

Научная статья

УДК 531.1/.3:612.766:616.71-007.157-053.2-07

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2024-30-3-372-383>



Особенности кинематики и кинетики двигательного стереотипа у детей с ахондроплазией: сравнительное кросс-секционное исследование

Т.И. Долганова[✉], Л.В. Смолькова, Д.В. Долганов, А.М. Аранович, Н.С. Гвоздев, Д.А. Попков

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Тамара Игоревна Долганова, rjik532007@rambler.ru

Аннотация

Введение. Изучение кинематических и кинетических параметров походки у детей с ахондроплазией позволит детальнее понять особенности их локомоции, определить стратегию планируемого лечения.

Цель работы — оценка особенностей локомоторной кинематики и кинетики у детей с ахондроплазией по сравнению со сверстниками без ортопедической патологии.

Материалы и методы. Проведена оценка локомоторного профиля методом видеоанализа походки. Кинематические данные регистрировали оптическими камерами Qualisys7+ (8 камер) с технологией видеозахвата пассивных маркеров; синхронизированными с шестью динамометрическими платформами KISTLER (Швейцария). Анализ кинематики и кинетики проводили в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений показателей суммарной пиковой мощности работы суставов. Сформировано три группы для анализа походки: I — дети 6–7 лет с ахондроплазией (6 человек, 12 конечностей), II — дети 6–7 лет без ортопедической патологии (8 человек, 16 конечностей); III — схожие ростом дети 3–4 лет без ортопедической патологии (8 человек, 16 конечностей).

Результаты. У детей с ахондроплазией обнаружены статистически значимые нарушения в локомоторной кинетике и кинематике. Первые связаны с продольным дефицитом сегментов конечностей и сниженной скоростью ходьбы. Вторые с продольным дефицитом не связаны, но проявлялись во всех плоскостях, а именно увеличением максимального наклона таза вперед, сгибательной позицией в тазобедренном, коленном суставах и позицией тыльной флексии голеностопного сустава; увеличенным максимальным углом отведения бедра и варусной деформацией коленного сустава; увеличенным ротационным диапазоном движений таза.

Обсуждение. Поскольку характерный вид основного профиля походки начинает проявляться у детей к 4–5 годам и связан с формированием активности центральных и спинномозговых генераторов, индуцирующих самоорганизацию двигательных стереотипов, мы полагаем, что выявляемые в локомоторной кинематике отклонения являются вторичными патогенетическими проявлениями кинетики, обусловленной продольным дефицитом сегментов.

Заключение. Особенности локомоторной кинетики у детей с ахондроплазией обусловлены продольным дефицитом конечностей и связаны с низкой скоростью ходьбы. Значимые отклонения локомоторной кинематики не связаны с продольным дефицитом сегментов, но выявлены во всех плоскостях и касаются всей биомеханической цепи.

Ключевые слова: ахондроплазия, здоровые дети, анализ походки, локомоторная кинетика и кинематика, удлинение конечностей

Для цитирования: Долганова Т.И., Смолькова Л.В., Долганов Д.В., Аранович А.М., Гвоздев Н.С., Попков Д.А. Особенности кинематики и кинетики двигательного стереотипа у детей с ахондроплазией: сравнительное кросс-секционное исследование. *Гений ортопедии*. 2024;30(3):372–383. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-3-372-383. EDN: HDXUWE.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2024-30-3-372-383>



Features of motor stereotype kinematics and kinetics in children with achondroplasia: a comparative cross-sectional study

T.I. Dolganova✉, L.V. Smolkova, D.V. Dolganov, A.M. Aranovich, N.S. Gvozdev, D.A. Popkov

Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Tamara I. Dolganova, rjik532007@rambler.ru

Abstract

Introduction The study of the kinematic and kinetic parameters of gait in children with achondroplasia would allow a more detailed understanding of the features of their locomotion and determine the strategy of planned treatment.

Purpose To evaluate features of locomotor kinematics and kinetics in children with achondroplasia and compare with peers without orthopedic pathology.

Materials and methods The locomotor profile was assessed by video gait analysis. Kinematic data were recorded by Qualisys7+ optical cameras (8 cameras) with passive marker video capture technology synchronized with six dynamic platforms KISTLER (Switzerland). The analysis of kinematics and kinetics was carried out in the QTM (Qualisys) and Visual3D (C-Motion) programs with automated calculation of the values of indicators of the total peak power in the joints. Three groups were formed for gait analysis: 1) children 6–7 years old, achondroplasia (6 subjects, $n = 12$ limbs); 2) their peers, children without orthopedic pathology, 6–7 years old (8 subjects, $n = 16$ limbs); 3) children without orthopedic pathology 3–4 years old similar in height (8 subjects, $n = 16$ limbs).

Results In children with achondroplasia, statistically significant disorder in locomotor kinetics and kinematics were found. The former are associated with a longitudinal deficiency of limb segments and decreased walking speed. The latter are not associated with a longitudinal deficit, but manifested in all planes, namely: an increase in the maximum forward inclination of the pelvis, a flexion position in the hip and knee joints, and dorsal flexion of the ankle joint; increased maximum angle of hip abduction and varus deformity of the knee joint; increased rotational range of motion of the pelvis.

Discussion Since the characteristic features of the main gait profile begin to appear in children by the age of 4–5 years, and is associated with the formation of the activity of central and spinal generators that induce the self-organization of motor stereotypes, we believe that the deviations detected in the locomotor kinematics are secondary pathogenetic manifestations of the kinetics due to the longitudinal deficit in limb segments.

Conclusion Features of locomotor kinetics in children with achondroplasia are due to the longitudinal deficit of the limb length and are associated with low walking speed. Significant deviations of the locomotor kinematics were not associated with the longitudinal deficit of the segments, but were detected in all planes and are related to the entire biomechanical chain.

Keywords: achondroplasia, healthy children, gait analysis, locomotor kinetics and kinematics, limb lengthening

For citation: Dolganova T.I., Smolkova L.V., Dolganov D.V., Aranovich A.M., Gvozdev N.S., Popkov D.A. Features of motor stereotype kinematics and kinetics in children with achondroplasia: a comparative cross-sectional study. *Genij Ortopedii*. 2024;30(3):372–383. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-3-372-383

ВВЕДЕНИЕ

Ахондроплазия представляет собой скелетную дисплазию, генетическое заболевание с частотой встречаемости 3,7–4,6 на 100 тыс. новорожденных [1, 2]. Диспропорциональное сложение характеризуется, в том числе, нарушением коэффициента пропорциональности между ростом и массой тела: значительным избирательным отставанием от уровня здоровых сверстников роста длинных костей нижних конечностей и меньшим — в росте сократительной части мышц, при полной сохранности их контрактильных свойств [3, 4, 5].

Необходимо учитывать, что у детей до 5 лет анатомическая и функционально оптимальная длины конечностей, когда регистрируются максимальные силовые параметры мышц, не совпадают. Продольный рост мышц у детей раннего возраста может осуществляться независимо от роста костей, в то время как у подростков — в значительной мере под влиянием тракции кости [6].

Среди других особенностей походки отмечают избыточное отведение бедер в сочетании со сгибательной установкой в тазобедренных суставах, гипермобильность коленных суставов во фронтальной плоскости с формированием варусной деформации коленного сустава за счет большеберцовой кости [7] и его рекурвационную деформацию [8, 9].

Вышеперечисленные особенности в сочетании с широким тазом, варусной и торсионной деформациями голеней, грудопоясничным кифозом, поясничным лордозом, сниженной мышечной силой в совокупности ведет к задержке двигательного развития и нарушению функции ходьбы [2, 9, 10, 11, 12]. Следствием биомеханических нарушений неизбежно являются повышенные энергозатраты при ходьбе: увеличение потребления кислорода и интенсификация метаболизма при двигательных тестах [13]. В литературе кинетический анализ походки у детей с ахондроплазией, включая суставные моменты, рассматривают без сравнения с контрольной группой [10, 14].

Количество исследований, изучающих кинематические и кинетические особенности походки у детей с ахондроплазией, ограничено и признано недостаточным [8, 15]. Неопределенность добавляет констатация слабой корреляции между рентгенологическими и кинематическими параметрами, описывающими угловые деформации. Стандартом оценки походки является трехмерный компьютерный анализ походки (3DGA). Комбинация кинетических и кинематических параметров общей модели походки рекомендуется в качестве экспертного уровня для объективного документирования выявляемых изменений [16, 17].

Изучение кинематических и кинетических параметров походки у детей с ахондроплазией позволит детальнее понять локомоцию при таком диспропорциональном состоянии, особенно в сравнении со сверстниками (по возрасту) и детьми с максимально приближенными дефинитивными размерами сегментов нижней конечности без скелетной дисплазии, а также контролировать изменения параметров в процессе роста ребенка на фоне проведения патогенетического фармакологического лечения [10, 18, 13].

Цель работы — оценка особенностей локомоторной кинематики и кинетики у детей с ахондроплазией по сравнению со сверстниками без ортопедической патологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка локомоторного профиля методом видеонализа походки (CGA) проведена в стационарных условиях у 6 детей (12 конечностей) с ахондроплазией. Критериями включения были подтвержденный диагноз ахондроплазии, возраст 6–7 лет, отсутствие ранее проводимого патогенетического фармакологического или ортопедического хирургического лечения. В группы сравнения включены 16 детей без ортопедической патологии. Здоровые дети подбирались для обследования по критерию схожего возраста (6–7 лет) и максимально приближенно по критерию «рост стоя» (группа детей 3–4 лет), учитывая, что обследование детей более младшего возраста для исследования параметров походки технически затруднено. Обследуемым проводили компьютерный анализ параметров ходьбы в лаборатории анализа движений Центра Илизарова (*Iizarov Gait Analysis Laboratory*). Обследуемые ходили самостоятельно, босиком, на 7-метровой дорожке с привычной для них скоростью.

Выделено три группы обследуемых:

группа I — дети 6–7 лет с ахондроплазией (6 человек, 12 конечностей),

группа II — дети 6–7 лет без ортопедической патологии (8 человек, 16 конечностей).

группа III — максимально приближенные по критерию «рост стоя» дети без ортопедической патологии в возрасте 3–4 лет (8 человек, 16 конечностей).

Кинематические данные регистрировали оптическими камерами Qualisys 7+ (8 камер компании Qualisys) с технологией видеозахвата пассивных маркеров, синхронизированными с шестью дина-

мометрическими платформами KISTLER (Швейцария). При установке маркеров использовали модель IOR. Анализ кинематики и кинетики проводили в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений [19]. Рассчитывали показатели суммарной (генерация + релаксация) пиковой мощности работы суставов [20]; суммарную общую пиковую мощность — как сумму абсолютных величин генерации и релаксации; значения полезной пиковой мощности — как разность абсолютных величин генерации и релаксации на графиках кинетики [21]. Общую механическую эффективность определяли как отношение положительной (полезной) пиковой мощности к общей [22].

Для статистической обработки данных применяли программу AtteStat 12.0.5. [23] Учитывая количество наблюдений в группах, для обработки результатов использовали непараметрическую статистику с принятием уровня значимости $p \leq 0,05$. Количественные характеристики выборочных совокупностей представлены в таблице в виде медианы с уровнем распределения процентилей 25 ÷ 75 % и числа наблюдений (n), равного числу конечностей. Статистическую значимость различий определяли с использованием непарного критерия Вилкоксона.

На проведение исследований получено разрешение комитета по этике НМИЦ ТО им. акад. Г.А. Илизарова (протокол от 21.10.2021 № 2(70)). Исследования проводили в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г., «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 года № 266. Родители детей, участвовавших в исследовании, присутствовали при его проведении, подтверждали информированное согласие на его проведение и публикацию результатов исследований без идентификации личности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены антропометрические данные детей всех трех групп. Рост пациентов с ахондроплазией статистически достоверно отличался не только от своих сверстников (на 8,8 σ), но и от детей 3–4 лет (на 2,3 σ). Вес детей и длина нижних конечностей достоверно отличались только с группой детей-сверстников, с группой детей 3–4 лет не имела достоверных различий.

Таблица 1

Антропометрические данные обследованных детей

Показатели	Группа I ($n = 6$)	Группа II ($n = 8$)	Группа III ($n = 8$)
Рост стоя, см	97,5 (90÷98,0) $P^2 = 9,19E-6$, $P^3 = 0,00169$	120 (117 ÷ 122)	102 (102 ÷ 103)
Вес, кг	17,5 (16,1÷19,0) $P^2 = 0,0347$	23,0 (19,6 ÷ 25,8)	15,4 (14,9÷17,4)
Длина нижних конечностей, см	42,0 (38,0÷44,0) $P^2 = 1,41E-05$	54,5 (52,0÷56,0)	44,0 (42,4÷45,0)

Примечание: P^2 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой II; P^3 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой III.

В таблице 2 указаны пространственно-временные параметры походки.

Как видно из представленных данных, достоверно снижены длина периода шага и скорость ходьбы в группе детей с ахондроплазией только по сравнению со второй группой (сверстники 6–7 лет), что, очевидно, связано со значительно меньшей длиной нижних конечностей.

Параметры кинематики движений представлены в таблице 3.

Таблица 2

Пространственно-временные показатели походки

Показатели	Группа I ($n = 6$)	Группа II ($n = 8$)	Группа III ($n = 8$)
Скорость ходьбы, м/сек	0,67 (0,65÷0,68) $P^2 = 0,012$	1,04 (0,97÷1,05)	0,78 (0,72÷0,82)
Длина периода шага, м	0,57 (0,53÷0,73) $P^2 = 0,037$	0,97 (0,85÷1,02)	0,74 (0,69÷0,79)
Длительность опорного периода, %	62,4 (61,5 ÷ 63,5)	61,9 (61,4 ÷ 62,3)	62,6 (61,7 ÷ 63,8)
Длительность не опорного периода, %	37,4 (36,3 ÷ 38,3)	38,0 (37,7 ÷ 38,5)	37,4 (36,3 ÷ 38,3)
Длительность двуопорного периода цикла шага, %	25,3 (22,5 ÷ 28,5)	22,9 (22,5 ÷ 24,6)	25,3 (22,5 ÷ 27,9)
Циклов шагов в минуту	70,6 (61,7÷72,4)	64,5 (63,3÷65,4)	65,1 (62,1÷66,8)

Примечание: P^2 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой II.

Таблица 3

Кинематические показатели

Показатели	Группа I (n = 12)	Группа II (n = 16)	Группа III (n = 16)
Обобщенный индекс походки (GPS, gait profile score)	12,3 (11,0÷13,9) $P^2 = 0,00367$, $P^3 = 0,011$	8,2 (8,0 ÷ 8,4)	9,7 (9,0 ÷ 10,3)
Установка стопы в начале опорного периода, °	6,6 (3,4÷10,2) $P^2 = 0,00098$, $P^3 = 0,00011$	-0,3 (-2,6÷1,9)	-2,6 (-3,4÷0,5)
Угол максимальной тыльной флексии стопы в опорную фазу, °	16,7 (15,2÷18,2) $P^2 = 0,00015$, $P^3 = 9,27E-06$	11,6 (10,2÷14,3)	10,6 (8,5÷12,1)
Позиция стопы в не опорную фазу, °	12,5 (7,8 ÷ 14,5) $P^2 = 0,00759$, $P^3 = 0,00090$	5,7 (2,8 ÷ 6,9)	4,7 (1,8 ÷ 6,6)
Амплитуда подошвенного сгибания, °	20,1 (16,2÷24,1) $P^2 = 0,0009$, $P^3 = 0,02434$	28,8 (24,6÷32,6) $P^{2-3} = 0,0167$	24,8 (21,8÷25,6)
Супинация стопы в опорную фазу, °	6,1 (1,3÷7,7) $P^2 = 0,0229$	0,7 (-1,8÷2,5)	1,45 (0,45÷4,3)
Угол ориентации стопы относительно вектора движения (max значения внутренней ротации), °	5,8 (1,6÷9,2)	8,2 (4,7 ÷ 13,1)	9,9 (8,0 ÷ 12,6)
Угол сгибания колена в начале опорного периода, °	6,7 (0,5÷17,2)	3,4 (1,4 ÷ 7,6)	3,7 (0,7 ÷ 5,8)
Угол пикового разгибания коленного сустава в опорную фазу, °	10,7 (8,5÷26,7)	5,7 (1,7 ÷ 8,4)	5,3 (2,3 ÷ 9,4)
Угол максимального сгибания в неопорную фазу, °	72,6 (70,3÷77,7) $P^2 = 0,00187$, $P^3 = 4,8E-05$	64,6 (61,6÷67,9)	62,8 (60,6÷64,2)
% цикла шага максимального сгибания коленного сустава в неопорную фазу	73,5 (72,0÷76,3)	73,5 (72,7÷74,3)	75,0 (73,0÷75,3)
Varus (+) / valgus (-) коленного сустава (max значения), °	5,8 (0,0÷11,5) $P^2 = 0,0388$, $P^3 = 0,00872$	-0,15 (-2,9÷1,2)	-2,0 (-5,0÷2,0)
Угол сгибания бедра в начале опорного периода, °	39,9 (33,5÷41,9) $P^2 = 0,0114$, $P^3 = 0,00173$	29,6 (24,7÷35,0)	27,5 (24,8÷29,6)
Максимальный угол разгибания бедра в опорную фазу, °	-0,7 (-6,1÷6,6) $P^2 = 0,00236$, $P^3 = 0,000321$	-11,7 (-15,2÷-7,7)	-13,6 (-16,6÷-7,3)
Угол максимального отведения бедра, °	10,3 (8,9÷14,9) $P^2 = 0,00813$, $P^3 = 0,000763$	4,7 (2,6÷7,8)	6,2 (3,5÷7,3)
Амплитуда движения тазобедренного сустава, °	40,3 (39,1÷47,4)	45,3 (43,4÷48,9)	43,1 (41,3÷44,2)
Ротация бедра (max значения внутренней ротации), °	8,2 (3,3 ÷ 18,4)	14,6 (7,6 ÷ 16,6)	13,1 (0,1 ÷ 13,9)
Угол максимального наклона таза кпереди, °	17,1 (14,8÷18,9) $P^2 = 0,000829$, $P^3 = 5,92E-05$	8,4 (5,3÷12,4)	8,9 (6,4÷10,8)
Амплитуда ротационных движений таза при ходьбе, °	27,2 (18,1÷33,3) $P^2 = 0,000529$, $P^3 = 4,4E-05$	14,2 (12,8÷18,2)	13,1 (12,7÷14,5)

Примечание: P^2 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой II; P^3 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой III.

В группах здоровых детей по возрасту достоверны различия только по параметру «амплитуда подошвенного сгибания», который имеет корреляционную связь со скоростью ходьбы ($r = 0,412$, $n = 32$, $p < 0,05$). В отношении кинематических параметров у детей с ахондроплазией (табл. 3, рис. 1) можно отметить достоверное увеличение интегрального показателя индекса оценки профиля походки (GPS), который предложен как количественный параметр идентификации типичных особенностей характера походки.

Отметим установку стопы в позицию тыльной флексии. Присутствует значимая супинация стопы в опорную фазу, но значимые ротационные установки стопы относительно вектора движений отсутствуют. Определена варусная деформация коленного сустава, связанная с отклонением биомеханической оси нижней конечности, типичной для ахондроплазии. У здоровых детей определен физиологический вальгус коленного сустава: для детей 3–4 лет зарегистрированы максимальные отклонения коленного сустава на вальгус до 5,0°, у детей 5–6 лет — до 2,9°.

Зарегистрированы сгибательная позиция бедра в начале опорного периода цикла шага, уменьшение угла разгибания бедра, что конкордантно с увеличением сгибания в коленном суставе в неопорную фазу. Достоверно увеличение наклона таза кпереди и увеличение его ротационных движений.

Суммарный показатель оценки ходьбы в группе пациентов с ахондроплазией также в большей степени показывает девиацию от нормы.

Joint Angle Comparison - unspecified

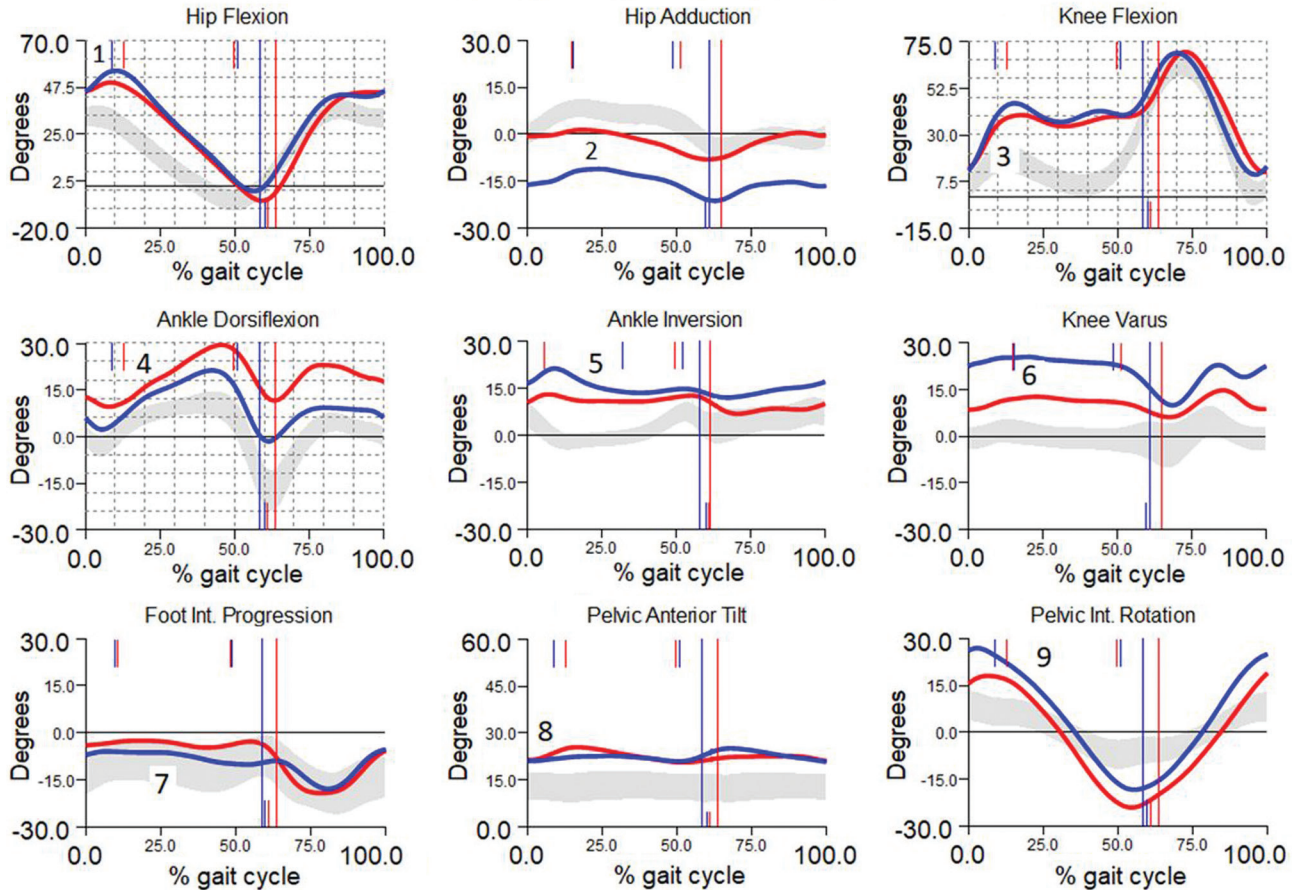


Рис. 1. Пример кинематических графиков, показывающих сгибательную (1) и отведенную установку бедра (2), сгибательную установку коленного сустава (3), преимущественное нахождение стопы в положении тыльной флексии (4), супинацию стопы в опорную фазу (5), varus-деформацию коленного сустава (6), сохранение нормальных ротационных установок сегментов относительно вектора движения (7), увеличение наклона таза кпереди (8) и его ротационных движений (9)

В обследованной группе пациентов рекурвационная установка в коленном суставе, которая сочеталась с разгибательной позицией бедра, выявлена только у одного пациента (рис. 2). При нормальном положении таза и сохраненной в полном объеме амплитудой движения в голеностопном суставе параметры кинетики отражали выраженное снижение силовых параметров сгибателей и разгибателей бедра и голени.

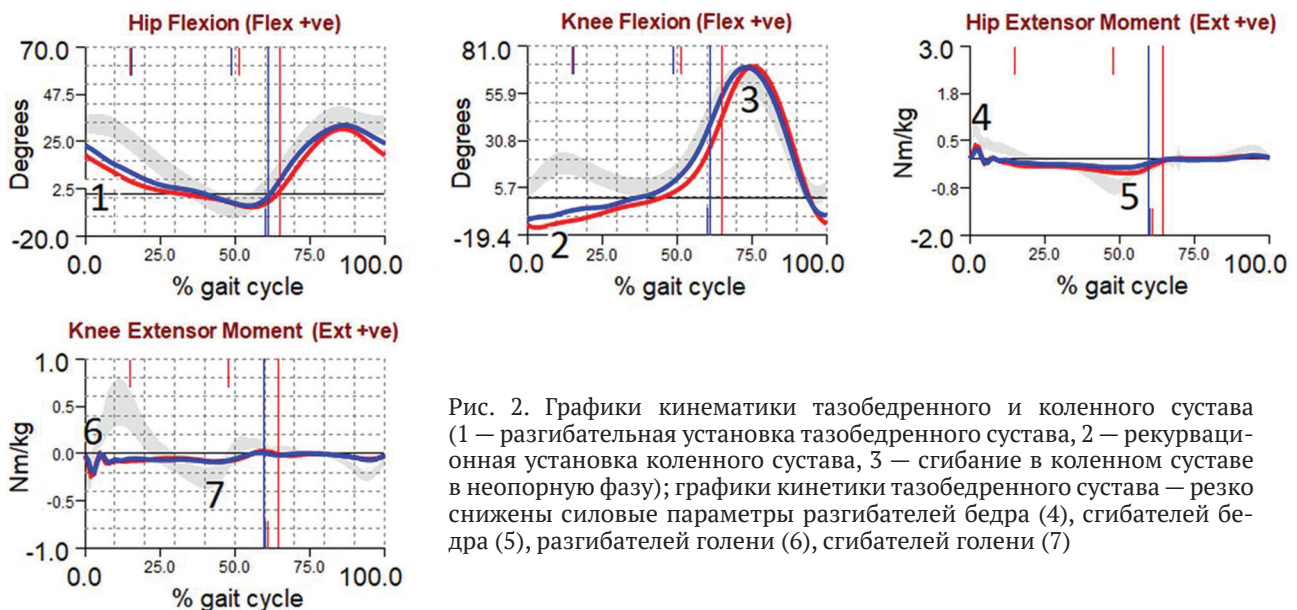


Рис. 2. Графики кинематики тазобедренного и коленного сустава (1 — разгибательная установка тазобедренного сустава, 2 — рекурвационная установка коленного сустава, 3 — сгибание в коленном суставе в неопорную фазу); графики кинетики тазобедренного сустава — резко снижены силовые параметры разгибателей бедра (4), сгибателей бедра (5), разгибателей голени (6), сгибателей голени (7)

В таблицах 4 и 5 представлены кинетические параметры ходьбы в группах обследованных.

В группах здоровых детей с возрастом зарегистрировано достоверное увеличение силовых параметров мышц, участвующих в двигательном стереотипе, при увеличении скорости ходьбы (сгибателей и разгибателей бедра, приводящих бедро) и при формировании опорного толчка.

Функциональные возможности мышц разгибателей и сгибателей бедра и разгибателей голени у детей с ахондроплазией имели достоверное отличие только относительно группы сверстников (где механический рычаг больше). Схожая длина сегментов нижних конечностей (с детьми возраста 3–4 лет и без ортопедических проблем) не сопровождалась достоверными отличиями в силовых параметрах этих групп мышц. Но показатели групп мышц, обеспечивающих сгибание голени и подошвенное сгибание, также достоверно снижены и относительно здоровых детей 3–4 лет, что отражает влияние уже сниженной скорости ходьбы у пациентов. Сниженные силовые параметры группы приводящих мышц бедра являются критерием декомпенсированной формы варусной деформации биомеханической оси нижней конечности.

Таблица 4

Кинетические параметры суставов нижних конечностей (относительный момент силы, нормализованный по весу; N·m/kg)

Показатели	Группа I (n = 12)	Группа II (n = 16)	Группа III (n = 16)
Разгибание бедра	0,36 (0,33÷0,53) $P^2 = 0,00574$	0,62 (0,55÷0,89) $P^{2-3} = 0,00290$	0,49 (0,38÷0,57)
Сгибание бедра	-0,25 (-0,34÷-0,21) $P^2 = 0,00218$	-0,48 (-0,56÷-0,31) $P^{2-3} = 0,01668$	-0,32 (-0,38÷-0,28)
Приведение бедра	0,32 (0,23÷0,37) $P^2 = 1,94E-05$, $P^3 = 7,2E-05$	0,62 (0,57÷0,66) $P^{2-3} = 0,02615$	0,53 (0,45÷0,57)
Разгибание голени	0,24 (0,09÷0,31) $P^2 = 0,03465$	0,34 (0,25÷0,48)	0,31 (0,21÷0,36)
Сгибание голени	-0,11 (-0,13÷-0,04) $P^2 = 0,01789$, $P^3 = 0,005327$	-0,18 (-0,26÷-0,12)	-0,18 (-0,24÷-0,11)
Разгибание голени в опорный толчок	0,06 (0,03÷0,11) $P^2 = 0,041$	0,13 (0,09÷0,14) $P^{2-3} = 0,000111$	0,05 (0,03÷0,07)
Тыльное сгибание	-0,09 (-0,10÷-0,08)	-0,14 (-0,15÷-0,09)	-0,11 (-0,13÷-0,09)
Подошвенное сгибание (take-off force)	0,58 (0,53÷0,79) $P^2 = 7,2E-05$, $P^3 = 0,003993$	1,1 (1,05÷1,21) $P^{2-3} = 2,6E-06$	0,86 (0,83÷0,91)

Примечание: P^2 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой II; P^{2-3} — уровень значимости при сравнении параметра группы II с группой III.

Таблица 5

Показатели суммарной (генерация + релаксация) пиковой мощности работы суставов, нормализованной по весу (W/kg)

Показатели	Группа I	Группа II	Группа III
Тазобедренный сустав	1,12 (0,86÷1,62)	1,27 (1,05÷1,46)	1,1 (0,94÷1,22)
Коленный сустав	1,24 (0,83÷1,81)	1,65 (1,46÷2,15)	1,48 (1,30÷1,69)
Голенистоопный сустав, опорный толчок (push-off)	2,05 (1,41÷2,17) $P^2 = 0,001253$	3,0 (2,62÷4,0) $P^{2-3} = 0,000205$	2,03 (1,85÷2,27)
Суммарная пиковая мощность работы всех суставов конечности	4,58 (3,31÷6,25) $P^2 = 0,03075$	6,13 (5,38÷7,06)	4,8 (4,05÷5,09)
Полезная пиковая мощность работы всех суставов конечности	0,63 (0,24÷1,01) $P^2 = 0,000763$	1,66 (1,39÷2,73) $P^{2-3} = 0,000974$	0,88 (0,62÷1,27)
Эффективность работы суставов, %	58,7 (53,9 ÷ 61,5) $P^2 = 0,001476$	63,7 (61,8 ÷ 67,2)	61,0 (58,0 ÷ 63,4)

Примечание: P^2 — уровень значимости при сравнении параметра группы ахондроплазии с группой II; P^{2-3} — уровень значимости при сравнении параметра группы II с группой III.

У пациентов с ахондроплазией относительно здоровых детей второй группы достоверно снижены показатели нормализованной по весу (W/kg) пиковой мощности опорного толчка, суммарной и полезной пиковой мощности работы суставов, но достоверно не отличаются от параметров здоровых детей 3–4 лет, где практически одинакова длина рычага (длина сегмента), формирующего опорный толчок.

ОБСУЖДЕНИЕ

Нарушения энхондрального остеогенеза при ахондроплазии, преимущественно в ростковых пластинках, ведет к выраженным изменениям скелета, характеризующимся, в первую очередь, диспропорциональным низким ростом [2, 3, 12, 18]. Эти аномалии роста отражаются, в частности, на измененной функции ходьбы, сопровождающейся меньшей эффективностью и повышенными энергозатратами [13, 15, 24].

Относительные к весу моменты силы мышц сгибателей и разгибателей стопы у пациентов ахондроплазией снижены на 15–30 %, сгибателей и разгибателей голени — на 40–60 % по сравнению с теми же показателями здоровых сверстников [25]. При данной патологии, при укороченном сегменте нижней конечности, замедленна возрастная дифференцировка мышц сгибателей и разгибателей: до 12 лет максимальная сила мышц-сгибателей больше максимальной силы мышц-разгибателей на 30–50 %, т.е. расчетный показатель индекса мышц-антагонистов соответствует значениям детей в возрасте 4–5 лет при приблизительно равной им длине сегмента [26].

По сравнению со взрослыми, дети демонстрируют более низкие параметры кинетики, скорости и мощности работы суставов даже после корректировки размерных различий, зависящих от возраста, за счет более низкого уровня максимальной произвольной мышечной активации, который связан с относительной неспособностью ими задействовать или использовать свои «быстросокращающиеся» двигательные волокна, тип II [27]. Возрастное увеличение силовых параметров мышц в группах здоровых детей согласуется с данными кинетики локомоторных стереотипов у здоровых детей в различных скоростных диапазонах передвижения, где определена достоверная положительная корреляционная связь между скоростью ходьбы и общей суммарной ($r = 0,907$; $n = 104$) и полезной пиковой мощностями ($r = 0,475$; $n = 104$) суставных мышц [22].

Временные параметры структуры шага определяют скоростью ходьбы, и относительная величина длительности опорного периода и двухопорного периода уменьшается при увеличении скорости ходьбы [28]. Несмотря на меньшую скорость ходьбы больных с ахондроплазией, временные параметры структуры шага (относительная длительность опорного, неопорного и двухопорного периодов цикла шага) достоверно не отличаются в группах обследованных. Полученные результаты согласуются с данными литературы: преобладание осевых отклонений при крайне недостаточной длине конечностей обуславливает особенности походки, характеризующиеся укорочением длины шага, низкой скоростью ходьбы [8, 10] и увеличенным ритмом при отсутствии различий в относительной скорости ходьбы с учетом длины конечностей [14].

Оптимальная стратегия улучшения состояния детей с ахондроплазией требует и изучения паттерна походки, особенностей кинематических и кинетических показателей как с точки зрения планирования лечения, так и для проведения объективного многофакторного контроля эффективности терапии [9, 10, 12].

В литературе можно найти ограниченное количество исследований походки людей с ахондроплазией с помощью инструментального анализа [8, 10, 24, 29, 30]. Часть работ выполнена для изучения локомоторной функции у взрослых или только после проведения оперативного лечения [10, 13, 30, 31]. Выявлен ряд специфических для ахондроплазии особенностей ходьбы, на которые указывают различные авторы. Кинематические особенности в сагиттальной плоскости при ходьбе характеризуются преимущественно доминирующей сгибательной позицией в тазобедренных, коленных и голеностопных суставах (тыльная флексия) [8, 14], что может являться компенсаторной установкой в связи с передним наклоном таза. Избыточный наклон таза кпереди может быть обусловлен слабостью разгибателей бедра и мышц брюшного пресса [32]. Структурные изменения в поясничном отделе позвоночника (лордоз в сочетании со стенозом) [33, 34, 35] могут также способствовать развороту таза, что ведет к компенсаторным установкам нижележащих сегментов. Наше исследование также выявило достоверное ограничение разгибания в тазобедренном суставе у детей с ахондроплазией, уменьшение подошвенной флексии в сочетании с достоверно большей тыльной флексией в опорную фазу цикла шага. Впервые выявленной особенностью является более выраженное сгибание коленного сустава в неопорную фазу в сравнении с контрольными группами, что может быть объяснено сгибательной установкой в тазобедренном суставе и ведет к увеличению пассивного сгибания в коленном суставе в неопорную фазу цикла шага.

По данным литературы, у пациентов с ахондроплазией регистрируют рекурвацию коленного сустава [14], к чему предрасполагает специфичная анатомия проксимального отдела большеберцовой кости (меньший, чем в норме, наклон суставной поверхности) [11]. В нашем исследовании компьютерный анализ походки у пяти пациентов не выявил рекурвационную установку в коленном суставе в опорную фазу. Вероятно, что достаточный контроль движений компенсирует данное анатомическое нарушение. У одного пациента (16 % случаев) определена рекурвационная установка в коленном суставе, при этом кинетика отражала выраженное снижение силовых параметров сгибателей и разгибателей бедра и голени (рис. 2).

У пациентов с ахондроплазией выявлено снижение величины кинетических показателей (как моменты сил, так и генерируемая мощность) в сагиттальной плоскости в сравнении со здоровыми сверстниками, что, очевидно, обусловлено меньшей длиной механического рычага сегментов. Мы обнаружили, что при сравнении с детьми со схожей длиной сегментов (но меньшего возраста) различия отсутствовали. Проводя сравнение с детьми 3–4 лет необходимо учитывать, что в этом возрасте общие параметры локомоторного паттерна до конца еще не сформированы [36, 37, 38]. Характерный вид основ-

ного 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 (англ.: spinal central pattern generators — CPG). В работах других авторов указано на соответствие кинетических изменений в сагиттальной плоскости сгибательным установкам в суставах у пациентов с ахондроплазией [8, 14], но сравнение показателей со здоровыми детьми со схожей длиной сегментов не проводилось.

Известно, что силовые параметры мышц и пиковая мощность работы суставов у пациентов ахондроплазией определяют длиной рычага (длиной сегмента конечности) при сохранной их физиологической зрелости [39, 40]. Снижение показателей мощности работы суставов также связано с меньшей скоростью ходьбы, т.к. определена достоверная положительная корреляционная взаимосвязь мощностных параметров локомоции со скоростью ходьбы [22].

Мы полагаем, что отсутствие различий в параметрах генерируемой мощности и моменте силы в сравнении с детьми меньшего возраста, имеющими схожую длину сегментов нижних конечностей, обосновывает стратегию увеличения продольных размеров длинных трубчатых костей (фармакологически и/или хирургически) именно с точки зрения снижения энергоемкости походки при ахондроплазии и, соответственно, увеличения двигательных возможностей.

Выявленные изменения кинематики в горизонтальной плоскости не столь выражены, как в сагиттальной плоскости. Обращает на себя внимание достоверное увеличение амплитуды ротации таза. Мы рассматриваем данную особенность как компенсаторную, направленную на увеличение длины шага. Это отмечают и другие исследователи [8, 31]. В работах D. Kierman et al. [8] и E.W. Broström et al. [14] описывают избыточную наружную ротацию бедра, которая не обнаружена у наших пациентов. Во фронтальной плоскости у детей с ахондроплазией наблюдали увеличенное отведение бедра. Анатомически тазовые органы у детей ахондроплазией отличаются более широкой и горизонтальной вертлужной впадиной [9]. Сгибательная позиция бедра также может способствовать увеличению отведения бедра и варусной деформации коленного сустава. Увеличение отведения бедра в сочетании с его сгибательной позицией также влияет на кинематику во фронтальной плоскости с уменьшением вектора силы приведения бедра во время ходьбы.

С точки зрения D. Kierman et al. [8], внутриторсионная установка голени компенсирует наружный разворот бедра, и ориентация стопы, в итоге, не отклоняется значимо от вектора движения пациента. В нашем исследовании значимых девиаций стопы также не обнаружено. Очевидно, что ротационные движения и взаимно компенсирующие торсионные деформации бедра и голени (при их присутствии) при ахондроплазии существенно не влияют на походку и не являются первостепенными патологическими элементами.

Изменения во фронтальной плоскости обусловлены варусной деформацией оси нижней конечности и нестабильностью коленного сустава. Это обуславливает амплитуду движений при приведении голени, возникновение компенсаторного вальгизирующего вектора момента силы, который можно измерить с помощью 3D-видеокомпьютерного анализа [41], и по его величине делать вывод о компенсированной или декомпенсированной нестабильности коленного сустава. По мере развития и роста, ноги у детей меняют свою форму, начиная с О-образной, проходя через период Х-образной, формируя физиологический вальгус коленного сустава, который мы и регистрируем в группах здоровых детей. В таком случае биомеханическая ось нижней конечности проходит через середины тазобедренного и коленного суставов, близко к наружному краю блока таранной кости, вследствие чего суставы нагружаются равномерно [42]. Наше исследование полностью подтверждает значимость варусной девиации биомеханической оси для кинематики и кинетики движений. Отклонение обычно двустороннее и симметричное, находится в основном на уровне большеберцовой кости, имеет сложную трехмерную деформацию, которую связывают с относительным превышением длины малоберцовой кости [43].

Другим характерным признаком ахондроплазии является фронтальная слабость коленного сустава за счет изменения проксимальных точек крепления коллатеральных связок.

Кроме того, выявлена супинация стопы, достоверно отличающаяся от параметров сверстников или здоровых детей со схожей длиной конечностей. Мы полагаем, что избыточная инверсия носит компенсаторно-приспособительный характер. Пространственно-временные характеристики походки у детей с ахондроплазией мы интерпретируем либо как следствие недостаточной длины сегментов (уменьшение величины шага, увеличение цикла шагов в минуту), либо как неустойчивость походки (увеличение относительной длительности двуопорной фазы).

Очевидно, что стратегией коррекции недостатков компонентов походки является увеличение длины сегментов нижних конечностей с восстановлением пропорций и устранением угловых деформаций. Это приведет как к улучшению показателя длины шага, так и снижению энергетических затрат при ходьбе.

Компьютерный (англ.: 3D-instrumented gait analysis) анализ походки является ценным и необходимым методом доказательной медицины в контроле эффективности проводимого хирургического и/или патогенетического фармакологического лечения (восоритид).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нарушения кинематических показателей ходьбы у детей с ахондроплазией касаются всей биомеханической цепи. Их выявляют в трех плоскостях: в сагитальной — увеличение максимального наклона таза вперед, сгибательная позиция в тазобедренном, коленном суставах и позиция тыльной флексии голеностопного сустава; во фронтальной — увеличенный максимальный угол отведения бедра и varus-деформация коленного сустава; в горизонтальной — увеличенный ротационный диапазон движений таза.

Отклонения кинетических параметров определяется меньшим рычагом (длина сегмента) и меньшей скоростью ходьбы. Схожая длина сегментов нижних конечностей (с детьми возраста 3–4 лет без ортопедических проблем) не сопровождается достоверными отличиями в силовых параметрах разгибателей бедра и голени. Кинетика группы мышц-сгибателей голени и стопы определяется скоростными параметрами ходьбы.

Изменения в горизонтальной плоскости носят компенсаторный характер и при нормальной ориентации оси стопы относительно вектора движения не являются патологическими.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Финансирование. Работа поддержана программой МЗ РФ в рамках государственного задания ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. акад. Г.А. Илизарова» для выполнения НИР на 2021–2023 гг. «Разработка телескопического интрамедуллярного стержня для реконструктивной хирургии конечностей при заболеваниях, сопровождающихся сниженными прочностными характеристиками костей у детей: дисхондроплазия, фосфат-диабет, фиброзная дисплазия, врожденный ложный сустав голени, несовершенный остеогенез»

Этическая экспертиза. Исследование выполнено в соответствии с этическими нормами Хельсинкской декларации (пересмотренной в октябре 2013 года), одобрено комитетом по этике (протокол № 2(70) от 21.10.2021).

Информированное согласие. От всех пациентов получено добровольное информированное согласие на публикацию результатов исследования без раскрытия личности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Coi A, Santoro M, Garne E, et al. Epidemiology of achondroplasia: A population-based study in Europe. *Am J Med Genet A*. 2019;179(9):1791–1798. doi: 10.1002/ajmg.a.61289
2. Foreman PK, van Kessel F, van Hoorn R, et al. Birth prevalence of achondroplasia: A systematic literature review and meta-analysis. *Am J Med Genet A*. 2020;182(10):2297–2316. doi: 10.1002/ajmg.a.61787
3. Ireland PJ, Donaghey S, McGill J, et al. Development in children with achondroplasia: a prospective clinical cohort study. *Dev Med Child Neurol*. 2012;54(6):532–7. doi: 10.1111/j.1469-8749.2012.04234.x
4. Мирзамуродов Х.Х.У. Удлинение конечностей при ахондроплазии. *Journal of Innovations in Social Sciences*. 2022;2(7):21–27.
5. Менщикова Т.И., Аранович А.М. Оценка резервных возможностей передней группы мышц голени у больных ахондроплазией в процессе удлинения (ультразвуковое исследование). *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2015;22(3):13–19.
6. Харрисон Д., Уайнер Д., Теннер Д. и др. *Биология человека*. М.: Мир; 1979:396–401.
7. Ulusaloglu AC, Asma A, Silva LC, et al. Growth Modulation by Tension Band Plate in Achondroplasia With Varus Knee Deformity: Comparison of Gait Analysis Measurements. *J Pediatr Orthop*. 2023;43(3):168–173. doi: 10.1097/BPO.0000000000002342
8. Kiernan D. Lower limb biomechanics during gait in children with Achondroplasia. *J Biomech*. 2021;119:110313. doi: 10.1016/j.jbiomech.2021.110313
9. Pauli RM. Achondroplasia: a comprehensive clinical review. *Orphanet J Rare Dis*. 2019;14(1):1. doi: 10.1186/s13023-018-0972-6
10. Inan M, Thacker M, Church C, et al. Dynamic lower extremity alignment in children with achondroplasia. *J Pediatr Orthop*. 2006;26(4):526–9. doi: 10.1097/01.bpo.0000217712.42115.e6
11. Brooks JT, Bernholt DL, Tran KV, Ain MC. The Tibial Slope in Patients With Achondroplasia: Its Characterization and Possible Role in Genu Recurvatum Development. *J Pediatr Orthop*. 2016;36(4):349–54. doi: 10.1097/BPO.0000000000000458
12. Baujat G, Legeai-Mallet L, Finidori G, et al. Achondroplasia. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2008;22(1):3–18. doi: 10.1016/j.berh.2007.12.008
13. Sims DT, Burden A, Payton C, et al. A quantitative description of self-selected walking in adults with Achondroplasia using the gait profile score. *Gait Posture*. 2019;68:150–154. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.11.019
14. Broström EW, Antonissen L, von Heideken J, et al. Gait in children with achondroplasia – a cross-sectional study on joint kinematics and kinetics. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23(1):397. doi: 10.1186/s12891-022-05343-4
15. Sims DT, Burden A, Payton C, et al. A spatio-temporal and kinematic description of self-selected walking in adults with Achondroplasia. *Gait Posture*. 2020;80:391–396. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.06.030

16. Hebda-Boon A, Tan XL, Tillmann R, et al. The impact of instrumented gait analysis on decision-making in the interprofessional management of cerebral palsy: A scoping review. *Eur J Paediatr Neurol*. 2023;42:60-70. doi: 10.1016/j.ejpn.2022.11.007
17. Чибиров Г.М., Долганова Т.И., Долганов Д.В., Попков Д.А. Анализ причин патологических паттернов кинематического локомоторного профиля по данным компьютерного анализа походки у детей со спастическими формами ДЦП. *Гений ортопедии*. 2019;25(4):493-500. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-493-500
18. Попков А.В., Шевцов В.И. *Ахондроплазия*. М.: Медицина; 2001:192-195.
19. Аксенов А.Ю., Клишкова Т.А. *Программа формирования отчета биомеханики ходьбы человека*. Пат. РФ № 2020665238. 24.11.2020. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. Ссылка активна на 06.09.2023.
20. Umberger BR, Martin PE. Mechanical power and efficiency of level walking with different stride rates. *J Exp Biol*. 2007;210(Pt 18):3255-65. doi: 10.1242/jeb.000950
21. Zelik KE, Honert EC. Ankle and foot power in gait analysis: Implications for science, technology and clinical assessment. *J Biomech*. 2018;75:1-12. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.04.017
22. Долганова Т.И., Попков Д.А., Долганов Д.В., Чибиров Г.М. Показатели кинетики локомоторных стереотипов у здоровых детей в различных скоростных диапазонах передвижения. *Гений ортопедии*. 2022;28(3):417-424. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-3-417-424
23. Гайдышев И.П. *Моделирование стохастических и детерминированных систем: Руководство пользователя программы AtteStat*. Курган; 2015:104-105.
24. Egginton R, Newman C, Walsh M et al. Kinematic characteristics of Achondroplasia. *Gait Posture*. 2006;24(Suppl. 2):S249-S250. doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.11.170
25. Менщикова Т.И., Долганова Т.И., Аранович А.М. Влияние силы мышц бедра и голени на опорные реакции стоп у больных ахондроплазией после коррекции роста. *Российский журнал биомеханики*. 2014;18(2):248-258.
26. Витензон А.С. *Закономерности нормальной и патологической ходьбы человека*. Москва: Зеркало-М; 1998:74-93.
27. Dotan R, Mitchell C, Cohen R, et al. Child-adult differences in the kinetics of torque development. *J Sports Sci*. 2013;31(9):945-53. doi: 10.1080/02640414.2012.757343
28. Бернштейн Н. А. *Избранные труды по биомеханике и кибернетике*. 2-ое издание. Москва: ТВТ Дивизион; 2019:175-177.
29. Rethlefsen S, Tolo VT. Gait analysis before and after tibial osteotomy in achondroplasia. *Gait Posture*. 1998;7(2):174-175. doi: 10.1016/S0966-6362(98)90260-0
30. Van der Meulen J, Dickens W, Burton M, Fernandes J. Gait characteristics of achondroplasia following lower limb-lengthening. *Gait & Posture*. 2008;28(Suppl. 2):S36-S37. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(08\)70052-3](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(08)70052-3)
31. Stefanou M, Pasparakis D, Darras N, Papagelopoulos P. Gait analysis of achondroplastic patients who have undergone lower limb lengthening using the ilizarov method: a five-to 19-year follow-up study. *Orthop Procs*. 2017;99-B(SUPP_1):11-11. doi:10.1302/1358-992X.99BSUPP_1.EORS2016-011
32. Wolf SI, Mikut R, Kranzl A, Dreher T. Which functional impairments are the main contributors to pelvic anterior tilt during gait in individuals with cerebral palsy? *Gait Posture*. 2014;39(1):359-64. doi: 10.1016/j.gaitpost.2013.08.014
33. Trotter TL, Hall JG; American Academy of Pediatrics Committee on Genetics. Health supervision for children with achondroplasia. *Pediatrics*. 2005;116(3):771-83. doi: 10.1542/peds.2005-1440
34. Прудникова О.Г., Аранович А.М. Клинико-рентгенологические аспекты сагиттального баланса позвоночника у детей с ахондроплазией. *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2018;6(4):6-12. doi: 10.17816/PTORS646-12
35. Прудникова О.Г., Аранович А.М., Муштаева Ю.А., Губин А.В. Биомеханические аспекты сагиттального баланса позвоночника у пациентов с ахондроплазией при удлинении конечностей методом Илизарова. *Хирургия позвоночника*. 2018;15(4):7-14. doi: 10.14531/2018.4.7-14
36. Долганова Т.И., Смолькова Л.В., Долганов Д.В. Биомеханические характеристики локомоторной активности у детей 3-6 лет без двигательных нарушений. *Вестник уральской медицинской академической науки*. 2022;19(5):502-513. doi: 10.22138/2500-0918-2022-19-5-502-513
37. Meyns P, Van de Walle P, Desloovere K, et al. 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
38. Mani H, Miyagishima S, Kozuka N, et al. 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
39. Щуров В.А., Менщикова Т.И. Особенности продольного роста голени у больных с ахондроплазией. *Физиология человека*. 1999;25(2):114-118.
40. Менщикова Т.И., Аранович А.М. Удлинение голени у больных ахондроплазией 6-9 лет как первый этап коррекции роста. *Гений ортопедии*. 2021;27(3):366-371. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-3-366-371
41. Byrnes SK, Holder J, Stief F, et al. Frontal plane knee moment in clinical gait analysis: A systematic review on the effect of kinematic gait changes. *Gait Posture*. 2022;98:39-48. doi: 10.1016/j.gaitpost.2022.07.258
42. Николенко В.Н., Фомичева О.А., Жмурко Р.С. и др. Индивидуально-типологические особенности морфогеометрии проксимального отдела бедренной кости. *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2010;6(1):36-39.
43. Lee ST, Song HR, Mahajan R, et al. Development of genu varum in achondroplasia: relation to fibular overgrowth. *J Bone Joint Surg Br*. 2007;89(1):57-61. doi: 10.1302/0301-620X.89B1.18223

Статья поступила 19.06.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 08.04.2024.

The article was submitted 19.06.2023; approved after reviewing 05.09.2023; accepted for publication 08.04.2024.

Информация об авторах:

Тамара Игоревна Долганова — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>;

Лидия Владимировна Смолькова — аспирант, slv@odb45.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>;

Дмитрий Владимирович Долганов — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, paradigma-dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>;

Анна Майоровна Аранович — доктор медицинских наук, профессор, заведующая отделением, старший научный сотрудник, aranovich_anna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7806-7083>;

Никита Сергеевич Гвоздев — врач травматолог-ортопед, nikitozgvozdev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3428-3742>;

Дмитрий Арнольдович Попков — доктор медицинских наук, профессор РАН, Член-корр. Французской Академии медицинских наук, руководитель клиники, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Information about the authors:

Tamara I. Dolganova — Doctor of Medical Sciences, leading researcher, rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>;

Lidiia V. Smolkova — postgraduate, slv@odb45.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9665-0427>;

Dmitry V. Dolganov — Candidate of Biological Sciences, senior researcher, paradigma-dv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8708-1303>;

Anna M. Aranovich — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department, senior researcher, aranovich_anna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7806-7083>;

Nikita S. Gvozdev — traumatologist-orthopedist, nikitozgvozdev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3428-3742>;

Dmitry A. Popkov — Doctor of Medical Sciences, Professor of RAS, Corresponding member of the French Academy of Medical Sciences, Head of the Clinic, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Вклад авторов

Долганова Тамара Игоревна — концептуализация, методология, создание метаданных, рецензирование.

Смолькова Лидия Владимировна — исследование, создание метаданных.

Долганов Дмитрий Владимирович — исследование, формальный анализ, визуализация.

Аранович Анна Майоровна — исследование.

Гвоздев Никита Сергеевич — исследование.

Попков Дмитрий Арнольдович — контроль, написание первоначального варианта, рецензирование, редактирование.