

УДК 616.831-009.12-053.2-06:612.76+615.477.1

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS41766>

Влияние ортопедической обуви на показатели межзонального распределения нагрузки на стопу при ходьбе больных детским церебральным параличом

© Л.М. Смирнова^{1, 2}, А.А. Кольцов¹, Э.И. Джомардлы¹¹ Федеральный научный центр реабилитации инвалидов им. Г.А. Альбрехта, Санкт-Петербург, Россия;² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Обоснование. Как показывают клинические наблюдения больных спастическими формами детского церебрального паралича и опрос, наиболее часто используемым техническим средством реабилитации у таких пациентов является ортопедическая обувь. Вместе с тем практически отсутствуют клинические и инструментальные исследования ее влияния на биомеханику ходьбы.

Цель — определить влияние ортопедической обуви на межзональное распределение нагрузки по плантарной поверхности стопы при ходьбе детей с церебральным параличом с разными уровнями нарушения глобальных моторных функций (GMFCS).

Материалы и методы. Проведены биомеханические исследования 42 пациентов (возраст — от 5 до 16 лет) с детским церебральным параличом с уровнями GMFCS 1–3 при ходьбе в двух типах обуви — стандартной (то есть не влияющей на функциональность стопы) и ортопедической; также обследованы 14 человек контрольной группы в стандартной обуви (общее количество стоп — 112). Статистический анализ данных проведен с применением непараметрических методов в программе SPSS for Widows.

Результаты. Использование сложной ортопедической обуви у пациентов с уровнем GMFCS 1 привело к усугублению отклонения от нормы основных показателей взаимодействия стоп с опорой в виде уменьшения парциальной нагрузки на пятку, увеличения носочно-пяточного соотношения нагрузки, медиолатерального распределения нагрузки в области пучков. У пациентов с уровнем GMFCS 2 нормализующее влияние ортопедической обуви выявлено только по показателю медиолатерального распределения нагрузки в области пучков. У пациентов с уровнем GMFCS 3 нормализующее влияние ортопедической обуви обнаружено по большему количеству показателей распределения нагрузки на стопу.

Заключение. Исследование показало, что у детей и подростков с церебральным параличом использование сложной ортопедической обуви привело к наиболее значимой нормализации показателей межзонального распределения нагрузки под стопой у пациентов группы GMFCS 3, менее значимой — у пациентов группы GMFCS 2, к усугублению патологического отклонения показателей — у пациентов группы GMFCS 1.

Ключевые слова: медицинская реабилитация; детский церебральный паралич; GMFCS; ортопедическая обувь; биомеханика; ходьба.

Как цитировать:

Смирнова Л.М., Кольцов А.А., Джомардлы Э.И. Влияние ортопедической обуви на показатели межзонального распределения нагрузки на стопу при ходьбе больных детским церебральным параличом // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2021. Т. 9. № 1. С. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS41766>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS41766>

Influence of orthopedic shoes on the indicators of the interzonal load distribution on the foot when walking patients with cerebral palsy

© Lyudmila M. Smirnova^{1, 2}, Andrey A. Koltsov¹, Elnur I. Dzhomardly¹¹ Federal Scientific Center for Rehabilitation of Disabled People named after G.A. Albrecht, Saint Petersburg, Russia;² Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), Saint Petersburg, Russia

BACKGROUND: Clinical observations of patients with spastic forms of cerebral palsy and surveys showed the most commonly used technical rehabilitative device of this patient contingent are orthopedic shoes. However, almost no clinical and instrumental studies examine the effect of such shoes on the walking characteristics of patients with cerebral palsy (CP).

AIM: This study aims to estimate the effect of orthopedic shoes on the interzonal load distribution on the plantar foot surface in children with CP and adolescents with different levels of gross motor function disorders (GMFCS).

MATERIALS AND METHODS: Biomechanical studies were conducted in 42 patients with CP 5–16 years old with GMFCS 1–3 level while wearing standard and orthopedic shoes. In 14 healthy children controls while wearing standard shoes (a total of 112 feet). Biomechanical examinations were performed on the software and hardware complex "DiaSled-M-Scan" with matrix plantar pressure meters in the form of insoles. Statistical data analysis was performed using nonparametric methods via SPSS software for Windows.

RESULTS: The use of complex orthopedic shoes in patients with level GMFCS 1 did not improve but worsened their foot loading parameters. The shoes reduced the loading of the heel, increased the toe-heel load ratio, and mediolateral load distribution in the fascicle area. In patients with GMFCS 2, the positive effect of orthopedic shoes was limited to improving the mediolateral load distribution in the fascicle area. In patients with GMFCS 3, the positive effect of orthopedic shoes was noted in the majority of the tested parameters.

CONCLUSION: Thus, the study showed that in children and adolescents with CP using complex orthopedic shoes led to the most significant normalization of interzonal load distribution under the foot in GMFCS 3 patients, less significant — in GMFCS 2 patients, and worsened the parameters in GMFCS 1 patients.

Keywords: rehabilitation; cerebral palsy; GMFCS; orthopedic shoes; biomechanics; walking.

To cite this article:

Smirnova LM, Koltsov AA, Dzhomardly EI. Influence of orthopedic shoes on the indicators of the interzonal load distribution on the foot when walking patients with cerebral palsy. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2021;9(1):51–61. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS41766>

ОБОСНОВАНИЕ

Детский церебральный паралич (ДЦП), частота встречаемости которого составляет 1,5–3,0 случая на 1000 живорожденных, является наиболее частой причиной нарушения глобальных моторных функций в педиатрической популяции [1–3]. Нарушение моторных функций, патологическое изменение стереотипа двигательных локомоций пациентов с ДЦП приводят к ограничению возможностей их самообслуживания, в том числе самостоятельного передвижения, и в итоге к снижению качества жизни [4, 5].

Одно из ведущих клинических проявлений этого заболевания — нарушение статодинамической функции, в частности взаимодействия стопы с опорой [6, 7]. Коррекция этого патологического состояния основана на мультидисциплинарном подходе [8, 9], в рамках которого, наряду с хирургическими, применяют и консервативные реабилитационные методы, в том числе ортезирование и другие технические средства реабилитации [10–12]. В нашей клинической практике в качестве такого средства часто используют сложную или типовую ортопедическую обувь, которой снабжено значительное количество детей со спастическими формами церебрального паралича [13]. Об этом же свидетельствуют и результаты анкетирования родителей этих больных. Однако, на наш взгляд, данная проблема недостаточно исследована и освещена в научных источниках.

В большинстве публикаций описаны различные ортезы на голеностопные суставы (конструкции AFO, GRAFO, leaf-spring AFO и др.) как наиболее часто применяемые в комплексной реабилитации пациентов с ДЦП [14–16], стельки, но не ортопедическая обувь. Лишь в одной из этих публикаций авторы сообщают о роли ортопедической обуви в коррекции косолапости у детей со спастическими формами церебрального паралича, но при этом основной акцент они делают на демонстрации технических особенностей изготовления ортопедической обуви [17].

В большинстве источников рассмотрены конструктивные особенности обуви, но не аспекты ее влияния на характеристики ходьбы [18, 19].

Таким образом, очевидно несоответствие высокой частоты назначения ортопедической обуви пациентам с ДЦП, по крайней мере в России, и низкой освещенности этого аспекта в российских и зарубежных источниках. Одним из основных медико-технических требований, предъявляемых к такой обуви, является нормализация межзонального распределения нагрузки на плантарную поверхность стопы и обеспечение рационального участия различных ее отделов в перекате. В связи с этим представляют научный и практический интерес биомеханические исследования для анализа влияния ортопедической

обуви на распределение нагрузки по зонам плантарной поверхности стопы у детей и подростков с церебральным параличом при ходьбе.

Цель — определить влияние ортопедической обуви на межзональное распределение нагрузки по плантарной поверхности стопы при ходьбе больных ДЦП с разными уровнями глобальных моторных функций (GMFCS).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведено одномоментное обсервационное экспериментально-аналитически контролируемое количественное исследование «случай – контроль».

Для исследования сформированы следующие группы.

Группа пациентов («П») состояла из 42 человек в возрасте от 5 до 16 лет с подтвержденным диагнозом «ДЦП, спастическая диплегия» либо «ДЦП, спастический тетрапарез» с эквино-плано-вальгусной либо плано-вальгусной деформацией стоп, проходивших лечение в ФГБУ «ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта» Минтруда России. Критерии исключения из группы: невозможность ходьбы самостоятельно или даже с дополнительной поддержкой (с использованием костылей, тростей, ходунков, при поддержке со стороны других лиц); когнитивные нарушения, не позволяющие добиться контакта с пациентом для проведения биомеханического обследования; ботулинотерапия в анамнезе менее чем за 6 мес. до обследования; хирургическое лечение в анамнезе менее чем за год до обследования.

Группа «П» по уровню нарушения глобальных моторных функций по классификации Gross Motor Functions Classification System (GMFCS) была разделена на три подгруппы [20]. Подгруппа П1 состояла из 7 человек с уровнем нарушений GMFCS 1, подгруппа П2 — из 16 человек с уровнем GMFCS 2, подгруппа П3 — из 19 человек с уровнем GMFCS 3.

Контрольная группа включала 14 человек в возрасте от 5 до 16 лет без клинических признаков анатомо-функциональных нарушений опорно-двигательной системы. Она была сформирована из обследованных детей во время профилактических осмотров в общеобразовательных учреждениях. Критерии исключения из группы: когнитивные нарушения, не позволяющие добиться контакта с пациентом для проведения биомеханического обследования.

Все биомеханические обследования проводили на рабочем месте, включающем программно-аппаратный комплекс (ПАК) «ДиаСлед-М-Скан» (совместное производство российских компаний ООО «ДиаСервис» и ООО «ВИТ») [21]. Применяли метод бароплантографии (анализ распределения нагрузки по плантарной поверхности стопы) в системе стопа — ложемент обуви. Матричные сенсоры в форме стелек вкладывали в обувь пациента. Данные регистрировали при ходьбе по ровной

поверхности в привычном для обследуемого темпе по прямой траектории.

Обследования проводили в два этапа — в стандартной обуви (индекс «с») и сложной ортопедической обуви (индекс «о») в один и тот же день для каждого пациента. Требования к конструкции стандартной обуви: гибкая подошва, мягкий верх, отсутствие выкладки свода, каблук — 1 см, достаточное внутриобувное пространство.

Сложная ортопедическая обувь была приобретена родственниками или опекунами пациентов до поступления их в стационар и соответствовала следующим требованиям: изготовлена индивидуально по меркам или слепкам; содержала в качестве обязательных элементов двусторонний либо круговой жесткий берц; использовалась пациентом не менее одного и не более 6 мес.; не имела дефицита внутриобувного пространства

и не приводила к формированию болей, натоптышей и потертостей; не имела значимых признаков деформации.

В результате биомеханического исследования сформирована база данных, включающая 196 наблюдений: один тип обуви (стандартной) для каждой стопы у 14 человек контрольной группы и два типа обуви (стандартная и ортопедическая) для каждой стопы 42 больных ДЦП с 1–3-м уровнями нарушения глобальных моторных функций по системе GMFCS.

Статистический анализ данных выполнен с помощью программы SPSS for Widows. Применяли: описательную статистику, тест Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро – Уилка с критическим уровнем значимости $p = 0,05$, непараметрические критерии Манна – Уитни и парный критерий Вилкоксона.

Дизайн исследования представлен на рис. 1.

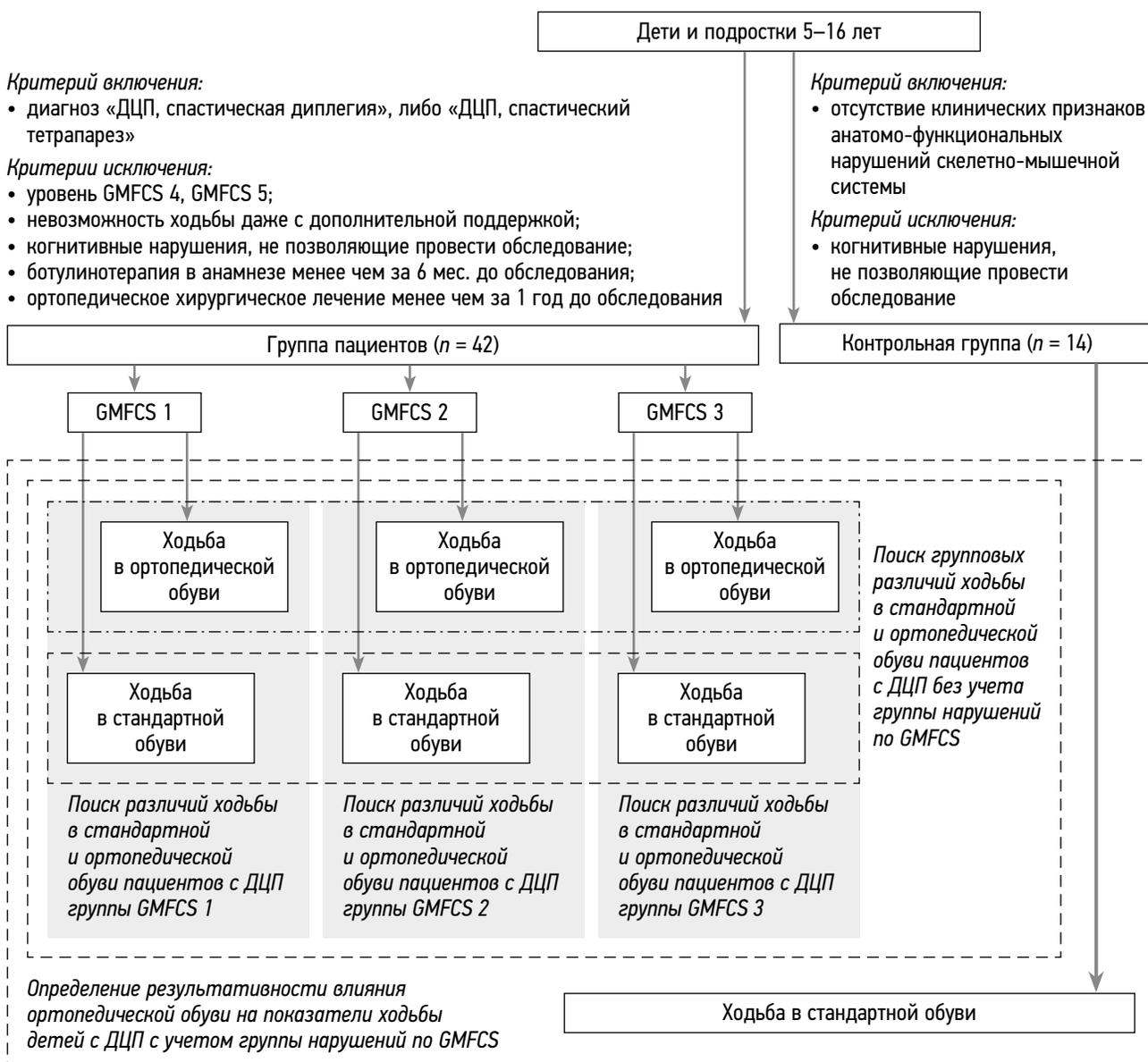


Рис. 1. Дизайн выполненного исследования. ДЦП — детский церебральный паралич

РЕЗУЛЬТАТЫ

При анализе распределения давления под стопой использовали такое же деление площади плантарной поверхности стопы, каким оно принято в программном обеспечении ПАК «ДиаСлед-М-Скан» (рис. 2).

Исследуемые бароплантографические переменные — показатели межзонального распределения нагрузки под стопой:

- 1) $f_{\text{пят}}$ — парциальная нагрузка на область пятки;
- 2) $f_{\text{св}}$ — парциальная нагрузка на область свода;
- 3) $f_{\text{пуч}}$ — парциальная нагрузка на область пучков;
- 4) $f_{\text{нос}}$ — парциальная нагрузка на область носка;
- 5) Кнос/пят — носочно-пяточное соотношение нагрузки;
- 6) Кп/з — соотношение нагрузок на передний отдел стопы (пучки вместе с носком) и задний (пятка вместе с подсводным пространством);
- 7) $\text{Км/л}_{\text{пят}}$ — медиолатеральное соотношение нагрузки в области пятки;
- 8) $\text{Км/л}_{\text{св}}$ — медиолатеральное соотношение нагрузки в области свода;
- 9) $\text{Км/л}_{\text{пуч}}$ — медиолатеральное соотношение нагрузки в области пучков;
- 10) $\text{Км/л}_{\text{нос}}$ — медиолатеральное соотношение нагрузки в области носка;
- 11) Км/л — медиолатеральное соотношение нагрузки на стопу.

Нагрузку на определенную область сенсора (зону стопы) рассчитывали как сумму давления на все относящиеся к ней датчики сенсора (или части датчиков в случае принадлежности их сразу к нескольким зонам). Парциальную нагрузку на область стопы определяли как долю от нагрузки на всю стопу. Носочно-пяточное соотношение нагрузки Кнос/пят рассчитывали делением нагрузки области носка к нагрузке области пятки. Медиолатеральное соотношение нагрузки в области стопы вычисляли как отношение нагрузки на медиальную зону этой области к нагрузке на латеральную зону.

Для определения типа распределения признаков переменных в совокупностях наблюдений, полученных при исследовании ходьбы пациентов, был применен тест Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро – Уилка, а также проанализированы формы гистограмм и квантильных диаграмм. Для большинства из одиннадцати исследуемых переменных распределение не соответствовало нормальному. Это касается совокупностей наблюдений, полученных при ходьбе как в стандартной, так и в ортопедической обуви. В этой связи для последующего анализа данных применяли непараметрические статистические методы.

Для поиска групповых различий между ходьбой пациентов в стандартной и ортопедической обуви использовали непараметрический парный критерий

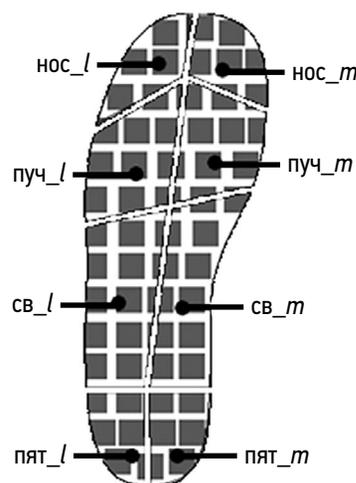


Рис. 2. Области матричного измерительного сенсора: нос — носочная, пуч — пучковая, св — подсводная, пят — пяточная; *m* — медиальная, *l* — латеральная зоны

Вилкоксона. Были выявлены следующие уровни статистической значимости p различий переменных: $f_{\text{пят}}$ — 0,306; $f_{\text{св}}$ — 0,092; $f_{\text{пуч}}$ — 0,789; $f_{\text{нос}}$ — 0,934; Кнос/пят — 0,871; Кп/з — 0,507; $\text{Км/л}_{\text{пят}}$ — 0,020; $\text{Км/л}_{\text{св}}$ — 0,000; $\text{Км/л}_{\text{пуч}}$ — 0,000; $\text{Км/л}_{\text{нос}}$ — 0,124; Км/л — 0,681. Как видно из этого перечня, статистически значимые различия межзонального распределения нагрузки на стопы при ходьбе пациентов с ДЦП в стандартной и ортопедической обуви существовали лишь по трем из одиннадцати переменных. Все они относились к распределению нагрузки относительно продольной оси стопы: медиолатеральное соотношение нагрузки в области пятки $\text{Км/л}_{\text{пят}}$, в области свода $\text{Км/л}_{\text{св}}$, в области пучков $\text{Км/л}_{\text{пуч}}$.

Несмотря на различия между группами исследований по трем переменным, эти результаты не были приняты как достаточные, так как анализ медиан и процентилей этих переменных показал существенный разброс значений в наблюдениях (табл. 1). Например, при ходьбе в ортопедической обуви (По) для переменной $\text{Км/л}_{\text{св}}$ значение медианы (0,90) почти на треть отличалось от ее значения на уровне первого квартиля Q_1 (0,57) и почти в 2 раза от значения на уровне Q_2 (1,30).

Таблица 1. Статистические характеристики переменных, по которым выявлено значимое различие ходьбы в ортопедической обуви по сравнению со стандартной для обобщенной группы больных детским церебральным параличом

Переменная	Группа	Q_1	Me	Q_2
$\text{Км/л}_{\text{пят}}$	Пс	0,64	0,85	1,10
	По	0,67	0,92	1,20
$\text{Км/л}_{\text{св}}$	Пс	0,52	0,72	1,11
	По	0,57	0,90	1,30
$\text{Км/л}_{\text{пуч}}$	Пс	0,84	1,14	1,38
	По	0,76	0,95	1,31

Примечание. По — ходьба в ортопедической обуви; Пс — ходьба в стандартной обуви.

Таблица 2. Уровень статистической значимости различий ходьбы в ортопедической обуви по сравнению со стандартной больными детским церебральным параличом с разной степенью нарушения глобальных моторных функций (парный критерий Вилкоксона)

Группа сравнения	Уровень статистической значимости различий групп по исследуемым переменным										
	f_пят	f_св	f_пуч	f_нос	Кнос/пят	Кп/з	Км/л_пят	Км/л_св	Км/л_пуч	Км/л_нос	Км/л
П1с и П1о	0,011	0,056	0,925	0,300	0,019	0,730	0,279	0,124	0,025	0,198	0,637
П2с и П2о	0,047	0,125	0,722	0,130	0,147	0,695	0,079	0,015	0,001	0,286	0,537
П3с и П3о	0,046	0,718	0,187	0,053	0,006	0,071	0,242	0,006	0,002	0,535	0,777

Примечание. Жирным шрифтом выделены переменные, по которым отмечены статистически значимые различия. П1 — подгруппа GMFCS 1; П2 — GMFCS 2; П3 — GMFCS 3; о — ортопедическая обувь; с — стандартная обувь.

Таблица 3. Медианные значения переменных, по которым выявлены статистически значимые различия ходьбы больных детским церебральным параличом в ортопедической обуви по сравнению со стандартной, для разных уровней нарушения глобальных моторных функций

Группы обследованных	Me (медиана) переменных			
	f_пят	Кнос/пят	Км/л_св	Км/л_пуч
К — контрольная группа в стандартной обуви	28,0	0,55	Значимых отличий не выявлено (см. табл. 2)	0,96
1.1 — пациенты с GMFCS 1	24,7	0,66		0,89
1.1с — стандартная обувь				
1.1о — ортопедическая обувь	20,6	0,82		0,77
К — контрольная группа в стандартной обуви	28,0	Значимых отличий не выявлено (см. табл. 2)	0,69	0,96
1.2 — пациенты с GMFCS 2	18,2		0,77	1,20
1.2с — стандартная обувь				
1.2о — ортопедическая обувь	15,9		0,92	0,98
К — контрольная группа в стандартной обуви	28,0	0,55	0,69	0,96
1.3 — пациенты с GMFCS 3	16,2	1,25	0,88	1,19
1.3с — стандартная обувь				
1.3о — ортопедическая обувь	17,2	0,99	0,96	1,03

Ввиду столь выраженного разброса данных было принято решение провести статистический анализ отдельно для каждой из трех подгрупп пациентов с разным уровнем нарушения глобальных моторных функций. Результаты этого анализа представлены в табл. 2.

Анализ показал, что общим для каждой из подгрупп пациентов (с разным уровнем нарушения моторных функций) является статистически значимое различие ходьбы в стандартной обуви по сравнению с ортопедической по переменным f_пят и Км/л_пуч. Кроме того, в подгруппе П1 различия наблюдались по переменной Кнос/пят, в подгруппе П2 — по переменной Км/л_св, а в подгруппе П3 по обоим этим переменным. В табл. 3 представлены медианные значения этих переменных, причем только для тех уровней GMFCS, в которых они статистически значимо отличались для ортопедической обуви по сравнению со стандартной. Для определения характера влияния ортопедической обуви на ходьбу больных ДЦП медианные значения этих четырех переменных представлены в табл. 3 не только для групп пациентов с разным уровнем нарушений, но и для контрольной группы без анатомо-функциональных признаков нарушения опорно-двигательной системы.

Более наглядно эти тенденции представлены на квантильных диаграммах (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученный в результате исследования большой разброс данных, характеризующих взаимодействие стоп с опорой в группе, объединяющей всех обследованных с ДЦП, не был неожиданным, так как больные с разными уровнями нарушения глобальных моторных функций имеют разную степень выраженности деформаций опорно-двигательного аппарата и, как следствие, разные паттерны ходьбы. Более того, пациенты с уровнем GMFCS 3, в отличие от других, использовали при ходьбе дополнительные средства опоры (трости, ходунки), влияющие на стереотип ходьбы [20]. В то же время мы представили количественную оценку этого разброса данных, чтобы продемонстрировать недостаточность исследования взаимодействия стоп с опорой у пациентов с ДЦП без учета уровня GMFCS. Несоблюдение данного положения может привести к ошибкам, обусловленным тем, что среди параметров взаимодействия стоп с опорой существуют и такие, отклонение которых от нормы для пациентов с одной группой GMFCS заключается в уменьшении, а для пациентов с другой — в увеличении, нивелируя таким образом отклонение этого параметра в общей группе больных ДЦП по сравнению с контрольной группой. По этим причинам для оценки влияния ортопедической обуви на взаимодействие стоп

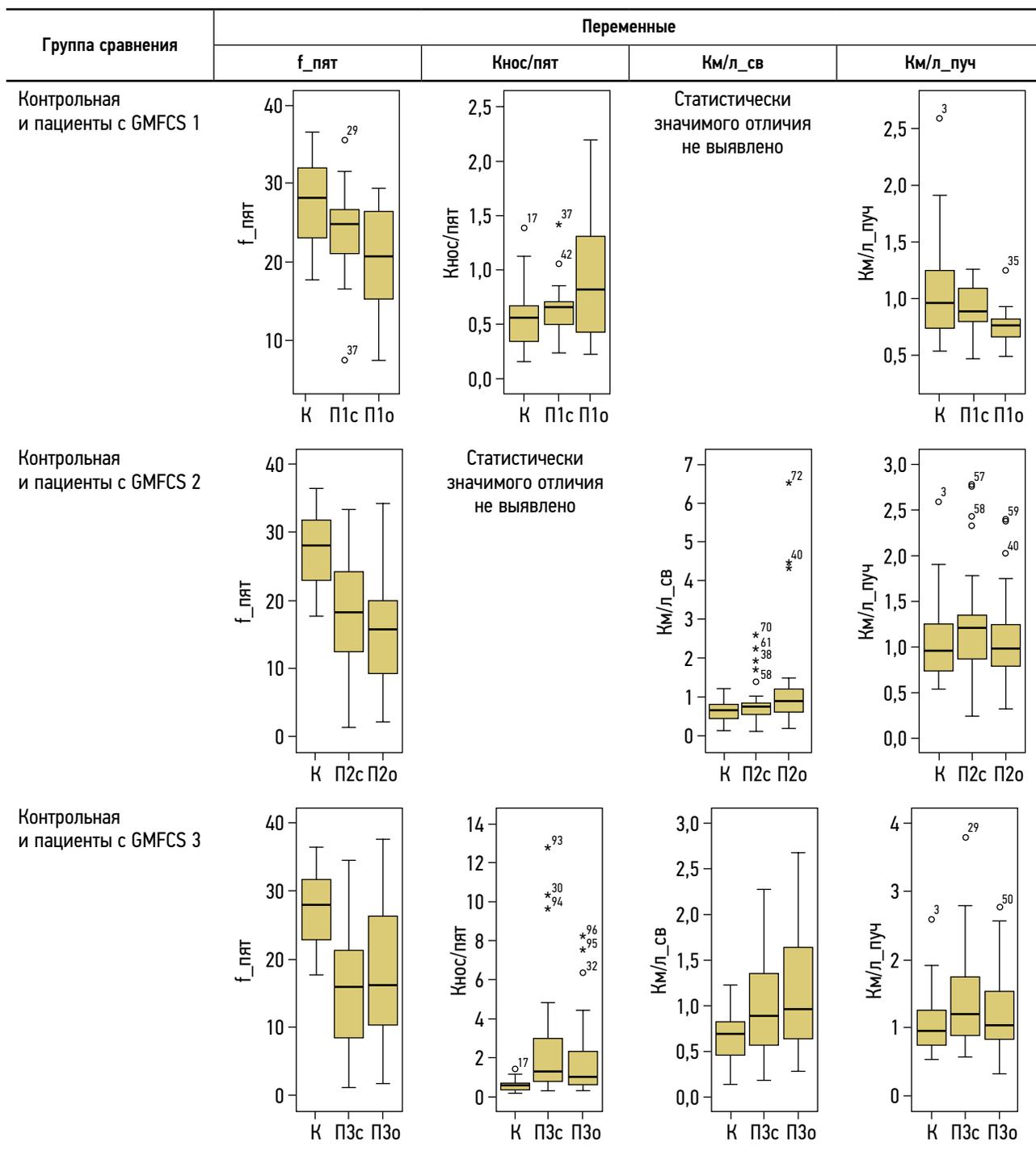


Рис. 3. Квантильные диаграммы переменных, по которым выявлено статистически значимое отличие ходьбы в ортопедической обуви по сравнению со стандартной для групп с разным уровнем нарушения глобальных моторных функций: К — контрольная группа (в стандартной обуви), П1 — подгруппа GMFCS 1, П2 — GMFCS 2, П3 — GMFCS 3, с — стандартная обувь, о — ортопедическая

с опорой у больных ДЦП следует использовать результаты статистического анализа с учетом уровня нарушений глобальных моторных функций по GMFCS.

При всех уровнях нарушения глобальных моторных функций наблюдались статистически значимые различия по показателю парциальной нагрузки на пятку при ходьбе в ортопедической обуви по сравнению со стандартной (табл. 2). Для групп с первым и вторым

уровнями нарушения моторных функций оно заключалось в снижении нагрузки на пятку, а для группы с третьим уровнем нарушения, наоборот, в незначительном увеличении (табл. 3, рис. 3).

Для пациентов с GMFCS 1 снижение парциальной нагрузки на пятку (см. табл. 3) при ходьбе в ортопедической обуви сопровождалось увеличением носочно-пяточного соотношения нагрузки (Кнос/пят),

что указывает на перераспределение ее с пятки на носок больше, чем при ходьбе в стандартной обуви и тем более при ходьбе в норме. Наблюдалось также еще большее, чем в стандартной обуви, патологическое снижение медиолатерального соотношения нагрузки в области пучков, то есть латеральное смещение нагрузки в этой области. При этом статистически значимого отличия медиолатерального соотношения нагрузки в области свода при ходьбе в стандартной и ортопедической обуви не выявлено, что косвенно свидетельствует о мобильности и/или незначительной выраженности плано-вальгусной деформации стопы. Можно предположить, что выкладка медиального продольного свода у пациентов с легкими двигательными нарушениями обеспечивает элевацию опущенной головки таранной кости без значимого сопротивления, формирует дугу медиального продольного свода и тем самым распределяет часть нагрузки по значительной площади поверхности стопы.

В то же время в группах GMFCS 2 и GMFCS 3, в связи с более выраженной и ригидной деформацией, основная часть нагрузки в среднем отделе стопы приходится практически на головку таранной кости и область таранно-ладьевидного сочленения [22]. В этом случае при использовании выкладки медиального продольного свода стопа опирается на него, нагрузка локализуется в области внутреннего продольного свода, возрастает показатель медиолатерального соотношения нагрузки в этой области, отличаясь от нормы еще более, чем в стандартной обуви.

Различие во влиянии ортопедической обуви на величину нагрузки в области пятки в разных группах по GMFCS можно объяснить как следствие разного влияния этой обуви на коррекцию свода стопы. Основанием для такого заключения послужили клинические наблюдения, которые показали различие в возможности коррекции эквинусного компонента деформации стопы в двух случаях: 1 — без предварительной коррекции вальгусной девиации и дисконгруэнтности в таранно-ладьевидном суставе; 2 — с устранением вальгусной девиации заднего отдела стопы и стабилизацией среднего отдела стопы. В первом случае возможность коррекции эквинуса выше за счет уменьшения рычага задней группы мышц [23], во втором случае такая возможность ниже вследствие того, что при коррекции вальгуса усиливается натяжение ахиллова сухожилия и выраженность эквинусного компонента деформации [23, 24]. По мнению V.S. Mosca, данный клинический тест позволяет выявить «истинную» эквинусную деформацию стопы, которая маскируется за счет вальгусного компонента [24].

На основании вышесказанного можно предположить существование сходного механизма влияния коррекции эквино-плано-вальгусной деформации стопы на биомеханику переката через нее при использовании ортопедической обуви.

В случае повышенной мобильности в суставе Шопара, в частности в таранно-ладьевидном сочленении

(ведущий фактор формирования «плануса»), и незначительной выраженности компонентов деформации стопы использование ортопедической обуви (с выкладкой медиального продольного свода, жесткой конструкцией и малым внутриобувным пространством) приводит к пассивному восстановлению соотношений в таранно-ладьевидном суставе, формированию медиального продольного свода и устранению вальгусной девиации стопы. Это влечет за собой увеличение эквинусного компонента, косвенно зарегистрированного нами в группе пациентов с GMFCS 1 как снижение нагрузки на пятку, увеличение носочно-пяточного соотношения нагрузки и избыточной латерализации нагрузки в области пучков (снижение Км/л_пуч) при ходьбе в ортопедической обуви по сравнению со стандартной и тем более по сравнению с ходьбой детей контрольной группы. В этом случае мобильность стопы позволяет обеспечить за счет внешних факторов полную или даже избыточную коррекцию медиального продольного свода, что закономерно смещает нагрузку в области пучков наружу — латерально, но при этом снижается нагрузка на пятку.

У пациентов групп GMFCS 2 и GMFCS 3 деформация стопы более выраженная и ригидная, поэтому в ортопедической обуви у них не восстанавливаются вообще либо частично пассивно восстанавливаются соотношения в суставах среднего и заднего отделов стопы и, как следствие, изменяется эквинусный компонент. Соответственно, в этих группах отличия нагрузки на пятку при использовании стандартной и ортопедической обуви менее значительны по сравнению с пациентами с GMFCS 1.

У пациентов группы GMFCS 3 при ходьбе в ортопедической обуви незначительно нормализуется распределение нагрузки на стопу в виде увеличения ее на пятку и уменьшения носочно-пяточного соотношения нагрузки. Наблюдается также нормализация (снижение) медиолатерального соотношения нагрузки в области пучков.

Медиализация нагрузки в области пучков в стандартной обуви связана с патологическими установками в суставах нижних конечностей [25], в частности с наличием плано-вальгусной деформации стопы. Такие деформации реже отмечаются у пациентов с GMFCS 1 и более выражены у пациентов групп GMFCS 2 и GMFCS 3. Таким образом, именно для пациентов этих групп характерны, во-первых, патологически измененное медиолатеральное соотношение нагрузки в области пучков, во-вторых, нормализация этого показателя за счет использования ортопедической обуви с жесткими специальными (корригирующими) элементами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У больных детским церебральным параличом с уровнем нарушений глобальных моторных функций GMFCS 1–3 выявлены статистически значимые различия

в характере влияния ортопедической обуви на взаимодействие стоп с опорой.

У пациентов с первым уровнем глобальных моторных функций (GMFCS 1) использование сложной ортопедической обуви привело к усугублению нарушений взаимодействия стоп с опорой по основным показателям — парциальной нагрузке на пятку, медиолатеральному распределению ее в области пучков и носочно-пяточному соотношению.

У пациентов со вторым уровнем нарушения (GMFCS 2) нормализующее влияние ортопедической обуви на взаимодействие стоп с опорой выявлено только по показателю медиолатерального распределения нагрузки в области пучков, а с третьим уровнем нарушения (GMFCS 3) — по большему количеству показателей распределения нагрузки на стопу — как в продольном направлении стопы, так и в поперечном (в области пучков).

Использование сложной ортопедической обуви привело к наиболее значимой нормализации показателей межзонального распределения нагрузки под стопой у пациентов группы GMFCS 3, менее значимой — у пациентов группы GMFCS 2, к усугублению патологического отклонения показателей — у пациентов группы GMFCS 1.

Данное исследование является пилотным, и его результаты указывают на целесообразность проведения более масштабных исследований с учетом других

показателей взаимодействия стоп с опорой для определения показаний к назначению ортопедической обуви пациентам с ДЦП.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Бюджетное финансирование.

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

Этическая экспертиза. Исследование одобрено этическим комитетом ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России (протокол № 1 от 24 сентября 2019 г.) и проведено в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации. Пациенты и их представители дали информированное согласие на участие в исследовании и публикацию его результатов.

Вклад авторов. Л.М. Смирнова — консультативная помощь при проведении инструментальных биомеханических обследований, статистическая обработка цифрового материала, написание базового текста статьи, этапное и заключительное редактирование статьи. А.А. Кольцов — концепция и дизайн исследования, этапное и заключительное редактирование статьи. Э.И. Джомардлы — анализ литературы, проведение клинического осмотра и биомеханических обследований, формирование статистических форм, сбор и обработка материала, написание базового текста статьи, этапное и заключительное редактирование статьи.

Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armand S., Decoulon G., Bonnefoy-Mazure A. Gait analysis in children with cerebral palsy // EFORT Open Rev. 2016. Vol. 1. P. 448–460. doi: 10.1302/2058-5241.1.000052
2. Valentina J., Davidson S.A., Bear N. et al. A prospective study investigating gross motor function of children with cerebral palsy and GMFCS level II after long-term botulinum toxin type A use // BMC Pediatrics. 2020. Vol. 20. No. 1. P. 7. doi: 10.1186/s12887-019-1906-8
3. Collado-Garrido L., Paras-Bravo P., Calvo-Martin P., Santibanez-Marguello M. Impact of resistance therapy on motor function in children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. Vol. 16. No. 22. P. e4513. doi: 10.3390/ijerph16224513
4. Saleh M., Almasri N.A., Malkawi S.H., Abu-Dahab S. Associations between impairments and activity limitations components of the international classification of functioning and the gross motor function and subtypes of children with cerebral palsy // J. Phys. Ther. Sci. 2019. Vol. 31. No. 4. P. 299–395. doi: 10.1589/jpts.31.299
5. Lee B.H. Relationship between gross motor function and the function, activity and participation components of the international classification of functioning in children with spastic cerebral palsy // J. Phys. Ther. Sci. 2017. Vol. 29. No. 10. P. 1732–1736. doi: 10.1589/jpts.29.1732
6. Son I., Lee D., Hong S., Lee K., Lee G. Comparison of gait ability of a child with cerebral palsy according to the difference of dorsiflexion angle of hinged ankle-foot orthosis: A case report // Am. J. Case Rep. 2019. Vol. 20. P. 1454–1459. doi: 10.12659/AJCR.916814
7. Kim H.Y., Cha Y.H., Byun J.Y., Chun Y.S., Choy W.S. Changes in gait parameters after femoral derotational osteotomy in cerebral palsy patients with medial femoral torsion // Journal of Pediatric Orthopaedics B. 2018;27:194–199. doi: 10.1097/BPB.0000000000000467
8. Patel D.R., Neelakantan M., Pandher K., Merrick J. Cerebral palsy in children: a clinical overview // Transl. Pediatr. 2020. Vol. 9. Suppl. 1. P. S125–S135. doi: 10.21037/tp.2020.01.01
9. Rasmussen H.M., Pederson N.W., Overgaard S. et al. Gait analysis for individually tailored interdisciplinary intervention in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial // Dev. Med. Child Neurol. 2019. Vol. 61. No. 10. P. 1189–1195. doi: 10.1111/dmnc.14178
10. Young J., Jackson S. Improved motor function in a pre-ambulatory child with spastic bilateral cerebral palsy, using a custom rigid ankle-foot orthosis-footwear combination: A case report // Prosthet. Orthot. Int. 2019. Vol. 43. No. 4. P. 453–458. doi: 10.1177/0309364619852239
11. Reis A.J., Schwartz M.H. Ground reaction and solid ankle-foot orthoses are equivalent for the correction of crouch gait in children with cerebral palsy // Dev. Med. Child Neurol. 2019. Vol. 61. No. 2. P. 219–225. doi: 10.1111/dmnc.13999
12. Schwarze M., Block J., Kunz T. et al. The added value of orthotic management in the context of multi-level surgery in children

with cerebral palsy // *Gait Posture*. 2019. Vol. 68. P. 525–530. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.01.006

13. Джомардлы Э.И., Кольцов А.А. Анализ использования технических средств реабилитации у пациентов со спастическими формами детского церебрального паралича в зависимости от уровня глобальных моторных функций пациента // *Гений ортопедии*. 2020. Vol. 26. No. 1. P. 57–64. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-1-57-64

14. Meyns P., Kerkum Y.L., Brehm M.A. et al. Ankle foot orthoses in cerebral palsy: Effects of ankle stiffness on trunk kinematics, gait stability and energy cost of walking // *Eur. J. Paediatr. Neurol.* 2020. Vol. 26. P. 68–74. doi: 10.1016/j.ejpn.2020.02.009

15. Wright E., DiBello S.A. Principles of ankle-foot orthosis prescription in ambulatory bilateral cerebral palsy // *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2020. Vol. 31. No. 1. P. 69–89. doi: 10.1016/j.pmr.2019.09.007

16. Aboutorabi A., Arazpour M., Ahmadi Bani M. et al. Efficacy of ankle foot orthoses types on walking in children with cerebral palsy: A systematic review // *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2017. Vol. 60. No. 6. P. 393–402. doi: 10.1016/j.rehab.2017.05.004

17. Murri A., Zechner G. Corrective dynamic shoe fitting of the functional clubfoot in patients with infantile cerebral palsy // *Z. Orthop. Ihre. Grenzgeb.* 1994. Vol. 132. No. 3. P. 214–220. (In German)

18. Bekk N.V., Belova L.A., Lapina T.S. Feature customization of orthopedic shoes for children with cerebral palsy // *ISJ Theoretical and Applied Science*. 2018. Vol. 12. No. 68. P. 117–121. doi: 10.15863/TAS.2018.12.68.21

19. Узанова Л.П., Мухаммедова М.О. Технологическое решение конструирования ортопедической обуви, учитывая биомеханику нижних конечностей // *World science: Problems and Innovation*. Пенза: Наука и Просвещение, 2018. С. 47–51.

20. Palisano R., Rosenbaum P., Walter S. et al. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy // *Dev. Med. Child Neurol.* 1997. Vol. 39. No. 4. P. 214–223. doi: 10.1111/j.1469-8749.1997.tb07414.x

21. Смирнова Л.М. Программно-аппаратный комплекс для оценки анатомо-функциональных нарушений и эффективности ортезирования при патологии стопы // *Медицинская техника*. 2009. Vol. 6. P. 22–26. doi: 10.1007/s10527-010-9137-1

22. Sees J.P., Miller F. Overview of foot deformity management in children with cerebral palsy // *J. Child Orthop.* 2013. Vol. 7. P. 373–377. doi: 10.1007/s11832-013-0509-4

23. Silfverskoild N. Reduction of the uncrossed two-joints muscles of the leg to one-joint muscles in spastic condition // *Acta Chir. Scand.* 1924. Vol. 56. P. 315–328.

24. Mosca V.S. Flexible flatfoot in children and adolescents // *J. Child Orthop.* 2010. Vol. 4. No. 2. P. 107–121. doi: 10.1007/s11832-010-0239-9

25. Falisse A., Pitto L., Kainz H. et al. Physics-based stimulations to predict the differential effects of motor control and musculoskeletal deficits on gait dysfunction in children cerebral palsy: A retrospective case study // *Front. Hum. Neurosci.* 2020. Vol. 14. P. 40. doi: 10.3389/fnhum.2020.00040

REFERENCES

1. Armand S, Decoulon G, Bonnefoy-Mazure A. Gait analysis in children with cerebral palsy. *EFORT Open Rev.* 2016;1:448–460. doi: 10.1302/2058-5241.1.000052

2. Valentina J, Davidson SA, Bear N, et al. A prospective study investigating gross motor function of children with cerebral palsy and GMFCS level II after long-term botulinum toxin type A use. *BMC Pediatrics.* 2020;20(1):7. doi: 10.1186/s12887-019-1906-8

3. Collado-Garrido L, Paras-Bravo P, Calvo-Martin P, Santibanez-Marguello M. Impact of resistance therapy on motor function in children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16(22):e4513. doi: 10.3390/ijerph16224513

4. Saleh M, Almasri NA, Malkawi SH, Abu-Dahab S. Associations between impairments and activity limitations components of the international classification of functioning and the gross motor function and subtypes of children with cerebral palsy. *J Phys Ther Sci.* 2019;31(4):299–395. doi: 10.1589/jpts.31.299

5. Lee BH. Relationship between gross motor function and the function, activity and participation components of the international classification of functioning in children with spastic cerebral palsy. *J Phys Ther Sci.* 2017;29(10):1732–1736. doi: 10.1589/jpts.29.1732

6. Son I, Lee D, Hong S, Lee K, Lee G. Comparison of gait ability of a child with cerebral palsy according to the difference of dorsiflexion angle of hinged ankle-foot orthosis: A case report. *Am J Case Rep.* 2019;20:1454–1459. doi: 10.12659/AJCR.916814

7. Kim HY, Cha YH, Byun JY, Chun YS, Choy WS. Changes in gait parameters after femoral derotational osteotomy in cerebral palsy

patients with medial femoral torsion. *Journal of Pediatric Orthopaedics B.* 2018;27:194–199. doi: 10.1097/BPB.0000000000000467

8. 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

9. Rasmussen HM, Pederson NW, Overgaard S, et al. Gait analysis for individually tailored interdisciplinary intervention in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *Dev Med Child Neurol.* 2019;61(10):1189–1195. doi: 10.1111/dmcn.14178

10. Young J, Jackson S. Improved motor function in a pre-ambulatory child with spastic bilateral cerebral palsy, using a custom rigid ankle-foot orthosis-footwear combination: A case report. *Prosthet Orthot Int.* 2019;43(4):453–458. doi: 10.1177/0309364619852239

11. Reis AJ, Schwartz MH. Ground reaction and solid ankle-foot orthoses are equivalent for the correction of crouch gait in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2019;61(2):219–225. doi: 10.1111/dmcn.13999

12. Schwarze M, Block J, Kunz T, et al. The added value of orthotic management in the context of multi-level surgery in children with cerebral palsy. *Gait Posture.* 2019;68:525–530. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.01.006

13. Dzhomardly EI, Koltsov AA. Analysis of the use of technical means for rehabilitation of patients with spastic types of cerebral palsy depending on the level of patient' motor function. *Genij ortopedii.* 2020;26(1):57–64. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-1-57-64. (In Russ.)

14. Meyns P, Kerkum YL, Brehm MA, et al. Ankle foot orthoses in cerebral palsy: Effects of ankle stiffness on trunk kinematics,

gait stability and energy cost of walking. *Eur J Paediatr Neurol.* 2020;26:68–74. doi: 10.1016/j.ejpn.2020.02.009

15. Wright E, DiBello SA. Principles of ankle-foot orthosis prescription in ambulatory bilateral cerebral palsy. *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2020;31(1):69–89. doi: 10.1016/j.pmr.2019.09.007

16. Aboutorabi A, Arazpour M, Ahmadi Bani M, et al. Efficacy of ankle foot orthoses types on walking in children with cerebral palsy: A systematic review. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2017;60(6): 393–402. doi: 10.1016/j.rehab.2017.05.004

17. Murri A, Zechner G. Corrective dynamic shoe fitting of the functional clubfoot in patients with infantile cerebral palsy. *Z. Orthop. Ihre Grenzgeb.* 1994;132(3):214–220. (In German)

18. Bekk NV, Belova LA, Lapina TS. Feature customization of orthopedic shoes for children with cerebral palsy. *ISJ Theoretical and Applied Science.* 2018;12(68):117–121. doi: 10.15863/TAS.2018.12.68.21

19. Uzakova LP, Mukhammedova MO. Technological solution construction of orthopedic shoes considering biomechanics of lower extremities. *World science: Problems and Innovation.* Penza: Nauka i Prosvesheniye; 2018. P. 47–51. (In Russ.)

20. Palisano R, Rosenbaum P, Walter S, et al. Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 1997;39(4):214–223. doi: 10.1111/j.1469-8749.1997.tb07414.x

21. Smirnova LM. Hardware-Software complex for assessment of anatomic-functional disturbances and orthosis efficiency in patients with foot pathology. *Biomedical Engineering.* 2009;43(6):260–264. doi: 10.1007/s10527-010-9137-1. (In Russ.)

22. Sees JP, Miller F. Overview of foot deformity management in children with cerebral palsy. *J Child Orthop.* 2013;7:373–377. doi: 10.1007/s11832-013-0509-4

23. Silfverskoild N. Reduction of the uncrossed two-joints muscles of the leg to one-joint muscles in spastic condition. *Acta Chir Scand.* 1924;56:315–328.

24. Mosca VS. Flexible flatfoot in children and adolescents. *J. Child. Orthop.* 2010;4(2):107–121. doi: 10.1007/s11832-010-0239-9

25. Falisse A, Pitto L, Kainz H, et al., Physics-based stimulations to predict the differential effects of motor control and musculoskeletal deficits on gait dysfunction in children cerebral palsy: A retrospective case study. *Front Hum Neurosci.* 2020;14:40. doi: 10.3389/fnhum.2020.00040

ОБ АВТОРАХ

Людмила Михайловна Смирнова, д-р техн. наук;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4373-9342>;
eLibrary SPIN: 5020-1408;
e-mail: info@diaserv.ru

***Андрей Анатольевич Кольцов**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 195067, Санкт-Петербург, ул. Бестужевская, д. 50;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0862-8826>;
eLibrary SPIN: 2767-3392;
e-mail: katandr2007@yandex.ru

Эльнур Исфандиярович Джомардлы, аспирант;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0281-3262>;
eLibrary SPIN: 5853-0260;
e-mail: mamedov.ie@yandex.ru

AUTHOR INFORMATION

Lyudmila M. Smirnova, Doctor of Engineering Science;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4373-9342>;
eLibrary SPIN: 5020-1408;
e-mail: info@diaserv.ru

***Andrey A. Koltsov**, MD, PhD;
address: 50 Bestuzhevskaya str., Saint Petersburg, 195067, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0862-8826>;
eLibrary SPIN: 2767-3392;
e-mail: katandr2007@yandex.ru

Elnur I. Dzhomardly, MD, PhD student;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0281-3262>;
eLibrary SPIN: 5853-0260;
e-mail: mamedov.ie@yandex.ru