

ИЗМЕНЕНИЕ БИОМЕХАНИКИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ У ДЕТЕЙ С РАЗНОВЕЛИКОСТЬЮ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИХ ДЛИНЫ

Никитюк И.Е.¹, Гаркавенко Ю.Е.^{1,2}, Савина М.В.¹

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии имени Г.И. Турнера» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, e-mail: femtotech@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Северо-западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург

Цель исследования – анализ динамики постуральной стабильности у детей с разноразмерностью нижних конечностей до и после имитации компенсации укорочения пораженной конечности. Проведено биомеханическое исследование 12 детей в возрасте от 10 до 16 лет с разноразмерностью нижних конечностей. Одностороннее укорочение нижней конечности у пациентов варьировало от 4 до 8 см, средняя величина компенсации составляла 4,0[3,0 – 6,0] см. Группа контроля состояла из 20 здоровых детей того же возраста. Плантографическим методом оценивали опорную функцию стоп, вертикальный баланс тела изучали с использованием двух стабилметрических платформ. При отсутствии компенсации укорочения плантография выявила у пациентов на стороне поражения участие в акте опоры только переднего отдела стопы при дефиците опорности пятки. Наряду с этим диагностировали нарушения постурального контроля как на укороченной стороне, так и на интактной. Интактной нижней конечности была присуща преимущественно опорная функция, а укороченной – преимущественно регулирующая. При имитации выравнивания длины нижних конечностей у пациентов отмечались признаки положительной динамики показателей постурального баланса тела, проявлением которой являлась нормализация положения общего центра давления в сагиттальной плоскости, обусловленная восстановлением опорности заднего отдела стопы пораженной нижней конечности. Это привело к трансформации опорных стратегий контралатеральных нижних конечностей, в результате чего произошло функциональное выравнивание сторон: повышение опорности пораженной стороны при улучшении регулирующей функции – интактной. Понимание механизмов адаптивных реакций опорно-двигательной системы на устранение разноразмерности нижних конечностей предполагает индивидуальный подход к выбору величины компенсации укорочения.

Ключевые слова: дети, одностороннее укорочение нижней конечности, стабилметрия.

CHANGES IN THE BIOMECHANICS OF THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM IN CHILDREN WITH LIMB LENGTH DISCREPANCE WHEN MODELING THE RESTORATION OF THEIR LENGTH

Nikityuk I.E.¹, Garkavenko Yu.E.^{1,2}, Savina M.V.¹

¹H. Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, Saint Petersburg, Russia, e-mail: femtotech@mail.ru;

²North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg

The aim of the study was to analyze the dynamics of postural stability in children with different sizes of the lower extremities before and after imitation of compensation for shortening of the affected limb. A biomechanical study of 12 children aged 10 to 16 years with different sizes of the lower extremities was conducted. Unilateral shortening of the lower limb in patients ranged from 4 to 8 cm, the average compensation was 4.0[3.0 – 6.0] cm. The control group consisted of 20 healthy children of the same age. The supporting function of the feet was evaluated by the plantographic method, the vertical balance of the body was studied using two stabilometric platforms. In the absence of compensation for shortening, plantography revealed in patients on the affected side the participation in the act of supporting only the forefoot with a lack of heel support. Along with this, violations of postural control were diagnosed both on the shortened side and on the intact side. The intact lower limb had a predominantly supporting function, while the shortened one had a predominantly regulating function. When simulating the alignment of the length of the lower extremities, patients showed signs of positive dynamics in the postural balance of the body, the manifestation of which was the normalization of the position of the general center of pressure in the sagittal plane, due to the restoration of the support of the posterior part of the foot of the affected lower limb. This led to a transformation of the supporting strategies of the contralateral lower extremities, as a result of which there was a functional alignment of the sides: an increase in the support of the

affected side while improving the regulatory function – intact. Understanding the mechanisms of adaptive reactions of the musculoskeletal system to eliminate the diversity of the lower extremities involves an individual approach to choosing the amount of compensation for shortening.

Keywords: children, unilateral shortening of the lower limb, stabilometry.

Введение

Разновеликость нижних конечностей у детей является частым симптомом поражения опорно-двигательной системы, она проявляется нарушением кинематики ходьбы пациентов [1], а также отклонениями в биомеханике как укороченной, так и интактной нижней конечности [2]. Принято считать, что в процессе роста детей с разновеликостью нижних конечностей постепенно формируется вторичный сколиоз вследствие постоянного перекаса таза при вертикальном положении тела [3]. Однако до сих пор исследователи расходятся в точках зрения на величину укорочения, которая может привести к вторичным деформациям опорно-двигательной системы. Одни авторы считают, что уже незначительное одностороннее укорочение нижней конечности провоцирует развитие сколиоза [4]. Другие клиницисты не выявляли деформации позвоночника у детей даже при существенной разнице в длине нижних конечностей, достигавшей 7 см [5], что объясняется формированием опорно-двигательной системой разнообразных компенсаторных механизмов [6]. Наиболее частым адаптивным механизмом является активное динамическое удлинение пациентом укороченной нижней конечности путем эквинусной установки стопы со смещением ее опорности в сторону переднего отдела [7]. Хотя клиницисты отмечают улучшение функции пораженной нижней конечности после ее хирургического удлинения [8], вопросы восстановления биомеханики опорно-двигательной системы после коррекции длины нижних конечностей изучены недостаточно. Исследования по имитации выравнивания длины нижних конечностей у пациентов могут позволить получить представление о трансформации механизмов управления их локомоциями, что целесообразно принимать во внимание при проведении восстановительного лечения.

Цель исследования – анализ динамики постуральной стабильности у детей с разновеликостью нижних конечностей до и после имитации компенсации укорочения пораженной конечности.

Материал и методы исследования. Проведено биомеханическое исследование 12 детей в возрасте от 10 до 16 лет с разновеликостью нижних конечностей. Одностороннее укорочение нижней конечности у пациентов варьировало от 4 до 8 см и было обусловлено поражением ростковых зон бедренной кости вследствие ее травмы или перенесенного гематогенного остеомиелита.

Для оценки опорной функции стоп проводили плантографическое исследование с помощью диагностического комплекса «Подоскан» (НМФ «МБН», Россия) (рис. 1).

Вертикальный баланс тела определяли в процессе стабилметрического исследования с открытыми и закрытыми глазами, используя комплекс «Стабилан 01-2» (ОКБ РИТМ, Россия) в двухплатформенном варианте.

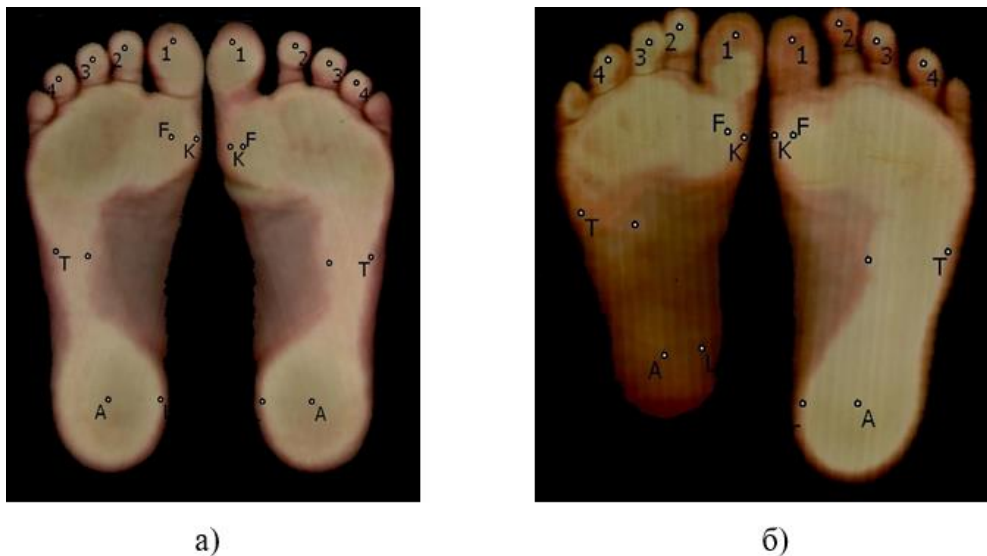


Рис. 1. Плантограммы обследованных детей при двуопорной нагрузке на стопы: а) здорового ребенка; б) пациента Н., 15 лет, с укорочением левой нижней конечности 6 см – выявляется отсутствие опорности заднего отдела левой стопы

Первое исследование проводилось по стандартной схеме без имитации восстановления длины укороченной нижней конечности. При этом обследуемые дети становились на стабилоплатформы босыми, располагая стопы по одной на каждую платформу – параллельно друг другу. Всем обследуемым предлагалось занять наиболее удобное вертикальное положение, что у некоторых пациентов сопровождалось отрывом пятки на стороне поражения от платформы с сохранением опорности переднего отдела стопы.

Второе исследование осуществляли с компенсацией укорочения пораженной нижней конечности путем моделирования восстановления ее длины. Для этого предварительно с помощью подставки под стопу определяли высоту компенсации, при которой пациент комфортно ощущал имитацию удлинения нижней конечности. Перед исследователями не ставилась задача полного «выравнивания» длины нижних конечностей, так как это может нарушить биомеханику и затруднить компенсирующие функции опорно-двигательной системы с последующим снижением качества жизни пациентов [9]. Поэтому высота компенсирующей подставки для каждого пациента была индивидуальной. Она могла или точно соответствовать разнице длин нижних конечностей, или быть меньше на 1–2 см. В дальнейшем платформу под укороченной нижней конечностью поднимали на соответствующую высоту и проводили регистрацию стабилметрических параметров, как и

в первом исследовании. При этом средняя величина разновеликости нижних конечностей составляла 4,5[4,0 – 8,0] см, а средняя величина компенсации укороченной нижней конечности – 4,0[3,0 – 6,0] см. Группа контроля состояла из 20 здоровых детей того же возраста.

Регистрировали стабилметрические параметры: отклонение общего центра давления (ЦДО) тела во фронтальной X_0 (мм) и в сагиттальной Y_0 (мм) плоскостях, линейную скорость V_0 (мм/с), площади S_0 (мм²) стахокинезиограмм. Оценивали параметры движения центров давления контралатеральных нижних конечностей: индивидуальное смещение центров давления на укороченной (ЦДУ) и интактной (ЦДИ) стороне в сагиттальной плоскости – Y_y и Y_n (мм), линейные скорости V_y и V_n (мм/с), показатели LFS_y и LFS_n (мм⁻¹), качество функции равновесия $KФР_y$ и $KФР_n$ (%), а также показатели длины y_y и y_n (мм), ширины x_y и x_n (мм), площади S_y и S_n (мм²), коэффициенты сжатия $KС_y$ и $KС_n$, углы направления колебаний a_y и a_n стахокинезиограмм.

Статистический анализ проводили с использованием программы Statgraphics Centurion 16.2 (разработчик Statpoint Technologies, Inc., США). Использовали критерии Манна–Уитни и Вилкоксона с уровнем для принятия различий 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение. При плантографическом исследовании у пациентов было выявлено нарушение опорной функции укороченной нижней конечности. На плантограммах это демонстрировалось асимметричным характером распределения нагрузки по подошвенной поверхности контралатеральных стоп. В связи с односторонним укорочением нижней конечности пациенты компенсаторно функционально «удлиняли» ее за счет разгибания коленного и голеностопного суставов. При этом на стороне поражения в акте опоры принимал участие только передний отдел стопы при выключенном заднем.

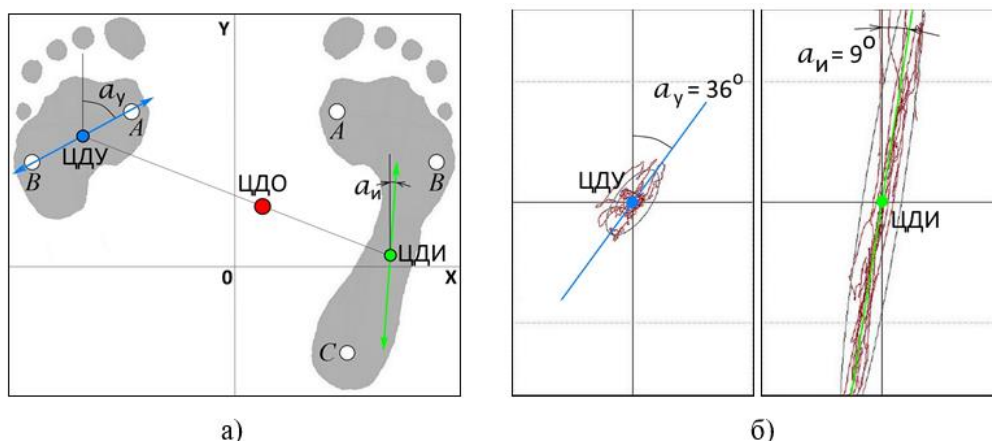


Рис. 2. Схемы движений центров давления нижних конечностей пациентов без компенсации укорочения на левой стороне: а) медианные показатели углов a_y и a_n и координат ЦД; б) стахокинезиограммы пациента Н., 15 лет, с левосторонним укорочением нижней

конечности 6 см. А и В – соответственно головки 1-й 5-й плюсневых костей, С – пяточная кость

Хотя считается, что интактная нижняя конечность также уравнивает баланс тела за счет ее функционального укорочения путем сгибания в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах [10], плантографические исследования не выявили нарушения ее функции.

В первом стабилметрическом исследовании у детей с разновеликостью нижних конечностей были выявлены резко выраженные нарушения пострурального баланса. У всех пациентов определялось существенное отклонение ($p < 0,05$) общего центра давления тела во фронтальной плоскости в сторону интактной нижней конечности на величину X_0 , равную 16[3 – 60] мм (рис. 2а). Указанное латеральное смещение ЦДО тела по оси X значительно превышало нормативный показатель, равный 0[-1 – 1] мм ($p < 0,05$), что являлось компенсаторной реакцией опорно-двигательной системы пациентов на одностороннее укорочение нижней конечности – частичное перераспределение веса тела с пораженной стороны на интактную [11].

Таблица 1

Стабилметрические показатели ($Me [Q_{25} - Q_{75}]$) здоровых детей и пациентов с разновеликостью нижних конечностей

Параметры	Группы обследованных детей						p
	Здоровые дети n=20		Пациенты с разновеликостью НК n=12				
			Без компенсации		С компенсацией		
	Левая НК (1)	Правая НК (2)	Укороченная НК (3)	Интактная НК (4)	Укороченная НК (5)	Интактная НК (6)	
Смещение Y (мм)	3 [-2 – 4]	6 [2 – 7]	80 [61 – 95]	7 [-2 – 33]	17 [9 – 37]	-12 [-26 – 6]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} = 0,001$
Длина оси x (мм)	0,4 [0,3–0,5]	0,3 [0,2–0,4]	1,1 [0,6–2,2]	0,9 [0,7–1,2]	1,1 [0,5–2,6]	0,8 [0,4–1,3]	$p^{3-4} = 0,223$ $p^{5-6} = 0,039$
Длина оси y (мм)	2,4 [2,1–2,9]	2,3 [1,8–3,0]	0,7 [0,5–1,1]	6,7 [4,4–11]	3,5 [2,2–6,3]	3,5 [2,3–5,5]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} = 0,991$
Площадь S (мм ²)	4 [3 – 7]	5 [4 – 8]	7 [4 – 15]	51 [33 – 89]	40 [14 – 81]	26 [9 – 46]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} = 0,158$
Скорость V (мм/с)	5 [4 – 6]	5 [4 – 7]	5 [4 – 8]	19 [12 – 25]	9 [7 – 13]	10 [6 – 16]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} = 0,757$
КС	18 [12 – 31]	15 [10 – 23]	4 [3 – 6]	16 [9 – 27]	7 [4 – 11]	8 [6 – 13]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} = 0,358$
α (град)	-7 [-9 – -5]	6 [4 – 9]	62 [36 – 79]	5 [2 – 8]	-11 [-36 – -4]	7 [4 – 11]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} < 0,001$
LFS (мм ⁻¹)	26 [20 – 34]	23 [16 – 32]	17 [13 – 23]	8 [6 – 11]	6 [4 – 12]	12 [5 – 17]	$p^{3-4} = 0,001$ $p^{5-6} = 0,061$

КФР (%)	94 [91 – 95]	94 [90 – 96]	94 [86 – 97]	52 [38 – 72]	85 [68 – 91]	78 [60 – 92]	$p^{3-4} < 0,001$ $p^{5-6} = 0,649$
----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	--

Примечание: $p^{3-4; 5-6}$ – уровень значимости различий между укороченной и интактной нижними конечностями (НК) у пациентов.

В сагиттальной плоскости у пациентов наблюдалось патологическое отклонение ЦДО тела кпереди на величину Y_0 26[20 – 56] мм, которая превышала показатели здоровых детей 3[-1 – 5] мм ($p < 0,05$). Указанный факт может быть объяснен двумя причинами: смещением на стороне поражения точки опоры в область переднего отдела стопы и увеличением наклона таза вперед, сформировавшегося компенсаторно вследствие разновеликости нижних конечностей [12]. Анализ индивидуального баланса контралатеральных нижних конечностей выявил у пациентов резко выраженное переднее отклонение ЦД по оси Y на стороне поражения по сравнению с интактной стороной, что обусловлено смещением опорности стопы укороченной нижней конечности в ее передний отдел (табл. 1). Отмечалась выраженная асимметрия в показателях ЦД контралатеральных нижних конечностей: длинной оси у эллипсов и коэффициентов сжатия КС статокнезиограмм, а также параметров LFS. При этом на укороченной нижней конечности показатели линейной скорости V_y и площади S_y соответствовали нормальным величинам, что подтверждалось высоким уровнем качества функции равновесия $КФР_y$, которое характерно для здоровых детей. На интактной нижней конечности, наоборот, отмечалось патологическое увеличение по сравнению с нормой параметров V_n и площади S_n , что соответствовало сниженному уровню качества функции равновесия $КФР_n$. Продемонстрированные различия в показателях стабилотрии подтверждают факт существования функциональной асимметрии у пациентов с разновеликостью нижних конечностей в соответствии с их функциональной специализацией [13]. В соответствии с изложенным, можно предположить, что для интактной нижней конечности характерна преимущественно опорная функция, для укороченной – преимущественно регулирующая. Так как интактная нижняя конечность выполняет функцию опоры, колебания ее центра давления направлены вдоль оси стопы в соответствии с ориентацией продольных сводов, поэтому они отклоняются от сагиттальной оси на небольшой угол α_n , величина и ориентация которого соответствуют норме (рис. 2б). В то же время на укороченной нижней конечности из-за снижения площади опоры направленность колебаний α_y ее центра давления соответствовала поперечному своду стопы в переднем отделе и была ориентирована по сравнению со здоровыми детьми с инверсией – в противоположную сторону со значительным отклонением.

Во втором стабилотрическом исследовании при имитации выравнивания длины нижних конечностей у пациентов отмечалась положительная динамика показателей

постурального баланса тела. Качество функции равновесия **КФР_о** тела улучшилось с 54[38 – 77]% до 72[58 – 87]% ($p=0,014$), линейная скорость **V_о** общего центра давления тела снизилась с 18[11 – 23] мм/с до 12[8 – 16] мм/с ($p=0,012$), наметилась тенденция к уменьшению площади **S_о** статокинезиограмм с 180[74 – 234] мм² до 97[50 – 181] мм² ($p=0,132$). В сагиттальной плоскости было отмечено смещение ЦДО тела кзади до величины -3[-7 – 9] мм ($p<0,05$), что указывает на нормализацию показателя **Y_о**. Указанные факты обусловлены трансформацией опорной стратегии пораженной нижней конечности, которая привела к восстановлению нагрузки на задний отдел стопы и более упорядоченному положению ЦДО в переднезаднем направлении (рис. 3а). При этом во фронтальной плоскости медианные показатели **X_о** общего ЦД практически не изменились ($p=0,392$) и составили 15[8 – 17] мм, а разброс квартильных показателей значительно сузился. Таким образом, имитация восстановления длины укороченной нижней конечности не оказала существенного влияния на распределение нагрузки между контралатеральными конечностями. Несмотря на компенсацию укорочения, у пациентов превалировал щадящий механизм постуральной стратегии, заключающийся в частичной разгрузке пораженной нижней конечности при сохранности функциональных резервов ее опорности на фоне неполного переноса веса тела на интактную сторону.

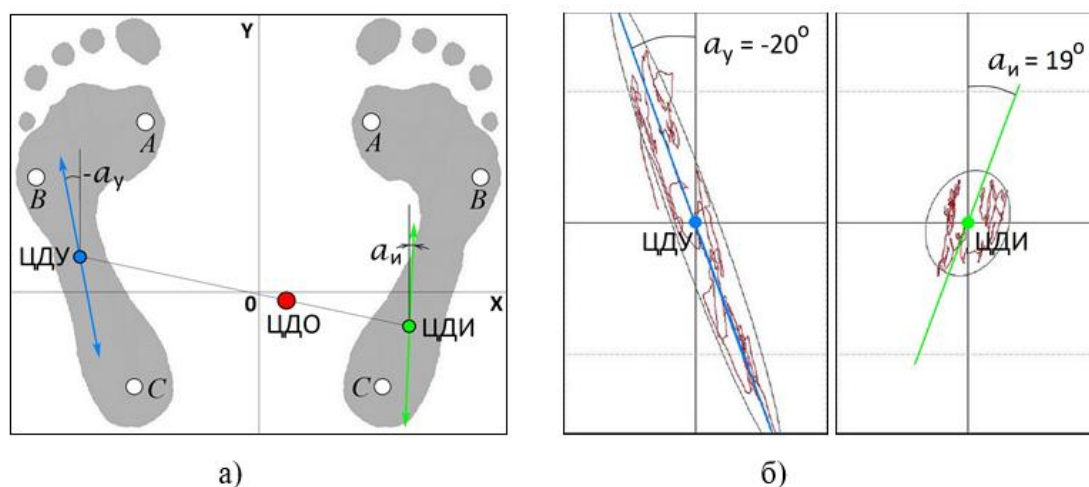


Рис. 3. Схемы движений центров давления нижних конечностей пациентов с компенсацией укорочения на левой стороне: а) медианные показатели углов α_y и α_n и координат ЦД; б) статокинезиограммы пациента Н., 15 лет, с левосторонним укорочением нижней конечности 6 см. А и В – соответственно головки 1-й 5-й плюсневых костей, С – пяточная кость

После компенсации укорочения у пациентов обеих групп произошли изменения во взаиморасположении центров давления контралатеральных нижних конечностей. В связи с восстановлением опорности заднего отдела стопы на стороне поражения наблюдалась

диспозиция ЦДУ в каудальном направлении, что приближало его локализацию к норме. В то же время на интактной стороне произошло избыточное смещение ЦДИ кзади, что может быть обусловлено инерционностью биомеханической стратегии тела, которая обеспечивает сохранность взаиморасположения центров давления контралатеральных нижних конечностей в сагиттальной плоскости независимо от внешних воздействий на опорно-двигательную систему. При этом было отмечено некоторое ухудшение стабильности баланса со снижением качества функции равновесия $\mathbf{КФР}_y$ на пораженной стороне при улучшении баланса с увеличением $\mathbf{КФР}_n$ – на интактной. Это проявлялось разнонаправленным изменением параметров движения ЦДУ и ЦДИ: увеличением линейной скорости \mathbf{V}_y центра давления, длинной оси y_y эллипса и площади \mathbf{S}_y статокинезиограмм на укороченной нижней конечности при снижении величин аналогичных показателей – на интактной. Таким образом, на противоположных сторонах наблюдалось выравнивание перечисленных параметров, в том числе показателей \mathbf{LFS} и коэффициентов сжатия $\mathbf{КС}$. Кроме того, на стороне поражения параметр угла \mathbf{a}_y приобрел более физиологическую направленность «против часовой стрелки» и достиг величины, которая соответствует показателям здоровых детей (рис. 3б). Следовательно, имитация компенсации укорочения длины нижней конечности у пациентов приводит к функциональной равнозначности сторон: повышению опорности пораженной стороны при улучшении регулирующей функции – интактной. Понимание адаптивных механизмов опорно-двигательной системы, формирующихся при устранении дисбаланса в длине нижних конечностей, предусматривает индивидуальный подход к выбору величины компенсации укорочения [14]. В связи с тем, что правильное распределение веса тела имеет решающее значение для оптимального процесса остеогенеза в ходе процедуры удлинения нижней конечности с использованием методов внешней фиксации, контроль симметрии распределения веса особенно важен на каждом этапе лечения [15].

Заключение

У детей с разновеликостью нижних конечностей нарушения постурального контроля выявляются как на укороченной стороне, так и на интактной. Вертикальный баланс контралатеральных нижних конечностей у пациентов реализуется с помощью различающихся постуральных стратегий вследствие того, что интактной нижней конечности присуща преимущественно опорная функция, а укороченной – регулирующая. При имитации выравнивания длины нижних конечностей у пациентов отмечались признаки положительной динамики показателей постурального баланса тела, проявлением которой являлась нормализация положения общего центра давления в сагиттальной плоскости, обусловленная восстановлением опорности заднего отдела стопы пораженной нижней конечности. Это привело к трансформации опорных стратегий контралатеральных нижних конечностей, в

результате чего произошло функциональное выравнивание сторон: повышение опорности пораженной стороны при улучшении регулирующей функции интактной. Понимание механизмов адаптивных реакций опорно-двигательной системы на устранение разновеликости нижних конечностей предполагает индивидуальный подход к выбору величины компенсации укорочения.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Zeitoune G., Nadal J., Batista L.A., Metsavaht L., Moraes A.P., Leporace G. Prediction of mild anatomical leg length discrepancy based on gait kinematics and linear regression model // *Gait Posture*. 2019. no. 67. P. 117-121. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.09.027.
2. Никитюк И.Е., Гаркавенко Ю.Е., Захарьян Е.А., Чигвария Н.Г. Исследование вертикального баланса тела у детей с односторонним укорочением нижней конечности // *Современные проблемы науки и образования*. 2022. № 5. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32023> (дата обращения: 25.06.2024). DOI: 10.17513/spno.32023.
3. Buyukaslan A., Abul K., Berk H., Yilmaz H. Leg length discrepancy and adolescent idiopathic scoliosis: clinical and radiological characteristics // *Spine Deformity*. 2022. Vol. 10. no. 2. P. 307-314. DOI: 10.1007/s43390-021-00417-0.
4. Shi Y., Pang H., Xu H., Li X., Cao Y., Merryweather A., Zheng P., Xiang J. Effects of orthotic insole on gait patterns in children with mild leg length discrepancy // *Gait & Posture*. 2022. no. 93. P. 191-197. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2022.02.003.
5. Aiona M., Patrick K.D., Khaled E., Robin D., Rosemary P. Gait patterns in children with limb length discrepancy // *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2015. Vol. 35. no. 3. P. 280-284. DOI: 10.1097/BPO.0000000000000262.
6. Gordon J.E., Davis L.E. Leg Length Discrepancy: The Natural History (And What Do We Really Know) // *J. Pediatr Orthop*. 2019. Vol. 39 (Is. 6, Supplement 1 Suppl 1). P. S10-S13.10-13. DOI: 10.1097/BPO.0000000000001396.
7. Bangerter C., Romkes J., Lorenzetti S., Krieg A.H., Hasler C.C., Brunner R., Schmid S. What are the biomechanical consequences of a structural leg length discrepancy on the adolescent spine during walking? // *Gait Posture*. 2019. no. 68. P. 506-513. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.12.040.

8. Yushan M., Hamiti Y., Yalikun A., Lu C., Yusufu A. Bifocal femoral lengthening assisted by preoperative 3-dimensional design in the restoration of posttraumatic limb length discrepancy // BMC Surg. 2022. Vol. 22. no. 1. P. 245. DOI: 10.1186/s12893-022-01697-7.
9. Pawik Ł., Pawik M., Wrzosek Z., Fink-Lwow F., Morasiewicz P. Assessment of the quality of life in patients with varying degrees of equalization of lower limb length discrepancy treated with Ilizarov method // J. Orthop Surg Res. 2021. Vol. 16. no. 1. P. 62. DOI: 10.1186/s13018-021-02202-1.
10. Siebers H.L., Eschweiler J., Quack V.M., Tingart M., Betsch M. Inertial measurement units for the detection of the effects of simulated leg length inequalities // J. Orthop Surg Res. 2021. Vol. 16. no. 1. P. 142. DOI: 10.1186/s13018-021-02212-z.
11. Никитюк И.Е., Кононова Е.Л., Гаркавенко Ю.Е. Особенности нарушения баланса тела у детей с односторонним укорочением нижней конечности // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2019. Т. 7. № 3. С. 45-54. DOI: 10.17816/PTORS7345-54.
12. Beeck A., Quack V., Rath B., Wild M., Michalik R., Schenker H., Betsch M. Dynamic evaluation of simulated leg length inequalities and their effects on the musculoskeletal apparatus // Gait Posture. 2019. no. 67. P. 71-76. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.09.022.
13. Schorderet C., Hilfiker R., Allet L. The role of the dominant leg while assessing balance performance. A systematic review and meta-analysis // Gait Posture. 2021. no. 84. P. 66-78. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.11.008.
14. Петрова Д.А., Крутелев Н.А., Кенис В.М. Влияние разновеликости нижних конечностей и ее компенсации у детей на амплитуду движения таза во фронтальной плоскости при ходьбе: проспективное когортное исследование 40 пациентов // Вестник восстановительной медицины. 2022. Т. 21. № 4. С. 79-87. DOI: 10.38025/2078-1962-2022-21-4-79-87.
15. Eliks M., Ostiak-Tomaszewska W., Lisiński P., Koczewski P. Does structural leg-length discrepancy affect postural control? Preliminary study // BMC Musculoskelet Disord. 2017. Vol. 18. no. 1. P. 346. DOI: 10.1186/s12891-017-1707-x.