

УДК: 612.766:531.1/.3-053.2(086.8)

*Т.И. Долганова, Л.В. Смолькова, Д.В. Долганов***БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЛОКОМОТОРНОЙ АКТИВНОСТИ
У ДЕТЕЙ 3–6 ЛЕТ БЕЗ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г. А. Илизарова»
Министерства здравоохранения РФ, г. Курган, Российская Федерация

Резюме. *Цель* — сформировать нормативные ориентиры значений кинетических и кинематических параметров походки у детей 3–6 лет без двигательных нарушений. *Материалы и методы.* Методом видеоанализа с целью определения нормативного диапазона значений локомоторных характеристик проведена оценка локомоторного профиля походки у детей 3–6 лет (16 человек) без двигательных нарушений в лаборатории биомеханики Центра Илизарова. Параметры кинематики регистрировались оптическими камерами Qualisys 7+ (8 камер), показатели кинетики регистрировались с использованием динамометрических платформ Kistler (6 платформ). Обследование состояло из двух проб: 1 — самостоятельная ходьба с привычной скоростью передвижения на 7-метровой дорожке; 2 — ходьба ребенка в сопровождении его взрослым за одну руку. Анализ результатов проводился по автоматизированным расчетам значений кинематики и кинетики с использованием описательной статистики. Оценка нормальности распределения исследуемых показателей осуществлялась по 12 одномерным критериям. *Результаты.* Установлено, что основные характеристики локомоторной активности в однородных по возрасту группах детей 3–6 лет подчиняются функции нормального распределения и, следовательно, нормативный диапазон значений функционирования может определяться правилом сигмальных отклонений. В статье приводятся выборочные значения кинематических и кинетических параметров походки у детей 3–6 лет без двигательных нарушений, рекомендуемые в качестве нормативных ориентиров. *Выводы.* Для детей 3–4 лет допустимы условия обследования как самостоятельно, так и с поддержкой за руку. Для детей 5–6 лет обследование должно включать только самостоятельную ходьбу, ходьба с поддержкой за руку искажает структуру локомоторного стереотипа сопровождающим, и поэтому такая походка должна расцениваться как неестественная.

Ключевые слова: дети, походка, двигательный стереотип, функция нормального распределения, кинетические параметры, кинематические параметры

Конфликт интересов отсутствует.

Контактная информация автора, ответственного за переписку:

Долганова Тамара Игоревна

rjik532007@rambler.ru

Дата поступления 11.06.2022 г.

Образец цитирования:

Долганова Т.И., Смолькова Л.В., Долганов Д.В. Биомеханические характеристики локомоторной активности у детей 3–6 лет без двигательных нарушений. [Электронный ресурс] Вестник уральской медицинской академической науки. 2022, Том 19, №5, с. 502–513, DOI: 10.22138/2500-0918-2022-19-5-502-513

Формирование походки у ребенка представляет собой сложный процесс, на который оказывают влияние не только антропометрические параметры, но и степень созревания нервной системы. По сравнению со взрослыми, даже после корректировки антропометрических различий, связанных с возрастом [1], дети за счет морфофункциональной незрелости двигательных волокон (II тип) демонстрируют бо-

лее низкую произвольную мышечную силу, а, следовательно, мощность и скорость передвижения [2].

Нормированные с учетом роста и веса параметры походки (длина шага, ширина шага) начинают отслеживаться только после трехлетнего возраста [3], однако у детей 3–4 лет общие параметры локомоторного паттерна до конца еще не сформированы [4, 5]. Характерный вид основного профиля походки начинает проявляться у детей примерно к 4–5 годам, что может быть связано с формированием активности центральных и спинномозговых генераторов, индуцирующих самоорганизацию двигательных стереотипов (spinal central pattern generators — CPG). CPG предположительно контролируются структурами ствола головного мозга и позвоночника, и их созревание происходит раньше, чем контроль со стороны коры больших полушарий [6]. Формирование биомеханического паттерна, обеспечивающего опорный толчок, у детей завершается к четырем годам. И лишь с 7-летнего возраста, когда окончательно формируются функциональные механизмы поддержания общего центра массы тела [7], походка у детей начинает приближаться к паттерну походки взрослого [8, 9]. Как усложненные формы походки в виде точного перешагивания [10], так и медиолатеральная динамическая стабильность при ходьбе продолжают формироваться до 10-летнего возраста, и связаны с развитием координации контралатеральных конечностей, а также координации поворотов туловища и таза, которые в локомоторных стереотипах способствуют более высоким скоростям передвижения [11]. Поскольку скорость передвижения и поддержание постурального баланса при ходьбе являются наиболее общими показателями функциональной зрелости походки [5, 12], то в анализе локомоторной активности детей дошкольного возраста диагностически значимыми параметрами стабильности становятся амплитуды колебаний головы, туловища и таза в трех плоскостях. Увеличение амплитуды колебаний рассматривается как критерий нарушения динамического контроля равновесия вследствие затруднения обработки зрительной, вестибулярной и соматосенсорной информации о положении тела [13].

Для дошкольного возраста также актуальна оценка кинематического паттерна торсии бедра. По мере физического развития ребенка степень антеверсии головки бедренной кости уменьшается и у детей старшего возраста при ходьбе преобладает относительная наружная торсия бедра в отличие от детей младшей возрастной группы. Кроме того, с возрастом уменьшается максимальный момент внутренней торсии (valgus) в плюснефаланговых и голеностопных суставах, что способствует стабильности походки [14].

Учитывая все многообразие силовых и пространственно-временных характеристик опорно-двигательной системы, важным компонентом анализа походки является наличие нормативных баз данных, соответствующих возрасту и методологии обследования детей [15]. Как правило, исследователи походки, либо ориентируются на опубликованные нормативные значения исследуемых параметров, либо в зависимости от ситуации и текущих потребностей, и возможностей, формируют собственные нормативные базы данных [16]. Создаваемые нормативные ориентиры значений используются в диагностических целях для сравнительной оценки результатов инструментальных обследований и принятия решений при назначении терапии. Если для взрослых [17, 18] и детей школьного возраста (7–16 лет) [8, 16] параметры суставной кинематики, а также временные и силовые характеристики опорных реакций в литературе представлены широко, то нормативные значения кинетики и кинематики для детей дошкольного возраста (3–6 лет) практически отсутствуют. Вместе с тем анализ походки в дошкольном возрасте необходим для интерпретации ранних аномальных отклонений [19], оптимизации тактики лечения пациентов [20] и прогноза двигательного исхода при церебральном параличе [21].

Цель исследования — сформировать нормативные ориентиры значений кинетических и кинематических параметров походки у детей 3–6 лет без двигательных нарушений.

Материалы и методы

Оценка локомоторного профиля методом видеоанализа походки проведена у детей без двигательной патологии в лаборатории анализа походки Центра Илизарова. Для анализа материала по возрастному признаку выделены две равночисленных группы:

I группа — 8 детей (16 конечностей) 3–4 лет, средний возраст $3,7 \pm 0,37$ года.

II группа — 8 детей (16 конечностей) 5–6 лет, средний возраст $5,6 \pm 0,46$ года. Обследование состояло из двух проб и предполагало ходьбу босиком на 7-метровой дорожке. Если первая проба предусматривала самостоятельную ходьбу с привычной для детей скоростью передвижения, то походка при

второй пробе осуществлялась на фоне комфортного для ребенка сопровождения его взрослым за руку.

Данные кинематики регистрировались оптическими камерами Qualisys 7+ (8 камер) с технологией видео захвата пассивных маркеров. Данные кинетики — с динамометрических платформ Kistler (6 платформ) (рис. 1). Анализ кинематики и кинетики проводился в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений [22].

Были экспортированы и обработаны следующие переменные: пиковая мощность тазобедренного, коленного и голеностопного (опорный толчок) суставов (W/kg) с расчетом суммарной мощности работы суставов; амплитуда движения общего центра давления (ОЦД) в сагиттальной, фронтальной и вертикальной составляющих осей движения; амплитуда движения в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах; расчетный индекс оценки профиля походки (Gait Profile Score — GPS), который основан на кинематических данных движения в 3-х плоскостных проекциях таза и бедра, в сагиттальной проекции голени и стопы, угла разворота стопы относительно вектора движения. GPS предложен как количественный параметр идентификации типичных особенностей характера походки [23].

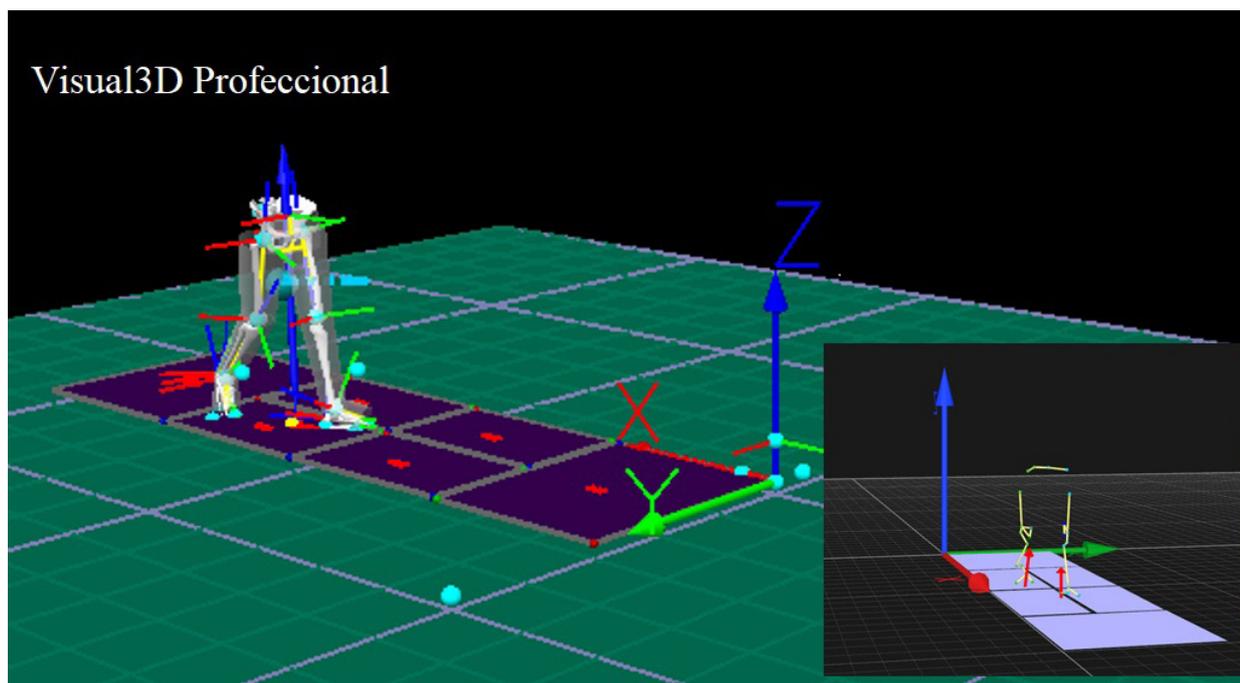


Рис 1. Пример выходной формы 3D видеоанализа походки: постпроцессорная обработка видеозахвата пассивных маркеров, синхронизированных с шестью динамометрическими платформами, с регистрацией вектора силы опорной реакции ног (красная стрелка) и вектора силы проходящего через общий центр массы обследуемого (синяя стрелка).

Fig. 1. An example of the output form of 3D video analysis of the gait: post-processing of the video capture of passive markers synchronized with six dynamometer platforms, with the registration of the force vector of the support reaction of the legs (red arrow), blue arrow passing through the common center of mass

Статистические методы исследования

Статистическая обработка данных производилась с помощью пакета анализа данных Microsoft Excel-2010 и AtteStat [24]. Оценка нормальности распределения кинематических и кинетических параметров осуществлялась по 12 одномерным критериям (Таблица 1) с порогом принятия решения $p=0,01$. Для представления обобщенных результатов использовался регрессионный анализ и методы описательной статистики в виде $M \pm \sigma$. Поскольку в отношении большинства показателей локомоторной активности гипотеза нормальности не отклонялась, применялись только методы параметрической статистики. Для выявления связи между показателями использован коэффициент корреляции Пирсона, а для сопоставительных оценок между выборочными совокупностями t-критерий Стьюдента для зависимых и независимых переменных. Степень статистической значимости отличий указывалась по критерию «р» при $p < 0,05$.

Таблица 1
Статистика критериев нормальности распределения величин скорости
самостоятельной ходьбы у детей

Table 1
Statistics of criteria for the normality of the distribution of values of the speed
of independent walking in children

Критерий/ Criterion	Дети 3–4 лет, ходьба самостоятельно, n=8/ Children 3–4 years old, walking independently, n=8			Дети 5–6 лет, ходьба самостоятельно, n=8/ Children 5–6 years old, walking independently, n=8		
	СК	p	p = 0,1	СК	P	P = 0,1
1	0,149314	0,147454	+	0,248083	0,186561	+
2	0,149314	0,361388	+	0,223532	0,164259	+
3	0,026239	0,107421	+	0,091624	0,13443	+
4	0,19104	0,103527	+	0,592556	0,116928	+
5	0,972435	0,101752	+	0,866388	0,129635	+
6	0,042465	0,477487	+	0,267341	0,361123	+
7	-1,11902	0,224931	+	-2,05354	0,082767	-
8	0,481172	0,213833	+	0,962766	0,382072	+
9	0,869086	0,171409	+	0,914906	0,05949	-
10	0,283888	0,43285	+	0,272947	0,194107	+
11	1,477345	0,22419	+	6,109843	0,013443	-
12	0,028655	1E-04	-	0,132788	1E-04	-

Примечание: Наименования критериев:

1. Модифицированный критерий Колмогорова; 2. Модифицированный критерий Смирнова; 3. Критерий Крамера-Мизеса; 4. Критерий Андерсона-Дарлинга; 5. Критерий Шапиро-Франсиа; 6. Критерий коэффициента асимметрии; 7. Критерий эксцесса; 8. Критерий Жарка-Бера; 9. Критерий Гири; 10. D критерий Д'Агостино; 11. Критерий χ^2 Фишера; 12. Критерий Эппса-Палли

СК — статистика критерия; P — показано двустороннее p — значение; p = 0,1 — порог принятия решения. Вывод: «+» — гипотеза о нормальности не отклоняется; «-» — гипотеза о нормальности отклоняется; n — число наблюдений

Note: Criteria names:

1. Modified Kolmogorov criterion; 2. Смирнова Modified Smirnov test; 3. Cramer-Mises criterion; 4. Anderson-Darling test; 5. Shapiro-Francia test; 6. Skewness factor criterion; 7. Criterion of kurtosis; 8. Fry-Beer Criterion; 9. Geary Criterion; 10. D D'Agostino test; 11. Fisher's χ^2 test; 12. Epps-Pally test

SC — criterion statistics; P — two-tailed p-value shown; P = 0.1 — decision threshold.

Conclusion: «+» — the hypothesis of normality is not rejected; «-» — the hypothesis of normality is rejected; n — number of observations

На проведение исследований было получено разрешение комитета по этике при ФГБУ «НМИЦ ТО имени акад. Г. А. Илизарова» № 2(70) от 21.10.2021. Исследования проводились в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 года, «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденной Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 года № 266». От законных представителей детей получено информированное согласие на участие в исследовании и публикацию их результатов без идентификации личности.

Результаты исследования и их обсуждение

При самостоятельном произвольном темпе ходьбы ($0,81 \pm 0,07$ м/сек) и при походке с поддержкой за руку ($0,69 \pm 0,04$ м/сек) обобщенные скоростные характеристики передвижения у детей 3–4 лет статистически значимо отличались (таблица 3) и, судя по всему, принадлежали к различным генеральным

совокупностям. Во всяком случае, гипотезы нормальности распределения не отклонялась как при произвольной самостоятельной ходьбе по 11 критериям, так и при поддержке за руку по 12 критериям (таблица 2). То есть, несмотря на различия в скоростях передвижения как конечного приспособительного результата двигательной функции, локомоторные стереотипы для 3–4 летних детей продолжали оставаться привычными и, судя по соответствию скоростных характеристик функции нормального распределения, не зависели от других обстоятельств [25].

Таблица 2
Оценка нормальности распределения локомоторных характеристик по критериям
Table 2
Evaluation of the normality of the distribution of locomotor characteristics according to the criteria

	ходили самостоятельно/ walked on their own		ходили за руку/ walked 1 hand	
	3–4 года/ 3–4 years n=16	5–6 лет/ 5–6 years n=16	3–4 года/ 3–4 years n=16	5–6 лет/ 5–6 years n=16
Скорость, м/сек Speed, m/s	11+/1-	8+/4-	12+/ 12-	5+/7-
GPS, усл. ед. cond. units	12+/ 12-	12+/ 12-	11+/1-	10+/2-
Кинематика/ Kinematics				
Амплитуда т/б сустава/ Amplitude of the hip joint, °	11+/1-	10+/2-	11+/1-	11+/1-
Амплитуда (сгибание) коленного сустава/ Amplitude (flexion) of the knee joint, °	10+/2-	11+/1-	10+/2-	9+/3-
Амплитуда (разгибание) коленного сустава/ Amplitude (extension) of the knee joint, °	11+/1-	8+/4-	11+/1-	7+/5-
Амплитуда г/ст сустава/ Ankle joint amplitude, °	10+/2-	11+/1-	12+/ 12-	11+/1-
Амплитуда колебаний ОЦД в сагиттальной плоскости Amplitude of fluctuations of Ground Reaction ant/post, Force (BW)	8+/4-	11+/1-	10+/2-	12+/ 12-
Амплитуда колебаний ОЦД во фронтальной плоскости/ Amplitude of fluctuations of Ground Reaction med/lat, Force (BW)	12+/ 12-	10+/2-	/12-	/12-
Амплитуда колебаний ОЦД в вертикальном направлении/ Amplitude of fluctuations of Ground Reaction vertical, Force (BW)	12+/ 12-	4+/8-	6+/6-	/12-
Кинетика мощность/ Kinetics power				
Тазобедренный сустав, hip joint, W/kg	1+/11-	10+/2-	11+/1-	12+/ 12-
Коленный сустав, Knee-joint, W/kg	10+/2-	8+/4-	10+/2-	7+/5-
Опорный толчок, Push up, W/kg	11+/1-	10+/2-	12+/ 12-	11+/1-
Суммарная мощность работы суставов/ The total power of the joints, W/kg	12+/ 12-	10+/2-	10+/2-	10+/2-

Вывод: количество критериев «+» — гипотеза о нормальности не отклоняется; «-» — гипотеза о нормальности отклоняется; n — число наблюдений

Conclusion: «+» — the hypothesis of normality is not rejected; «-» — the hypothesis of normality is rejected; n — number of observations

При более высоких, в среднем, скоростных характеристиках ($0,91 \pm 0,09$ м/сек) произвольный самоопределяемый темп ходьбы у 5–6 летних детей также по 8 критериям соответствовал закону нормального распределения, однако при ходьбе за руку при скорости $0,82 \pm 0,09$ м/сек гипотеза нормальности отклонялась уже по 7 критериям. Кроме того, степень достоверности отличий ($p=0,00005/p=0,00002$, таблица 3) между темпом походки при ходьбе за руку у 3–4 летних и 5–6 летних была ниже в 2,5 раза. То есть, судя по статистическим оценкам, скоростные характеристики походки в обоих случаях принадлежали разным генеральным совокупностям, но ходьба с поддержкой уже не являлась полно-

стью привычным самостоятельно организованным двигательным стереотипом и на характер походки, по-видимому, оказывалось влияние со стороны сопровождающего. Во всяком случае, при ходьбе с поддержкой за руку гипотеза нормальности распределения отклонялись по всем 12 критериям еще и в отношении показателей диапазона колебаний ОЦД во фронтальной плоскости и в вертикальном направлении (Таблица 2). Несмотря на то, что все остальные кинематические и кинетические характеристики походки не являлись конечными приспособительными результатами локомоторной функции, они так же в рассмотренных выборочных совокупностях по большинству критериев соответствовали функции нормального распределения (Таблица 2).

Следует отметить, что обнаруженная в двигательных циклических стереотипах тенденция, касающаяся склонности локомоторных характеристик к функции нормального распределения, нашла подтверждение и в источниках литературы. В относительно однородных по возрасту группах детей 3–4 лет временные параметры цикла шага также соответствовали закону нормального распределения [26].

При этом неожиданный факт выявления ненормальности распределения в отношении единственного кинетического показателя, которым оказалась пиковая мощность работы тазобедренного сустава при самостоятельной ходьбе у детей 3–4 лет, стал статистическим аргументом поиска его взаимосвязей с другими количественными признаками [25].

Учитывая то обстоятельство, что у ребенка в 3–4 года смещение ОЦД во фронтальной плоскости коррелирует с возрастом ($r = 0,434$, $p < 0,001$) и отражает процесс развития межконечностной координации и координации скручивания туловища в контроле динамического равновесия во время ходьбы [5], а параметры кинематики таза при ходьбе отражают нейромоторную зрелость походки у детей до 4 лет [27], проведен корреляционно-регрессионный анализ пиковой мощности работы мышц тазобедренного сустава и амплитуды колебания таза при ходьбе в трех плоскостях. В результате анализа зависимость пиковой мощности работы мышц тазобедренного сустава от амплитуды движения таза в сагиттальной плоскости не подтвердилась, в то время как достоверная положительная зависимость от амплитуды движения таза во фронтальной (1) и горизонтальной (2) плоскостях у детей 3–4 лет при самостоятельной ходьбе успешно описывались уравнениями линейной регрессии:

$$A = 0,1913W - 0,0678 \quad R^2 = 0,5272 \quad \text{при } n=16, p \leq 0,05, (1)$$

$$A = 0,0283W + 0,7005 \quad R^2 = 0,4936 \quad \text{при } n=16, p \leq 0,05, (2)$$

где A — амплитуда колебания таза, W — пиковая мощность работы тазобедренного сустава.

В случае при ходьбе с поддержкой за руку контроль и коррекция динамического равновесия тела, по-видимому, осуществлялись с участием сопровождающего, поэтому и величины мощности работы мышц тазобедренного сустава соответствовали функции нормального распределения.

У детей 5–6 лет, имеющих сформированный динамический баланс тела за счет функциональной зрелости нейромышечного аппарата [5], значения пиковой мощности работы мышц тазобедренного сустава также соответствовали функции нормального распределения, а их взаимосвязь с амплитудами движения таза в исследуемых плоскостях ожидаемо отсутствовала.

Значения параметров кинематики и кинетики походки у детей 3–6 лет без двигательных нарушений представлены в таблице 3.

Таким образом, для детей 3–6 лет нормативные значения локомоторных характеристик получены при скорости ходьбы 0,65–1,05 м/сек. В медицинском модуле в клиническом заключении видеоанализа походки [18] значения нормы рассчитаны для скорости ходьбы 1,1–1,3 м/сек.

По данным литературы у здоровых детей в зависимости от используемых классификаторов нормы (UNB или Сан-Диего) от 6 до 49% (соответственно) циклов шага интерпретировались как аномальные для нормативных кинематических кривых [28]. Параметры кинетики и кинематики не имеют достоверных различий в возрастных группах 3–4 лет и 5–6 лет, но значения кинетики определяются скоростью ходьбы. При ходьбе за одну руку с уменьшением скорости ходьбы на 15% (3–4 летние), регистрировалось статистически значимое уменьшение всех параметров кинетики, а именно пиковая мощность работы тазобедренного и коленного суставов на 37% для каждого, опорного толчка — на 25% и суммарной мощности работы суставов — на 31% (таблица 3).

Полученные значения амплитуды колебания таза в сагиттальной, фронтальной и горизонтальной плоскостях соответствуют опубликованным для аналогичной возрастной группы и увеличение данного параметра является одним из критериев физиологической незрелости походки [27].

Таблица 3
Выборочные значения кинематических и кинетических параметров походки у детей 3–6 лет без двигательных нарушений (M±δ, n — число наблюдений)

Table 3

Selected values of kinematic and kinetic parameters of gait in children aged 3–6 years without movement disorders (M±δ, n — number of observations)

	3–4 года/ 3–4 years n=16		5–6 лет/ 5–6 years n=16	
	Самостоятельно/ walking independ- ently	За руку/ walking with one hand	Самостоятельно/ walking independ- ently	За руку/ walking with one hand
Скорость ходьбы, м/сек/ Speed, m/s	0,81±0,07	0,69±0,04 P ¹ = 0,00002	0,92±0,09 P ² = 0,0037	0,81±0,09 P ¹ = 0,00005
GPS общий, усл. ед./ GPS, general, cond. Units	8,36±1,09	8,48±1,1	8,32±1,32	8,40±1,54
Кинематика — амплитуда движения/ kinematics — range of motion				
голеностопный сустав/ Ankle joint, °	24,4±2,23	24,1±3,98	27,8±2,71	25,4±2,62
разгибания в коленном суставе/ extension of the knee joint, °	8,12±2,21	6,2±1,78 P ¹ =0,0058	7,69±2,94	6,08±1,68
сгибания в коленном суставе/ flexion of the knee joint, °	57,9±7,3	56,4±7,88	56,2±3,31	54,2±3,13
тазобедренного сустава/ hip joint, °	42,9±2,63	40,1±3,6	43,5±2,59	40,6±3,12
Таза в сагиттальной плоскости/ pelvis tilt, °	5,6±0,74	5,3±0,62	4,5±0,62	4,6±0,60
Таза во фронтальной плоскости/ pelvis obliquity, °	6,4±0,87	5,9±0,70	6,6±1,15	6,6±1,15
Таза в горизонтальной плоскости pelvis rotation, °	15,8±4,49	18,0±5,06	13,9±2,52	14,6±2,49
Max значение торсии бедра/ Max hip torsion value, °	9,66±6,91	10,7±6,75	12,4±7,24	11,3±7,9
Max угол установки стопы относительно вектора движения/ Max Foot Progression, °	4,3±7.21	4,7±5.84	5,3±6.81	5,3±6,28
Кинетика — пиковая мощность работы/ Kinetics — peak power				
тазобедренный сустава/ hip joint, W/kg	1,15±0,19	0,73±0,13 P ¹ =0,00007	1,02±0,23	0,88±0,26
Коленный сустава/ knee joint, W/kg	1,47±0,29	0,93±0,17 P ¹ =0,00001	1,36±0,32	1,23±0,35
Опорный толчок/ Push up W/kg	2,31±0,51	1,75±0,26 P ¹ =0,0019	2,84±0,57	2,40±0,37
Суммарная мощность/ Total power, W/kg	4,94±0,75	3,41±0,49 P ¹ =0,000039	5,22±0,94	4,51±0,77

Примечание: P¹ — показана величина достоверности различий по t-критерию Стьюдента для зависимых переменных относительно самостоятельной походки,

P² — показана величина достоверности различий по t-критерию Стьюдента для независимых переменных относительно детей 3–4 лет.

Note: P¹ — shows the magnitude of the significance of differences according to Student's t-test for dependent variables relative to independent gait,

P² — shows the magnitude of the significance of differences according to Student's t-test for independent variables relative to children 3–4 years old.

Выводы

Основные характеристики локомоторной активности в однородных по возрасту группах детей 3–6

лет подчинялись функции нормального распределения. Следовательно, для определения диапазона нормы может использоваться правило сигмальных отклонений.

Представленные нами данные можно применять в качестве нормативных ориентиров для детей 3–6 лет в привычном для них скоростном темпе ходьбы.

Для детей 3–4 лет допустимы условия обследования, как при самостоятельной ходьбе, так и с поддержкой за одну руку. Для детей 5–6 лет обследование рекомендуется проводить во время самостоятельной ходьбы, поскольку ходьба с поддержкой за руку искажается сопровождающим и расценивается как неестественная.

У детей 3–4 лет параметры кинематики таза и мощности мышц тазобедренного сустава имеют достоверную линейную зависимость и могут отражать функциональную зрелость нейромышечного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hestbaek L., Andersen S.T., Skovgaard T., Olesen L.G., Elmose M., Bleses D. et al. Influence of motor skills training on children's development evaluated in the Motor skills in PreSchool (MiPS) study-DK: study protocol for a randomized controlled trial, nested in a cohort study. *Trials*. 2017; 18(1): 400. DOI: 10.1186/s13063-017-2143-9
2. Hallemans A., Verbecque E., Dumas R., Cheze L., Van Hamme A., Robert T. Developmental changes in spatial margin of stability in typically developing children relate to the mechanics of gait. *Gait Posture*. 2018; 63: 33–38. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.04.019
3. Liu W., Mei Q., Yu P., Gao Z., Hu Q., Fekete G. et al. Biomechanical characteristics of the typically developing toddler gait: a narrative review. *Children (Basel)*. 2022; 9(3): 406. DOI: 10.3390/children9030406
4. Meyns P., Van de Walle P., Desloovere K., Janssens S., Van Sever S., Hallemans A. Age-related differences in interlimb coordination during typical gait: An observational study. *Gait Posture*. 2020; 81: 109–115. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.07.013
5. Mani H., Miyagishima S., Kozuka N., Kodama Y., Takeda K., Asaka T. Development of postural control during single-leg standing in children aged 3–10 years. *Gait Posture*. 2019; 68: 174–180. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.11.024
6. Hu M., Zhou N., Xu B., Chen W., Wu J., Zhou J. Quantifying intra-limb coordination in walking of healthy children aged three to six. *Gait Posture*. 2016; 50: 82–88. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.08.025
7. Mani H., Miyagishima S., Kozuka N., Inoue T., Hasegawa N., Asaka T. Development of the relationships among dynamic balance control, inter-limb coordination, and torso coordination during gait in children aged 3–10 years. *Front Hum Neurosci*. 2021; 15: 740509. DOI: 10.3389/fnhum.2021.740509
8. Витензон А.С., Петрушанская К.А., Спивак Б.Г., Матвеева И.А., Гриценко Г.П., Сутченков И.А. Особенности биомеханической структуры ходьбы у здоровых детей разного возраста. *Российский журнал биомеханики*. 2013; 17, № 1 (59): 78–93
9. Ciğali B.S., Uluçam E., Bozer C. 3-D Motion analysis of hip, knee and ankle joints of children aged between 7–11 years during gait. *Balk Med J*. 2011; 28: 197–201. DOI: 10.5174/tutfd.2010.04199.2
10. Corporaal S.H.A., Bruijn S.M., Hoogkamer W., Chalavi S., Boisgontier M.P., Duysens J. et al. Different neural substrates for precision stepping and fast online step adjustments in youth. *Brain Struct Funct*. 2018; 223(4): 2039–2053. DOI: 10.1007/s00429-017-1586-9
11. Whitcome K. K., Miller E. E., Burns J. L. Pelvic rotation effect on human stride length: releasing the constraint of obstetric selection. *Anat. Rec. (Hoboken)*. 2017; 300: 752–763. DOI: 10.1002/ar.23551
12. Bach M.M., Daffertshofer A., Dominici N. The development of mature gait patterns in children during walking and running. *Eur. J. Appl. Physiol*. 2021; 121: 1073–1085. DOI: 10.1007/s00421-020-04592-2
13. Summa A., Vannozzi G., Bergamini E., Iosa M., Morelli D., Cappozzo A. Multilevel upper body movement control during gait in children with cerebral palsy. *PloSone*. 2016; 11(3): e0151792. DOI: 10.1371/journal.pone.0151792
14. Mudge A.J., Baua K.V., Purcella L.N., Wua J.C., Axta M.W., Selbera P. et al. Normative reference values for lower limb joint range, bone torsion, and alignment in children aged 4–16 years. *J. Pediatr Orthoped*. 2014; 23: 15–25. DOI: 10.1097/BPB.0b013e328364220a
15. Benard M.A. Pediatric Considerations. *Clin Podiatr Med Surg*. 2020 Jan; 37(1): 125–150. DOI: 10.1016/j.cpm.2019.08.001.

16. Smith Y., Louw Q., Brink Y. The three-dimensional kinematics and spatiotemporal parameters of gait in 6–10 year old typically developed children in the cape metropole of South Africa – a pilot study. *BMC Pediatr.* 2016; 16: 200. DOI:10.1186/s12887-016-0736-1

17. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. Москва: Т.М. Андреева, 2007. – 640 с.

18. Долганова Т.И., Чибиров Г.М., Долганов Д.В., Попков Д.А. Результаты клинико-инструментального анализа походки у детей со спастическими формами детского церебрального паралича. *Медицинский вестник Северного Кавказа.* 2020; 15(2): 255-259. DOI: 10.14300/mnnc.2020.15060

19. Thevenon A., Gabrielli F., Lepvrier J., Faupin A., Allart E., Tiffreau V. et al. Collection of normative data for spatial and temporal gait parameters in a sample of French children aged between 6 and 12. *Ann Phys Rehabil Med.* 2015; 58(3): 139-44. DOI: 10.1016/j.rehab.2015.04.001

20. Долганова Т.И., Гатамов О.И., Чибиров Г.М., Долганов Д.В., Попков Д.А. Клинико-биомеханические результаты многоуровневых ортопедических вмешательств при crouch. *Гений ортопедии.* 2020; 26(3): 325-333. DOI:10.18019/1028-4427-2020-26-3-325-333

21. Ferre-Fernández M., Murcia-González M.A., Barnuevo Espinosa M.D., Ríos-Díaz J. Measures of motor and functional skills for children with cerebral palsy: a systematic review. *Pediatr Phys Ther.* 2020; 32(1): 12-25. DOI: 10.1097/PEP.0000000000000661

22. Патент 2020665238 Российская Федерация. Программа формирования отчета биомеханики ходьбы человека /А.Ю. Аксенов, Т.А. Клишковская; заявитель и патентообладатель ФГБУ «НМИЦ ТО им. акад. Г.А.Илизарова» МЗ РФ. № 2020665238; заявл. 24.11.2020; опубл. 24.11.2020

23. Visscher R.M.S., Freslier M., Moissenet F., Sansgiri S., Singh N.B., Viehweger E. et al. Impact of the marker set configuration on the accuracy of gait event detection in healthy and pathological subjects. *Front. Hum. Neurosci.* 2021; 15: 720699. doi: 10.3389/fnhum.2021.720699

24. Гайдышев И.П. Решение научных и инженерных задач средствами Excel, VBA и C/C++. Санкт-Петербург: ВХВ-Петербург, 2004. 512 с.

25. Леонов В.П. Требования и рекомендации по описанию и использованию статистического анализа в исследованиях. *Инновационная медицина Кубани.* 2019; 15(3): 74-76. DOI: 10.35401/2500-0268-2019-15-3-74-76

26. Motiian S., Pergami P., Guffey K., Mancinelli C.A., Doretto G. Automated extraction and validation of children's gait parameters with the Kinect. *Biomed Eng On line.* 2015; 14: 112. DOI: 10.1186/s12938-015-0102-9

27. Gieysztor E., Pecuch A., Kowal M., Borowicz W., Paprocka-Borowicz M. Pelvic symmetry is influenced by asymmetrical tonic neck reflex during young children's gait. *International journal of environmental research and public health.* 2020; 17(13): 4759. DOI:10.3390/ijerph17134759

28. Oudenhoven L.M., Booth A.T.C., Buizer A.I., Harlaar J., van der Krogt M.M. How normal is normal: Consequences of stride to stride variability, treadmill walking and age when using normative pediatric gait data. *Gait Posture.* 2019; 70: 289-297. DOI:10.1016/j.gaitpost.2019.03.011.

Авторы

Долганова Тамара Игоревна

Доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории клиники нейроортопедии и системных заболеваний

rjik532007@rambler.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>

Смолькова Лидия Владимировна

Аспирант

slv@odb45.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>

Долганов Дмитрий Владимирович

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории клиники нейроортопедии и системных заболеваний

paradigma-dv@rambler.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>

ФБГУ «НМИЦ ТО» им. акад. Г.А.Илизарова

Российская Федерация, 640014, г. Курган, улица М. Ульяновой, 6

T.I. Dolganova, L.V. Smolkova, D.V. Dolganov

BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE LOCOMOTOR ACTIVITY IN CHILDREN OF 3–6 YEARS OLD WITHOUT MOVEMENT DISORDERS

FSBI “National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics”
of the RF Ministry of Health, Kurgan, Russian Federation

Abstract. Purpose of the study — to form normative guidelines for the values of kinetic and kinematic parameters of gait in children aged 3–6 years without motor disorders. **Materials and methods.** Using video analysis to determine the normative range of the values of locomotor characteristics, the gait profile (Gait profile Score — GPS) was assessed in children aged 3–6 years (n=16) without movement disorders in the laboratory of biomechanics of the Ilizarov Centre. Kinematic parameters were recorded with Qualisys 7+ optical cameras (n=8), kinetic parameters were recorded using Kistler dynamometric platforms (n=6). The examination consisted of two tests: 1 — independent walking with the usual speed of movement on a 7-m track; 2 — carried out on the background of comfortable for the child accompaniment by an adult for 1 hand. Analysis of results was carried out by automated calculations of kinematics and kinetics values using descriptive statistics. The assessment of the normality of the distribution of the studied parameters was performed according to 12 univariate criteria. **Results.** It has been established that the main characteristics of locomotor activity in age-homogeneous groups of children aged 3–6 years obey the normal distribution function and, therefore, the normative range of functioning values can be determined by the rule of sigma deviations. The article presents selective values of kinematic and kinetic parameters of gait in children aged 3–6 years without movement disorders recommended as normative guidelines. **Conclusions.** For children 3–4 years old, examination conditions are acceptable both independently and with support by the hand. For children aged 5–6 years, the examination should include only independent walking, walking with support by the hand distorts the structure of the locomotor stereotype of the accompanying person, and therefore such a gait should be regarded as unnatural.

Keywords: children, gait, movement stereotype, function of normal distribution, kinetic parameters, kinematic parameters

There is no conflict of interest.

Contact details of the corresponding author:

Tamara I. Dolganova

rjik532007@rambler.ru

Received 11.06.2022

For citation:

Dolganova T.I., Smolkova L.V., Dolganov D.V. Biomechanical characteristics of the locomotor activity in children of 3-6 years old without movement disorders. [Online] Vestn. Ural. Med. Akad. Nauki. = Journal of Ural Medical Academic Science. 2022, Vol. 19, no. 5, pp. 502–513. DOI: 10.22138/2500-0918-2022-19-5-502-513 (In Russ)

REFERENCES

1. Hestbaek L., Andersen S.T., Skovgaard T., Olesen L.G., Elmose M., Bleses D., Andersen S.C., Lauridsen H.H. Influence of motor skills training on children’s development evaluated in the Motor skills in PreSchool

(MiPS) study-DK: study protocol for a randomized controlled trial, nested in a cohort study. *Trials*. 2017; 18 (1): 400. DOI: 10.1186/s13063-017-2143-9.

2.Hallemans A., Verbecque E., Dumas R., Cheze L., Van Hamme A., Robert T. Developmental changes in spatial margin of stability in typically developing children relate to the mechanics of gait. *Gait Posture*. 2018; 63: 33-38. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.04.019.

3.Liu W., Mei Q., Yu P., Gao Z., Hu Q., Fekete G., István B., Gu Y. Biomechanical characteristics of the typically developing toddler gait: a narrative review. *Children (Basel)*. 2022; 9 (3): 406. DOI: 10.3390/children9030406.

4.Meyns P., Van de Walle P., Desloovere K., Janssens S., Van Sever S., Hallemans A. Age-related differences in interlimb coordination during typical gait: An observational study. *Gait Posture*. 2020; 81: 109-115. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.07.013.

5.Mani H., Miyagishima S., Kozuka N., Kodama Y., Takeda K., Asaka T. Development of postural control during single-leg standing in children aged 3-10 years. *Gait Posture*. 2019; 68: 174-180. DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.11.024.

6.Hu M., Zhou N., Xu B., Chen W., Wu J., Zhou J. Quantifying intra-limb coordination in walking of healthy children aged three to six. *Gait Posture*. 2016; 50: 82-88. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2016.08.025.

7.Mani H., Miyagishima S., Kozuka N., Inoue T., Hasegawa N., Asaka T. Development of the relationships among dynamic balance control, inter-limb coordination, and torso coordination during gait in children aged 3-10 years. *Front. Hum. Neurosci.* 2021; 15: 740509. DOI:10.3389/fnhum.2021.740509.

8.Vitenzon A.S., Petrushanskaia K.A., Spivak B.G., Matveeva I.A., Gritsenko G.P., Sutchenkov I.A. Characteristic features of the biomechanical structure of walking in normal children of different ages. *Russian Journal of Biomechanics*. 2013; 17 (1): 78-93. (in Russian)

9.Çiğali B.S., Uluçam E., Bozer C. 3D motion analysis of hip, knee and ankle joints of children aged between 7-11 years during gait. *Balkan Med. J.* 2011; 28: 197-201. DOI:10.5174/tutfd.2010.04199.2.

10.Corporaal S.H.A., Bruijn S.M., Hoogkamer W., Chalavi S., Boisgontier M.P., Duysens J., Swinnen S.P., Gooijers J. Different neural substrates for precision stepping and fast online step adjustments in youth. *Brain Struct. Funct.* 2018; 223 (4): 2039-2053. DOI: 10.1007/s00429-017-1586-9.

11.Whitcome K.K., Miller E.E., Burns J.L. Pelvic rotation effect on human stride length: releasing the constraint of obstetric selection. *Anat. Rec. (Hoboken)*. 2017; 300 (4): 752-763. DOI: 10.1002/ar.23551.

12.Bach M.M., Daffertshofer A., Dominici N. The development of mature gait patterns in children during walking and running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2021; 121 (4): 1073-1085. DOI: 10.1007/s00421-020-04592-2.

13.Summa A., Vannozzi G., Bergamini E., Iosa M., Morelli D., Cappozzo A. Multilevel upper body movement control during gait in children with cerebral palsy. *PLoS One*. 2016; 11 (3): e0151792. DOI: 10.1371/journal.pone.0151792.

14.Mudge A.J., Bau K.V., Purcell L.N., Wu J.C., Axt M.W., Selber P., Burns J. Normative reference values for lower limb joint range, bone torsion, and alignment in children aged 4-16 years. *J. Pediatr. Orthop. B*. 2014; 23 (1): 15-25. DOI: 10.1097/BPB.0b013e328364220a.

15.Benard M.A. Pediatric Considerations. *Clin. Podiatr. Med. Surg.* 2020; 37 (1): 125-150. DOI: 10.1016/j.cpm.2019.08.001.

16.Smith Y., Louw Q., Brink Y. The three-dimensional kinematics and spatiotemporal parameters of gait in 6-10 year old typically developed children in the Cape Metropole of South Africa – a pilot study. *BMC Pediatr.* 2016; 16 (1): 200. DOI: 10.1186/s12887-016-0736-1.

17.Skvortsov D.V. Diagnosing motor pathology by instrumental methods: gait analysis, stabilometry. Moscow: T.M. Andreeva; 2007. (in Russian)

18.Dolganova T.I., Chibirov G.M., Dolganov D.V., Popkov D.A. Results of clinical and instrumental analysis of gait in children with spastic forms of cerebral palsy. *Medical Bulletin of the North Caucasus*. 2020; 15 (2): 255-259. DOI: 10.14300/mnnc.2020.15060.

19.Thevenon A., Gabrielli F., Lepvrier J., Faupin A., Allart E., Tiffreau V., Wieczorek V. Collection of normative data for spatial and temporal gait parameters in a sample of French children aged between 6 and 12. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2015; 58 (3): 139-144. DOI: 10.1016/j.rehab.2015.04.001.

20.Dolganova T.I., Gatamov O.I., Chibirov G.M., Dolganov D.V., Popkov D.A. Clinical and biomechanical results of multilevel orthopaedic interventions in crouch-gait patients. *Orthopedic Genius*. 2020; 26 (3): 325-333. (in Russian) DOI:10.18019/1028-4427-2020-26-3-325-333.

21. Ferre-Fernández M., Murcia-González M.A., Barnuevo Espinosa M.D., Ríos-Díaz J. Measures of motor and functional skills for children with cerebral palsy: a systematic review. *Pediatr. Phys. Ther.* 2020; 32 (1): 12-25. DOI: 10.1097/PEP.0000000000000661.
22. Aksenov A.Iu., Klishkovskaia T.A. The program for generating a report on the biomechanics of human walking. Patent RF, No 2020665238; 2020. (in Russian)
23. Visscher R.M.S., Freslier M., Moissenet F., Sansgiri S., Singh N.B., Viehweger E., Taylor W.R., Brunner R. Impact of the marker set configuration on the accuracy of gait event detection in healthy and pathological subjects. *Front. Hum. Neurosci.* 2021; 15: 720699. DOI: 10.3389/fnhum.2021.720699.
24. Gaidyshev I.P. Solving scientific and engineering problems using Excel, VBA and C/C ++. St. Petersburg: VKhV-Peterburg; 2004. (in Russian)
25. Leonov V.P. Requirements and recommendations for the description and use of statistical analysis in research. *Innovative medicine of Kuban.* 2019; 15 (3): 74-76. (in Russian) DOI: 10.35401/2500-0268-2019-15-3-74-76.
26. Motiiian S., Pergami P., Guffey K., Mancinelli C.A., Doretto G. Automated extraction and validation of children's gait parameters with the Kinect. *Biomed. Eng. Online.* 2015; 14: 112. DOI: 10.1186/s12938-015-0102-9.
27. Gieysztor E., Pecuch A., Kowal M., Borowicz W., Paprocka-Borowicz M. Pelvic symmetry is influenced by asymmetrical tonic neck reflex during young children's gait. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020; 17 (13): 4759. DOI: 10.3390/ijerph17134759.
28. Oudenhoven L.M., Booth A.T.C., Buizer A.I., Harlaar J., van der Krogt M.M. How normal is normal: Consequences of stride to stride variability, treadmill walking and age when using normative paediatric gait data. *Gait Posture.* 2019; 70: 289-297. DOI:10.1016/j.gaitpost.2019.03.011.

Aauthors

Tamara I. Dolganova

M.D., Ph.D., leading researcher of the Scientific Laboratory of the Clinics for neuroorthopedics and systemic diseases

rjik532007@rambler.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>

Lidia V. Smolkova

Postgraduate

slv@odb45.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>

Dmitry V. Dolganov

Ph.D. in Biology, senior researcher of the Scientific Laboratory of the Clinics for neuroorthopedics and systemic diseases

paradigma-dv@rambler.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>

FSBI NIMRC TO of the RF Ministry of Health, Kurgan
6 M. Ulianova Street Kurgan Russian Federation 640014