

Возрастная эволюция кинематических параметров движения туловища**Л.В. Смолькова¹✉, А.О. Трофимов¹, И.Д. Черепанов¹, Т.И. Долганова^{1,2}, Д.В. Долганов¹**¹ *Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия*² *Курганский государственный университет, Курган, Россия*

Аннотация. Цель. Оценка возрастной эволюции кинематики таза, туловища и головы. **Материалы и методы.** Методика исследования – 3D-видеоанализ походки, анализ кинематики в программах QTM и Visual3D с автоматизированным расчетом значений. Сформированы группы обследованных: I – 13 человек 3–6 лет ($4,5 \pm 0,83$) года; II – 18 человек 8–11 лет ($9,9 \pm 1,01$) года; III – 15 человек 12–16 лет ($15,0 \pm 0,86$) года. **Результаты исследований** представлены в таблицах. **Выводы.** Предложены нормативные значения в трех плоскостях параметров кинематики таза, туловища и головы в возрастном аспекте. Возрастная эволюция стратегии коррекции динамического баланса формируется в сагиттальной и горизонтальной плоскостях преимущественно за счет кинематики таза, во фронтальной плоскости – за счет кинематики туловища. Гендерная коррекция динамического баланса проявляется во фронтальной плоскости с 3–6 лет, функциональная зрелость достижения горизонтального взора формируется у девочек быстрее, чем у мальчиков.

Ключевые слова: здоровые дети, кинематика, таз, туловище, голова, видеоанализ походки

ORIGINAL RESEARCHES

Original article

Age evolution of kinematic parameters of body movement**L.V. Smolkova¹✉, A.O. Trofimov¹, I.D. Cherepanov¹, T.I. Dolganova^{1,2}, D.V. Dolganov¹**¹ *National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia*² *Kurgan State University, Kurgan, Russia*

Abstract. Purpose – evaluation of the age evolution of the kinematics of the pelvis, trunk and head. **Materials and methods.** Research methodology – 3D-video analysis of gait, kinematics analysis in QTM and Visual3D programs with automated calculation of values. The examined groups were formed: I – 13 people aged 3–6 years (4.5 ± 0.83); II – 18 people 8–11 years old (9.9 ± 1.01); III – 15 people aged 12–16 (15.0 ± 0.86). The **research results** are presented in tables. **Conclusions.** Normative values in three planes of the parameters of the kinematics of the pelvis, torso and head in the age aspect are proposed. The age evolution of the dynamic balance correction strategy is formed in the sagittal and horizontal planes mainly due to the kinematics of the pelvis, in the frontal plane – due to the kinematics of the body. Gender correction of the dynamic balance manifests itself in the frontal plane from 3-6 years old, the functional maturity of achieving a horizontal gaze is formed faster in girls than in boys.

Keywords: healthy children, kinematics, pelvis, trunk, head, video analysis of gait

Параметры общего баланса позвоночника рассматриваются в контексте «конуса экономии энергии» (COE – cone of economy), предложенного в 1975 г. Ж. Дюбуссе [1], куда последовательно входят скелет нижних конечностей и таза, позвоночник и голова.

У здоровых взрослых субъектов при ходьбе наблюдается прогрессивное снижение ускорения от таза к груди (амплитуда колебания туловища меньше амплитуды колебания таза) и от грудины к голове, что отражает принятие стратегий пострурального контроля для достижения горизонтального взора. Как следствие, при ходьбе голова движется по прямой с почти постоянной скоростью, что приводит к устойчивому зрительному входу и более эффективной обработке

сигналов вестибулярной системы, тем самым улучшая контроль равновесия. Центральная нервная система отдает приоритет стабильности верхних частей тела над нижними сегментами, движения туловища, по крайней мере, частично отражают стратегии коррекции баланса [2], и увеличенный диапазон движения туловища и таза можно рассматривать как индикатор пониженной динамической устойчивости, функциональной незрелости походки [3].

Систематической оценки возрастной эволюции движений таза, туловища и головы не проводилось. Понимание возрастных изменений нормальной детской походки необходимо для оценки походки, вызванной патологическим паттерном ходьбы у детей,

поскольку созревание и рост могут быть ошибочно приняты за динамику процесса.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценка возрастной эволюции кинематики таза, туловища и головы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка локомоторного профиля методом видеонализа походки проведена у детей в лаборатории анализа походки Центра Илизарова. Критериями включения были отсутствие неврологического, ортопедического или психологического диагноза, отсутствие проблем с опорно-двигательным аппаратом в анамнезе.

Для анализа материала по возрастному признаку сформировано три группы обследованных ($M \pm \sigma$):

1. Группа I – дети 3–6 лет. Мальчики – 6 человек, (4,5 ± 0,83) года, скорость ходьбы (0,98 ± 0,16) м/с; девочки – 7 человек, (4,43 ± 0,77) года, скорость ходьбы (0,91 ± 0,16) м/с.

2. Группа II – дети 8–11 лет. Мальчики – 9 человек, (9,9 ± 1,01) года, скорость ходьбы (1,16 ± 0,07) м/с; девочки – 9 человек, (9,9 ± 1,03) года, скорость ходьбы (1,23 ± 1,13) м/с.

3. Группа III – дети 12–16 лет. Мальчики – 8 человек, (14,5 ± 1,37) года, скорость ходьбы (1,24 ± 0,15) м/с; девочки – 7 человек, (15,0 ± 0,86) года, скорость ходьбы (1,15 ± 0,14) м/с.

Дети ходили самостоятельно, босиком на 7-метровой дорожке с привычной для них скоростью передвижения. Данные кинематики регистрировались оптическими камерами Qualisys 7+ (8 камер) с технологией видеозахвата пассивных маркеров. Анализ

кинематики проводился в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений.

Для статистической обработки данных применяли программу AtteStat 12.0.5. С учетом количества наблюдений в группах, для обработки результатов использована непараметрическая статистика с принятием уровня значимости $p \leq 0,05$. Количественные характеристики выборочных совокупностей представлены в таблицах в виде медианы с уровнем распределения процентилей 25÷75 % и числа наблюдений (n). Статистическую значимость различий определяли с использованием непарного критерия Вилкоксона.

На проведение исследований было получено разрешение комитета по этике при ФГБУ «НМИЦ ТО им. акад. Г.А. Илизарова» № 2(70) от 21.10.2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований представлены в табл. 1–3.

В сагиттальной плоскости с возрастом уменьшается амплитуда кинематики таза при ходьбе и в III группе обследованных (12–16 лет) относительно I группы (3–6 лет) у мальчиков она уменьшена на 4,18σ, а у девочек на 1,34σ. Во фронтальной плоскости достоверных различий амплитуды движения таза при ходьбе в группах по полу и возрасту не выявлено. В горизонтальной плоскости амплитуда движения таза также уменьшалась с возрастом, но у девочек быстрее и относительно группы I (3–6 лет) уже в группе II (8–11 лет) уменьшалась на 1,23σ, а к 12–16 годам – на 2,31σ. У мальчиков значимое различие амплитуды движения таза в горизонтальной плоскости относительно детей группы I формировалось к возрасту детей группы III (1.35σ).

Таблица 1

Амплитуда кинематики таза, градус, Me (25÷75 %)

| Группа I (3–6 лет) | | Группа II (8–11 лет) | | Группа III (12–16 лет) | |
|---------------------------------|------------------|----------------------|---|--|--|
| М n = 6 | Д n = 7 | М n = 9 | Д n = 9 | М n = 8 | Д n = 7 |
| <i>Сагиттальная плоскость</i> | | | | | |
| 5,0 (4,7÷5,3) | 4,6 (3,6÷4,9) | 4,3 (3,5÷5,1) | 4,4 (3,8÷4,8) | 3,4 (2,9÷4,3) P ¹ = 0,0013 | 3,6 (3,2÷3,9) P ¹ = 0,0082 |
| <i>Фронтальная плоскость</i> | | | | | |
| 5,8 (5,4÷6,4) | 7,2 (6,3÷10,0) | 7,3 (5,6÷8,9) | 8,1 (5,9÷9,2) | 6,8 (5,6÷8,6) | 8,4 (8,0÷9,0) |
| <i>Горизонтальная плоскость</i> | | | | | |
| 16,8 (12,7÷18,6) | 17,9 (15,1÷19,1) | 15,0 (10,9÷18,8) | 14,7 (11,8÷15,4) P ² = 0,0215 | 11,7 (9,6÷13,8) P ¹ = 0,0057 | 10,5 (8,1÷12,2) P ¹ = 0,0026 |

¹ уровень значимости при сравнении параметра групп I и III;

² уровень значимости при сравнении параметра групп I и II.

Кинематика движения туловища в сагиттальной и горизонтальной плоскостях относительно калибровочного уровня (пола) и таза не имела статистически значимых различий в группах по полу и возрасту. Во фронтальной плоскости амплитуда движения туловища относительно калибровочного уровня во всех возрастных группах у девочек была меньше и к 12–16 годам уже статистически достоверно отличалась от значений у мальчиков ($p = 0,00075$).

В фронтальной плоскости амплитуда движения туловища относительно калибровочного уровня во всех возрастных группах у девочек была меньше и к 12–16 годам уже статистически достоверно отличалась от значений у мальчиков ($p = 0,00075$).

Таблица 2

Амплитуда кинематики туловища, градус, Me (25÷75 %)

| Группа I (3–6 лет) | | Группа II (8–11 лет) | | Группа III (12–16 лет) | |
|--|------------------|----------------------|------------------|--|--|
| М n = 6 | Д n = 7 | М n = 9 | Д n = 9 | М n = 8 | Д n = 7 |
| <i>Относительно калибровочного уровня (пола)</i> | | | | | |
| <i>Сагиттальная плоскость</i> | | | | | |
| 3,5 (3,0÷3,9) | 4,0 (3,1÷4,4) | 4,2 (3,7÷5,0) | 3,8 (3,2÷4,4) | 2,8 (2,4÷3,9) | 3,0 (2,5÷5,0) |
| <i>Фронтальная плоскость</i> | | | | | |
| 4,4 (2,7÷5,4) | 2,7 (1,8÷3,5) | 3,8 (2,9÷5,5) | 2,6 (1,7÷3,9) | 4,6 (3,8÷6,5) | 2,8 (1,8÷3,2) P ³ = 0,0007 |
| <i>Горизонтальная плоскость</i> | | | | | |
| 5,7 (4,0÷7,4) | 6,0 (5,2÷6,5) | 5,8 (4,5÷6,9) | 6,7 (5,0÷9,8) | 8,7 (5,7÷10,2) | 7,4 (6,2÷9,2) |
| <i>Кинематика грудной клетки относительно таза</i> | | | | | |
| <i>Сагиттальная плоскость</i> | | | | | |
| 3,9 (2,6÷4,6) | 3,9 (3,5÷4,9) | 4,6 (3,4÷6,4) | 4,5 (3,6÷6,4) | 3,6 (2,3÷4,7) | 4,2 (3,3÷5,8) |
| <i>Фронтальная плоскость</i> | | | | | |
| 6,4 (5,6÷7,3) | 8,6 (7,2÷10,4) | 10,0 (7,7÷14,2) | 10,8 (6,5÷13,0) | 12,2 (9,2÷17,0) P ¹ = 0,0049 | 11,0 (8,6÷11,7) |
| <i>Горизонтальная плоскость</i> | | | | | |
| 12,8 (10,3÷15,1) | 13,6 (12,3÷15,8) | 11,8 (11,0÷15,9) | 16,3 (14,4÷18,1) | 12,1 (10,9÷15,1) | 11,8 (8,3÷12,5) |

¹ уровень значимости при сравнении параметра групп I и III;

³ уровень значимости при сравнении параметра в группе III между мальчиками и девочками.

Кинематика движения туловища относительно таза с возрастом имела тенденцию к увеличению больше у мальчиков ($p = 0,0049$), чем у девочек. Кинематика движения головы в сагиттальной плоскости относи-

тельно калибровочного уровня с возрастом имела тенденцию к уменьшению у мальчиков и у девочек, но в возрастной группе 3–6 лет у мальчиков она была достоверно больше, чем у девочек ($p = 0,03$).

Таблица 3

Амплитуда кинематики головы в сагиттальной плоскости, градус, Me (25÷75 %)

| Группа I (3–6 лет) | | Группа II (8–11 лет) | | Группа III 12–16 лет | |
|--|--|----------------------|---------------|----------------------|---------------|
| М n = 6 | Д n = 7 | М n = 9 | Д n = 9 | М n = 8 | Д n = 7 |
| <i>Относительно калибровочного уровня (пола)</i> | | | | | |
| 6,1 (4,7÷7,7) | 3,7 (3,1÷4,8) P ⁴ = 0,03 | 5,3 (4,1÷7,5) | 4,3 (3,1÷5,3) | 3,9 (3,2÷6,5) | 4,0 (2,6÷6,2) |
| <i>Относительно таза</i> | | | | | |
| 4,1 (2,7÷5,6) | 2,4 (1,2÷3,5) | 4,6 (2,9÷6,2) | 3,0 (2,0÷3,7) | 3,4 (1,5÷4,8) | 3,6 (2,4÷4,8) |

⁴ уровень значимости при сравнении параметра в группе I между мальчиками и девочками.

Развитие контроля динамического равновесия требует больше времени для созревания по сравнению с изолированными кинематическими и кинетическими паттернами и возрастной диапазон очень широк – от 7 до 14 лет [4].

По нашим данным, движения таза с возрастом уменьшаются в сагиттальной и горизонтальной плоскостях, возрастная и гендерная динамика кинематики туловища определяется только во фронталь-

ной плоскости. Полученные результаты согласуются с данными литературы: для механически менее энергосберегающей походки у детей младшего возраста [1] характерно большее угловое смещение и увеличение амплитуды колебания таза и туловища при ходьбе [5], которое также зависит и от скорости ходьбы [6]. Движения грудной клетки и таза постепенно уменьшаются с увеличением возраста до 14 лет [7] или даже до 16 лет [8].

Кинематика движения головы в сагиттальной плоскости, определяющая поструральный контроль для достижения горизонтального взора, уменьшалась с возрастным, но только в группе детей 3–6 лет имела статистически значимые гендерные отличия, которые не проявлялись в более старшем возрасте. Полученные различия отражают функциональную зрелость стратегии коррекции баланса, которая формируется у девочек быстрее, чем у мальчиков. В основной своей массе дети только с 7 лет могут выполнять одновременную двигательную и когнитивную задачу [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования сформулированы следующие выводы:

1. Предложены нормативные значения параметров кинематики таза, туловища и головы в возрастном аспекте в трех плоскостях.
2. Формирование двигательного контроля динамической устойчивости продолжается до 16 лет.
3. Возрастная эволюция стратегии коррекции динамического баланса формируется в сагиттальной и горизонтальной плоскостях преимущественно за счет коррекции кинематики таза, во фронтальной плоскости – за счет коррекции кинематики туловища.
4. Гендерная возрастная эволюция коррекции динамического баланса проявляется только во фронтальной плоскости с 3–6 лет: уменьшение у девочек движения туловища относительно калибровочного уровня (пола) – более плавная походка; увеличение у мальчиков углового ускорения туловища относительно таза к периоду пубертатного скачка роста

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Информация об авторах

Лидия Владимировна Смолькова – аспирант, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия; slv@odb45.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>

Анатолий Олегович Трофимов – аспирант, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия; a4texa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3455-4530>

Иван Дмитриевич Черепанов – аспирант, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия; smilyha@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8261-8581>

Тамара Игоревна Долганова – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории клиники нейроортопедии и системных заболеваний, Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова; научный сотрудник академической кафедры «Анатомия и физиология человека» имени профессора, заслуженного деятеля науки РФ А.П. Кузнецова; Курганский государственный университет, Курган, Россия; gjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>

Дмитрий Владимирович Долганов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории клиники нейроортопедии и системных заболеваний; Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия; paradigma-dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 07.08.2024; принята к публикации 18.11.2024.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Information about the authors

Lidiya V. Smolkova – Postgraduate student, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia; slv@odb45.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>

5. В возрастном аспекте 3–6 лет функциональная зрелость стратегии коррекции баланса достижения горизонтального взора формируется у девочек быстрее, чем у мальчиков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Дюбуссе Ж. 3D-анализ развития сколиотической деформации и 3D-цепь баланса пациента со сколиозом. *Хирургия позвоночника*. 2016;13(3):108–113.
2. Van de Venis L., Weerdesteijn V., Konijnenburg A. et al. Increased trunk movements in people with hereditary spastic paraplegia: do these involve balance correcting strategies? *Journal of Neurology*. 2022;269:4264–4269.
3. Shih H.S., Gordon J., Kulig K. Trunk control during gait: walking with wide and narrow step widths present distinct challenges. *Journal of Biomechanics*. 2021;114:110135.
4. Cimolin, V., Cau, N., Sartorio, A. et al. Symmetry of gait in underweight, normal and overweight children and adolescents. *Sensors*. 2019;19(9):2054.
5. Bach M.M., Daffertshofer A., Dominici N. The development of mature gait patterns in children during walking and running. *European Journal of Applied Physiology*. 2021;121:1073–1085.
6. Begue J., Peyrot N., Lesport A. et al. Segmental contribution to whole-body angular momentum during stepping in healthy young and old adults. *Scientific Reports*. 2021;11(1):19969.
7. Leban B., Cimolin V., Porta M. et al. Age-Related Changes in Smoothness of Gait of Healthy Children and Early Adolescents. *Journal of Motor Behavior*. 2020;52(6):694–702.
8. Li Y., Koldenhoven R.M., Liu T., Venuti C.E. Age-related gait development in children with autism spectrum disorder. *Gait Posture*. 2021;84:260–266.
9. Hinton D.C., Vallis L.A. Children Age 7 Complete Complex Gait and Postural Tasks Differently Than Adults Under Dual-Task Conditions. *Journal of Motor Behavior*. 2016;48(3):193–204.

Anatoly O. Trofimov – Postgraduate student, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia; a4texa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3455-4530>

Ivan D. Cherepanov – postgraduate student, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia; smilyha@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8261-8581>

Tamara I. Dolganova – MD, Leading Researcher at the Scientific Laboratory of the Clinic of Neuroorthopedics and Systemic Diseases, National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov; Researcher at the Academic Department of Human Anatomy and Physiology named after Professor, Honored Scientist of the Russian Federation A.P. Kuznetsov; Kurgan State University, Kurgan, Russia; rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>

Dmitry V. Dolganov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Scientific Laboratory of the Clinic of Neuroorthopedics and Systemic Diseases; National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov, Kurgan, Russia; paradigm-dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>

The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 07.08.2024; accepted for publication 18.11.2024.