



УДК 531/534:[57+61]

## ОСОБЕННОСТИ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ХОДЬБЫ У ЗДОРОВЫХ ДЕТЕЙ РАЗНОГО ВОЗРАСТА

**А.С. Витензон<sup>1</sup>, К.А. Петрушанская<sup>2</sup>, Б.Г. Спивак<sup>1</sup>,  
И.А. Матвеева<sup>3</sup>, Г.П. Гриценко<sup>1</sup>, И.А. Сутченков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Федеральное бюро медико-социальной экспертизы Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации, Россия, 127486, Москва, ул. Ивана Сусанина, 3, e-mail: fgufbmsebiomech@rambler.ru

<sup>2</sup> Научный центр здоровья детей Российской академии медицинских наук, Россия, 119296, Москва, Ломоносовский проспект, 2

<sup>3</sup> Научно-практический центр детской психоневрологии Департамента здравоохранения Российской Федерации, Россия, 119602, Москва, Мичуринский проспект, 74

**Аннотация.** Рассмотрена биомеханическая структура ходьбы здоровых детей трёх возрастных групп – от 7 до 13 лет. Закономерности изменений биомеханических параметров ходьбы были прослежены в возрастном аспекте с целью получения нормативных данных по локомоции детей, что необходимо прежде всего для дальнейшего сопоставления их ходьбы с ходьбой детей с патологией опорно-двигательного аппарата. Однако полученные данные представляют интерес не только для формирования базы данных по ходьбе здоровых детей разного возраста, но и для выяснения механизмов становления локомоторного навыка в процессе онтогенеза. Данная работа является лишь первым этапом анализа ходьбы здоровых детей. Цель последующих мероприятий – разработка методик для изучения ходьбы детей более раннего возраста. Необходимость данных исследований продиктована тем, что именно в этом возрасте возможно наиболее полноценное восстановление двигательных функций у детей с поражениями опорно-двигательного аппарата, а следовательно, становится чрезвычайно актуальным сопоставление их ходьбы с ходьбой здоровых детей соответствующего возраста.

**Ключевые слова:** биомеханические особенности ходьбы, характеристики ходьбы детей различного возраста, моменты мышечных сил в суставах нижних конечностей, формирование локомоторного навыка.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема детской инвалидности является одной из наиболее актуальных в современной медицине. За последние годы резко возросло количество детей-инвалидов с поражением опорно-двигательного аппарата [10].

В связи с этим возникла необходимость не только комплексной реабилитации таких детей, но и инструментальной оценки функции их передвижения. Поскольку параметры ходьбы больных необходимо всегда сопоставлять с нормой, авторы

---

© **Витензон А.С.**, Петрушанская К.А., Спивак Б.Г., Матвеева И.А., Гриценко Г.П., Сутченков И.А., 2013  
Витензон Анатолий Самойлович, Москва

Петрушанская Кира Анатольевна, к.б.н., с.н.с. отдела восстановительного лечения детей с церебральными параличами научного центра здоровья детей РАМН, Москва

Спивак Борис Григорьевич, к.м.н., г.н.с. федерального бюро медико-социальной экспертизы, Москва

Матвеева Ирина Антоновна, к.м.н., заведующая отделом восстановительной медицины и реабилитации научно-практического центра детской психоневрологии, Москва

Гриценко Галина Павловна, к.т.н., в.н.с. кабинета физиологии и эргономики движений, Москва

Сутченков Игорь Анатольевич, инженер научно-медицинской фирмы МБН, Москва

проанализировали ходьбу здоровых детей разного возраста. Подобные исследования предпринимались неоднократно [1, 3, 4, 8, 11–13]. При этом некоторые авторы обращали внимание только на становление локомоторного навыка в младшей возрастной группе, т.е. до 4 лет [4, 12], другие авторы определяли параметры ходьбы у детей дошкольного и школьного возраста, разделив их на 4 возрастные группы: 3–5 лет, 7–8 лет, 10–11 лет и 14–15 лет [1, 3].

Наиболее полное описание и анализ экспериментальных данных по ходьбе детей в возрасте от 3 до 15 лет были даны в нескольких монографиях [1, 8, 9, 10–13]. В частности, Д.П. Букреева и соавт. [1] установили, что с увеличением возраста детей происходят закономерные изменения биомеханической структуры ходьбы: снижение высокого темпа передвижения, свойственного детям младшего возраста, увеличение длины шага и средней скорости ходьбы, повышение ритмичности движений, их устойчивости и экономичности, и наконец возникает большая концентрация мышечных усилий в более короткие интервалы времени. Тем не менее эти исследования были проведены еще до появления компьютерной техники; в них отсутствовали усреднённые данные по изменению кинематических и динамических параметров, необходимые для сравнения структуры ходьбы здоровых детей с ходьбой детей с поражением опорно-двигательного аппарата.

В более поздних работах *D.H. Sutherland et al.* [10] показали, что длина шага напрямую зависит от роста и что отношение роста к длине шага у детей очень близко к соответствующему отношению у взрослых людей. С их точки зрения, изменение длины шага с возрастом зеркально отражает изменения роста: отмечается резкое увеличение роста к 4 годам, а затем темп роста тела замедляется, и в полном соответствии с ним замедляется рост длины шага. *F.N. Todd et al.* [13] показали соотношение между ростом детей и основными параметрами ходьбы. По их мнению, для ходьбы детей самого раннего возраста характерен очень высокий темп – 170 шаг/мин. С возрастом темп ходьбы замедляется, но даже к 7 годам он равен приблизительно 140 шаг/мин, что значительно превышает темп ходьбы взрослых людей – 113 шаг/мин для мужчин и 118 шаг/мин для женщин.

*M.W. Whittle* [11] проследил изменение длительности опорной и переносной фазы у детей от самого раннего возраста до 4 лет. Выяснилось, что у детей самого раннего возраста длительность переносной фазы резко снижена (в процентном отношении к длительности всего локомоторного цикла) по сравнению со взрослыми, что минимизирует время, проведённое в неустойчивом положении в одноопорную фазу шага. Автор отмечает, что относительная длительность переносной фазы повышается с возрастом и к 4 годам достигает соотношения взрослых испытуемых.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что большая часть работ как отечественных, так и зарубежных авторов посвящена не столько выявлению биомеханической структуры ходьбы здоровых детей разного возраста с целью формирования нормативных данных по их локомоции, сколько проблеме становления у них локомоторного навыка. Поэтому представляет научный и практический интерес возвращение к возрастному исследованию локомоторных функций у здоровых детей с целью получения статистически достоверных данных по данной возрастной группе, что необходимо для последующего сопоставления их локомоции с локомоцией детей соответствующего возраста с поражениями опорно-двигательного аппарата.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Под наблюдением находились 307 детей разного возраста: 106 детей 7–8 лет, 105 детей 10–11 лет и 96 детей 13 лет. Все дети были клинически обследованы ортопедом-травматологом с целью отбора ортопедически здоровых испытуемых. Иначе говоря, в эту группу вошли только те дети, у которых в анамнезе не было переломов и

серьёзных травм конечностей и позвоночника, отсутствовали даже начальные признаки сколиотической болезни, плоскостопие, а укорочение одной из конечностей не превышало 0,5 см.

Из 307 обследованных детей только 32 были признаны ортопедически здоровыми. Таким образом, объектом исследования была ходьба 32 здоровых детей трёх возрастных групп: первая группа – 7–8 лет (12 человек), вторая группа – 10–11 лет (10 чел.) и третья группа – 13 лет (10 чел.). Из них мальчиков было 15 человек, девочек – 17.

Посредством диагностического инструментального комплекса исследовали следующие биомеханические параметры ходьбы: основные, временные, кинематические и динамические.

По подограмме определяли основные и временные параметры ходьбы, а именно: длительность цикла, темп ходьбы, среднюю длину шага расчётным путем, среднюю скорость передвижения, продолжительность опорной, двуопорной и переносной фаз, интервалов опоры на пятку, всю стопу и ее передний отдел, интервал  $\tau$  – время от отрыва пятки одной ноги до начала опоры другой ноги, коэффициент ритмичности (отношение длительности переносной фазы обеих ног).

Кинематические параметры (угловые перемещения в голеностопном, коленном и тазобедренном суставах обеих конечностей) регистрировали посредством многозвенных электрогониометров.

Динамические параметры (вертикальную, продольную и поперечную составляющие главного вектора опорной реакции) исследовали посредством динамографической методики.

Биомеханические параметры записывали у всех испытуемых в шести проходах по горизонтальной поверхности. Измеряемые параметры обрабатывали с частотой 200 раз в секунду при помощи 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя с погрешностью 1–2 разряда при помощи программы съёма измерений. По полученным данным строили графики изменения различных параметров ходьбы в течение локомоторного цикла.

Для расчёта количественных показателей энерготрат наиболее эффективным является метод математического моделирования. Для оценки ходьбы взрослых испытуемых и здоровых детей разного возраста используется математическая модель, разработанная Г.П. Гриценко [5–7]. На основе этой модели рассчитываются суставные моменты в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах в течение двойного шага. Модель предназначена для исследования ходьбы в сагиттальной плоскости по горизонтальной опорной поверхности.

Физическая модель представлена в виде девятизвенной биокинематической цепи. Все части тела выше тазобедренного сустава моделируются одним звеном (туловищем), а каждая из нижних конечностей – четырёхзвенной шарнирной цепочкой. Использование принципа освобождения от связей позволяет рассматривать опорные реакции как внешние нагрузки на динамическую систему.

Уравнения динамики модели составлены с учетом следующих допущений: все звенья биокинематической цепи абсолютно жесткие; звенья имеют постоянные значения моментов инерции и координат центров масс; связи между звеньями стационарные, а сама система голономная. Иначе говоря, звенья связаны между собой идеальными шарнирами.

Движение данной биокинематической цепи обеспечивается действием суставных моментов, развиваемых мышцами человека при ходьбе. Модель имеет 11 степеней свободы. Нелинейные дифференциальные уравнения динамики системы получены с использованием уравнений Лангранжа II рода и разрешены относительно определяемых суставных моментов [5–7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Основные характеристики

В табл. 1 приведены основные параметры ходьбы здоровых детей трех возрастных групп в их сопоставлении с ходьбой взрослых людей. Видно, что у детей всех возрастных групп длительность цикла меньше, чем у взрослых, а произвольный темп, соответственно, выше. Наиболее высокий темп (121 шаг/мин) отмечается в первой возрастной группе, во второй группе темп ходьбы равен 115 шаг/мин, в третьей группе он самый низкий – 106 шаг/мин.

Противоположная тенденция отмечается в изменении длины двойного шага: у взрослых она равна 1,42 м, у детей 7 лет – 1,04 м, у детей 11 лет – 1,15 м, у детей 13 лет – 1,26 м.

Средняя скорость ходьбы у детей всех групп меньше, чем у взрослых, соответственно 3,78, 4,00 и 4,01 км/ч.

### Временные характеристики

Несмотря на различия темпа, временная структура ходьбы детей разного возраста приблизительно одинакова. В каждом цикле представлены две основные фазы: опорная и переносная. Опорная фаза четко разделена на три интервала: опору на пятку, всю стопу и носок, определяется также двуопорная фаза и положительный интервал  $\tau$  (отрыв пятки от опоры происходит раньше наступания другой ноги).

Возрастные особенности временных параметров имеют количественный характер: так, в первых двух возрастных группах по сравнению со взрослыми испытуемыми отмечается более длительная переносная фаза и, наоборот, более короткая двуопорная фаза. Для третьей группы характерно увеличение длительности опоры на передний и задний отделы стопы, а также двуопорной фазы и незначительное уменьшение длительности переносной фазы. Коэффициент ритмичности так же, как и у взрослых, близок к 1, и лишь в первой группе составляет 0,96.

Следовательно, временная структура шага, судя по осредненным данным, уже вполне сформирована к возрасту 7 лет. При этом относительная длительность фаз и интервалов шага в возрастном аспекте оказывается достаточно стабильной (табл. 2).

### Кинематические характеристики

На рис. 1 приведены графики изменений угловых перемещений в трёх крупных суставах нижних конечностей при ходьбе детей разного возраста, а в табл. 3 даны максимальные значения межзвенных углов. Из графиков видно, что кинематический рисунок ходьбы весьма близок во всех возрастных группах и в основном соответствует кинематике ходьбы взрослых испытуемых.

Так, на всех кривых межзвенных углов у детей и взрослых прослеживаются одинаковые фазы движений. В голеностопном суставе их четыре: два подошвенных сгибания в начале и в конце опорной фазы и два тыльных сгибания во время опоры на передний отдел стопы и во время переноса ноги; в коленном суставе также отмечаются четыре движения – сгибание с малой амплитудой (подгибание) в начале опорной фазы и с большой амплитудой – в переносную фазу, одно разгибание в опорную фазу и другое – в переносную; в тазобедренном суставе отмечаются три экстремальных значения: два сгибания в начале и в конце цикла и одно разгибание во время опоры на передний отдел стопы.

Таблица 1

Основные характеристики ходьбы у взрослых и детей различного возраста в норме

Параметр	Взрослые	Дети											
		I группа			II группа			III группа					
		$M \pm m$	%	$p$	$M \pm m$	%	$p$	$M \pm m$	%	$p$			
Длительность двойного шага, с	$1,21 \pm 0,03$	82	<0,05	$1,04 \pm 0,01$	86	<0,05	$1,13 \pm 0,03$	93	>0,05				
Длина двойного шага, м	$1,42 \pm 0,02$	73	<0,05	$1,15 \pm 0,02$	81	<0,05	$1,26 \pm 0,04$	89	<0,05				
Средняя скорость, м/с	$1,17 \pm 0,03$	90	<0,05	$1,11 \pm 0,02$	95	>0,05	$1,12 \pm 0,03$	96	>0,05				
Средняя скорость, км/ч	$4,22 \pm 0,11$	90	<0,05	$4,00 \pm 0,06$	95	>0,05	$4,01 \pm 0,10$	95	>0,05				
Темп, шаг/мин	$99 \pm 2$	122	<0,05	$115 \pm 1$	116	<0,05	$106 \pm 2$	107	<0,05				

Таблица 2

**Временные характеристики ходьбы (% к длительности двойного шага)  
у взрослых и здоровых детей различного возраста**

Нога	Параметр	Дети											
		Взрослые			I группа			II группа			III группа		
		$M \pm m$	%	$p$	$M \pm m$	%	$p$	$M \pm m$	%	$p$	$M \pm m$	%	$p$
Правая нижняя конечность	Опора на пятку	6,4±0,6	97	>0,05	6,2±0,5	97	>0,05	6,9±0,5	108	>0,05	7,9±0,7	123	>0,05
	Опора на всю стопу	37,3±1,1	102	>0,05	37,9±1,6	102	>0,05	37,8±0,8	101	>0,05	35,7±1,6	96	>0,05
	Опора на носок	19,0±0,8	94	>0,05	17,9±1,2	94	>0,05	16,9±0,9	89	>0,05	19,2±1,2	101	>0,05
	Переносная фаза	37,3±0,6	102	>0,05	38,0±0,5	102	>0,05	38,4±0,7	103	>0,05	37,2±0,6	100	>0,05
	Двуопорная фаза	12,7±0,4	80	<0,05	10,2±0,7	80	<0,05	12,1±0,9	95	>0,05	12,7±0,4	100	>0,05
Левая нижняя конечность	Сдвиг (интервал τ)	6,6±1,1	83	>0,05	5,5±1,4	83	>0,05	5,5±1,5	83	>0,05	6,7±1,2	102	>0,05
	Опора на пятку	6,6±0,5	106	>0,05	7,0±0,4	106	>0,05	7,2±0,5	109	>0,05	7,3±0,5	111	>0,05
	Опора на всю стопу	38,0±0,9	97	>0,05	36,8±1,7	97	>0,05	36,9±1,1	97	>0,05	35,2±2,6	93	>0,05
	Опора на носок	17,8±0,7	94	>0,05	16,8±1,5	94	>0,05	17,8±0,8	100	>0,05	20,0±2,4	112	>0,05
	Переносная фаза	37,6±0,4	105	<0,05	39,4±0,7	105	<0,05	38,1±0,5	101	>0,05	37,5±0,3	100	>0,05
Коэффициент ритмичности	Двуопорная фаза	12,4±0,6	100	>0,05	12,4±0,7	100	>0,05	11,4±0,3	92	>0,05	12,6±0,3	102	>0,05
	Сдвиг (интервал τ)	5,1±0,8	129	>0,05	6,6±1,5	129	>0,05	5,7±1,1	112	>0,05	7,3±2,4	143	>0,05
		0,99±0,01	97	<0,05	0,96±0,01	97	<0,05	0,99±0	100	>0,05	0,99±0,01	100	>0,05

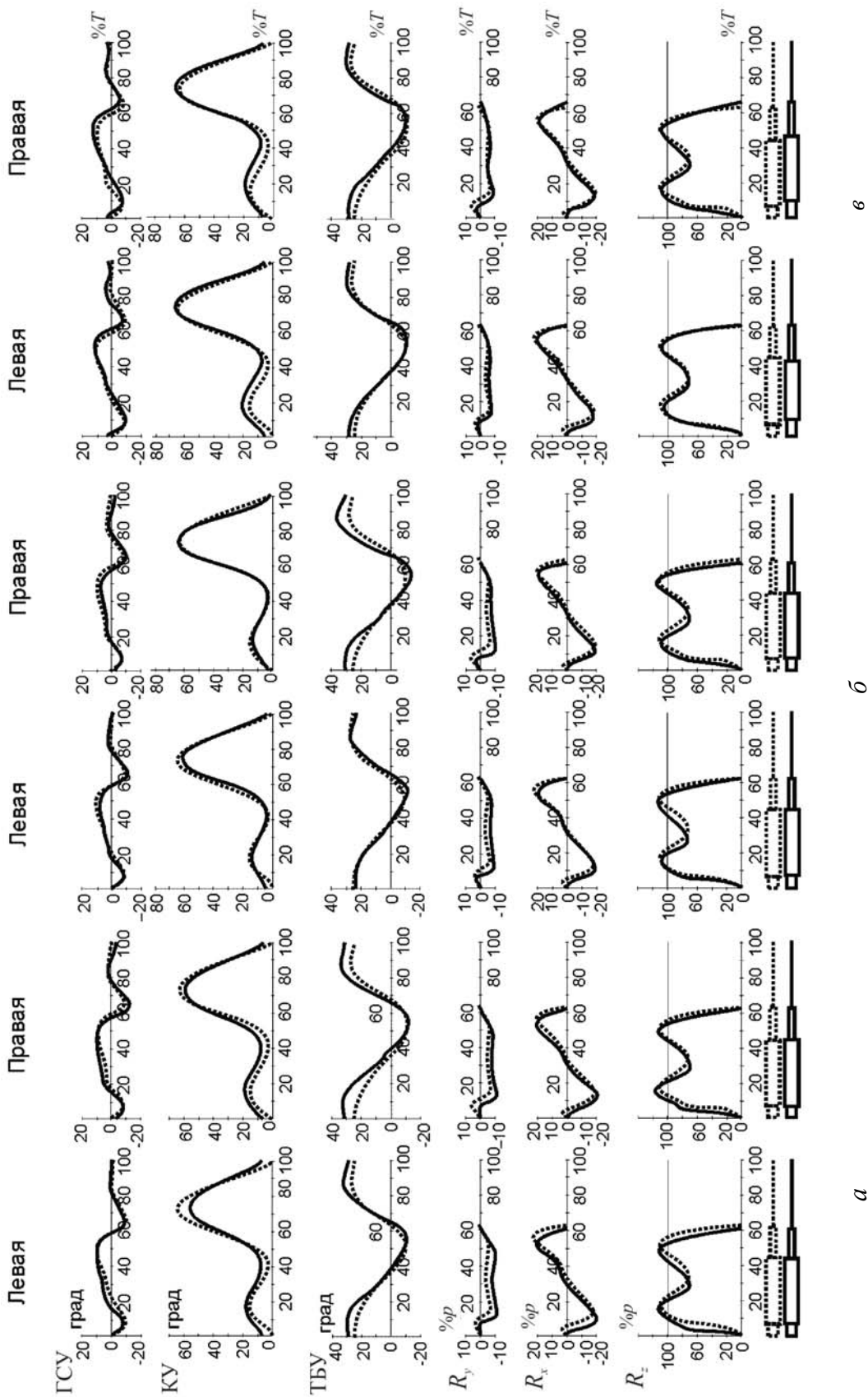


Рис. 1. Кинематические (град) и динамические (% к весу тела) параметры нижних конечностей при ходьбе детей разного возраста и взрослых в норме: а – I группа (дети в возрасте 7–8 лет); б – II группа (дети в возрасте 10–11 лет); в – III группа (дети в возрасте 13–14 лет). ГСУ – голенистоопный угол, КУ – коленный угол, ТБУ – тазобедренный угол.  $R_y$  – вертикальная,  $R_x$  – продольная,  $R_z$  – поперечная составляющие опорной реакции. Под графиками подогранны: пунктирная линия – взрослые, сплошная линия – дети

Таблица 3

Экстремальные значения угловых перемещений, град, у взрослых и детей различного возраста в норме

Сустав	Нога	Параметр	Взрослые		Дети									
			I группа			II группа			III группа					
			M±m	%T	%	M±m	%T	%	M±m	%T	%			
ГСУ	Правая	I подошвенное сгибание	-7,1±1,2	8	114	>0,05	-7,6±1,1	7	107	>0,05	-8,3±1,0	10	117	>0,05
		I тыльное сгибание	10,2±1,1	49	98	>0,05	7,6±0,6	48	75	>0,05	12,2±1,1	51	120	>0,05
		II подошвенное сгибание	-8,4±1,5	65	146	>0,05	-10,3±1,7	65	123	>0,05	-5,9±1,6	67	70	>0,05
	Левая	II тыльное сгибание	3,1±0,9	82	68	>0,05	2,3±1,0	83	74	>0,05	3,5±1,1	83	113	>0,05
		I подошвенное сгибание	-8,2±1,0	8	93	>0,05	-8,0±0,9	7	98	>0,05	-9,2±0,8	10	112	>0,05
		I тыльное сгибание	11,3±1,1	49	87	>0,05	8,3±0,9	45	73	>0,05	11,7±1,1	51	104	>0,05
КУ	Правая	II подошвенное сгибание	-9,2±1,7	66	97	>0,05	-10,9±1,6	65	118	>0,05	-7,9±1,8	66	86	>0,05
		II тыльное сгибание	1,0±0,9	83	90	>0,05	2,3±0,8	83	230	>0,05	4,4±1,4	83	440	>0,05
		Сгибание в опорную фазу	15,8±1,8	16	121	>0,05	13,6±1,2	17	86	>0,05	19,0±2,6	18	120	>0,05
	Левая	Разгибание опорную фазу	3,4±0,9	42	40	>0,05	3,8±1,0	41	112	>0,05	8,0±1,5	41	235	>0,05
		Сгибание в переносную фазу	63,4±1,2	73	93	>0,05	64,0±1,7	73	101	>0,05	65,4±3,3	74	103	>0,05
		Разгибание переносную фазу	1,0±0,3	100	700	>0,05	2,5±0,7	100	250	>0,05	7,2±1,2	100	720	>0,05
ТБУ	Правая	Сгибание в опорную фазу	16,3±2,1	17	111	>0,05	14,1±1,3	17	87	>0,05	20,4±2,6	17	125	>0,05
		Разгибание опорную фазу	3,3±0,8	42	41	>0,05	4,1±1,0	41	124	>0,05	7,3±1,4	42	221	>0,05
		Сгибание в переносную фазу	64,6±1,6	73	86	>0,05	60,7±1,6	73	94	>0,05	65,8±2,6	73	102	>0,05
	Левая	Разгибание переносную фазу	1,3±0,4	100	531	>0,05	4,3±0,8	100	331	>0,05	6,1±1,3	100	469	>0,05
		Сгибание в опорную фазу	25,8±1,3	0	129	>0,05	29,0±1,4	3	112	>0,05	28,1±2,3	0	110	>0,05
		Разгибание	-10,6±1,1	54	111	>0,05	-12,5±1,3	54	118	>0,05	-10,3±1,1	54	97	>0,05
Левая	Сгибание в переносную фазу	27,8±1,3	89	121	>0,05	34,2±1,3	87	123	>0,05	30,0±2,2	88	108	>0,05	
	Сгибание в опорную фазу	25,2±1,1	0	117	>0,05	23,6±1,6	4	94	>0,05	28,1±1,7	0	112	>0,05	
	Разгибание	-9,6±0,7	52	113	>0,05	-11,4±1,7	54	119	>0,05	-10,9±1,0	53	114	>0,05	
		Сгибание в переносную фазу	26,9±1,4	88	121	>0,05	27,0±1,4	86	100	>0,05	30,0±1,7	88	112	>0,05

Примечание. ГСУ – голенистоопный, КУ – коленный, ТБУ – тазобедренный угол.



Таблица 4

Экстремальные значения составляющих опорных реакций у взрослых и детей различного возраста в норме

Опорная реакция	Нога	Параметр	Взрослые		Дети											
			I группа			II группа			III группа							
			$M \pm m$	%T	%	$M \pm m$	%T	%	$M \pm m$	%T	%	$p$				
$R_z$	Правая	Передний толчок	111,1±2,5	17	116,9±3,2	15	105	>0,05	108,0±3,5	15	97	>0,05	107,7±2,8	16	97	>0,05
		Минимум	72,4±3,0	34	69,5±2,3	28	96	>0,05	71,9±2,0	29	99	>0,05	70,5±2,4	30	97	>0,05
		Задний толчок	110,9±2,6	51	112,8±2,8	49	102	>0,05	115,4±2,6	49	104	>0,05	109,1±2,6	50	98	>0,05
Левая	Передний толчок	109,8±3,4	18	112,5±2,3	15	102	>0,05	106,4±2,7	15	97	>0,05	104,9±2,8	15	96	>0,05	
	Минимум	72,3±2,7	33	70,2±2,2	28	97	>0,05	73,5±1,8	27	102	>0,05	73,0±2,1	28	101	>0,05	
	Задний толчок	111,7±2,9	51	111,9±2,3	48	100	>0,05	114,2±2,4	49	102	>0,05	107,5±3,1	49	96	>0,05	
$R_x$	Правая	Передний толчок	-18,7±1,0	15	-20,5±1,5	13	110	>0,05	-18,3±1,3	12	97	>0,05	-18,5±0,8	13	99	>0,05
		Задний толчок	20,1±0,9	56	20,5±1,0	53	102	>0,05	19,2±1,1	54	96	>0,05	18,5±0,6	55	92	>0,05
		Передний толчок	-18,1±1,1	14	-20,1±1,4	11	111	>0,05	-17,6±0,9	8	97	>0,05	-17,7±0,9	12	98	>0,05
Левая	Задний толчок	22,3±1,1	56	19,9±1,3	52	89	>0,05	19,5±1,2	53	87	>0,05	20,1±0,9	54	90	>0,05	
	Передний толчок	-8,1±0,6	15	-11,4±0,7	13	141	<0,05	-10,7±0,9	13	132	<0,05	-8,7±0,6	15	107	>0,05	
	Задний толчок	-6,7±0,4	51	-8,3±0,7	46	124	>0,05	-6,9±0,5	45	103	>0,05	-6,1±0,3	41	91	>0,05	
$R_y$	Правая	Передний толчок	-7,4±0,5	15	-11,5±0,7	13	155	<0,05	-9,1±0,9	13	123	>0,05	-7,3±0,8	14	99	>0,05
		Задний толчок	-6,5±0,5	51	-10,1±0,7	47	155	<0,05	-7,7±0,5	48	118	>0,05	-7,1±0,5	43	109	>0,05

Тем не менее существуют определённые отличия в кинематических кривых ходьбы у детей разного возраста, а именно:

а) временной сдвиг влево по оси времени экстремумов угловых перемещений, особенно в младшей возрастной группе;

б) изменение ряда амплитудных значений углов, например, увеличение угла разгибания в коленном суставе в опорную и переносную фазы во всех группах, что предполагает ходьбу на полусогнутых ногах, возрастание амплитуды сгибательных движений в тазобедренном суставе, особенно в младшей возрастной группе;

в) пространственная асимметрия движений нижних конечностей, преимущественно в первой и второй возрастных группах.

Большая часть этих изменений исчезает к возрасту 13 лет, когда стереотип ходьбы детей приближается к стереотипу локомоции взрослых испытуемых.

### **Динамические характеристики**

Динамические параметры ходьбы взрослых испытуемых и здоровых детей трёх возрастных групп представлены на рис. 1 и в табл. 4.

Вертикальная составляющая опорной реакции (кривая  $R_z$ ) у детей 7–13 лет имеет двугорбый вид с чётко выраженным передним, задним толчком и минимумом между ними.

Продольная составляющая опорной реакции (кривая  $R_x$ ) в том же возрастном диапазоне представлена двумя противоположно направленными максимумами, из которых отрицательный максимум соответствует переднему толчку, а положительный – заднему.

Поперечная составляющая опорной реакции (кривая  $R_y$ ) имеет три экстремальных значения (в самом начале опорной фазы при постановке стопы на внутренний край и два максимума при опоре стопы на наружный край).

При ходьбе детей в возрасте от 7 до 13 лет отмечаются следующие изменения динамических параметров ходьбы:

а) более раннее возникновение экстремальных точек кривых опорной реакции по оси времени, что характерно для более высокого темпа ходьбы, прежде всего, в младшей возрастной группе;

б) преобладание переднего толчка над задним по составляющей  $R_x$ ;

в) увеличение амплитудных колебаний составляющей  $R_y$  у детей в возрасте 7–11 лет, свидетельствующее о некотором снижении у них медиолатеральной устойчивости;

г) большая крутизна переднего и заднего фронтов составляющей  $R_z$  опорной реакции (судя по данным дифференцирования этого параметра в связи с более высоким темпом ходьбы детей (рис. 2)).

К возрасту 13 лет все рассмотренные динамические параметры ходьбы становятся мало отличимыми от аналогичных параметров взрослых испытуемых.

### **Энергетические параметры ходьбы**

К числу энергетических параметров локомоции должны быть отнесены моменты мышечных сил в сочленениях нижних конечностей, вычисленные методом математического моделирования. На рис. 3 с помощью серии графиков представлена развёртка суставных моментов в течение цикла ходьбы (профилограмма) в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах при ходьбе взрослых испытуемых и детей разного возраста, а в табл. 5 приведены численные значения раздельно для правой и левой нижних конечностей. Из графиков видно, что кривые моментов мышечных сил в тазобедренном и коленном суставах содержат две основные фазы, тогда как в голеностопном суставе наблюдается только одна фаза.

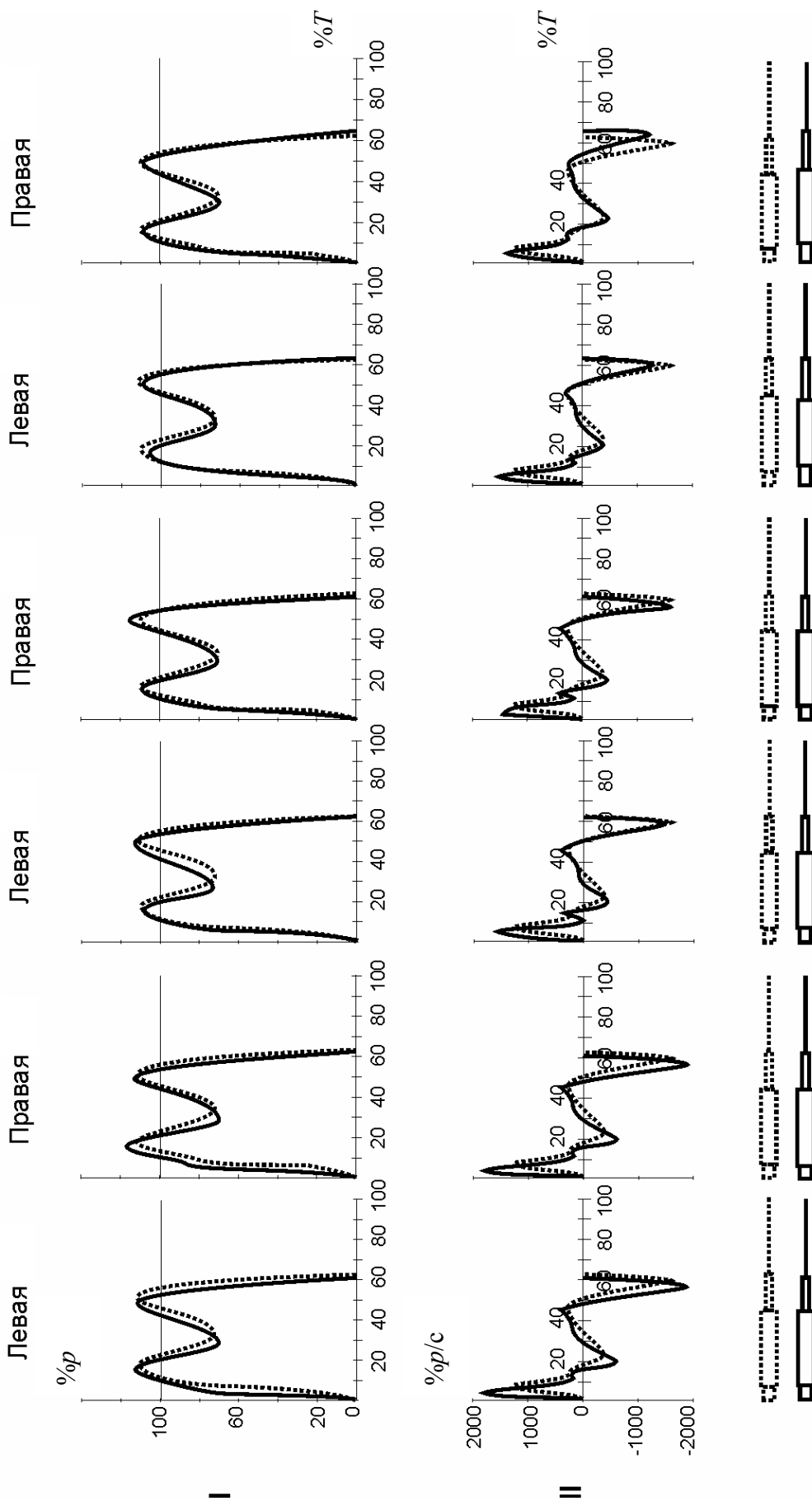


Рис. 2. Составляющие опорных реакции  $R_z$  (% к весу тела) и их производные (% к весу тела/с) при ходьбе детей разного возраста и взрослых в норме. I – опорные реакции, II – их производные. Остальные обозначения такие же, как на рис. 1

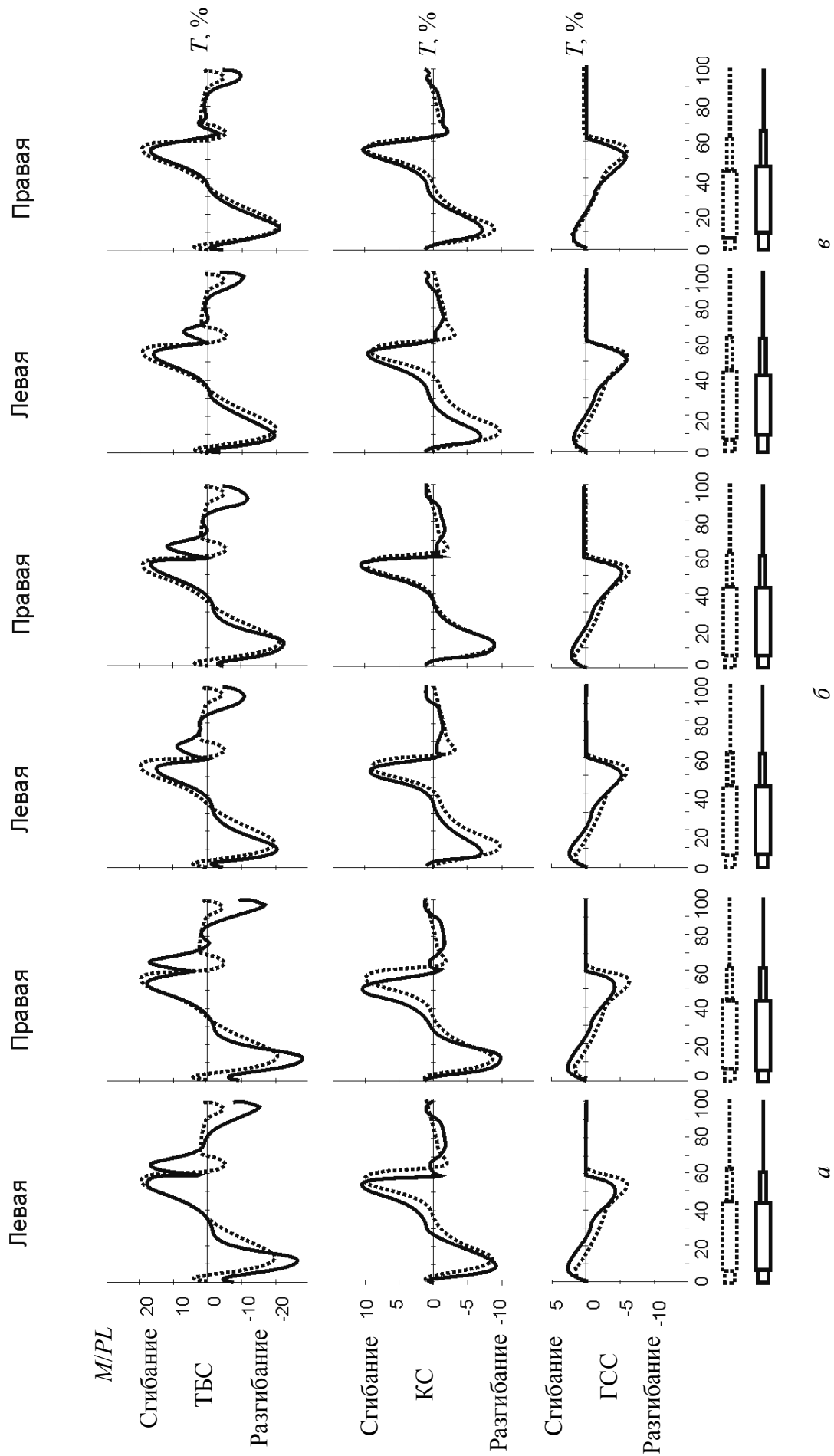


Рис. 3. Моменты мышечных сил (% к весу тела  $P \cdot \text{рост } H$ ) при ходьбе детей разного возраста и взрослых в норме. ТБС – тазобедренный, КС – коленный, ГСС – голеностопный сустав. Остальные обозначения такие же, как на рис. 1.

Таблица 5

**Моменты мышечных сил в суставах нижних конечностей  
у взрослых и детей различного возраста в норме**

Испытуемые	Сустав	Фаза	Правая нога			Левая нога			
			Среднее	Экстремум	%T	Среднее	Экстремум	%T	
			$M \pm m$			$M \pm m$			
Взрослые	ТБС	I	-9,9±0,3	-20,6±0,9	14	-9,5±0,4	-19,5±0,9	13	
		II	9,5±0,3	18,9±0,8	56	9,5±0,4	19,1±0,9	56	
	КС	I	-4,1±0,2	-8,7±0,5	14	-3,7±0,2	-8,0±0,5	12	
		II	5,1±0,2	9,9±0,5	57	5,0±0,2	10,1±0,5	56	
	ГСС	I	-3,0±0,1	-6,4±0,2	53	-2,9±0,0	-6,1±0,2	53	
Дети	I группа	ТБС	I	-12,5±0,8	-28,7±2,8	10	-13,3±1,3	-28,1±2,0	10
			II	8,8±0,6	17,3±1,3	54	7,4±0,8	17,4±1,7	55
		КС	I	-4,6±0,6	-9,8±1,5	14	-4,6±0,4	-8,8±1,0	9
			II	5,0±0,6	10,5±1,2	49	4,4±0,3	10,7±0,7	53
		ГСС	I	-2,4±0,1	-4,6±0,2	51	-2,4±0,1	-4,5±0,1	50
	II группа	ТБС	I	-9,9±0,5	-23,0±1,7	11	-8,7±0,5	-20,2±2,0	11
			II	7,9±0,4	16,6±0,7	54	7,4±0,6	16,2±1,5	55
		КС	I	-4,1±0,3	-8,9±0,7	11	-3,2±0,2	-7,5±0,8	9
			II	4,6±0,2	10,3±0,4	54	4,4±0,3	9,6±0,8	54
		ГСС	I	-2,6±0,1	-5,5±0,1	51	-2,6±0,1	-5,2±0,2	51
	III группа	ТБС	I	-9,8±0,6	-20,8±1,3	12	-9,3±0,4	-19,7±0,8	9
			II	8,5±0,4	16,9±1,1	55	8,3±0,4	17,0±1,0	54
		КС	I	-3,8±0,2	-7,5±0,5	10	-3,7±0,2	-7,1±0,4	9
			II	4,5±0,3	10,1±0,6	55	4,3±0,3	9,9±0,5	54
		ГСС	I	-2,9±0,1	-5,9±0,2	52	-2,8±0,1	-5,6±0,2	51

Примечание. ТБС – тазобедренный, КС – коленный, ГСС – голеностопный сустав.

Первая фаза моментов в тазобедренном и коленном суставах при произвольном темпе ходьбы взрослых испытуемых занимает 35–37% двигательного цикла, т.е. две первые трети опорной фазы. Её конец совпадает с завершением интервала опоры на всю стопу. Эта фаза является отрицательной, её экстремум проецируется на  $t = 13–15\%$  временной оси. Данная фаза отражает деятельность мышц-разгибателей тазобедренного и коленного суставов, которые, с одной стороны, обеспечивают опорность нижней конечности, а с другой – подъём общего центра масс до наивысшего положения.

Вторая фаза моментов в тазобедренном и коленном суставах имеет длительность 20% цикла и располагается в последней трети опорной фазы, её положительный экстремум приходится на  $t = 55\%$  цикла. По своему функциональному значению моменты мышечных сил в этой фазе направлены на отталкивание ноги от опорной поверхности и обусловлены работой трёхглавой мышцы голени и мышц-сгибателей бедра.

Моменты мышечных сил первой фазы в тазобедренном суставе несколько превышают моменты второй фазы, в то время как величины моментов в коленном суставе в обеих фазах примерно равны.

В голеностопном суставе кривая момента мышечных сил образует одну фазу продолжительностью в 50% цикла. Она начинается при  $t = 18\%$ , а заканчивается в конце опорной фазы. Её экстремум возникает при  $t = 53\%$  локомоторного цикла. Величина моментов мышечных сил неодинакова для разных сочленений нижних конечностей: наибольшие моменты возникают в тазобедренном суставе, значительно меньшие – в коленном суставе, еще меньшие – в голеностопном.

Таковы особенности моментов мышечных сил при произвольном (среднем) темпе ходьбы взрослых испытуемых [2, 7].

Моменты мышечных сил у детей имеют ряд отличий от соответствующих параметров взрослых испытуемых:

а) экстремальные точки кривых моментов мышечных сил сдвинуты влево по временной оси, что связано с более быстрым развитием биомеханических событий в течение цикла ходьбы;

б) амплитудные значения первой фазы моментов мышечных сил в тазобедренном и коленном суставах у лиц в возрасте 7 лет превышают соответствующие значения ходьбы взрослых людей, в то же время амплитуда второй фазы моментов значительно снижена; у испытуемых в возрасте 11–13 лет амплитуда как первой, так и второй фаз моментов мышечных сил в тазобедренном и коленном суставах несколько меньше, чем у взрослых испытуемых;

в) во всех возрастных группах детей амплитудные значения моментов мышечных сил в голеностопном суставе ниже, чем у взрослых.

Таким образом, несмотря на более высокий темп ходьбы детей 7–13 лет, оказываются относительно ослабленными усилия, соответствующие отталкиванию ноги от опорной поверхности.

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Представленные материалы свидетельствуют о том, что биомеханическая структура локомоторного акта практически полностью складывается к возрасту 7 лет. Это относится по существу ко всем исследованным характеристикам ходьбы: временным, кинематическим, динамическим, а также к моментам мышечных сил в суставах нижних конечностей.

Необходимо отметить, что особенно чётко программируются относительные временные параметры ходьбы, отражающие последовательность выполнения локомоторных движений, их взаимную связь и согласованность. Менее точно, по-видимому, осуществляется программа амплитудных значений кинематических и динамических параметров, которые зависят как от условий передвижения, так и от индивидуальных особенностей походки. Так, у детей 7–11 лет при ходьбе наблюдается некоторая пространственная асимметрия движений и развиваемых усилий, что, вероятно, связано с известной неравнозначностью локомоторных функций нижних конечностей.

Кроме того, у детей, особенно в младшей возрастной группе, выявляется недостаточная концентрация сил, формирующих задний толчок, о чем свидетельствует уменьшение величины моментов мышечных сил во второй фазе в тазобедренном, коленном, а также в голеностопном суставах. Можно также отметить, что у детей 7–8 лет амплитуда вертикальной составляющей  $R_z$  в фазе переднего толчка выше, чем у взрослых. Это свидетельствует о выработке с возрастом навыка более плавного наступания, даже при относительно быстрой ходьбе.

Все эти изменения накладываются на общий возрастной фон локомоции, который характеризуется более высоким темпом передвижения, уменьшением длины шага и средней скорости ходьбы в возрасте 7–11 лет. У подростков 13 лет характеристики ходьбы приближаются к взрослой норме.

Полученные данные имеют, прежде всего, эталонное значение. Они позволяют произвести сравнительный анализ ходьбы детей с патологией опорно-двигательного аппарата, опираясь на соответствующую возрастную норму. Необходимо отметить, что данные исследования явились лишь первым этапом изучения ходьбы здоровых детей. Цель дальнейшего анализа – изучение локомоции детей более раннего возраста, в частности, детей в возрасте от 3 до 5 лет. Необходимость изучения походки детей раннего возраста продиктована тем, что именно в этом возрасте у детей с заболеваниями опорно-двигательного аппарата отмечается наилучший реабилитационный прогноз, т.е. значительное улучшение функции передвижения, формирование более правильного навыка ходьбы, что предполагает регулярное сравнение их ходьбы с ходьбой здоровых детей соответствующего возраста.

### ВЫВОДЫ

1. Комплексные исследования ходьбы детей трёх возрастных групп (7, 11 и 13 лет) показывают, что биомеханическая структура локомоторного акта практически полностью сформирована у детей в возрасте 7–8 лет.

2. Основное отличие ходьбы здоровых детей от ходьбы здоровых взрослых заключается в более высоком темпе передвижения, уменьшении длины шага и средней скорости передвижения. Именно более высокий темп ходьбы оказывает влияние на все биомеханические параметры, особенно в младшей возрастной группе.

3. Для ходьбы детей, особенно в младшей возрастной группе, характерны некоторая асимметрия движений, наклонность к лёгкой сгибательной позиции нижних конечностей в опорной фазе, уменьшение моментов мышечных сил, формирующих задний толчок.

4. Полученные данные имеют эталонное значение. Они позволяют произвести сравнительный анализ ходьбы детей с нарушениями опорно-двигательного аппарата с ходьбой здоровых детей соответствующего возраста.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букреева Д.П., Косилов С.А., Тамбиева А.П. Возрастные особенности циклических движений детей и подростков. – М.: Педагогика, 1973. – 159 с.
2. Витензон К.А., Петрушанская К.А. От естественного к искусственному управлению локомоцией. – М.: МБН, 2003. – 448 с.
3. Витензон А.С., Самсонова Л.Н. Биомеханическая и иннервационная структура ходьбы детей раннего возраста // Протезирование и протезостроение: сб. тр. – М.: ЦНИИПП, 1973. – Вып. 31. – С. 39–46.
4. Гриценко Г.П., Витензон А.С., Славуцкий Я.Л., Сутченков И.А. Биомеханический комплекс для оценки ходьбы в норме и при нарушениях опорно-двигательного аппарата // Протезирование и протезостроение: сб. тр. – М.: ЦНИИПП, 1997. – Вып. 94. – С. 84–88.
5. Гриценко Г.П. Методы исследования энерготрат при ходьбе человека в норме и на протезе бедра: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – М., 1975. – 21 с.
6. Гриценко Г.П., Морейнис И.Ш. Суставные моменты и мощности мышечных сил при ходьбе // Протезирование и протезостроение: сб. тр. – М.: ЦНИИПП, 1974. – Вып. 33. – С. 80–85.
7. Гриценко Г.П., Славуцкий Я.Л., Журавлев Д.В., Сутченков И.А. Оценка энерготрат при ходьбе методом математического моделирования // ЦНИИПП – 50, СПбНИИП – 75: материалы юбилейной науч.-практ. конф. – М., 1994. – С. 34.
8. Gage J.R. Gait analysis in cerebral palsy. – London: Mac Keith Press, 1991. – 206 p.
9. Miller F. Cerebral palsy. – New York: Springer, 2005. – 1055 p.
10. Sutherland V., Olshen R.F., Biden E.M., Wyatt M.P. The development of nature walking. – London: Mac Keith Press, 1988. – 227 p.
11. Todd F.N., Lamoreux L.W., Skinner S.R., Johanson M.E., St. Helen R., Moran S.A., Ashley K.A. Variation in the gait of normal children // Journal of Biomechanics and Joint Surgery. – 1989. – Vol. 71A. – P. 196–204.
12. Whittle M.V. Gait: analysis: an introduction. – Oxford: Butterworth Heinemann, 1991. – 232 p.
13. Winter D.A. The biomechanics and motor control of human gait. – Waterloo: University of Waterloo Press, 1991. – 148 p.

## PECULIARITIES OF BIOMECHANICAL STRUCTURE OF WALKING OF HEALTHY CHILDREN OF DIFFERENT AGE GROUPS

**A.S. Vitenson**, K.A. Petrushanskaya, I.A. Matveeva, B.G. Spivak, G.P. Gritsenko,  
I.A. Sutchenkov (Moscow, Russia)

Biomechanical structure of walking of healthy children of three age groups – from 7 up to 13 – has been considered in this article. Regularities of changes of biomechanical parameters of walking have been traced in the age aspect with the purpose to obtain the normative data on children's locomotion. This study is really necessary, first of all, for further comparison of their walking with walking of children with the pathology of the locomotor system. However, the obtained data are of interest not only for creating data base of children of different age, but also for revealing the mechanisms of formation of the locomotor stereotype in healthy children. The purpose of the further study is elaboration of methods for biomechanical investigation of children of more early age (in particular, in children with infantile cerebral palsy). Necessity of the given investigations is connected with the fact, that the most valuable restoration of the motional functions takes place just at this age. That means, that regular comparison of their walking with walking of healthy children of the corresponding age becomes a very actual problem.

**Key words:** biomechanical peculiarities of walking, characteristics of walking of children of different age, moments of muscle forces at the joints of the lower extremities, formation of the locomotor stereotype.

*Получено 04 декабря 2012*