнал биомеханики*. 2016;20(2):150-167. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2016.2.05.
- Park KB, Park H, Park BK, et al. Clinical and Gait Parameters Related to Pelvic Retraction in Patients with Spastic Hemiplegia. *J Clin Med*. 2019;8(5):679. doi: 10.3390/jcm8050679.
- Wren TA, Lening C, Rethlefsen SA, Kay RM. Impact of gait analysis on correction of excessive hip internal rotation in ambulatory children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *Dev Med Child Neurol*. 2013;55(10):919-925. doi: 10.1111/dmcn.12184.
- Hara R, Rethlefsen SA, Wren TAL, Kay RM. Predictors of Changes in Pelvic Rotation after Surgery with or without Femoral Derotational Osteotomy in Ambulatory Children with Cerebral Palsy. *Bioengineering (Basel)*. 2023;10(10):1214. doi: 10.3390/bioengineering10101214.
- Min JJ, Kwon SS, Kim KT, et al. Evaluation of factors affecting external tibial torsion in patients with cerebral palsy. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):684. doi: 10.1186/s12891-021-04570-5.
- Riad J, Finnbogason T, Broström E. Anatomical and dynamic rotational alignment in spastic unilateral cerebral palsy. *Gait Posture*. 2020;81:153-158. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.07.010.
- Joo S, Miller F. Abnormalities in the uninvolved foot in children with spastic hemiplegia. *J Pediatr Orthop*. 2012;32(6):605-608. doi: 10.1097/BPO.0b013e318263a245.

19. Yoon JA, Jung DH, Lee JS, et al. Factors associated with unaffected foot deformity in unilateral cerebral palsy. *J Pediatr Orthop B*. 2020;29(1):29-34. doi: 10.1097/BPB.0000000000000665.
20. Allen PE, Jenkinson A, Stephens MM, O'Brien T. Abnormalities in the uninvolved lower limb in children with spastic hemiplegia: the effect of actual and functional leg-length discrepancy. *J Pediatr Orthop*. 2000;20(1):88-92.
21. Reid LB, Rose SE, Boyd RN. Rehabilitation and neuroplasticity in children with unilateral cerebral palsy. *Nat Rev Neurol*. 2015;11(7):390-400. doi: 10.1038/nrneurol.2015.97.
22. Riad J, Haglund-Akerlind Y, Miller F. Classification of spastic hemiplegic cerebral palsy in children. *J Pediatr Orthop*. 2007;27(7):758-764. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181558a15.
23. Pinzur M. S. Gait patterns in spastic hemiplegia in children and young adults *J Bone Joint Surg Am*. 1987;69(8):1304.
24. Cimolin V, Galli M, Tenore N, et al. Gait strategy of uninvolved limb in children with spastic hemiplegia. *Eura Medicophys*. 2007;43(3):303-10.
25. Corradin M, Schiavon R, Borgo A, et al. The effects of uninvolved side epiphysiodesis for limb length equalization in children with unilateral cerebral palsy: clinical evaluation with the Edinburgh visual gait score. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2018;28(5):977-984. doi: 10.1007/s00590-017-2097-3.
26. 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.
27. Demirel M, Sağlam Y, Yıldırım AM, et al. Temporary Epiphysiodesis Using the Eight-Plate in the Management of Children with Leg Length Discrepancy: A Retrospective Case Series. *Indian J Orthop*. 2022;56(5):874-882. doi: 10.1007/s43465-021-00599-9.
28. Tirta M, Hjorth MH, Jepsen JF, et al. Are percutaneous epiphysiodesis and Phemister technique effective in the treatment of leg-length discrepancy? A systematic review. *J Pediatr Orthop B*. 2024. doi: 10.1097/BPB.0000000000001160.
29. Liu XC, Fabry G, Molenaers G, et al. Kinematic and kinetic asymmetry in patients with leg-length discrepancy. *J Pediatr Orthop*. 1998;18(2):187-189.
30. 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.

Статья поступила 02.02.2024; одобрена после рецензирования 02.08.2024; принята к публикации 05.02.2025.

The article was submitted 02.02.2024; approved after reviewing 02.08.2024; accepted for publication 05.02.2025.

Информация об авторах:

Улви Фаиг оглы Мамедов — аспирант, ulvi.mamedof@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0266-6515>;

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

Лидия Владимировна Смолькова — аспирант, slv@odb45.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>;

Анатолий Олегович Трофимов — аспирант, a4texa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3455-4530>;

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

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

Information about the authors:

Ulvi F. Mamedov — post-graduate student, ulvi.mamedof@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0266-6515>;

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

Lidiia V. Smolkova — post-graduate student, slv@odb45.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>;

Anatoly O. Trofimov — post-graduate student, a4texa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3455-4530>;

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

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 the Clinic, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Вклад авторов:

Мамедов У.Ф. — обобщение данных, написание первоначального варианта.

Долганова Т.И. — анализ видеоматериала, статистическая обработка и редактирование.

Смолькова Л.В. — формирование группы контроля.

Трофимов А.О. — формирование группы контроля.

Гатамов О.И. — контроль и формирование клинического материала.

Попков Д.А. — методология, концептуализация, управление проектом.