

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО БАЛАНСА ТЕЛА У ДЕТЕЙ С ОДНОСТОРОННИМ УКОРОЧЕНИЕМ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ НА ФОНЕ ПОСТВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОКСИМАЛЬНОГО ОТДЕЛА БЕДРА

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

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 имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург

Цель исследования – оценить вклад в нарушение постурального баланса деформации проксимального отдела бедренной кости у детей с односторонним укорочением нижней конечности. Двухплатформенным методом был исследован вертикальный баланс пациентов в возрасте от 10 до 14 лет с односторонним укорочением нижней конечности на величину от 2 до 5 см, которые были распределены на две группы по 13 чел. в каждой. В основной группе укорочение нижней конечности развилось на фоне перенесенного гематогенного остеомиелита проксимального метаэпифиза бедренной кости, что сопровождалось его деформацией, а также анатомо-функциональными нарушениями тазобедренного сустава. Контрольная группа включала пациентов только с посттравматическим укорочением нижней конечности. Для вычисления критериев нормы провели анализ биомеханических параметров 13 здоровых детей того же возраста. Общим для всех пациентов являлось грубое нарушение фронтально-сагиттального баланса тела и пораженной нижней конечности. Значимые различия между группами пациентов выявлены в показателях синхронизации параметров постурального контроля: на стороне поражения у больных основной группы корреляция LFS ~ A сильная: $r_s = -0,77$, наоборот, у больных контрольной группы – очень слабая: $r_s = -0,28$. Патологическое увеличение угла колебаний α на пораженной нижней конечности составило для основной и контрольной групп соответственно 0[-21–44] и 37[-7–79] градусов. Это могло являться следствием односторонних анатомических нарушений проксимального отдела бедренной кости, способствующих адаптивной реорганизации в кинематических цепях организма «таз – позвоночник», что приводит к формированию патологической постуральной стратегии удержания вертикального баланса тела.

Ключевые слова: проксимальный отдел бедренной кости, неравенство длины нижних конечностей, вертикальный баланс тела, стабилметрия

FEATURES OF VERTICAL BODY BALANCE IN CHILDREN WITH UNILATERAL SHORTENING OF THE LOWER LIMB AGAINST THE BACKGROUND OF POST-INFLAMMATORY CHANGES IN THE PROXIMAL THIGH

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

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

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

The aim of the study was to assess the contribution to the postural balance disorder of deformity of the proximal femur in children with unilateral shortening of the lower limb. A two-platform method was used to study the vertical balance of patients aged 10 to 14 years with unilateral shortening of the lower limb by an amount from 2 to 5 cm, who were divided into two groups of 13 people each. In the main group, shortening of the lower limb developed against the background of hematogenous osteomyelitis of the proximal metaepiphysis of the femur, which was accompanied by its deformation, as well as anatomical and functional disorders of the hip joint. The control group included patients with only posttraumatic shortening of the lower limb. To calculate the norm criteria, the biomechanical parameters of 13 healthy children of the same age were analyzed. Common to all patients was a gross violation of the frontal-sagittal balance of the body and the affected lower limb. Significant differences between the groups of patients were revealed in the parameters of synchronization of postural control parameters: on the side of the lesion in patients of the main group, the correlation of LFS ~ A was strong: $r_s = -0.77$, on the contrary, in patients of the control group – very weak: $r_s = -0.28$. The pathological increase in the angle of vibration α on the affected lower limb was 0[-21 – 44] and 37[-7 – 79] degrees, respectively, for the main and control groups. This could be a consequence of unilateral anatomical disorders of the proximal femur, contributing to adaptive reorganization in the kinematic chains of the body “pelvis – spine”, which leads to the formation of a pathological postural strategy of maintaining the vertical balance of the body.

Keywords: proximal femur, leg length discrepancy, vertical body balance, stabilometry

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Деформации проксимального отдела бедренной кости у детей нередко формируются после перенесенного острого гематогенного остеомиелита. Сопутствующим осложнением заболевания может являться укорочение нижней конечности на стороне поражения вследствие снижения функции или разрушения метаэпифизарного росткового хряща бедренной кости. Изменения анатомии проксимального отдела бедренной кости могут приводить к нарушению конгруэнтности суставных поверхностей тазобедренного сустава, разбалансировке мышечных векторов моментов сил и избыточному напряжению в компонентах сустава, что сопровождается ухудшением его функции [1]. В процессе роста ребенка разновеликость нижних конечностей, так же как и дисфункция тазобедренного сустава, приводят к изменениям в кинематических цепях «таз – позвоночник», что негативно сказывается на биомеханике всей опорно-двигательной системы [2, 3]. Считается, что такие патологические трансформации позвоночно-тазовых соотношений у больных являются вынужденным компенсаторным ответом организма, способствующим удержанию вертикального положения тела [4]. Однако адаптивные реакции опорно-двигательной системы при одностороннем поражении нижних конечностей изучены недостаточно, так как их анализ носит однобокий характер: внимание акцентируется исключительно на анатомо-функциональных нарушениях тазобедренного сустава [5] или только на разновеликости нижних конечностей [6]. Дальнейшее исследование особенностей биомеханики опорно-двигательной системы у пациентов с поражением проксимального отдела бедренной кости поможет внести вклад в расшифровку механизмов управления их локомоциями, что весьма актуально при проведении восстановительного лечения.

Цель исследования – оценить вклад в нарушение постурального баланса тела деформации проксимального отдела бедренной кости у детей с односторонним укорочением нижней конечности.

Материалы и методы исследования

Был исследован вертикальный баланс пациентов в возрасте от 10 до 14 лет с односторонним укорочением нижней конечности на величину от 2 до 5 см, которые были распределены на две группы по 13 чел. в каждой. В основной группе укорочение нижней конечности (в среднем $3,1 \pm 0,21$ см) развилось на фоне перенесенного гематогенного

остеомиелита проксимального метаэпифиза бедренной кости, что сопровождалось его деформацией, а также анатомо-функциональными нарушениями тазобедренного сустава в виде подвывиха, децентрации или коксартроза (рис. 1, а, б). Контрольная группа включала пациентов только с укорочением нижней конечности (в среднем $3,4 \pm 0,27$ см), которое сформировалось после травматических повреждений ростковых зон бедренных костей. Группы пациентов были однородными по возрасту, величине укорочения пораженной нижней конечности, отсутствию угловой деформации коленного сустава. Для оптимизации однородности групп в выборки включали только больных, у которых общий центр давления (ЦД) тела был смещен в сторону интактной нижней конечности, что является типичным при односторонней патологии [7]. Для вычисления критериев нормы провели анализ биомеханических параметров 13 здоровых детей того же возраста.

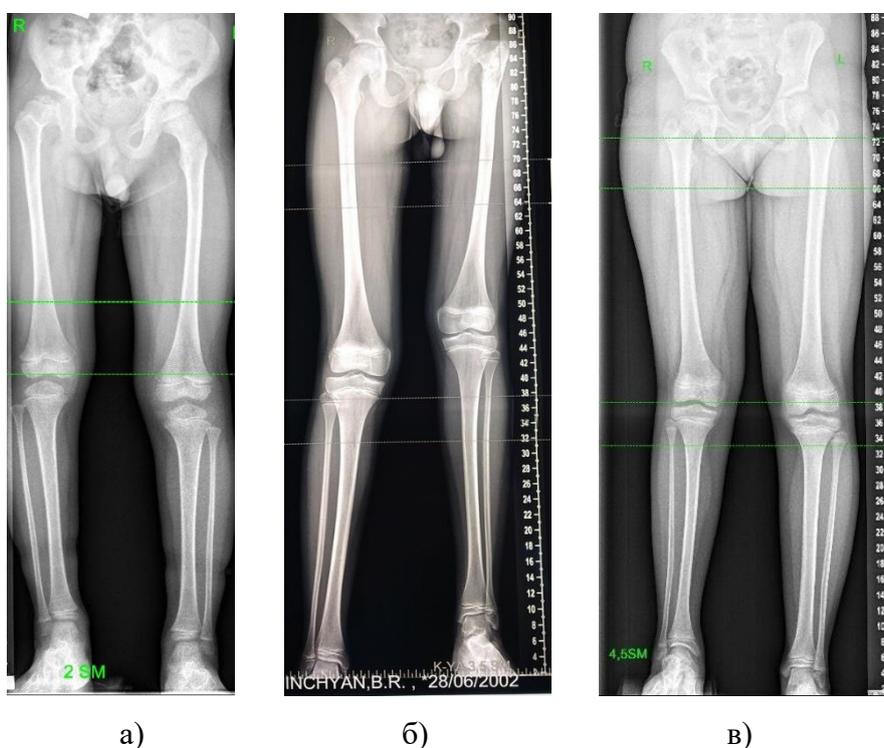


Рис. 1. Панорамные рентгенограммы нижних конечностей пациентов:

основная группа – с односторонним поствоспалительным поражением проксимального отдела бедренной кости, укорочением нижней конечности: справа (а), слева (б);
контрольная группа – с приобретенным укорочением нижней конечности справа (в)

Для оценки вертикального баланса тела применяли двухплатформенный стабилметрический метод с использованием комплекса «Стабилан 01-2» (ОКБ РИТМ, Россия) для регистрации движений общего ЦД тела и ЦД под каждой нижней конечностью. Обследуемый становился на две рядом расположенные стабилметрические платформы и располагал стопы на равной дистанции от их внутренних краев таким образом, чтобы оси стоп были параллельны. Расстояние между осями стоп соответствовало расстоянию между

передними верхними осями таза. Обследование осуществляли последовательно сначала с открытыми, а затем – с закрытыми глазами. При этом фиксировали статокинезиограммы – траектории движения центров давления. На основании полученных статокинезиограмм рассчитывали параметры движения общего ЦД тела: диспозицию во фронтальной X (мм) и в сагиттальной $Y_{\text{общ}}$ (мм) плоскостях, угол направления колебаний статокинезиограммы общего ЦД тела $\alpha_{\text{общ}}$ (градусы), то есть отклонение ее большой оси относительно сагиттальной оси, величину векторов V_x и V_y – проекций линейной скорости общего ЦД тела соответственно на ось X и ось Y . Также вычисляли соотношение V_y/V_x . Дополнительно оценивали показатели статокинезиограмм каждой из контралатеральных нижних конечностей: диспозицию Y (мм), площадь S (мм²), длину траектории L (мм), амплитуду колебаний центра давления A (мм), отношение длины траектории ЦД к площади статокинезиограммы LFS (мм⁻¹), угол направления колебаний статокинезиограммы α в градусах.

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

Результаты исследования и их обсуждение

В обеих группах пациентов было выявлено резко выраженное, практически одинаковое, нарушение фронтального баланса, на что указывало отклонение общего ЦД тела по оси X в направлении интактной конечности на 20[9–38] мм в основной группе и на 12[6–22] мм – в контрольной ($p = 0,09$).

Таблица 1

Стабилометрические параметры контралатеральных нижних конечностей здоровых детей и пациентов обеих групп

Параметры	Группы детей						p
	Здоровые ($Me [Q_{25} - Q_{75}]$) $n = 13$		Основная ($Me [Q_{25} - Q_{75}]$) $n = 13$		Контрольная ($Me [Q_{25} - Q_{75}]$) $n = 13$		
	Левая НК	Правая НК	Пораженная НК (1)	Интактная НК (2)	Пораженная НК (3)	Интактная НК (4)	
Смещение Y , мм	3 [-1–4]	6 [3–7]	35 [24–95]	-2 [-11–5]	72 [58–96]	10 [0–31]	$p^{1-3} = 0,469$ $p^{2-4} = \mathbf{0,008}$
Площадь S , мм ²	4 [3–7]	5 [3–8]	40 [13–110]	39 [25–78]	15 [9–22]	54 [30–85]	$p^{1-3} = \mathbf{0,004}$ $p^{2-4} = 0,296$
Длина L , мм	112 [98–144]	122 [103–150]	204 [133–350]	324 [211–396]	179 [134–231]	454 [323–597]	$p^{1-3} = 0,269$ $p^{2-4} = \mathbf{0,013}$

Амплитуда A , мм	2,0 [1,7–2,5]	1,7 [1,3–2,3]	3 [2–4]	4 [3–6]	2 [1–3]	5 [4–8]	$p^{1-3} = 0,101$ $p^{2-4} = 0,048$
Угол α (град)	-7 [-9–5]	6 [5–8]	0 [-21–44]	7 [1–11]	37 [-7–79]	4 [2–7]	$p^{1-3} = 0,048$ $p^{2-4} = 0,236$

Примечание. $p^{1-3; 2-4}$ – уровень значимости различий между соименными нижними конечностями (НК) пациентов основной и контрольной групп.

В сагиттальной плоскости наблюдалось патологическое отклонение общего ЦД тела вперед, в равной степени выраженное у пациентов основной и контрольной групп, показатели координаты $Y_{\text{общ}}$ которых составляли соответственно 16[-1–25] мм и 22[7–56] мм ($p = 0,156$). Подобная передняя диспозиция общего центра давления тела могла быть вызвана увеличением наклона таза вперед, которое характерно для больных с односторонним укорочением нижней конечности [2]. Наиболее выраженной демонстрацией нарушения сагиттального баланса тела у пациентов обеих групп являлось значительное одинаковое переднее отклонение ЦД под пораженной нижней конечностью (табл. 1). Однако на интактной нижней конечности особенности сагиттального баланса имели различия: в основной группе ЦД был смещен по сравнению с нормой назад ($F = 0,021$; $P\text{-value} = 0,000$), в контрольной группе, наоборот, вперед ($F = 0,052$; $P\text{-value} = 0,000$) (рис. 2, а). Такие расхождения в поструральных стратегиях интактных нижних конечностей между группами пациентов могут быть объяснены многообразием адаптивных механизмов опорно-двигательной системы, ориентированных на поддержание вертикального баланса тела [8].

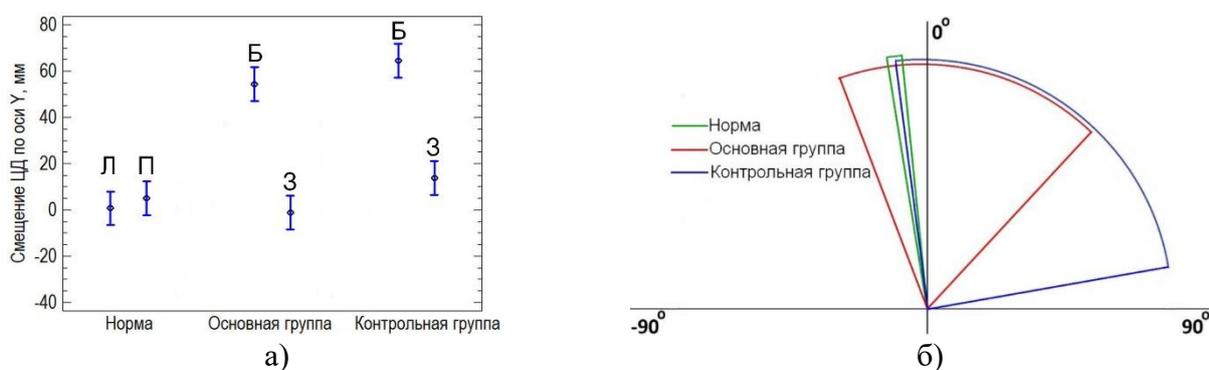


Рис. 2. Графическое отображение движения ЦД нижних конечностей: а) диаграмма 95 %-ных интервалов средних значений смещения ЦД в сагиттальной плоскости: (Л – левая и П – правая нижние конечности у здоровых детей, Б – «больная» и З – «здоровая» нижние конечности у пациентов); б) диаграмма квартильных значений углов α статокинезиограмм пораженных нижних конечностей у пациентов

Анализ параметров **S**, **L** и **A** выявил существенное их увеличение по сравнению с нормой ($p < 0,05$) у пациентов обеих групп на обеих нижних конечностях. При этом были установлены значимые различия в показателях между соименными конечностями основной и

контрольной групп, в направленности которых не было выявлено каких-либо закономерностей (табл. 1). Для интерпретации результатов проведена комплексная сравнительная оценка параметров посредством корреляционного анализа. Если в норме сила связей между **LFS** и **A** на левой нижней конечности была слабой $r_s = -0,33$ ($p = 0,096$), на правой – достаточно сильной обратной $r_s = -0,51$ ($p = 0,007$), то у пациентов основной группы наблюдалась сильная обратная корреляция $r_s = -0,77$ ($p = 0,000$) на пораженной конечности и умеренная $r_s = -0,45$ ($p = 0,021$) на интактной. Наоборот, у пациентов контрольной группы связи **LFS** ~ **A** на пораженной и интактной нижних конечностях были очень слабые или вообще отсутствовали, составляя соответственно $r_s = -0,28$ ($p = 0,163$) и $r_s = -0,08$ ($p = 0,688$). Известно, что с увеличением силы корреляций **LFS** ~ **A** повышается синхронизированность механизмов обеспечения вертикального баланса [9]. В таком случае высокие значения коэффициентов корреляции у пациентов основной группы могут рассматриваться в качестве показателя усиленного постурального контроля, сформировавшегося как вынужденный компенсаторный ответ опорно-двигательной системы на нарушение фронтального баланса тела с целью минимизации энергетических затрат при сохранении вертикального положения [10]. Однако необходимо учитывать, что высокие показатели синхронизации постурального контроля могут являться признаком ее неблагополучия вследствие тяжести основного заболевания [9]. Параметры **S**, **L** и **A** не только взаимосвязаны, но и могут быть зависимы от других параметров вертикального баланса. Анализ величин углов направления колебаний α статокнезиограмм контралатеральных нижних конечностей выявил отклонения у пациентов обеих групп только на стороне поражения (табл. 1). Оценка уровней стандартных отклонений по F-критерию Фишера выявила значимые отличия показателей α от нормы у пациентов основной ($F = 0,003$; $P\text{-value} = 0,000$) и контрольной ($F = 0,002$; $P\text{-value} = 0,000$) групп (рис. 2, б). При этом более выраженные отклонения угла α от нормальных величин наблюдались у больных контрольной группы (табл. 1). Это может быть обусловлено различиями в структуре кинематических цепей между группами пациентов. В то время как у пациентов контрольной группы отсутствует какая-либо связь величины угла α с показателями **S**, **L** и **A**, у пациентов основной группы существует сильная обратная зависимость α от указанных параметров (табл. 2).

Таблица 2

Корреляционные связи между стабилметрическими параметрами пораженной нижней конечности у пациентов обеих групп

Соотношения	Коэффициент корреляции Спирмена r_s		
	Здоровые дети $n = 13$	Основная группа $n = 13$	Контрольная группа $n = 13$
$\alpha \sim S$	-0,15 (0,449)	-0,63 (0,001)	-0,17 (0,948)

$\alpha \sim L$	-0,15 (0,463)	-0,54 (0,02)	-0,18 (0,407)
$\alpha \sim A$	-0,19 (0,242)	-0,61 (0,001)	-0,16 (0,572)

Примечание. Числа в скобках означают достигнутый уровень значимости p коэффициента корреляции.

По-видимому, у больных основной группы, вследствие более грубых анатомических нарушений проксимального отдела пораженного бедра, опорно-двигательная система вынужденно включает адаптивные механизмы, направленные на нивелирование ее функциональных нарушений. Поэтому у этих пациентов при патологическом увеличении показателей площади, длины траектории и амплитуды колебаний центра давления пораженной конечности угол отклонения α статокинезиограммы компенсаторно снижается в сторону нормализации (рис. 3).

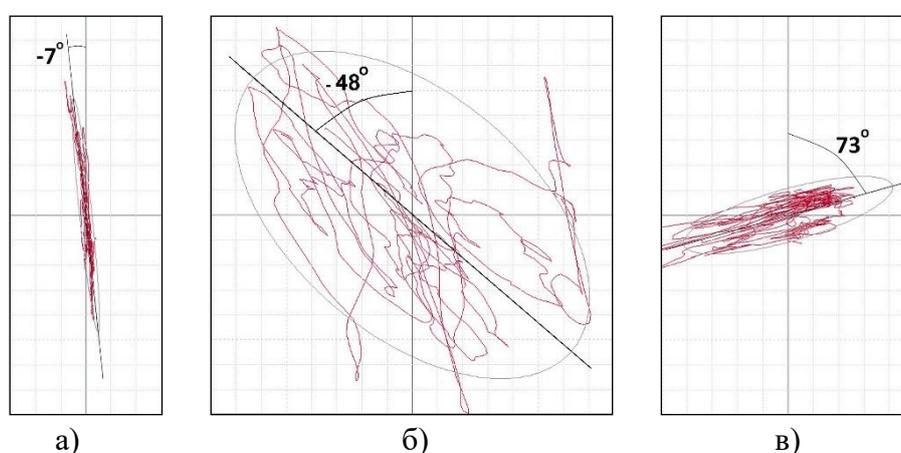


Рис. 3. Примеры величин площадей статокинезиограмм в зависимости от величины и направления отклонения угла α : на левой нижней конечности у здорового ребенка (а); на пораженной нижней конечности у пациента основной группы (б) и пациента контрольной группы (в). Отмечается увеличение площади статокинезиограммы при уменьшении угла α

Анализ величин углов направления колебаний статокинезиограмм общего ЦД тела $\alpha_{\text{общ}}$ показал незначительное его отклонение от сагиттальной оси у здоровых детей, в среднем $-4[-9-0]$ градусов. У больных обеих групп отклонение угла $\alpha_{\text{общ}}$ было одинаковым ($p = 0,784$) и резко выраженным по сравнению с нормой: $16[-6-35]$ градусов ($p = 0,006$) у пациентов основной группы и $18[-8-35]$ градусов ($p = 0,016$) у пациентов контрольной группы. Отличительной особенностью пациентов контрольной группы являлась сильная обратная зависимость угла $\alpha_{\text{общ}}$ от соотношения сагиттальной и фронтальной составляющих V_y/V_x результирующего вектора скорости V : $r_s = -0,43$ ($p = 0,031$). Иными словами, при увеличении параметра $\alpha_{\text{общ}}$ происходит уменьшение соотношения V_y/V_x , так как ориентация результирующего вектора скорости V в общей сложности совпадает с направлением длинной оси колебаний общего ЦД тела (рис. 4, б).

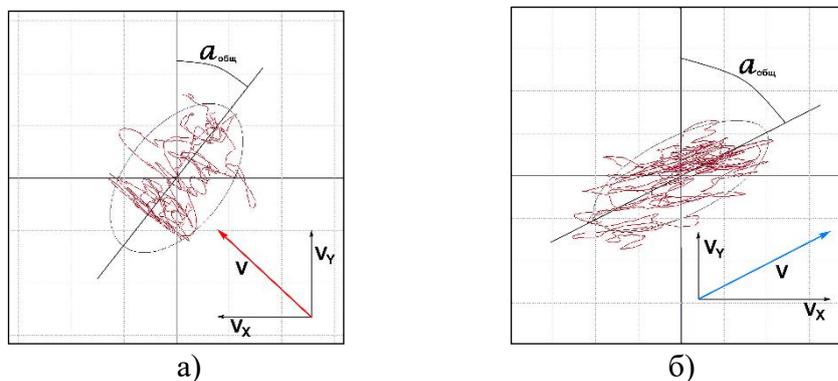


Рис. 4. Примеры направления результирующего вектора скорости V по отношению к направлению длинной оси колебаний общего ЦД тела: а) у пациента основной группы; б) у пациента контрольной группы (V_Y – сагиттальная и V_X – фронтальная составляющие вектора V)

Совершенно другая зависимость $\alpha_{\text{общ}} \sim V_Y/V_X$ имела у пациентов основной группы, которая была незначительной ($r_s = 0,06$; $p = 0,763$). Это может быть обусловлено несовпадением ориентации вектора скорости V с длинной осью колебаний общего ЦД тела (рис. 4, а). Такая бессистемная направленность вектора V с точки зрения биомеханики может квалифицироваться как энергетически невыгодная.

Заключение

У детей с односторонним укорочением нижней конечности на фоне поствоспалительных изменений проксимального отдела бедра выявлены грубые нарушения вертикального баланса тела и контралатеральных нижних конечностей. В указанной группе пациентов наблюдалась дезорганизация постурального контроля, которая по структуре адаптивных реакций организма имела отличия от таковых у пациентов контрольной группы с изолированным укорочением нижней конечности после травматических повреждений ростковых зон бедренных костей. Общим для всех пациентов являлось грубое нарушение фронтально-сагиттального баланса тела и пораженной нижней конечности. Однако на интактной нижней конечности у больных основной группы отмечалась задняя диспозиция центра давления, в то время как в контрольной группе – передняя. Значимые различия между группами пациентов выявлены в показателях синхронизации параметров постурального контроля, в величине отклонения угла направления колебаний, а также его зависимости от других стабилметрических параметров. Это может являться следствием односторонних анатомических нарушений проксимального отдела бедренной кости, способствующих адаптивной реорганизации в кинематических цепях организма «таз – позвоночник», что приводит к формированию патологической постуральной стратегии удержания вертикального баланса тела.

Список литературы

1. Зеленецкий И.Б., Корольков А.И., Мителева З.М., Снисаренко П.И. Децентрация и напряженно-деформированное состояние в тазобедренном суставе при его дисплазии // Запорожский медицинский журнал. 2018. Т. 20, № 5. С. 674–680. DOI: 10.14739/2310-1210.2018.5.141536.
2. 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, Is. 67. P. 71–76. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.09.022.
3. Бортулев П.И., Виссарионов С.В., Басков В.Е., Овечкина А.В., Барсуков Д.Б., Поздникин И.Ю. Клинико-рентгенологические показатели позвоночно-тазовых соотношений у детей с диспластическим подвывихом бедра // Травматология и ортопедия России. 2018. Т. 24, № 3. С. 74–82. DOI: 10.21823/2311-2905-2018-24-3-74-82.
4. Buckland A.J., Steinmetz L., Zhou P., Vasquez-Montes D., Kingery M., Stekas N.D., Ayres E.W., Varlotta C.G., Lafage V., Lafage R., Errico T., Passias P.G., Protosaltis T.S., Vignodchik J. Spinopelvic compensatory mechanisms for reduced hip motion (ROM) in the setting of hip osteoarthritis // Spine Deform. 2019. Vol. 7, Is. 6. P. 923–928. DOI: 10.1016/j.jspd.2019.03.007.
5. Юсупов К.С., Барабаш Ю.А., Павленко Н.Н., Ромакина Н.А., Анисимова Е.А., Летов А.С., Сертакова А.В., Анисимов Д.И. Биомеханические показатели ортопедического статуса пациентов с диспластическим коксартрозом IV типа (Crowe) до и после лечения // Саратовский научно-медицинский журнал. 2017. Т. 13, № 3. С. 520–526.
6. Michalik R., Rissel V., Migliorini F., Siebers H.L., Betsch M. Biomechanical evaluation and comparison of clinically relevant versus non-relevant leg length inequalities // BMC Musculoskelet Disord. 2022. Vol. 23, Is. 1. P. 174. DOI: 10.1186/s12891-022-05113-2.
7. 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.
8. Fettrow 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, Is. 12. P. e0225902. DOI: 10.1371/journal.pone.0225902.
9. Никитюк И.Е., Кононова Е.Л., Икоева Г.А., Солохина И.Б. Влияние роботизированной механотерапии в различных комбинациях с неинвазивной электростимуляцией мышц и спинного мозга на постуральный баланс у детей с тяжелыми формами ДЦП // Вестник

восстановительной медицины. 2020. Т. 98, № 4. С. 26–34. DOI: 10.38025/2078–1962–2020–98–4–26–34.

10. 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. Vol. 59. P. 147–151. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.10.004.