

## ПАТОЛОГИЧЕСКАЯ ГИПЕРСИНХРОНИЗИРОВАННОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ ТЕЛА У ДЕТЕЙ С ПОСЛЕОЖОГОВОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ СТОПЫ

© *И.Е. Никитюк, Е.Л. Кононова, М.С. Никитин, К.А. Афоничев*

ФГБУ «Научно-исследовательский детский ортопедический институт им. Г.И. Турнера»  
Минздрава России, Санкт-Петербург

Поступила: 03.12.2018

Одобрена: 18.02.2019

Принята: 06.06.2019

**Актуальность.** Лечение детей с послеожоговыми деформациями стопы является важной задачей реконструктивно-пластической хирургии. Рубцы, образующиеся на тыльной поверхности стоп, даже при адекватной хирургической тактике в остром периоде термической травмы, в дальнейшем нередко приводят к деформациям всей стопы, что вызывает нарушение ее опорной функции. Важность проблемы заключается в том, что с ростом ребенка развиваются вторичные патологические изменения со стороны суставов нижних конечностей и позвоночника, приводящие к нарушению локомоторной функции, в том числе к отклонениям в системе управления балансом тела.

**Цель исследования** — изучить постуральную стабильность у детей с послеожоговой деформацией стопы до и после хирургического лечения.

**Материал и методы.** Стабилометрическое исследование проведено 12 пациентам с рубцовой послеожоговой деформацией стопы, средний возраст которых составил  $9,8 \pm 0,93$  года. В контрольную группу вошли 12 детей той же возрастной группы, не имеющие признаков ортопедической патологии. Результаты оценивали при помощи методов описательной статистики с включением корреляционно-регрессионного анализа.

**Результаты.** У пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы до лечения выявлено компенсаторное перераспределение статической нагрузки в сторону интактной нижней конечности. Анализ данных постурального контроля у пациентов основной группы показал патологическое повышение синхронизированности системы управления балансом тела. После реконструктивных операций на пораженной стопе отмечались симметричность распределения нагрузки и восстановление опорности конечности пораженной стороны. Корреляционный анализ выявил выраженное уменьшение патологической гиперсинхронизации между стабилометрическими параметрами, что может свидетельствовать о тенденции к нормализации стратегии постурального контроля после лечения.

**Заключение.** Устранение послеожоговой деформации стопы способствовало восстановлению ее анатомической формы и сопровождалось выраженной положительной динамикой в состоянии системы вертикального баланса тела.

**Ключевые слова:** стопа; ожоги; дети; стабилметрия; постуральный баланс.

## ABNORMAL HYPERSYNCHRONIZATION OF BODY BALANCE CONTROL SYSTEM IN CHILDREN WITH POST-BURN FOOT DEFORMITY

© *I.E. Nikityuk, E.L. Kononova, M.S. Nikitin, K.A. Afonichev*

The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia

For citation: *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery.* 2019;7(2):61-68

Received: 03.12.2018

Revised: 18.02.2019

Accepted: 06.06.2019

**Relevance.** Treatment of children with post-burn foot deformities is an important task of reconstructive plastic surgery. The scars formed on the back surface of the feet, even with adequate surgical approach, in the acute period of thermal injury, further often lead to deformities of the entire foot, which leads to a derangement of its support function. The importance of the problem lies in the fact that with the growth of the child, secondary abnormal changes develop on the part of the joints of the lower extremities and the spine, leading to impaired locomotor function, including deviations in the body balance control system.

**Purpose of the study.** To study postural stability in children with post-burn foot deformities before and after surgical treatment.

**Material and methods.** The stabilometric study was conducted in 12 patients with post-burn cicatricial foot deformity, the average age of the patients was  $9.8 \pm 0.93$  years old. The control group consisted of 12 children of the same age with no signs of orthopedic abnormality. To assess the results, the methods of descriptive statistics with the inclusion of correlation and regression analysis were used.

**Results.** In patients with post-burn cicatricial deformity of the foot at the pre-treatment stage, a compensatory redistribution of the static load towards the intact lower limb was revealed. Analysis of postural control indicators in patients of the main group showed an abnormal increase in the synchronization of the system of body balance control. After reconstructive operations on the affected foot, symmetry of the distribution of the load and restoration of the support of the limb of the affected side were noted. Correlation analysis revealed a pronounced decrease in abnormal hypersynchronization between stabilometric parameters, which may indicate a trend towards normalization of the postural control strategy in patients after treatment.

**Conclusion.** Elimination of post-burn foot deformity contributed to the restoration of its anatomical shape and was accompanied by pronounced positive dynamics in the state of the system of vertical balance of the patient's body.

**Keywords:** foot; burns; children; stabilometry; postural balance.

## Введение

Стопа — один из основных структурных сегментов опорно-двигательного аппарата человека, обеспечивающих его статолокомоторную функцию, и представляет целостный морфофункциональный объект, от которого зависит двигательная функция человека [1]. Лечение детей с послеожоговыми деформациями стопы является важной задачей реконструктивно-пластической хирургии [2]. По данным некоторых авторов, частота повреждений этой области достигает более 40 % [3], при этом чаще поражается тыл стопы [4]. Тыльная поверхность стопы характеризуется рядом анатомических особенностей: более тонким кожным покровом, истонченным подкожно-жировым слоем, поверхностно расположенным сосочковым слоем дермы, периферическим кровоснабжением, замедленным венозным и лимфатическим оттоком. Все эти факторы предрасполагают к более глубокому поражению данной области и последующему рубцеванию [5]. Рубцы, образующиеся на тыле стопы, даже при адекватной хирургической тактике в остром периоде термической травмы, в дальнейшем нередко вызывают деформацию всей стопы [6], что приводит к нарушению ее опорной функции. Важность проблемы также заключается в том, что с ростом ребенка асимметрия нагрузки на нижние конечности способствует развитию вторичных патологических изменений со стороны суставов нижних конечностей и позвоночника, приводящих к нарушению статолокомоторной функции [7]. Именно поэтому важна количественная оценка распределения нагрузки на нижние конечности в процессе ортопедической реабилитации [8]. Однако вопросы диагностики дисфункции опорно-двигательного аппарата, развившейся при осложненном течении ожогов тыла

стопы у детей, практически не освещены как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

С учетом того что опорно-двигательный аппарат человека является функционально единым, для оценки статолокомоторной функции целесообразно использовать метод стабилометрии, обладающий высокой информативностью при анализе механизмов нарушения и восстановления вертикального баланса тела у пациентов с ортопедической патологией.

**Цель работы** — изучить постуральную стабильность у детей с послеожоговой деформацией стопы до и после хирургического лечения.

## Материал и методы

Стабилометрическое исследование проведено 12 пациентам с рубцовой послеожоговой деформацией стопы, в том числе 7 детям с левосторонним поражением, 5 — с правосторонним. Возраст детей составил от 5 до 16 лет (средний возраст —  $9,8 \pm 0,93$  года). В основную группу были включены дети, ранее не оперированные по поводу ожоговой деформации стопы в других медицинских учреждениях. Обследование проводили при помощи программно-аппаратного комплекса «МБН Биомеханика» (ООО НМФ «МБН», Россия) до хирургического лечения и в сроки от 1 до 2 лет после устранения рубцовой деформации по стандартной схеме с открытыми и закрытыми глазами. Регистрировали параметры смещения проекции центра масс (ПЦМ) тела: координату  $x$  (мм), среднюю длину траектории  $L$  (мм), площадь  $S$  (мм<sup>2</sup>), отношение длины статокинезиограммы к ее площади  $L/S$  (мм<sup>-1</sup>). Вычисляли средние показатели амплитуды колебаний проекции центра масс  $A$  (мм) и уровень 60 % мощности спек-



**Рис. 1.** Фото стоп пациента Б., 14 лет. Послеожоговая рубцовая деформация правой стопы: *а* — до операции; *б* — через год после оперативного вмешательства на пораженной стопе

тра во фронтальной и сагиттальной плоскостях  $f60\%$  (Гц). Дополнительно рассчитывали интегративный показатель — отношение длины к амплитуде  $L/A$  [9]. Оперативное вмешательство состояло в устранении послеожоговой деформации стопы с целью восстановления анатомической формы и замещения рубцов кожи полнослойными кожными трансплантатами (рис. 1).

Контрольную группу составили 12 детей той же возрастной группы, не имеющие признаков ортопедической патологии.

Статистический анализ данных проводили с помощью программ SPSS 11.5 и Statgraphics Centurion 16.2. Сначала определяли характер распределения вариационных рядов (критерий Шапиро – Уилка). Так как в сравниваемых группах (хотя бы в одной) количественные признаки не соответствовали закону нормального распределения, для сравнения несвязанных выборок использовали  $U$ -критерий Манна – Уитни, а для связанных — критерий Вилкоксона с расчетом  $Z$ -критерия. Данные представляли в виде медианы ( $Me$ ) и межквартильного интервала (25–75%). Различия в показателях считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ . Для исследования взаимосвязи между параметрами стабилometrics применяли корреляционный анализ с использованием коэффициента Спирмена  $r_s$ . Корреляцию считали сильной при  $r_s \geq 0,7$ .

## Результаты

У пациентов с последствиями послеожоговой рубцовой деформации стопы присутствовали нарушения постурального баланса, на что указывали стабилметрические показатели (табл. 1).

У пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы до лечения выявлено выраженное и статистически значимое смещение ПЦМ во

фронтальной плоскости (показатель  $x$ ) в соответствии с принципом контралатеральности — смещение в сторону, противоположную пораженной стороне (см. рис. 4, *а*). Такой характер асимметричного распределения веса тела на нижние конечности может свидетельствовать о компенсаторном перераспределении статической нагрузки в сторону интактной нижней конечности, что характерно для односторонних поражений [10]. Указанный факт имеет большое клиническое значение, так как длительная асимметрия опорности нижних конечностей может вызывать негативные последствия вследствие того, что приводит к избыточной нагрузке на другие отделы опорно-двигательной системы [11].

Анализ остальных показателей постурального контроля у пациентов основной группы показал значимое и стабильное отклонение от нормы в сторону повышения параметра  $L$ . Параметры  $S$ ,  $A$  и  $f60\%$  также были повышены с разным уровнем значимости в зависимости от использования пациентом в процессе исследования зрительного анализатора. Таким образом, у пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы наблюдались выраженные нарушения постурального баланса тела. Считается, что такой невысокий физиологический ресурс постурального контроля требует повышенных затрат энергии, избыточной нагрузки на другие отделы опорно-двигательного аппарата [12].

Для получения более полного представления о функциональных отклонениях в поддержании вертикального баланса тела обследованных детей проведен корреляционный анализ. Зависимость параметра  $L/S$  от амплитуды колебаний  $A$  отражала степенная функция:  $Y = bX^a$ ; связь интегративного показателя  $L/A$  со средним уровнем мощности спектра  $f60\%$  была линейной:  $Y = a + bX$ , где  $a$  и  $b$  — коэффициенты регрессии, переменная  $X$

Таблица 1

Стабилометрические показатели здоровых детей и пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы (до и после хирургического лечения)

Параметры		Контрольная группа $n = 12$ Ме (25–75 %)	Критерий Манна – Уитни ( $p$ -value)	Основная группа, до операции $n = 12$ Ме (25–75 %)	Критерий Вилкоксона $P$	Основная группа, после операции $n = 12$ Ме (25–75 %)
$x$ , мм	О	0,29 (0,1–0,37)	< 0,0001	5,01 (3,87–6,15)	0,002	1,21 (0,92–1,61)
	З	0,3 (0,13–0,41)	0,0001	4,43 (2,96–7,96)	0,002	0,93 (0,69–2,35)
$L$ , мм	О	619 (580–686)	0,0002	1084 (819–1324)	0,002	920 (649–1156)
	З	790 (630–952)	0,004	1397 (990–1638)	0,002	1082 (667–1290)
$S$ , мм <sup>2</sup>	О	346 (311–474)	0,005	949 (452–1426)	0,019	697 (499–1048)
	З	639 (353–740)	0,112	669 (493–1847)	0,002	491 (360–1358)
$A$ , мм	О	2,4 (2,1–3,1)	0,026	4,1 (2,5–5,0)	0,889	3,2 (2,4–4,6)
	З	3,0 (2,5–3,6)	0,402	3,3 (2,4–5,7)	0,889	3,5 (2,7–4,8)
$f60$ %, Гц	О	1,2 (1,0–1,4)	0,908	1,2 (1,0–1,5)	1,000	1,3 (0,8–1,4)
	З	1,0 (0,9–1,1)	0,024	1,1 (1,0–1,7)	0,182	1,0 (0,9–1,1)

Примечание. О — проба с открытыми глазами; З — проба с закрытыми глазами;  $p$ -value — уровень значимости различия показателей между группами здоровых и больных детей;  $p$  — уровень значимости различия показателей в группе больных детей до и после операции.

Таблица 2

Корреляционный анализ зависимости параметра  $L/S$  от амплитуды колебаний  $A$  проекции центра масс и параметра  $L/A$  от среднего уровня мощности спектра  $f60$  % статокинезиограммы здоровых детей и пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы (до и после хирургического лечения)

Зависимость		Коэффициент корреляции Спирмена $r_s$		
		Контрольная группа $n = 12$	Основная группа, до операции $n = 12$	Основная группа, после операции $n = 12$
$L/S \sim A$	О	-0,44	-0,79	-0,68
	З	-0,58	-0,93	-0,80
$L/A \sim f60$ %	О	0,20	0,90	0,43
	З	0,42	0,83	0,48

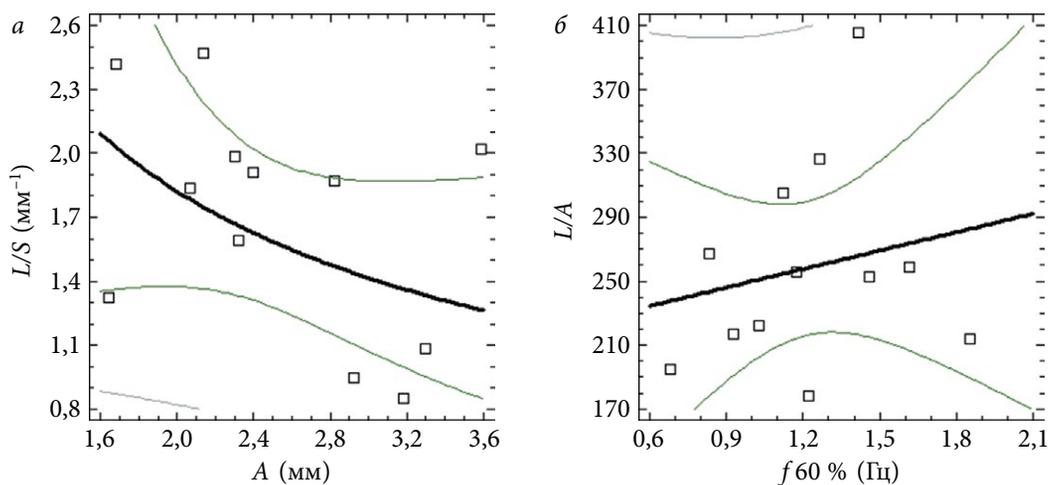
Примечание. О — проба с открытыми глазами; З — проба с закрытыми глазами.

соответствует амплитуде  $A$  или среднему уровню мощности спектра  $f60$  %, переменная  $Y$  — параметрам  $L/S$  или  $L/A$ . Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 2.

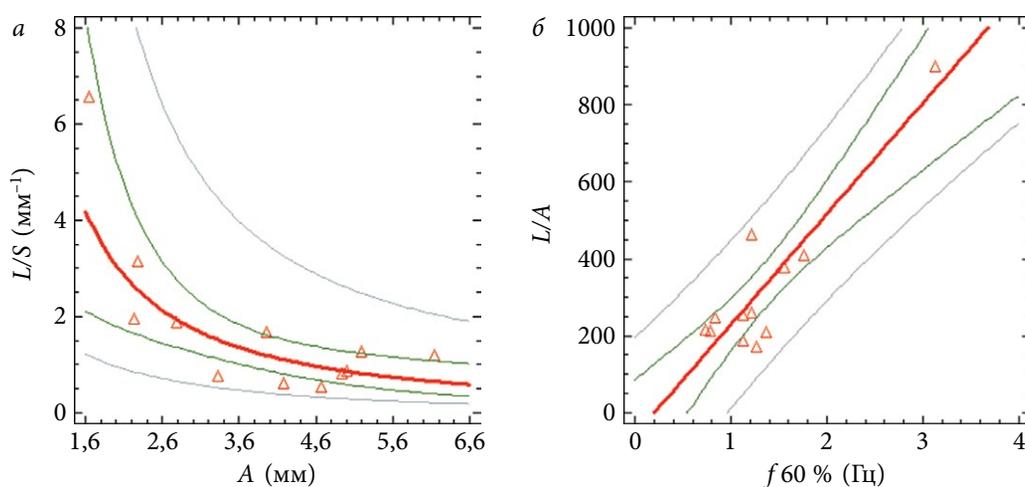
Корреляционный анализ выявил, что в группе здоровых детей существует довольно слабая связь между параметрами  $L/S \sim A$  и  $L/A \sim f60$  %, так как модули коэффициентов корреляции не превышают 0,7 (рис. 2).

Данный факт свидетельствует, что в норме для обеспечения вертикальной стабильности тела нет необходимости в высокой синхронизации параметров  $L$ ,  $S$ ,  $A$  и  $f60$  %, соотношения между которыми в процессе спокойного стояния носят случайный, хаотический характер [13].

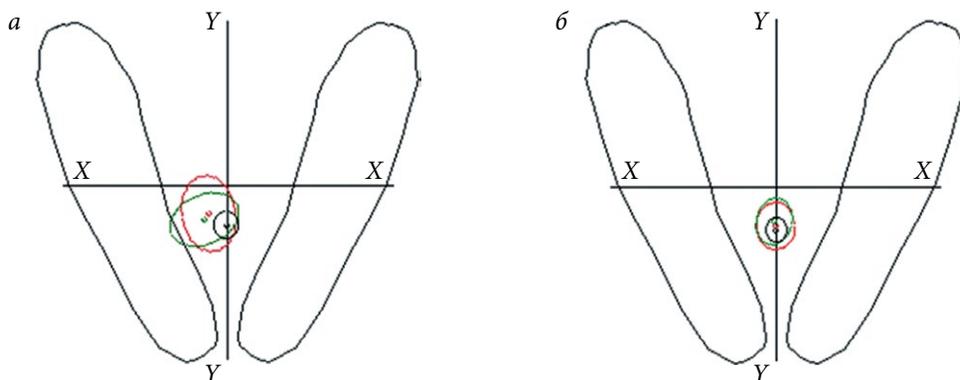
У пациентов основной группы до лечения обеспечение пострурального баланса тела осуществлялось по другому принципу и характеризова-



**Рис. 2.** Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии), отражающие у здоровых детей при открытых глазах зависимость: *a* — параметра  $L/S$  от амплитуды колебаний  $A$  проекции центра масс; *b* — параметра  $L/A$  от среднего уровня мощности спектра  $f 60\%$  статокинезиограммы



**Рис. 3.** Линия регрессии (жирная) и ее доверительный интервал (тонкие линии), отражающие у пациентов с односторонним ожогом тыла стопы при открытых глазах зависимость до лечения: *a* — параметра  $L/S$  от амплитуды колебаний  $A$  проекции центра масс; *b* — параметра  $L/A$  от среднего уровня мощности спектра  $f 60\%$  статокинезиограммы



**Рис. 4.** Стабилограммы пациента Б., 14 лет (см. рис. 1): *a* — до операции; *b* — через год после хирургического вмешательства на пораженной стопе. Восстановление центрации проекции центра масс тела во фронтальной плоскости, нормализация площади статокинезиограммы. Красная линия — проба с открытыми глазами, зеленая — проба с закрытыми глазами

лось сильной корреляционной связью в соотношениях  $L/S \sim A$  и  $L/A \sim f 60\%$ , в которых модули коэффициентов  $r_s$  превышали 0,7 (рис. 3).

Такая сила корреляционных связей между стабилметрическими параметрами может свидетельствовать о различной поструральной стратегии

обеспечения вертикального баланса тела у здоровых детей и пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы.

После реконструктивных операций на пораженной стопе оценивали восстановление опорной функции нижних конечностей (см. табл. 1).

Отмечалась значимая стабилизация ПЦМ тела во фронтальной плоскости (ось  $x$ ), что указывает на симметричность распределения нагрузки и восстановление опорности конечности пораженной стороны (рис. 4, б).

Описательный статистический анализ других параметров стабилотрии у больных с послеожоговой рубцовой деформацией стопы хотя и не выявил полного восстановления до нормы средних значений длины  $L$  и площади  $S$  статокинезиограммы после лечения, однако показал устойчивость, значимость и однонаправленность их изменений в сторону нормализации. Несмотря на отсутствие изменений после лечения в показателях  $A$  и  $f60\%$ , корреляционный анализ выявил уменьшение патологической гиперсинхронизации в соотношении  $L/S \sim A$ , при этом коэффициенты корреляции между показателями  $L/A$  и  $f60\%$  снизились до нормальных величин. Это может свидетельствовать о тенденции к нормализации стратегии постурального контроля у пациентов после реконструктивно-восстановительных операций на пораженной стопе.

## Обсуждение результатов

Результаты настоящей работы продемонстрировали значительное снижение постуральной стабильности у детей с послеожоговой рубцовой деформацией стопы, что проявлялось выраженными отклонениями параметров стабилотрии от номинальных значений. При этом прослеживались сильные корреляционные связи между площадью  $S$ , длиной статокинезиограммы  $L$ , амплитудой колебаний проекции центра масс  $A$  и уровнем  $60\%$  мощности спектра  $f60\%$ , которые значительно превышали таковые у здоровых детей. Это указывает на более упорядоченную траекторию ПЦМ и, следовательно, большую синхронизованность системы управления вертикальным балансом тела у пациентов с односторонней послеожоговой рубцовой деформацией стопы по сравнению со здоровыми детьми. Гиперсинхронизованная постуральная стратегия является адаптивной, так как позволяет обеспечить поддержание вертикальной позы и возможность движения в новых условиях функционирования деформированной стопы. В то же время повышенная упорядоченность траектории ПЦМ является патологической, так как считается показателем дефицита постурального контроля. Подобная гиперсинхронизация системы управления балансом тела характерна для пациентов с поражениями центральной нервной системы: при черепно-мозговых травмах [14], паркинсонизме [15], спинальной патологии [16]. Хорошо

известно, что рецепторы стопы служат важным источником информации об изменении положения ПЦМ тела [17], при этом в разгруженной нижней конечности активность механорецепторов стопы снижается [18]. Кроме того, одностороннее изменение привычной стимуляции поверхностных и глубоких рецепторов подошвы стопы затрудняет контроль и управление вертикальной позой [19]. Можно предположить, что и у пациентов с послеожоговой рубцовой деформацией стопы происходят изменения в кортикоспинальном механизме реализации акта опоры стопы, который подвержен влиянию патологически измененной афферентной импульсации от пораженной стопы. При этом в афферентном контроле и программировании двигательных актов участвуют механорецепторы различных зон кожи стопы [20]. Измененная афферентная импульсация от рецепторов пораженной стопы создает мышечный дисбаланс опорно-двигательной системы, так как проходит по проприоцептивной спиноцеребральной петле с односторонним нарушением одного из звеньев биокинематической цепи [21]. В таких условиях измененной центральной регуляции статолокомоторных функций у детей с послеожоговыми деформациями стопы включаются дополнительные механизмы компенсации для поддержания равновесия тела. Возможно, эти компенсаторные механизмы реализуются путем изменения постуральной стратегии за счет патологического повышения синхронизованности системы управления балансом тела.

## Выводы

1. В группе детей с послеожоговой рубцовой деформацией стопы были выявлены нарушения постурального баланса и асимметричность нагрузки на нижние конечности, что может указывать на компенсацию ухудшения опорной функции пораженной стопы интактной конечностью.
2. Устранение послеожоговой деформации стопы сопровождалось выраженной положительной динамикой в состоянии системы вертикального баланса тела пациентов.

## Дополнительная информация

**Источник финансирования.** Работа проведена в рамках Государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации № АААА-А18-118122690164-3.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов

интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Этическая экспертиза.** Исследование выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации с поправками Минздрава России, одобрено этическим комитетом ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России (протокол № 4 от 27.11.2018). Пациенты (их представители) подписали добровольное информированное согласие на обработку и публикацию персональных данных.

**Благодарность.** Авторы выражают свою благодарность Алене Николаевне Мельченко, руководителю отдела по реализации международных проектов и внешним связям ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России за оказанную помощь в переводе на английский язык резюме части публикации.

#### Вклад авторов

*И.Е. Никитюк* — разработка дизайна исследования, сбор и статистическая обработка материала, обзор публикаций по теме статьи и написание текста рукописи.

*Е.Л. Кононова* — сбор и анализ материала, обзор публикаций по теме статьи, написание текста, этапное и заключительное редактирование рукописи.

*М.С. Никитин* — сбор и анализ материала, обзор публикаций по теме статьи, написание текста.

*К.А. Афоничев* — сбор и анализ материала, обзор публикаций по теме статьи, написание текста, этапное и заключительное редактирование рукописи.

## Литература

1. Ефимов А.П. Информативность биомеханических параметров походки для оценки патологии нижних конечностей // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 80–88. [Efimov AP. Informativity of biomechanical parameters of gait for the estimation of the lower extremities pathology. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2012;16(1):80-88. (In Russ.)]
2. Ngu F, Patel B, McBride C. Epidemiology of isolated foot burns in children presenting to a Queensland paediatric burns centre- a two-year study in warmer climate. *Burns Trauma*. 2017;5:6. <https://doi.org/10.1186/s41038-017-0070-3>.
3. Гизатулина Л.Я., Богов А.А., Муллин Р.И., Ибрагимов Я.Х. Применение васкуляризированной кожной пластики задним фасциально-жировым лоскутом голени на ретроградном кровотоке для замещения дефекта мягких тканей нижней трети голени и стопы // Практическая медицина. – 2017. – № 8. – С. 53–55. [Gizatulina LY, Bogov AA, Mullin RI, Ibragimov YK. The usage of vascularized skin plastics by reverse adipofascial flap of the lower leg in counterpulsation for defects of soft tissues of the lower third of shin and foot. *Prakticheskaya meditsina*. 2017;(8):53-55. (In Russ.)]
4. Богов А.А., Ибрагимова Л.Я., Муллин Р.И. Применение васкуляризированной кожной пластики медиальным лоскутом стопы для замещения дефекта мягких тканей стопы // Практическая медицина. – 2012. – № 8-1. – С. 86–87. [Bogov AA, Ibragimova LY, Mullin RI. The use of vascularized skin plastics by medial flap of the foot for replacing defects of soft tissues of the foot. *Prakticheskaya meditsina*. 2012;(8-1): 86-87. (In Russ.)]
5. Богданов С.Б., Бабичев Р.Г. Хирургические аспекты лечения детей с глубокими ожогами тыльной поверхности кистей и стоп // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2016. – Т. 6. – № 1. – С. 57–62. [Bogdanov SB, Babichev RG. Surgical aspects of treatment children with deep burns of dorsal surface of hands and feet. *Rossiyskiy vestnik detskoy khirurgii, anesteziologii i reanimatologii*. 2016;6(1):57-62. (In Russ.)]
6. Sonmez Ergun S. A new splint for dorsal foot burns. *J Burn Care Res*. 2018;39(2):308-310. <https://doi.org/10.1097/BCR.0000000000000573>.
7. Hurkmans HLP, Busmann JBJ, Benda E, et al. Techniques for measuring weight bearing during standing and walking. *Clin Biomech*. 2003;18(7):576-589. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(03\)00116-5](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(03)00116-5).
8. Kumar SN, Omar B, Joseph LH, et al. Evaluation of limb load asymmetry using two new mathematical models. *Glob J Health Sci*. 2014;7(2):1-7. <https://doi.org/10.5539/gjhs.v7n2p1>.
9. Никитюк И.Е., Мошонкина Т.Р., Щербаклова Н.А., и др. Влияние локомоторной тренировки и функциональной электромиостимуляции на постуральные функции детей с тяжелыми формами ДЦП // Физиология человека. – 2016. – Т. 42. – № 3. – С. 37–46. [Nikityuk IE, Moshonkina TR, Shcherbakova NA, et al. Effects of locomotor training and functional electrical stimulation on postural function in children with severe cerebral palsy. *Fiziol Cheloveka*. 2016;42(3):37-46. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164616030127>.
10. Adegoke BO, Olaniyi O, Akosile CO. Weight bearing asymmetry and functional ambulation performance in stroke survivors. *Glob J Health Sci*. 2012;4(2):87-94. <https://doi.org/10.5539/gjhs.v4n2p87>.
11. Щуров В.А., Новиков К.И., Мурадисинов С.О. Влияние разницы высоты нижних конечностей на биомеханические параметры ходьбы // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15. – № 4. – С. 102–107. [Shchurov VA, Novikov KI, Muradisinov SO. Effect of uneven legs on biomechanical parameters of walking. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2011;15(4):102-107. (In Russ.)]
12. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. – М.: Т.М. Андреева, 2007. – 640 с. [Skvortsov DV. Diagnostika dvigatel'noy patologii instrumental'nymi metodami: analiz pokhodki, stabilometriya. Moscow: T.M. Andreeva; 2007. 640 p. (In Russ.)]

13. Никитюк И.Е., Икоева Г.А., Кивоенко О.И. Система управления вертикальным балансом у детей с церебральным параличом более синхронизирована по сравнению со здоровыми детьми // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 49–57. [Nikityuk IE, Ikoeva GA, Kivoenko OI. The vertical balance management system is more synchronized in children with cerebral paralysis than in healthy children. *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2017;5(3):49-57. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/PTORS5349-57>.
14. Cavanaugh JT, Guskiewicz KM, Stergiou N. A nonlinear dynamic approach for evaluating postural control: new directions for the management of sport-related cerebral concussion. *Sports Med*. 2005;35(11):935-950. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535110-00002>.
15. Schmit JM, Riley MA, Dalvi A, et al. Deterministic center of pressure patterns characterize postural instability in Parkinson's disease. *Exp Brain Res*. 2006;168(3):357-367. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0094-y>.
16. Никитюк И.Е., Кононова Е.Л., Виссарионов С.В. Постуральный дефицит у детей со стенозом позвоночного канала // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2018. – Т. 6. – № 4. – С. 13–19. [Nikityuk IE, Kononova EL, Vissarionov SV. Postural deficiency in children with spinal stenosis *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2018;6(4):13-19. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/PTORS6413-19>.
17. Carpenter MG, Murnaghan CD, Inglis JT. Shifting the balance: evidence of an exploratory role for postural sway. *Neuroscience*. 2010;171(1):196-204. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.030>.
18. Wright WG, Ivanenko YP, Gurfinkel VS. Foot anatomy specialization for postural sensation and control. *J Neurophysiol*. 2012;107(5):1513-1521. <https://doi.org/10.1152/jn.00256.2011>.
19. Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Влияние структуры опорной поверхности под стопой на поддержание вертикальной позы при разном распределении нагрузки между ногами // Физиология человека. – 2016. – Т. 42. – № 4. – С. 61–68. [Kazennikov OV, Kireeva TB, Shlykov VY. Influence of structure of the support surface under the sole on vertical posture during standing with different body weight distribution between legs. *Fiziol Cheloveka*. 2016;42(4):61-68. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164616040044>.
20. Бачу А.А. Усиление сенсорно-моторной интеграции в неокортексе путем рефлексогенной стимуляции физиологически активных зон // Вестник Приднестровского университета. – Серия «Медико-биологические и химические науки». – 2014. – № 2. – С. 112–117. [Bachu AY. Usilenie sensorno-motornoy integratsii v neokortekse putem refleksogennoy stimulyatsii fiziologicheskii aktivnykh zon. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Mediko-biologicheskie i khimicheskie nauki*. 2014;(2):112-117. (In Russ.)]
21. Шеколова Н.Б., Бронников В.А., Ладейщиков В.М., Зиновьев А.М. Значение оценки биомеханических показателей при ортопедической коррекции двигательных нарушений у больных после перенесенного церебрального инсульта // Пермский медицинский журнал. – 2018. – Т. 35. – № 3. – С. 9–14. [Schekolova NB, Bronnikov VA, Ladeischikov VM, Zinoviev AM. Significance of biomechanical indices assessment in orthopedic correction of motor disorders in patients following cerebral stroke. *Perm Medical Journal*. 2018;35(3):9-14. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/pmj3539-14>.

### Сведения об авторах

**Игорь Евгеньевич Никитюк** — канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологических и биомеханических исследований ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0001-5546-2729>. E-mail: femtotech@mail.ru.

**Елизавета Леонидовна Кононова** — канд. мед. наук, руководитель лаборатории физиологических и биомеханических исследований ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0001-7624-013X>. E-mail: Yelisaveta@yandex.ru.

**Максим Сергеевич Никитин** — врач травматолог-ортопед отделения последствий травм и ревматоидного артрита ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0001-8987-3489>. E-mail: doknikitin@yandex.ru.

**Константин Александрович Афоничев** — д-р мед. наук, руководитель отделения последствий травм и ревматоидного артрита ФГБУ «НИДОИ им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0002-6460-2567>. E-mail: afonichev@list.ru.

**Igor E. Nikityuk** — MD, PhD, Leading Researcher of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research. The Turner Scientific Research Institute for Childrens Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-5546-2729>. E-mail: femtotech@mail.ru.

**Elizaveta L. Kononova** — MD, PhD, Head of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research. The Turner Scientific Research Institute for Childrens Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-7624-013X>. E-mail: Yelisaveta@yandex.ru.

**Maksim S. Nikitin** — MD, Orthopedic and Trauma Surgeon of the Department of Trauma Sequelae and Rheumatoid Arthritis. The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-8987-3489>. E-mail: doknikitin@yandex.ru.

**Konstantin A. Afonichev** — MD, PhD, D.Sc., Head of the Department of Trauma Sequelae and Rheumatoid Arthritis. The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-6460-2567>. E-mail: afonichev@list.ru.