

ОЦЕНКА НАРУШЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО БАЛАНСА ТЕЛА У ДЕТЕЙ С ОДНОСТОРОННИМ ПОРАЖЕНИЕМ ПРОКСИМАЛЬНОГО ОТДЕЛА БЕДРЕННОЙ КОСТИ

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 – оценить нарушения постурального баланса нижних конечностей у детей с неравенством их длины в зависимости от направленности латерального смещения общего центра давления (ЦД) тела. Было обследовано 27 пациентов (10-14 лет) с односторонним укорочением нижней конечности, которые были рандомизированы на группы: I группа ($n=12$) – со смещением общего ЦД в сторону укороченной нижней конечности, II группа ($n=15$) – со смещением общего ЦД в сторону интактной конечности. Группу контроля составили 16 здоровых детей. Обследование осуществляли с использованием двух платформ, что позволяло отдельно регистрировать изменения положения центра давления под каждой нижней конечностью. У пациентов обеих групп выявлена дезорганизация вертикального баланса на укороченной и интактной нижних конечностях, выраженность которой зависит от ориентации смещения общего ЦД тела в медиолатеральном направлении. Наиболее выраженные нарушения постурального контроля по сравнению со здоровыми детьми были в группе пациентов со смещением общего ЦД в сторону интактной нижней конечности, в отличие от пациентов со смещением общего ЦД в сторону укороченной конечности. Это проявлялось нарушением сагиттального баланса тела, обусловленного компенсаторным увеличением наклона таза вперед. Различия в индивидуальной мобильности центров давления укороченной и интактной нижних конечностей были резко выражены по сравнению с нормальными показателями. Имело место патологическое увеличение по сравнению с нормой углов направления колебаний α на укороченной нижней конечности. Выраженные расхождения в стабилметрических показателях между группами пациентов могут быть обусловлены различиями в их постуральных стратегиях, сформированных опорно-двигательной системой в ответ на разнонаправленное нарушение фронтального баланса тела.

Ключевые слова: неравенство длины нижних конечностей, стабилметрия, сагиттальный баланс.

Источник финансирования: работа проведена в рамках выполнения Государственного задания Минздрава России.

ASSESSMENT OF VIOLATIONS OF THE VERTICAL BALANCE OF THE BODY IN CHILDREN WITH UNILATERAL LESION OF THE PROXIMAL FEMUR

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, e-mail: femtotech@mail.ru;

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

The aim of the study was to assess violations of the postural balance of the lower extremities in children with an inequality in their length depending on the direction of lateral displacement of the general center of pressure (COP) of the body. 27 patients (10-14 years old) with unilateral shortening of the lower limb were examined, who were randomized into groups: group I ($n=12$) – with a shift of the total COP towards the shortened lower limb, group II ($n=15$) – with a shift of the total COP towards the intact limb. The examination was carried out using two platforms, which made it possible to separately register changes in the position of the pressure center under each lower limb. In patients of both groups, disorganization of the vertical balance on the shortened and intact lower extremities was revealed, the severity of which depends on the orientation of the displacement of the total COP of the body in the mediolateral direction. The most pronounced violations of postural control compared with healthy children were in the group of patients with a shift of the total COP towards the intact lower limb, in contrast to patients with a shift of the total COP towards the shortened limb. This was manifested by a violation of the sagittal balance of the body, due to a compensatory increase in the forward tilt of the pelvis. The differences in the individual mobility of the pressure centers of the shortened and intact lower extremities were sharply expressed in comparison with normal indicators. There was a pathological increase in comparison with

the norm of the angles of the direction of oscillations α on the shortened lower limb. Pronounced differences in stabilometric indicators between groups of patients may be due to differences in their postural strategies formed by the musculoskeletal system in response to a multidirectional violation of the frontal balance of the body.

Keywords: leg length discrepancy, stabilometry, sagittal balance.

Неравенство длины нижних конечностей является достаточно распространённым проявлением поражения опорно-двигательной системы и может быть обусловлено как врождённой, так и приобретённой патологией. Одностороннее укорочение нижней конечности обычно приводит к нарушению кинематики ходьбы пациента [1], которое значительно снижает качество его жизни [2]. Асимметрия длины нижних конечностей у детей может прогрессировать в процессе их роста, что является причиной появления дисбаланса в распределении нагрузки между контралатеральными конечностями [3]. У клиницистов сложилось представление, что при асимметрии нагрузки в большей степени нарушается функция укороченной нижней конечности. Вместе с тем для минимизации патологического смещения центра масс тела у пациентов формируются компенсаторные стратегии биомеханики опорно-двигательной системы [4], которые проявляются как на укороченной, так и на интактной нижних конечностях [5]. При этом ряд исследователей утверждает, что патологические изменения в интактной нижней конечности развиваются чаще, чем в укороченной [6]. Таким образом, некоторые клинические аспекты при одностороннем укорочении нижней конечности окончательно не выяснены, адаптивные реакции опорно-двигательной системы пациентов требуют дальнейшего изучения [7].

Цель исследования – оценить нарушения постурального баланса нижних конечностей у детей с неравенством их длины в зависимости от направленности латерального смещения общего центра давления тела.

Материал и методы исследования. Проведен ретроспективно-проспективный когортный анализ типа «случай-контроль» результатов стабилметрического исследования за 2018–2022 годы 27 пациентов в возрасте от 10 до 14 лет с односторонним поражением проксимального отдела бедренной кости. У всех больных на стороне поражения выявлено укорочение нижней конечности величиной от 2 до 6 см, развившееся после гематогенного остеомиелита проксимального метаэпифиза бедренной кости. Пациенты, в зависимости от направленности смещения общего центра давления (ЦД) во фронтальной плоскости, были рандомизированы на две группы: I группа (12 пациентов) – со смещением общего ЦД в сторону укороченной нижней конечности, II группа (15 пациентов) – со смещением общего ЦД в сторону интактной нижней конечности. Группу контроля составили 16 здоровых детей того же возраста.

Для изучения вертикального баланса тела применяли билатеральный тест с использованием двухплатформенной методики, что давало возможность регистрировать изменения положения центра давления индивидуально для каждой нижней конечности. Обследуемым детям предлагали встать на две рядом стоящие платформы комплекса «Стабилан 01-2» (ОКБ «РИТМ», Россия) в положении «стопы на ширине плеч». В течение 20 секунд регистрировали параметры движений ЦД тела и нижних конечностей при открытых и закрытых глазах: координаты во фронтальной X (мм) и сагиттальной Y (мм) плоскостях, длину траектории L (мм), площадь статокинезиограммы S (мм²), вектор V_x – проекция линейной скорости ЦД на ось X , вектор V_y – проекция линейной скорости ЦД на ось Y . Вычисляли соотношение V_y/V_x . Рассчитывали дополнительные параметры: **КРИНД** – коэффициент резкого изменения направления движения ЦД (процент резких поворотов вектора скорости более 45° относительно общего количества векторов); α (градусы) – угол среднего направления колебаний (угол отклонения большой оси статокинезиограммы от сагиттальной оси: при повороте по часовой стрелке – угол положительный, против – отрицательный) (рис. 2а).

Статистические расчёты выполнены с использованием программ SPSS 11.5 (разработчик IBM, США) и Statgraphics Centurion 16.2 (разработчик Statpoint Technologies, Inc., США). Использовали критерий Манна-Уитни, применяли корреляционный анализ с использованием коэффициента Спирмена r_s . Уровень для принятия различий составлял 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение. Сравнительный анализ модульных показателей положения общего центра давления во фронтальной плоскости показал значительное его отклонение от абсолютного центра у пациентов первой и второй групп, соответственно $|X_1| = 17[4 - 25]$ мм и $|X_2| = 22[12 - 35]$ мм, в то время как у здоровых детей отклонение ЦД было незначительным $|X| = 0,9 [0,7 - 1,8]$ мм ($p < 0,05$). Указанные отклонения ЦД являются следствием нарушения фронтального баланса туловища, развившегося на фоне перекоса таза у пациентов с разной длиной нижних конечностей [8]. Обе группы пациентов могут считаться однородными как по величине фронтального смещения ЦД, так и по величине укорочения нижней конечности, которое составило, соответственно, $3,7 \pm 0,47$ см и $4,2 \pm 0,34$ см ($p > 0,05$).

Сравнительный анализ положения общего ЦД в сагиттальной плоскости выявил значимое его смещение в заднем и переднем направлениях по оси Y на $17 [-11 - 38]$ мм у пациентов первой группы по сравнению с нормой ($3,5 [1,1 - 5,3]$ мм). В то же время у пациентов второй группы наблюдалось преимущественно переднее смещение общего ЦД ($22 [14 - 50]$ мм) ($p = 0,038$).

При раздельной оценке отклонений ЦД по оси Y под каждой из нижних конечностей различий под интактной НК между группами пациентов выявлено не было (рис. 1а). В то же время у пациентов второй группы по сравнению с первой отмечалось резко выраженное переднее отклонение ЦД под укороченной НК.

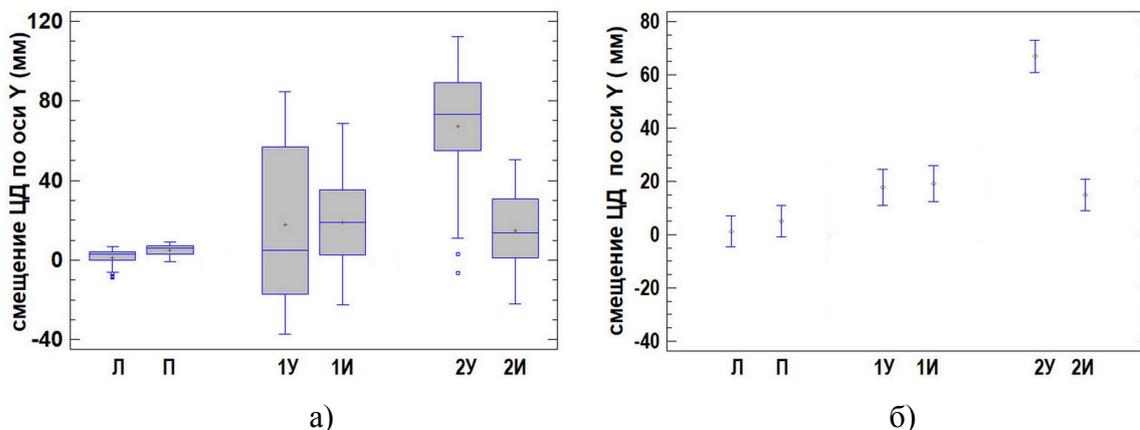


Рис. 1. Диаграммы смещения ЦД нижних конечностей по оси Y обследованных детей:

а) диаграмма box plot; б) диаграмма 95%-ных интервалов средних значений.

Л и П – левая и правая нижние конечности у здоровых детей; 1У и 1И – укороченная и интактная нижние конечности у пациентов первой группы; 2У и 2И – укороченная и интактная нижние конечности у пациентов второй группы

При этом в обеих группах больных интервалы средних значений координат Y центров давления поражённых и интактных нижних конечностей в 95,0% случаев не перекрываются с аналогичными показателями здоровых детей, что указывает на их несовпадение (рис. 1б).

Таблица 1

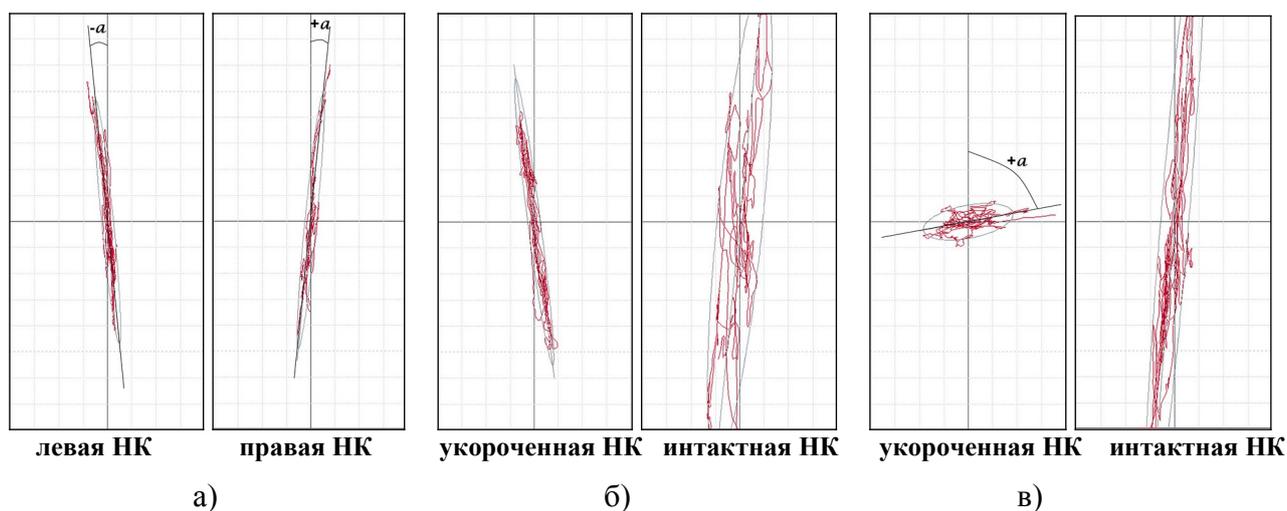
Стабилометрические показатели нижних конечностей (Me [Q₂₅ – Q₇₅]) у здоровых детей и пациентов с односторонним укорочением НК

Параметры	Группы детей					p
	Здоровые (1) (среднее значение), n = 32	Пациенты				
		Группа I		Группа II		
		Укороченная НК (2), n = 12	Интактная НК (3), n = 12	Укороченная НК (4), n = 15	Интактная НК (5), n = 15	
Длина L, мм	116 [96 – 143]	210 [157 – 346]	443 [218 – 1080]	188 [129 – 289]	442 [333 – 623]	p ²⁻⁴ = 0,159 p ³⁻⁵ = 0,841
Площадь S, мм ²	5 [4 – 8]	19 [11 – 34]	82 [25 – 352]	20 [11 – 33]	75 [32 – 106]	p ²⁻⁴ = 0,542 p ³⁻⁵ = 0,559
КРИНД	22 [19 – 27]	19 [15 – 25]	15 [13 – 17]	31 [25 – 37]	15 [12 – 18]	p ²⁻⁴ = 0,000 p ³⁻⁵ = 0,965

Примечание: p²⁻⁴; 3-5 – уровень значимости различий между группами больных.

Таким образом, в обеих группах пациентов центры давления нижних конечностей смещены вперёд, по сравнению с нормой, при этом наиболее выраженное смещение наблюдалось у пациентов второй группы на стороне поражения. Следовательно, у пациентов с односторонним укорочением нижней конечности отмечается нарушение сагиттального баланса тела, которое может быть обусловлено компенсаторно сформировавшимся увеличением наклона таза вперёд [9; 10]. При этом значимой зависимости смещения ЦД нижних конечностей по оси Y от смещения по оси X не было выявлено ни у пациентов, ни у здоровых детей (табл. 1).

На этом фоне значимо по сравнению с нормой у пациентов обеих групп были увеличены ($p < 0,05$) медианные показатели длины **L** и площади **S** статокинезиограмм как на укороченной, так и на интактной нижних конечностях (табл. 1). Вместе с тем в обеих группах больных указанные показатели на интактной конечности были значительно выше таковых на укороченной конечности ($p < 0,05$), и только у некоторых пациентов показатели на стороне поражения приближались к нормальным величинам (рис. 2 а, б).



*Рис. 2. Примеры статокинезиограмм контралатеральных нижних конечностей:
а) здорового ребёнка; б) пациента с левосторонним УНК со смещением общего ЦД в сторону укороченной НК; в) пациента с левосторонним УНК со смещением общего ЦД в сторону интактной НК*

Выраженное увеличение площадей колебаний **S** центров давления под интактными нижними конечностями, по сравнению с таковыми под укороченными конечностями, может быть обусловлено значимым снижением количества резких поворотов векторов скорости ЦД в обеих группах пациентов. Об этом свидетельствуют сниженные, по сравнению с нормой, показатели КРИНД ($p = 0,000$) соответствующих центров давления (табл. 1). Вместе с тем КРИНД центра давления укороченной НК пациентов первой группы соответствует нормальным значениям ($p > 0,05$), в то время как у пациентов второй группы КРИНД резко

превышает норму ($p=0,000$), что указывает на чрезмерное увеличение количества резких поворотов векторов скорости ЦД. Необходимо учитывать, что у здоровых детей значения КРИНД центров давления контралатеральных нижних конечностей одинаковые ($p>0,05$), поэтому обе конечности в равной степени мобильны и задействованы в выполнении опорной и регулирующей функции. Наоборот, в соответствии с показателями КРИНД, у пациентов первой группы интактная нижняя конечность характеризуется сниженной мобильностью при нормальной мобильности укороченной конечности. У пациентов же второй группы сниженная мобильность интактной нижней конечности сочетается с повышенной мобильностью укороченной конечности. Такую разноплановость поструральных реакций в ответ на фронтальное смещение общего ЦД у детей с разновеликостью нижних конечностей можно объяснить значительной разницей в механической работе между укороченной и интактной конечностями [11]. Кроме того, нижние конечности человека образуют единую кинематическую цепь [12], поэтому для поддержания вертикального равновесия тела опорно-двигательная система человека реализует множество разнообразных механизмов, направленных на координацию движений нижних конечностей [13].

Сравнительная оценка углов направления колебаний α статокинезиограмм выявила незначительную их величину у здоровых детей – отклонение длинной оси эллипса составляло в среднем 6 [5 – 8] градусов влево или вправо от сагиттальной оси. Аналогичные показатели угла α имели статокинезиограммы интактных нижних конечностей обеих групп пациентов (рис. 3б). Наибольшие отклонения в показателях α были выявлены со стороны укороченной НК в обеих группах больных. При этом самые выраженные нарушения имели место у пациентов второй группы: 51 [19 – 79] градус, у которых также имела место инверсия направленности длинной оси статокинезиограмм, что проявлялось её отклонением в противоположную сторону от нормального направления (рис. 2в, 3а).

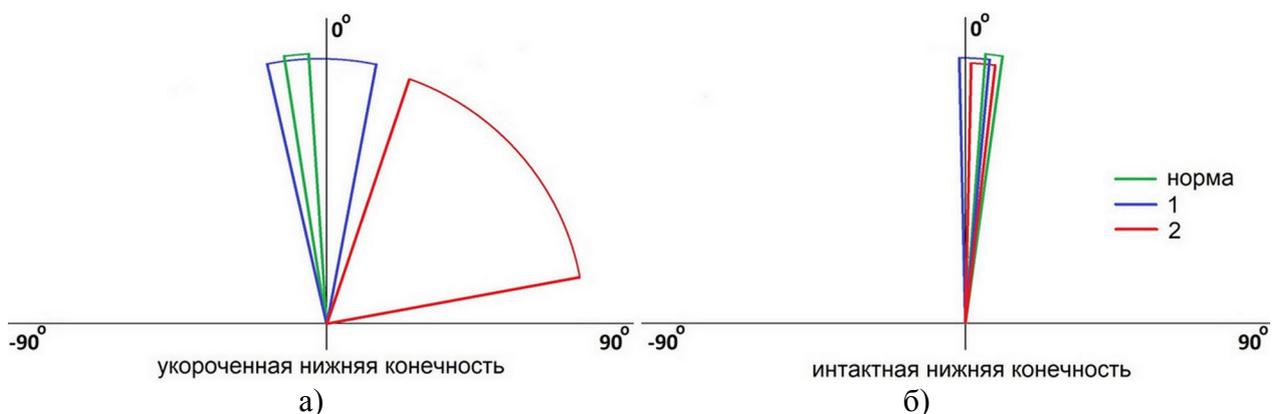


Рис. 3. Диаграммы квартильных значений ($[Q_{25} - Q_{75}]$) углов направления колебаний α статокинезиограмм нижних конечностей у обследованных детей:

1 – пациенты первой группы, 2 – пациенты второй группы

Анализ зависимости величины угла α от смещения ЦД во фронтальной (координата X) и сагиттальной (координата Y) плоскостях не выявил значимой связи ни у здоровых детей, ни у обследованных пациентов (табл. 3). Указанный факт свидетельствует о том, что нарушение баланса нижних конечностей у пациентов обеих групп может быть вызвано не нарушением нагрузки на нижние конечности, а обусловлено адаптивными реакциями опорно-двигательной системы на одностороннее укорочение нижней конечности. Подобные отклонения в поструральном балансе имеют место у больных с односторонней патологией тазобедренного сустава, у которых развиваются изменения в кинематических цепях, обусловленные нарушением позвоночно-тазовых соотношений [14].

Зависимость соотношения сагиттальной и фронтальной составляющих V_Y/V_X результирующего вектора скорости V от величины углов направления колебаний α представлена в таблице 2. Из этой таблицы следует, что у здоровых детей достаточно выраженная связь $\alpha \sim V_Y/V_X$ на обеих нижних конечностях.

Таблица 2

Корреляционные связи между стабилметрическими параметрами нижних конечностей у здоровых детей и пациентов с односторонним укорочением НК

Параметры	Коэффициент корреляции Спирмена r_s					
	Здоровые дети		Пациенты			
	Левая НК, $n = 16$	Правая НК, $n = 16$	Группа I		Группа II	
			Укороченная НК, $n = 12$	Интактная НК, $n = 12$	Укороченная НК, $n = 15$	Интактная НК, $n = 15$
$\alpha \sim X$	0,24	-0,08	0,18	-0,29	0,27	-0,12
$\alpha \sim Y$	0,33	0,04	0,39	0,30	0,32	-0,03
$\alpha \sim V_Y/V_X$	-0,46	-0,47	-0,80	0,13	0,12	-0,51

Это может быть обусловлено тем, что в норме направление результирующего вектора скорости V в целом совпадает с направлением длинной оси колебаний ЦД. Поэтому при увеличении угла α происходит отклонение вектора V по часовой стрелке, что приводит к уменьшению составляющей V_Y и увеличению V_X . То есть с увеличением α уменьшается соотношение V_Y/V_X (рис. 4а).

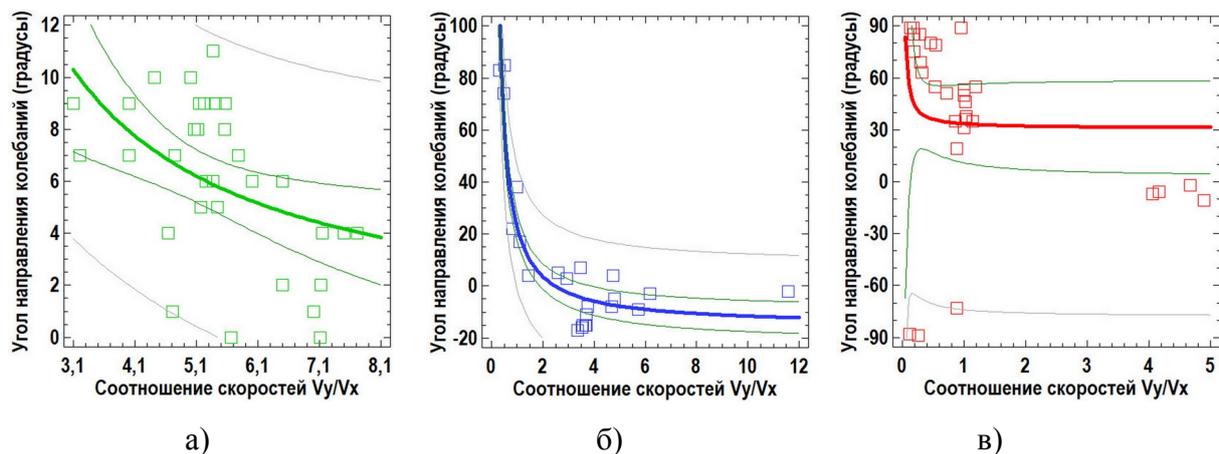


Рис. 4. Зависимость соотношения сагиттальной и фронтальной составляющих (V_y/V_x) вектора скорости V контралатеральных нижних конечностей от величины и направления отклонения длинной оси α статокинезиограммы от сагиттальной оси: а) у здоровых детей; б) у пациентов первой группы, в) у пациентов второй группы

По сравнению со здоровыми детьми, у пациентов первой группы на укороченной НК наблюдается очень сильная корреляция $\alpha \sim V_y/V_x$ (рис. 4б), обусловленная более упорядоченной направленностью результирующего вектора скорости V с направлением длинной оси колебаний ЦД. Напротив, у пациентов второй группы связь $\alpha \sim V_y/V_x$ на укороченной НК очень слабая (рис. 4в). Это объясняется тем, что результирующий вектор скорости V может и совпадать по направлению с длинной осью колебаний ЦД, и может быть направлен перпендикулярно к ней. Указанный фактор свидетельствует о хаотичной направленности результирующих векторов скорости, которая с позиций биомеханики может расцениваться как энергетически невыгодная. На интактной нижней конечности у пациентов наблюдалась противоположная зависимость угла α от соотношения V_y/V_x : очень слабая у пациентов первой группы и выраженная, близкая к норме – у пациентов второй группы.

Заключение

У детей с разновеликостью нижних конечностей выявлена дезорганизация вертикального баланса на поражённой и интактной сторонах, выраженность которой зависит от ориентации смещения общего центра давления тела в медиолатеральном направлении. Наиболее выраженные нарушения пострурального контроля по сравнению со здоровыми детьми были в группе пациентов со смещением общего центра давления в сторону интактной нижней конечности, в отличие от пациентов со смещением общего центра давления в сторону укороченной конечности. Это проявлялось нарушением сагиттального баланса тела, обусловленного компенсаторным увеличением наклона таза вперёд. Различия в индивидуальной мобильности центров давления укороченной и интактной нижних конечностей были резко выражены по сравнению с нормальными показателями. Имело

место патологическое увеличение по сравнению с нормой углов направления колебаний α на укороченной нижней конечности. Выраженные расхождения в стабилметрических показателях между группами пациентов могут быть обусловлены различиями в их поструральных стратегиях, сформированных опорно-двигательной системой в ответ на разнонаправленное нарушение фронтального баланса тела.

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. 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.
3. Pereiro-Buceta H., Becerro-de-Bengoa-Vallejo R., Losa-Iglesias M.E., López-López D., Navarro-Flores E., Martínez-Jiménez E.M., Martiniano J., Calvo-Lobo C. The Effect of Simulated Leg-Length Discrepancy on the Dynamic Parameters of the Feet during Gait-Cross-Sectional Research. *Healthcare*. 2021. vol. 9. no. 8. P. 932. DOI: 10.3390/healthcare9080932.
4. Assogba T.F., Boulet S., Detrembleur C., Mahaudens P. The effects of real and artificial Leg Length Discrepancy on mechanical work and energy cost during the gait. *Gait Posture*. 2018. no. 59. P. 147-151. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.10.004.
5. Khamis S., Carmeli E. Relationship and significance of gait deviations associated with limb length discrepancy: A systematic review. *Gait Posture*. 2017. no. 57. P. 115-123. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.05.028.
6. Tallroth K., Ristolainen L., Manninen M. Is a long leg a risk for hip or knee osteoarthritis? *Acta Orthop*. 2017. vol. 88. no. 5. P. 512–515. DOI: 10.1080/17453674.2017.1348066.
7. Никитюк И.Е., Гаркавенко Ю.Е., Кононова Е.Л. Особенности опорной функции нижних конечностей у детей с последствиями поражения проксимального отдела бедра острым гематогенным остеомиелитом // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2018. Т. 6. № 1. С. 14-22. DOI: 10.17816/PTORS5349-57.
8. 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.

9. Kwon Y.J., Song M., Baek I.H., Lee T. The effect of simulating a leg-length discrepancy on pelvic position and spinal posture. *J. Phys Chem Sci.* 2015. vol. 27. no. 3. P. 689-691. DOI: 10.1589/jpts.27.689.
10. 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.
11. Song M.H., Song H.R., Kim W.S. Inter-limb difference of mechanical work in limb length discrepancy. *Gait Posture.* 2021. no. 84. P. 79-86. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.11.018.
12. Olsen A.M. A mobility-based classification of closed kinematic chains in biomechanics and implications for motor control. *J. Exp Biol.* 2019. vol. 222. no. Pt 21. P. jeb195735. DOI: 10.1242/jeb.195735.
13. Fettes T., Rayman H., Grant D., Thompson E., Crenshaw J., Higginson J., Jeka J. Interdependence of balance mechanisms during bipedal locomotion. *PLoS One.* 2019. vol. 14. no. 12. P. e0225902. DOI: 10.1371/journal.pone.0225902.
14. Никитюк И.Е., Бортулёв П.И., Виссарионов С.В. Вертикальный баланс у детей с односторонним диспластическим подвывихом бедра до и после хирургического лечения // *Современные проблемы науки и образования.* 2022. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31985> (дата обращения: 10.01.2023). DOI: 10.17513/sp no.31985.