

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОП ПОСЛЕ МИКРОХИРУРГИЧЕСКОЙ АУТОТРАНСПЛАНТАЦИИ КОМПЛЕКСОВ ТКАНЕЙ НА КИСТЬ

Голяна С.И., Никитюк И.Е., Гранкин Д.Ю.

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: ser.golyana@yandex.ru

Цель исследования – оценить динамику функции опорно-двигательной системы после заимствования пальцев стопы при микрохирургической аутотрансплантации на кисть у детей с врожденными и приобретенными деформациями верхней конечности. Было проведено биомеханическое исследование перед проведением данной реконструктивной операции и в сроки от 3 месяцев до 5 лет после хирургического лечения у 33 пациентов в возрасте от 5 до 12 лет. Дети были распределены на две группы в зависимости от количества заимствованных пальцев, входящих в состав аутотрансплантата донорской стопы. В первую группу вошли 19 детей, у которых произведена аутотрансплантация только одного (второго) пальца со стопы на кисть. Соответственно, во вторую группу включены 14 детей, у которых со стопы был заимствован аутотрансплантат блока 2–3-го пальцев. Для оценки функции стоп были использованы плантографический и стабилметрический методы. Хирургическое заимствование аутотрансплантатов пальцев со стопы привело к ухудшению показателей биомеханических характеристик опорно-двигательной системы пациентов, более выраженному у пациентов второй группы. Произошли снижение угловых параметров β донорских стоп до $7[5 - 9]^\circ$ (норма $16[15 - 17]^\circ$), нарастание асимметрии ширины Δt и площади опоры Δs контралатеральных стоп, в среднем соответственно до 17% и 26% (норма - 2%). Однако в сроки от 6 до 12 месяцев после операции данные показатели максимально приближались к норме. Последствия аутотрансплантации только одного 2-го пальца были еще менее ощутимы, о чем свидетельствовали показатели плантографии и стабилографии. Восстановление показателей биомеханики стопы после заимствования одного пальца происходило в среднем через 5–6 месяцев после снятия гипсовой иммобилизации и начала нагрузки на нижнюю конечность.

Ключевые слова: кисть, стопа, микрохирургия, аутотрансплантация пальца стопы, биомеханика.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания Минздрава России.

BIOMECHANICAL STUDY OF FEET AFTER MICROSURGICAL AUTOTRANSPLANTATION OF TISSUE COMPLEXES TO THE HAND

Golyana S.I., Nikityuk I.E., Grankin D.Y.

H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia, e-mail: ser.golyana@yandex.ru

The purpose of the study is to assess the dynamics of the function of the musculoskeletal system after borrowing the toes of the foot in microsurgical autotransplantation on the hand in children with congenital and acquired deformations of the upper limb. A biomechanical study was carried out prior to this reconstructive surgery and within three months to five years after the surgical treatment for 33 patients aged between 5 and 12. The children were divided into two groups, depending on the number of borrowed fingers that make up the autograft of the donor foot. The first group included 19 children who had autotransplanted only one (second) toe from foot to hand. Accordingly, 14 children were included in the second group, in which the autograft block of 2-3 fingers was borrowed from the foot. For the evaluation of the stop function, plantographic and stabilometric methods were used. Surgical borrowing of the autograft of the toes from the foot led to a deterioration in the biomechanical characteristics of the musculoskeletal system of patients, more pronounced in the second group. The angles of β donor feet have been reduced to $7[5-9]^\circ$ (standard $16[15-17]^\circ$), and the asymmetry of Δt width and Δs counterlateral stop support has increased to 17% and 26% respectively (norm 2%). However, in the period from 6 to 12 months after the operation, these indicators were maximally close to the norm. The effects of the autotransplantation of only one second finger were even less felt, as indicated by the indicators of the planting and stabilization. Recovery of foot biomechanics after borrowing one finger took place on average 5–6 months after the plaster immobilization had been removed and the lower limb had begun to bear the load.

Ключевые слова: hand, foot, microsurgery, toe to hand transfer, biomechanics.

Work carried out within the framework of the State task of the Ministry of Health of the Russian Federation.

Грубые анатомические и функциональные нарушения кисти у детей как следствие врожденной патологии или тяжелых травм являются сложнейшей проблемой детской ортопедии. Использование микрохирургической аутотрансплантации пальцев стопы для восстановления пальцев кисти является перспективным направлением современной восстановительной хирургии [1, 2]. Большинство хирургов рекомендуют заимствование только одного – второго пальца с донорской стопы [3]. При тяжелых поражениях кисти для наиболее полноценного восстановления пальцев некоторые авторы используют аутотрансплантацию комплекса тканей стопы, включающего 2-й и 3-й пальцы [4, 5]. Однако указанные операции являются достаточно серьезным вмешательством в структуру арочного аппарата стопы, которое теоретически может спровоцировать перераспределение нагрузки по ее отделам и приводить к нарушению ее опорной функции. Кроме того, по мнению некоторых ортопедов-травматологов, существует риск формирования деформаций донорской стопы в отдаленном периоде после операции заимствования пальцев [6]. Оценка функционального статуса донорской стопы после аутотрансплантации пальцев изучена недостаточно. В литературе освещены преимущественно субъективные данные опросов пациентов [7], в то время как аспект результатов объективных инструментальных исследований практически не представлен. Для оценки опорной функции стоп перспективно применение биомеханических методов – плантографии [8] и стабилотрии [9].

Цель исследования – оценить динамику функции опорно-двигательной системы после заимствования пальцев стопы при микрохирургической аутотрансплантации на кисть у детей с врожденными и приобретенными деформациями верхней конечности.

Материал и методы исследования. У 33 пациентов в возрасте от 5 до 12 лет ($10,1 \pm 0,26$ года) с отсутствием пальцев на кисти вследствие врожденной патологии и травматических повреждений проведено биомеханическое исследование перед проведением реконструктивных операций. Обследование проводилось в сроки от 3 месяцев до 5 лет после оперативного лечения. Все пациенты были распределены на две группы в зависимости от количества заимствованных пальцев с одной донорской стопы в ходе микрохирургической пересадки на пораженную кисть. Первая группа включала 19 детей, у которых проведено заимствование только одного 2-го пальца со стопы (рис. 1А, 1Б, 1В). Во второй группе у 14 детей со стопы был заимствован аутотрансплантат, включающий блок 2–3-го пальцев (рис. 2А, 2Б, 2В).

Для оценки опорной функции стоп проводили компьютерную плантографию на программно-аппаратном комплексе диагностики «Подоскан» (ООО НМФ «МБН», Россия).

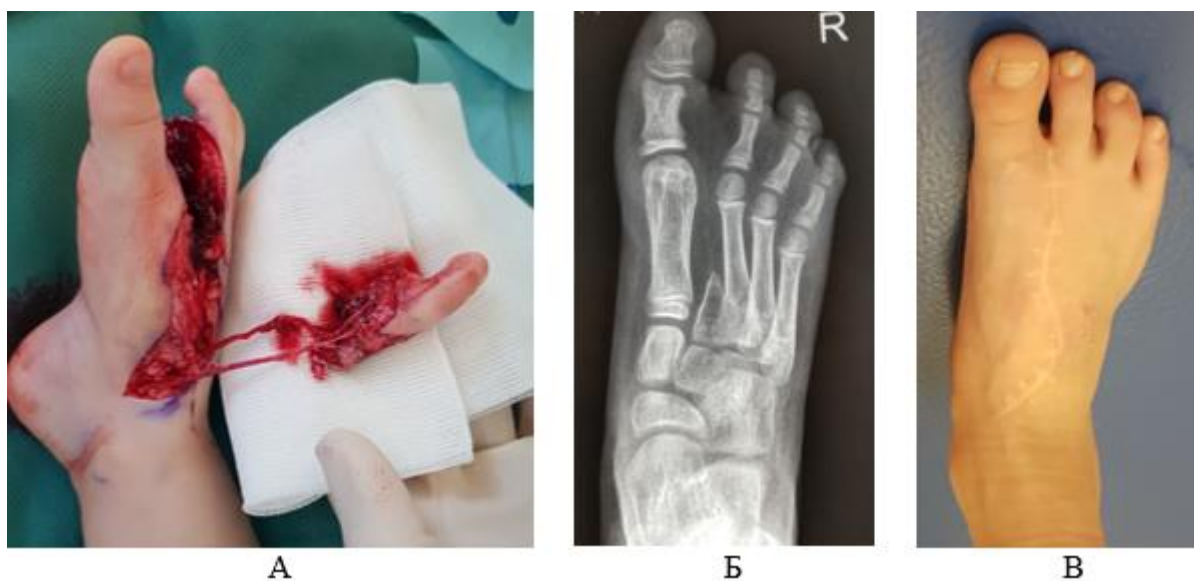


Рис. 1. Заимствование 2-го пальца стопы для пересадки его на кисть: А) мобилизованный палец стопы на сосудистой ножке; Б) рентгенограмма; В) внешний вид стопы через полгода после операции

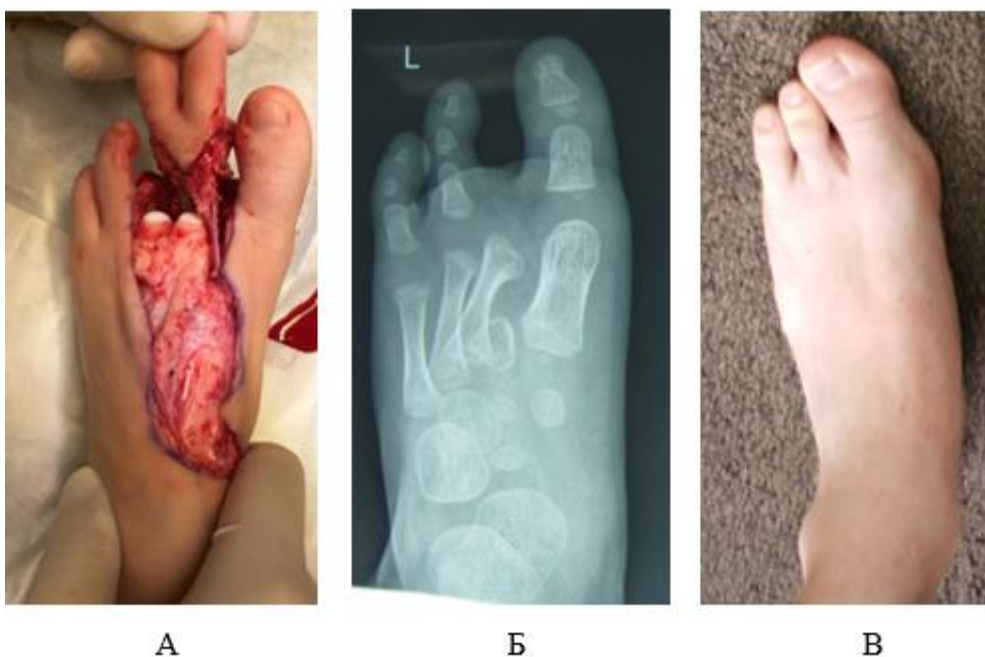


Рис. 2. Заимствование блока 2–3-го пальцев стопы для пересадки на кисть: А) мобилизованный блок 2–3-го пальцев стопы на сосудистой ножке; Б) рентгенограмма; В) внешний вид стопы через 3 года после операции

У каждого обследуемого на полученных плантограммах на обеих стопах отмечали реперные точки и проводили линии по общепринятой методике [10]: (N-M) – касательная к наружному контуру отпечатка, (K-L) – касательная к внутреннему контуру отпечатка, (K-N) –

чреспучковая линия, соединяющая наиболее выступающие латеральные точки контура переднего отдела стопы (рис. 3).

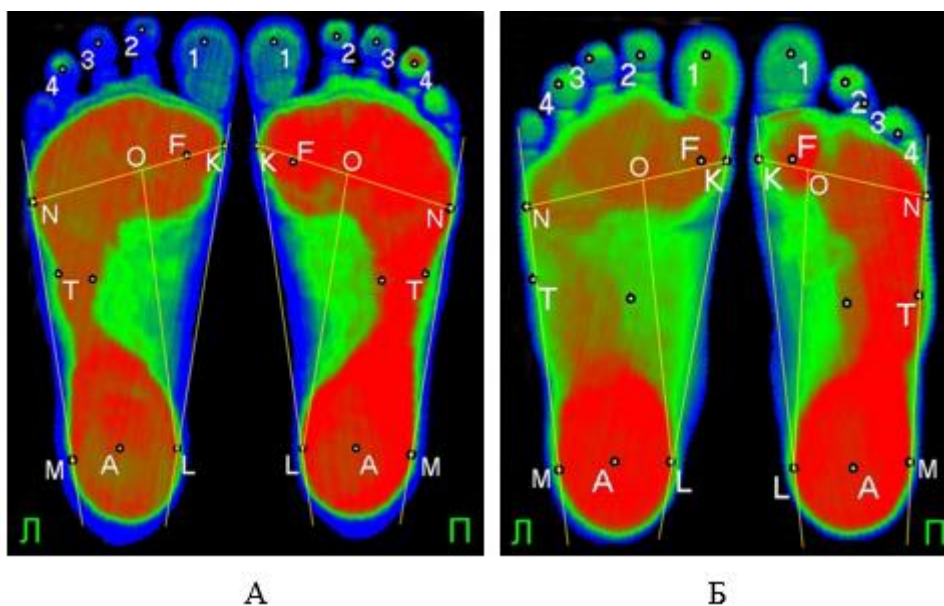


Рис. 3. Схема расчета линейных и угловых параметров плантограммы: А) у здорового ребенка; Б) у пациента Т., 6 лет, после операции заимствования блока 2–3-го пальцев с правой стопы. Угол стопы $\beta = KLO$

Через точку L проводили линию (L-O), параллельную наружной касательной, до пересечения с чреспучковой линией в точке O. Полученный угол KLO является углом стопы β , который измеряли в градусах ($^{\circ}$). По расстоянию между точками K и L определяли ширину переднего отдела стопы t , которая наряду с углом стопы β является важным критерием для оценки изменения поперечных размеров стопы после заимствования аутотрансплантатов пальцев. Площадь опоры стоп s определяли по показаниям прибора. Для оценки асимметрии величин плантографических характеристик между контралатеральными стопами рассчитывали различия: абсолютные – между углами стопы $\Delta\beta$ ($^{\circ}$) и относительные – между показателями ширины Δt и площади Δs стопы (%).

Для оценки распределения нагрузки между нижними конечностями применяли метод стабилометрии с использованием программно-аппаратного комплекса «Биомеханика» (ООО НМФ «МБН», Россия). Регистрировали параметры статокинезиограмм с открытыми и с закрытыми глазами, тем самым получали данные о колебаниях центра давления (ЦД) тела каждого обследуемого. Это давало возможность рассчитать величины показателей вертикального баланса: координаты X (мм) и Y (мм) – отклонение ЦД тела соответственно по осям X и Y, то есть во фронтальной и сагиттальной плоскостях. Оценивали разброс колебаний ЦД относительно среднего положения во фронтальной и сагиттальной плоскостях: соответственно x и y (мм). Рассчитывали соотношение y/x – отношение большого диаметра (y)

эллипса статокинезиограммы к его малому диаметру (x). Оценивали площадь эллипса статокинезиограммы S (мм^2) и линейную скорость центра давления V (мм/с). Для определения нормальных плантографических и стабилметрических показателей обследовали 18 здоровых детей того же возраста.

Статистическую обработку данных производили с использованием программы SPSS Statistics 22 (разработчик IBM, США). Для оценки различий между выборками использовали критерий Манна–Уитни и F-критерий Фишера. Пороговый уровень статистической значимости принимали при значении критерия $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. Перед операцией у пациентов средняя величина угла стопы составляла $16[14 - 17]^\circ$, которая не имела значимых отличий от таковой у здоровых детей – $16[15 - 17]^\circ$ ($p=0,987$). Выраженность асимметрии показателей $\Delta\beta$, Δt и Δs контралатеральных стоп у пациентов не была увеличена по сравнению с нормой (табл. 1). Подобная незначительная асимметрия параметров плантографии между левой и правой стопами подтверждена другими исследователями, объясняется церебральной латеритизацией головного мозга и расценивается как физиологическая [11]. Таким образом, в группе пациентов перед операцией угловые и линейные параметры стоп соответствовали норме, распределение статической нагрузки было равномерным по отделам стоп с обеих сторон.

Таблица 1

Изменение параметров плантографии ($Me [Q_{25} - Q_{75}]$) донорской стопы у пациентов после операции в зависимости от количества заимствованных пальцев

Параметры	Группы обследованных детей				p
	Здоровые дети (1) $n=18$	До операции (2) $n=33$	Пациенты		
			После заимствования пальцев		
			1-я группа (3)	2-я группа (4) $n=14$	
$\Delta\beta$ ($^\circ$)	1 [0 – 2]	2 [0 – 3]	4 [3 – 5]	11 [10 – 13]	$p^{1-2} = 0,817$ $p^{2-3} = 0,002$ $p^{2-4} < 0,001$ $p^{3-4} < 0,001$
Δt , %	2 [2 – 3]	2 [2 – 3]	8 [6 – 11]	17 [15 – 20]	$p^{1-2} = 0,469$ $p^{2-3} < 0,001$ $p^{2-4} < 0,001$ $p^{3-4} < 0,001$
Δs , %	2 [1 – 3]	1 [1 – 2]	15 [12–19]	26 [23 – 30]	$p^{1-2} = 0,703$ $p^{2-3} < 0,001$ $p^{2-4} < 0,001$ $p^{3-4} < 0,001$

Примечание: $\Delta\beta$ – различия между величинами углов стопы, Δt – различия между показателями ширины стопы, Δs – различия между показателями площади стопы

После операций заимствования аутотрансплантатов пальцев для микрохирургической пересадки на кисть средняя величина угла стопы уменьшилась до величины 14[11 – 15]° у пациентов первой группы ($p=0,012$), до величины 7[5 – 9]° у пациентов второй группы ($p<0,012$). При этом значимо увеличились по сравнению с исходными величины медианных значений асимметрии всех показателей: $\Delta\beta$ и Δt в 2 раза, Δs в 15 раз – у пациентов первой группы. У пациентов второй группы произошло более выраженное нарастание асимметрии: $\Delta\beta$ – почти в 6 раз, Δt – почти в 9 раз, Δs в 26 раз. Таким образом, у пациентов после заимствования пальцев со стопы происходит уменьшение ее угла и ширины, а также снижение площади ее опоры. Необходимо учитывать, что изменение анатомических соотношений донорской стопы может сказаться на биомеханике ходьбы оперированных пациентов. В норме при ходьбе в периоде опоры стопы распространение статической нагрузки по ней происходит веерообразно – сначала одна пяточная кость в фазу нагружения пятки, затем кубовидная и три клиновидные кости в фазу переката, далее – пять головок плюсневых костей. Уменьшение угла и ширины стопы у пациентов после удаления пальцев, особенно блока из 2–3-го пальцев, влечет за собой изменение формы стопы из трапециевидной в практически прямоугольную. Это приводит к нарушению направленности векторов сил, взаимное расположение которых в стопе становится не веерообразным, а параллельным. Снижение площади опоры донорской стопы, особенно выраженное у пациентов с заимствованием блока из двух пальцев, указывает на существенную асимметрию распределения подошвенного давления между контралатеральными стопами, которая является нежелательным фактором для функционирования опорно-двигательной системы [12]. Необходимо также принимать во внимание, что заимствование пальцев осуществляется в области продольной оси стопы, которая проходит через середину пятки и середину головок 2-й и 3-й плюсневых костей. Вдоль этой линии в фазу переката перемещается траектория движения центра давления стопы [13]. Остается совершенно неизученным возможное отягощающее влияние указанного фактора на биомеханику ходьбы пациентов.

Таблица 2

Изменение параметров стабилотрии ($Me [Q_{25} - Q_{75}]$) у пациентов после операции в зависимости от количества заимствованных пальцев с донорской стопы

Параметры	Группы обследованных детей				P
	Здоровые дети (1) $n = 18$	Пациенты			
		До операции (2) $n = 33$	После заимствования пальцев		
			1-я группа (3)	2-я группа (4) $n = 14$	

Координата X (мм)	0 [-1 – 1]	0 [-2 – 1]	1 [-2 – 3]	--2 [-6 – 5]	$p^{2-3} = 0,877$ $p^{2-4} = 0,586$ $p^{3-4} = 0,713$
Площадь S (мм ²)	490 [410 – 560]	517 [409 – 628]	643 [492–798]	998 [780 – 1221]	$p^{2-3} = 0,378$ $p^{2-4} < 0,001$ $p^{3-4} = 0,008$
Скорость V (мм/с)	5,1 [4,9 – 5,3]	5,2 [4,9 – 5,5]	7,5 [6,7 – 8,3]	8,7 [7,9 – 9,6]	$p^{2-3} < 0,001$ $p^{2-4} < 0,001$ $p^{3-4} = 0,024$
Соотношение y/x	1,6 [1,4 – 1,8]	1,4 [1,2 – 1,7]	1,2 [1,1 – 1,5]	1,0 [0,8 – 1,3]	$p^{2-3} = 0,883$ $p^{2-4} = 0,036$ $p^{3-4} = 0,062$

Примечание: все тесты – при открытых и закрытых глазах

При анализе вертикального баланса туловища у пациентов перед хирургическим лечением не было выявлено значимых отклонений стабилметрических показателей от нормальных величин ($p > 0,05$). После заимствования аутотрансплантатов пальцев со стопы у пациентов обеих групп медианные показатели фронтального баланса значимо не изменились, в то время как квартильные интервалы параметра X претерпели расширение. У пациентов первой группы послеоперационный разброс показателей X оказался невыраженным по сравнению с предоперационным, различия между дисперсиями выборок оставались незначимыми: критерий Фишера $F = 0,873$ при $p = 0,771$. Наоборот, у пациентов второй группы разброс показателей X после операции существенно увеличился, различия между дисперсиями выборок стали значимыми: критерий Фишера $F = 0,334$ при $p = 0,012$. Направленность смещения ЦД у пациентов была противоположной стороне оперированной нижней конечности. Это можно объяснить тем, что после заимствования пальцев с донорской стопы ее опорность частично снижается, при этом наблюдается адаптивная реакция опорно-двигательной системы – компенсаторная разгрузка оперированной нижней конечности с переносом веса тела на интактную нижнюю конечность [14].

Отклонения от нормы в показателях площадей статокинезиограмм S и скоростей центров давления V были более выраженными у пациентов второй группы по сравнению с первой.

Анализ соотношений большого диаметра (y) эллипса статокинезиограмм к его малому диаметру (x) показал, что в норме фигура эллипса вытянута в сагиттальной плоскости (рис. 4А).

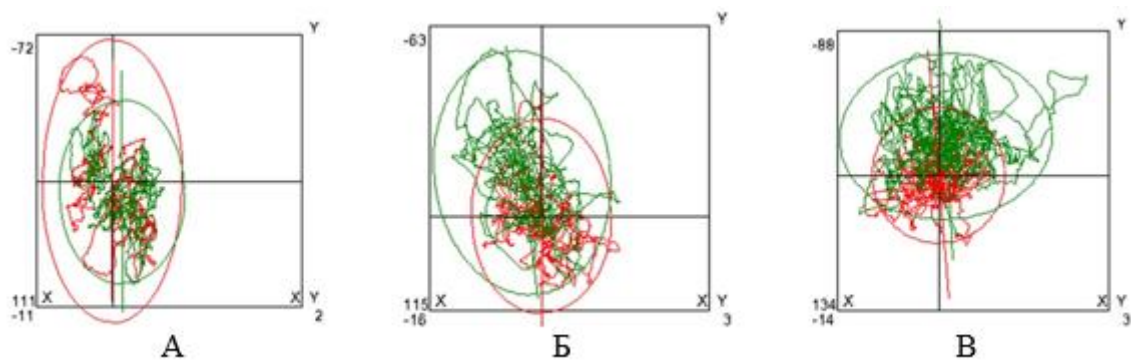


Рис. 4. Графическое изображение статокинезиограмм обследованных детей: А) здорового ребенка; Б) пациента после заимствования II пальца с правой стопы; В) пациента после заимствования блока II и III пальцев с правой стопы. Красный цвет – тест с открытыми глазами; зеленый цвет – тест с закрытыми глазами

У пациентов первой группы после операции эллипс несколько приплюснут, однако по показателю y/x соответствует норме, что свидетельствует о преимущественно переднезадней направленности колебаний ЦД пациентов (рис. 4Б). Такая направленность колебаний считается физиологической и является признаком хорошей стабильности вертикального баланса. У пациентов второй группы после операции отмечается тенденция к вытягиванию фигуры эллипса во фронтальной плоскости (рис. 4В), о чем свидетельствует снижение отдельных показателей y/x до величины менее 1,0. Такая боковая направленность колебаний ЦД биомеханически невыгодна опорно-двигательной системе, что может предполагать напряженность и быструю утомляемость механизмов пострурального контроля у пациентов второй группы. Однако через 6 и более месяцев после пересадки одного пальца стопы и через год после пересадки блока 2–3-го пальцев стопы данные описываемых исследований приближались к норме, при этом в 96% случаев не отмечалось нарушения функции стоп, не наблюдалась хромота, дети не жаловались на боли и какие-либо проблемы, связанные с ходьбой, бегом, прыжками.

Выводы

1. Плантографический и стабилметрический методы исследования позволяют объективно оценить функциональное состояние опорно-двигательной системы у детей после заимствования пальцев стопы при микрохирургической аутотрансплантации на кисть.
2. Хирургическое заимствование аутотрансплантатов пальцев с донорских стоп приводит к отклонениям в показателях биомеханических характеристик опорно-двигательной системы пациентов в первые полгода после операции.
3. Имеет значение количество заимствованных пальцев со стопы: после аутотрансплантации одного пальца функция стопы восстанавливалась в течение 6 месяцев,

после пересадки блока 2–3-го пальцев нормализация биомеханических показателей происходила в течение 1 года.

Список литературы

1. Jones N.F., Graham D., Au K. Bilateral Metacarpal Hands: Reconstruction With 6 Toe Transfers // *Hand*. 2019. Vol. 7. no. 6. P. 923-928. DOI: 10.1177/1558944718810844.
2. Forte A.J., Makita K.C., Torres-Guzman R.A., Avila F.R., Safe B., Buncke G., Buntic R., Watt A. Great Toe Transplantation // *Semin Plast Surg*. 2022. Vol. 36. no. 4. P. 243-252. DOI: 10.1055/s-0042-1758689.
3. Kotkansalo T., Vilkki S.K., Elo P. The functional results of post-traumatic metacarpal hand reconstruction with microvascular toe transfers // *J. Hand Surg Eur*. 2009. no. 34. P. 730-742.
4. Голяна С.И., Авдейчик Н.В., Гранкин Д.Ю., Сафонов А.В. Микрохирургическая аутотрансплантация пальцев стопы на кисть у детей // *Современные проблемы науки и образования*. 2019. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29371>. (дата обращения: 25.10.2023). DOI: 10.17513/spno.29371.
5. Wei F.C., Lutz B.S., Cheng S.L., Chuang D.C. Reconstruction of bilateral metacarpal hands with multiple-toe transplantations // *Plast Reconstr Surg*. 1999. Vol. 104. no. 6. P. 1698-1704. DOI: 10.1097/00006534-199911000-00013.
6. Maruccia M., Kiranantawat K., Yeo M.S.W., Nicoli F., Ciudad P., Chen H.C. Donor site of toe transfer: is combined second and third toe transfer the better choice? A 31 years of long-term follow-up // *Microsurgery*. 2014. Vol. 34. no. 6. P. 500-501. DOI: 10.1002/micr.22268.
7. Tsai T.Y., Fries C.A., Hsiao J.C., Hsu C.C., Lin Y.T., Chen S.H., Lin C.H., Wei F.C., Lin C.H. Patient-Reported Outcome Measures for Toe-to-Hand Transfer: A Prospective Longitudinal Study // *Plast Reconstr Surg*. 2019. Vol. 143. no. 4. P. 1122-1132. DOI: 10.1097/PRS.0000000000005422.
8. Rosende-Bautista C., Munuera-Martínez P.V., Seoane-Pillado T., Reina-Bueno M., Alonso-Tajes F., Pérez-García S., Domínguez-Maldonado G. Relationship of body mass index and footprint morphology to the actual height of the medial longitudinal arch of the foot // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021. Vol. 18. no. 18. P. 9815. DOI: 10.3390/ijerph18189815.
9. Никитюк И.Е., Кононова Е.Л., Никитин М.С., Афоничев К.А. Патологическая гиперсинхронизированность системы управления балансом тела у детей с послеожоговой деформацией стопы // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2019. Т. 7. № 2. С. 61-68. DOI: 10.17816/PTORS7261-68.

10. Годунов С. Ф. О конфигурации подошвы стопы и обуви // Ортопед. травматол. 1971. № 7. С. 31-35.
11. Nirenberg M.S., Ansert E., Krishan K., Kanchan T. Two-dimensional metric comparisons between dynamic bare footprints and insole foot impressions-forensic implications // Sci. Justice. 2020. Vol. 60. no. 2. P. 145-150. DOI: 10.1016/j.scijus.2019.12.001.
12. Kim J., Park B.Y., Mun S.J., Shim J., Choi E.S., Noh H. Differences in plantar pressure by REBA scores in dental hygienists // Int. J. Dent. Hyg. 2019. Vol. 17. no. 2. P. 177-182. DOI: 10.1111/idh.12375.
13. Wan D.P., Bao H.L., Wang J.P., Wei J., Ma J.B., Yao S.X., Xu C. Plantar Pressure Distribution and Posture Balance During Walking in Individuals with Unilateral Chronic Ankle Instability: An Observational Study // Med. Sci Monit. 2023. no. 29. P. e940252. DOI: 10.12659/MSM.940252.
14. Дашевский И.Н., Никитин С.Е. Биомеханика разгрузки нижних конечностей при ортезировании // Российский журнал биомеханики. 2016. Т. 20. № 2. С. 134-149.