

ОЗДОРОВИТЕЛЬНАЯ И АДАПТИВНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА

Научная статья

УДК 796.012.412.4

<https://doi.org/10.35266/2949-3463-2024-3-9>

Анализ биомеханических особенностей кинетических показателей инициации ходьбы у девочек-подростков с идиопатическим сколиозом

Роман Олегович Солодилов^{1✉}, Олег Александрович Кошевой², Анастасия Егоровна Винс³

¹ Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

² ООО «Медицина и реабилитация», Сургут, Россия

³ Спортивная школа паралимпийского и сурдлимпийского резерва «Центр адаптивного спорта Югры», Ханты-Мансийск, Россия

¹ solodilov_ro@surgu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-4837-7427>

² swimmerkosh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1770-2394>

³ ae_bazhenova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5257-3618>

Аннотация. Несмотря на достижения современной науки и значительное количество исследований, этиология идиопатического сколиоза остается недостаточно изученной. Сколиотическая деформация позвоночного столба приводит к нарушению функциональных связей между различными частями тела, что обуславливает необходимость формирования новых компенсаторных механизмов для поддержания и контроля равновесия. Идиопатический сколиоз оказывает значительное влияние на пространственно-временные параметры двигательной активности человека, включая его осанку, походку и скорость передвижения. Изменения в кинематических и кинетических характеристиках при ходьбе обусловлены как самой деформацией позвоночника, так и компенсаторными адаптациями, которые организм вынужден использовать для поддержания устойчивости. В этом контексте изучение переходных процессов между статическими (стояние) и динамическими (ходьба) состояниями у пациентов с идиопатическим сколиозом представляется особенно актуальным, так как этот переход требует особой координации и адаптации биомеханических механизмов.

Ключевые слова: идиопатический сколиоз, биомеханика, компенсаторные механизмы

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Шифр специальности: 5.8.6. Оздоровительная и адаптивная физическая культура.

Для цитирования: Солодилов Р. О., Кошевой О. А., Винс А. Е. Анализ биомеханических особенностей кинетических показателей инициации ходьбы у девочек-подростков с идиопатическим сколиозом // Северный регион: наука, образование, культура. 2024. Т. 25, № 3. С. 81–86. <https://doi.org/10.35266/2949-3463-2024-3-9>.

Original article

Biomechanical features analysis of kinetic indicators of gait initiation in female adolescents with idiopathic scoliosis

Roman O. Solodilov^{1✉}, Oleg A. Koshevoy², Anastasiya E. Vins³

¹ Surgut State University, Surgut, Russia

² ООО “Meditsina i reabilitatsiya”, Surgut, Russia

³ Sports school of Paralympic and Deaflympic reserve “Tsentr adaptivnogo sporta Yugry”, Khanty-Mansiysk, Russia

¹ solodilov_ro@surgu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-4837-7427>

² swimmerkosh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1770-2394>

³ ae_bazhenova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5257-3618>

Abstract. The etiology of idiopathic scoliosis remains insufficiently studied despite advances in modern science and a significant amount of research. Scoliosis of the spinal column disrupts the functional connections between different parts of the body, necessitating the formation of new compensatory mechanisms to maintain and control balance. Idiopathic scoliosis has a considerable impact on the spatiotemporal parameters of human motor activity, including posture, gait, and walking speed. Changes in kinematic and kinetic characteristics during walking are influenced both by the spinal deformity itself and by the compensatory adaptations that the body must employ to maintain stability. In this context, the study of transitional processes between static (standing) and dynamic (walking) states in patients with idiopathic scoliosis is particularly relevant, as this transition requires special coordination and adaptation of biomechanical mechanisms.

Keywords: idiopathic scoliosis, biomechanics, compensatory mechanisms

Financing: the study is made within the framework of the strategic academic leadership program “Priority 2030”.

Code: 5.8.6. Health-Improving and Adapted Physical Education.

For citation: Solodilov R. O., Koshevoy O. A., Vins A. E. Biomechanical features analysis of kinetic indicators of gait initiation in female adolescents with idiopathic scoliosis. *Severny region: nauka, obrazovanie, kultura*. 2024;25(3):81–86. <https://doi.org/10.35266/2949-3463-2024-3-9>.

ВВЕДЕНИЕ

Ходьба у здорового человека – высокоэффективный и энергосберегающий способ передвижения. Биомеханическая структура человеческого организма эволюционно адаптирована для реализации этой функции с минимальными энергетическими затратами и мышечными усилиями. При выполнении ходьбы активируется широкий спектр мышц, включая мышцы спины, кора, что обеспечивает поддержание равновесия и стабильности, а также оптимальное распределение массы тела во время движения.

Инициация ходьбы представляет собой переходный этап между статическим положением тела и началом движения. Этот процесс включает ряд фаз и адаптаций, через которые проходит организм перед активацией моторных функций. Во время данного этапа происходит слаженная работа различных мышечных групп, а также координация их действий. Инициация ходьбы требует не только мышечных усилий, но и учета гравитационных факторов, действующих на тело [1]. Когда человек стоит, сила реакции опоры уравновешивает силу тяжести, поддерживая равновесие. Однако, когда тело наклоняется вперед, часть веса переносится на переднюю ногу, одновременно сила реакции опоры в задней ноге уменьшается, пока она не оторвется от земли [2]. Эта разнонаправленность создает оптимальные условия для непосредственного начала движения.

Данный процесс контролируется сложными механизмами координации. У здоровых людей инициация ходьбы в значительной мере автоматизирована, тогда как при наличии патологий опорно-двигательного аппарата или нарушений координации этот процесс требует более активного моторного контроля со стороны организма. Асимметричные патологии нижних конечностей, такие как односторонний гонартроз, гемиплегия, варусные и вальгусные деформации суставов, оказывают значительное влияние на данный процесс.

Скорость инициации ходьбы определяется множеством факторов, среди которых выделяются два ключевых – сила мышц и скорость их активации. Мышцы, вовлеченные в поддержание равновесия и движение, должны обладать достаточной силой и готовностью к выполнению данной задачи. Недостаток мышечной силы или нарушения их активации могут существенно замедлить скорость инициации ходьбы [1]. Эффективная работа нервной системы, координирующей действия различных мышц, также является необходимым условием для плавной инициации движения [3].

Исследования биомеханики ходьбы выявили ряд специфических особенностей, которые присущи пациентам с идиопатическим сколиозом (ИС) [4–6]. Предполагаемые факторы риска, такие как генетические аспекты, влияние окружающей среды, особенности

нервной системы и дисбаланс роста, не предоставляют полного объяснения причин развития данной патологии. По одной из гипотез, ИС является компенсаторной реакцией организма на диспропорциональный рост костной ткани позвоночника по отношению к спинному мозгу [7]. На фоне вышеизложенных особенностей у людей, страдающих сколиозом, так или иначе будет формироваться мышечный дисбаланс и различные компенсаторные механизмы. Деформация позвоночника изменяет взаимосвязь между различными частями тела, что требует от организма формирования новых компенсаторных механизмов поддержания равновесия и контроля тела. Хотя эти механизмы и могут быть в какой-то мере эффективными, однако они также способны вызывать дополнительные нагрузки и стрессовые состояния для организма.

Ходьба у пациентов с ИС характеризуется нарушением пространственно-временных параметров (положение тела, скорость и т. д.), которое также связано с компенсаторными перестройками, вызванными деформацией позвоночного столба. В связи с важностью пространственно-временных изменений в контексте компенсаторной перестройки орга-

низма при деформации позвоночника необходимо изучить механизм перехода между двумя состояниями – положением стоя и ходьбой у людей, страдающих ИС. Предположительно, смещение центра тяжести, коррелирующее с деформацией позвоночника, будет оказывать влияние на скорость инициации ходьбы.

Цель исследования – изучить биомеханические особенности кинетических показателей инициации ходьбы у девочек подросткового возраста с некомпенсированным С-образным сколиозом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 19 девочек подросткового возраста, из которых 10 (относительно здоровых) составили контрольную группу (КГ) и 9 (с идиопатическим сколиозом) – экспериментальную группу (ЭГ). В ЭГ включены только пациенты с правосторонним С-образным грудопоясничным сколиозом II степени и эктоморфным типом телосложения.

Обе группы были сопоставимы и не демонстрировали статистически значимых различий по показателям возраста, длины и массы тела (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные данные участников исследования, ($M \pm \sigma$)

Показатель	КГ ($n = 10$)	ЭГ ($n = 9$)
Возраст, лет	$13,6 \pm 2,2$	$12,6 \pm 1,8$
Длина тела, м	$1,61 \pm 0,09$	$1,56 \pm 0,7$
Масса тела, кг	$47,3 \pm 7,0$	$45,9 \pm 8,3$
Угол Кобба, °	–	$18,3 \pm 7,5$

Примечание. Составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В рамках исследования собран подробный анамнез испытуемых, включающий: информацию о дебюте заболевания, его течении и скорости прогрессирования, семейный анамнез, физической активности (спортивные секции и кружки), предшествующее лечение и наличие сопутствующих заболеваний [8]. У участниц ЭГ изучены рентгеновские снимки, выполнена оценка угла искривления по методу Кобба, для оценки стадии оссификации подвздошных костей проведен тест

Риссера, произведена оценка сагиттального профиля позвоночника. У всех испытуемых оссификация подвздошных костей соответствовала стадиям активного роста (R2–R3), при этом значимых различий в длине нижних конечностей зафиксировано не было.

С целью регистрации показателей силы реакции опоры использован компьютерный комплекс анализа движений для выявления нарушения функций и их восстановления «Биомеханика-МБН». Частота регистрации

показателей составляла 100 Гц. По сигналу испытуемые выполнили две серии из пяти последовательных инициаций ходьбы. Экспериментатор давал команду с какой ноги начинать движение. Анализ полученных данных производился по трем компонентам силы реакции опоры: медиолатеральный (поперечный, Fx), переднезадний (продольный, Fy), вертикальный (Fz) [8].

Весь статистический анализ проводился при помощи пакета программ SPSS 22.0 (SPSS, Inc., США) и Statistica 12.5 (StatSoft Power Solutions, Inc., США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных выявил, что испытуемые ЭГ затрачивали статистически значимо больше времени на выполнение инициации паттерна шага (с учетом всех трех компонентов), по сравнению с испытуемыми КГ (рисунок). Дифференцированные временные показатели, отражающие моменты возникновения пиковых значений, зарегистрированные силовой платформой, размещенной под опорной конечностью, представлены в табл. 2.

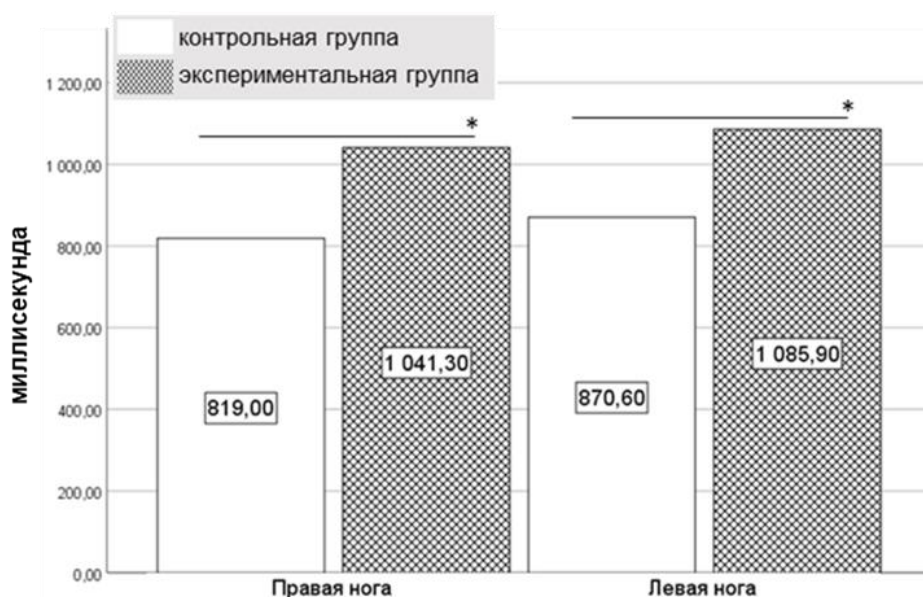


Рисунок. Общая продолжительность фазы инициации ходьбы

Примечания: 1. «*» – достоверные различия, $p \leq 0,05$.

2. Составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 2

Компоненты силы реакции опоры при инициации шага
правой/левой нижней конечностью (мс)

Моменты возникновения пиковых значений		Fx			Fy			Fz		
		КГ KG	ЭГ EG	p	КГ KG	ЭГ EG	p	КГ KG	ЭГ EG	p
Пик 1	П	41 ± 29	52 ± 49	НД	82 ± 51	59 ± 33	**	37 ± 15	36 ± 14	НД
	Л	36 ± 21	48 ± 46		89 ± 54	85 ± 54		48 ± 19	52 ± 24	
	p	НД	НД		НД	**		НД	**	
Промежуточный пик	П	169 ± 53	181 ± 82	НД	258 ± 74	234 ± 88	*	155 ± 36	159 ± 51	НД
	Л	163 ± 59	177 ± 79		229 ± 86	239 ± 81		162 ± 52	156 ± 56	
	p	НД	НД		*	*		НД	НД	
Пик 2	П	346 ± 59	398 ± 69	**	439 ± 71	468 ± 61	**	379 ± 55	395 ± 67	НД
	Л	378 ± 72	381 ± 71		448 ± 75	458 ± 56		388 ± 62	394 ± 42	
	p	*	*		НД	НД		НД	НД	

Примечания: 1. Достоверные статистические различия обозначены «*» при $p < 0,03$ и «**» при $p < 0,01$, «НД» – недостоверные различия, $p > 0,05$; «П» – правая нога, «Л» – левая.

2. Составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Полученные данные подтвердили тот факт, что «левая нижняя конечность, соответствующая стороне вогнутости дуги искривления, вызывает увеличение параметров продолжительности фазы инициации шага и пиковых значений силы реакции опоры» [8]. Сравнение компонентов силы реакции опоры при инициации шага правой и левой нижними конечностями также подтвердило факт того, что «нестабильность динамических характеристик стереотипа ходьбы в значительной степени определяется выбором ноги, с которой начинается шаг – а при инициации шага с левой ноги (сторона вогнутости дуги искривления) у испытуемых с идиопатическим сколиозом наблюдается тенденция к использованию стратегии стабилизации движения, в то время, как при инициации шага с правой ноги (сторона выпуклости дуги искривления) деформация позвоночника приводит к систематической нестабильности поддержания равновесия» [8]. Полученные данные подтвердили, что ИС приводит к развитию асимметрии динамического стереотипа ходьбы, в зависимости от стороны инициации шага. Деформация позвоночного столба и асимметричное развитие мышечно-связочного аппарата при сколиозе обуславливают неравномерное распределение биомеханических нагрузок, что способствует изменению кинетических параметров ходьбы в зависимости от того, с какой ноги начинается шаг.

Таким образом, ИС оказывает непосредственное влияние на постуральные компенсаторные стратегии организма человека, что в свою очередь связано с изменением биомеханики и распределением нагрузки вследствие деформации позвоночного столба. Искривление позвоночника приводит к нарушению симметрии тела, что вызывает

необходимость адаптации со стороны опорно-двигательного аппарата для поддержания равновесия и координации движений. Выполнение таких локомоций, как ходьба и бег, у пациентов с ИС вызывают асимметричные двигательные паттерны, которые направлены на компенсацию постурального дисбаланса, в частности зафиксированы изменения в кинетических параметрах движений.

Полученные результаты во многом согласованы с выводами зарубежных коллег [6, 9, 10], установивших, что адаптивные стратегии могут включать в себя перераспределение мышечной активности, корректировку осанки и модификацию двигательных стереотипов, направленных на стабилизацию тела в условиях измененной биомеханической нагрузки, обусловленной деформацией позвоночника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования подтвердили, что идиопатический сколиоз оказывает значительное влияние на симметрию и стабильность динамического стереотипа ходьбы. Хотя двигательные стереотипы и представляют собой устойчивые и стандартизированные паттерны движений, которые формируются многократным повторением определенных моторных действий, экспериментально доказано, что такие стереотипы обладают способностью к адаптации и изменению в зависимости от индивидуальных биомеханических особенностей человека. Нарушение симметрии приводит к необходимым для организма адаптационным изменениям в работе мышц и суставов, направленных на компенсацию постурального дисбаланса и поддержание координации движений.

Список источников

1. Miyazaki T., Kawada M., Nakai Y. et al. Validity of measurement for trailing limb angle and propulsion force during gait using a magnetic inertial measurement unit // *BioMed Research International*. 2019. P. 8123467. <https://doi.org/10.1155/2019/8123467>.
2. Nishida M., Nagura T., Fujita N. et al. Spinal correction surgery improves asymmetrical trunk kinematics during gait in adolescent idiopathic scoliosis with

References

1. Miyazaki T., Kawada M., Nakai Y. et al. Validity of measurement for trailing limb angle and propulsion force during gait using a magnetic inertial measurement unit. *BioMed Research International*. 2019:8123467. <https://doi.org/10.1155/2019/8123467>.
2. Nishida M., Nagura T., Fujita N. et al. Spinal correction surgery improves asymmetrical trunk kinematics during gait in adolescent idiopathic scoliosis with

- thoracic major curve // *European Spine Journal*. 2019. Vol. 28, no. 3. P. 619–626. <https://doi.org/10.1007/s00586-018-5741-7>.
3. Fortin C., Nadeau S., Labelle H. Inter-trial and test-retest reliability of kinematic and kinetic parameters among subjects with adolescent idiopathic scoliosis // *European Spine Journal*. 2007. Vol. 17, no. 2. P. 204–216. <https://doi.org/10.1007/s00586-007-0469-9>.
 4. Кириллова К. А. Коррекция сколиотической деформации у студентов средствами адаптивной физической культуры // *Адаптивная физическая культура*. 2023. Т. 95, № 3. С. 48–49.
 5. Deng C., Gillette J. C., Derrick T. R. Finite element analysis of femoral neck strains during stair ascent and descent // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 9183. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87936-y>.
 6. Shere C., Clark E. M. Systematic review of the association between isolated musculoskeletal hypermobility and adolescent idiopathic scoliosis // *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2023. Vol. 143, no. 6. P. 3055–3076. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04508-z>.
 7. Bensoussan L., Mesure S., Viton J. M. et al. Temporal, kinetic and kinematic asymmetry in gait initiation in one subject with hemiplegia // *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*. 2004. Vol. 47, no. 9. P. 611–620. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2004.04.004>.
 8. Солодилов Р. О. Биомеханика адаптивных компенсаторных реакций организма девочек подросткового возраста с идиопатическим сколиозом // *Адаптивная физическая культура*. 2023. Т. 96, № 4. С. 5–7.
 9. Diop M., Rahmani A., Calmels P. et al. Influence of speed variation and age on the intrasubject variability of ground reaction forces and spatiotemporal parameters of children normal gait // *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*. 2004. Vol. 47, no. 2. P. 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2003.09.006>.
 10. Daryabor A., Arazpour M., Sharifi G. et al. Gait and energy consumption in adolescent idiopathic scoliosis: A literature review // *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2017. Vol. 60, no. 2. P. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2016.10.008>.
 - thoracic major curve. *European Spine Journal*. 2019;28(3):619–626. <https://doi.org/10.1007/s00586-018-5741-7>.
 3. Fortin C., Nadeau S., Labelle H. Inter-trial and test-retest reliability of kinematic and kinetic parameters among subjects with adolescent idiopathic scoliosis. *European Spine Journal*. 2007;17(2):204–216. <https://doi.org/10.1007/s00586-007-0469-9>.
 4. Kirillova K. A. Correction of scoliotic deformity in students by means of adaptive physical culture. *Adaptive Physical Education*. 2023;95(3):48–49. (In Russ.).
 5. Deng C., Gillette J. C., Derrick T. R. Finite element analysis of femoral neck strains during stair ascent and descent. *Scientific Reports*. 2021;11(1):9183. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87936-y>.
 6. Shere C., Clark E. M. Systematic review of the association between isolated musculoskeletal hypermobility and adolescent idiopathic scoliosis. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2023;143(6):3055–3076. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04508-z>.
 7. Bensoussan L., Mesure S., Viton J. M. et al. Temporal, kinetic and kinematic asymmetry in gait initiation in one subject with hemiplegia. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*. 2004;47(9):611–620. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2004.04.004>.
 8. Solodilov R. O. Biomechanics of adaptive compensatory reactions of adolescent girls with idiopathic scoliosis. *Adaptive Physical Education*. 2023;96(4):5–7. (In Russ.).
 9. Diop M., Rahmani A., Calmels P. et al. Influence of speed variation and age on the intrasubject variability of ground reaction forces and spatiotemporal parameters of children normal gait. *Annales de Readaptation et de Medecine Physique*. 2004;47(2):72–80. <https://doi.org/10.1016/j.annrmp.2003.09.006>.
 10. Daryabor A., Arazpour M., Sharifi G. et al. Gait and energy consumption in adolescent idiopathic scoliosis: A literature review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2017;60(2):107–116. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2016.10.008>.

Информация об авторах

Р. О. Солодилов – кандидат биологических наук, доцент.

О. А. Кошевой – кандидат биологических наук, заведующий отделением физической реабилитации.

А. Е. Винс – кандидат биологических наук, заместитель начальника Управления, начальник отдела физической реабилитации.

About the authors

R. O. Solodilov – Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor.

O. A. Koshevoy – Candidate of Sciences (Biology), Head of the Physical Rehabilitation Department.

A. E. Vins – Candidate of Sciences (Biology), Deputy Head of Department, Head of Physical Rehabilitation Department.