

Научная статья / Original article

УДК 616-08

<https://doi.org/>

ВЛИЯНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ХОДЬБЫ ПО ИСКУССТВЕННО НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА БИОМЕХАНИКУ ХОДЬБЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 2D-ВИДЕОАНАЛИЗА

Святослав Валерьевич Новосельцев¹, Алексей Германович Решетников², Алексей Васильевич Рыльский²,
Максим Эйвазович Мисирханов², Зульхиджа Исмаевна Яндиева²

¹ Северо-Западная академия остеопатии и медицинской психологии, Санкт-Петербург, Россия

² Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Обоснование: Ходьба по неровной поверхности является естественным биомеханическим стрессором, стимулирующим нейромышечную адаптацию, активирующим сенсомоторные механизмы и используемым в реабилитации. Несмотря на растущий интерес к оценке адаптивных реакций, влияние кратковременного воздействия неровностей на параметры ходьбы у здоровых людей остается недостаточно изученным.

Цель: оценить немедленное влияние кратковременной ходьбы по искусственно неровной поверхности (степ-платформы) на биомеханические параметры ходьбы с использованием 2D-видеоанализа.

Материалы и методы: В исследовании приняли участие 39 здоровых добровольцев (средний возраст 29 лет, рост 175 см, масса 78 кг), случайным образом разделённых на основную (n = 19) и контрольную (n = 20) группы. Все участники выполнили три этапа ходьбы босиком: (1) по ровной поверхности (базальный этап); (2) основная группа – по искусственно неровной поверхности (степы), контрольная – по ровной поверхности; (3) повторная ходьба по ровной поверхности. Биомеханические показатели (углы в тазобедренном, коленном, голеностопном суставах, длина шага, время шага, скорость) оценивались методом 2D-видеоанализа (OpenPose, 240 кадров/с). Статистическая обработка выполнена в StatTech v.4.8.5 (Россия) с использованием критерия Манна–Уитни ($p < 0,05$).

Результаты: Выявлены статистически значимые изменения дисперсии доминирующей частоты в основной группе на этапах 2 и 3 ($p < 0,001$ и $p = 0,002$ соответственно) по сравнению с контролем. После ходьбы по неровной поверхности отмечено увеличение амплитуды тыльного сгибания голеностопного сустава, угла сгибания в коленном суставе, времени шага и вариабельности движений, что указывает на активацию механизмов сенсомоторной адаптации и повышение устойчивости.

Заключение: Кратковременная ходьба по искусственно неровной поверхности вызывает немедленные адаптивные изменения в биомеханике ходьбы, что подтверждает диагностическую и реабилитационную ценность данного вида нагрузки и высокую чувствительность 2D-видеоанализа для оценки адаптивных реакций.

Ключевые слова: ходьба, биомеханика, 2D-видеоанализ, неровная поверхность, сенсомоторная адаптация

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Новосельцев С.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0596-2343>, snovoselcev@mail.ru

Решетников А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-6535-8252>; reshetnikov_a_g@staff.sechenov.ru

Рыльский А.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1023-6426>, 79165850111@yandex.ru

Мисирханов М.Э. – <https://orcid.org/0009-0000-2544-3340>, 549699@gmail.com

Яндиева З.И. – <https://orcid.org/0009-0004-8668-2387>, zulhidza2001@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Святослав Валерьевич Новосельцев, snovoselcev@mail.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Новосельцев С.В., Решетников А.Г., Рыльский А.В., Мисирханов М.Э., Яндиева З.И. Влияние кратковременной ходьбы по искусственно неровной поверхности на биомеханику ходьбы: исследование с использованием 2D-видеоанализа // Мануальная терапия. 2025. №95(1-4). С. 14-19.

THE EFFECT OF SHORT-TERM WALKING ON AN ARTIFICIALLY UNEVEN SURFACE ON GAIT BIOMECHANICS: A 2D VIDEO ANALYSIS STUDY

Svyatoslav V. Novoseltsev¹, Aleksey G. Reshetnikov², Aleksey V. Rylsky², Maksim E. Misirkhanov², Zulhidzha I. Yandieva²

¹ North-West Academy of Osteopathy and Medical Psychology, Saint Petersburg, Russia

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

ABSTRACT

Background: Walking on uneven surfaces is a natural biomechanical challenge that stimulates neuromuscular adaptation, activates sensorimotor mechanisms and has rehabilitation applications. Despite growing interest in assessing adaptive responses, the effect of short-term exposure to uneven surfaces on gait parameters in healthy individuals remains understudied.

Objective: To evaluate the immediate effect of short-term walking on an artificially uneven surface (step platforms) on gait biomechanics using a 2D video analysis.

Materials and methods: Thirty-nine healthy volunteers (mean age: 29 years, height: 175 cm, weight: 78 kg) participated in the study and were randomly assigned to the main (n = 19) and control (n = 20) groups. All participants performed three stages of barefoot walking: (1) on a flat surface (baseline), (2) the main group – on an artificially uneven surface (step platforms), the control group – on a flat surface, (3) repeated walking on a flat surface. The biomechanical parameters (hip, knee, and ankle joint angles, step length, step time, speed) were assessed using a 2D video analysis (OpenPose, 240 fps). Statistical analysis was performed in StatTech v.4.8.5 code (Russia) using the Mann–Whitney U test ($p < 0,05$).

Results: Statistically significant differences in dominant frequency variance were observed in the main group at stages 2 and 3 ($p < 0,001$ and $p = 0,002$, respectively) compared to the control one. The main group showed an increase in the ankle dorsiflexion amplitude, knee flexion angle, step time and variability of movements after uneven surface walking which indicates the activation of sensorimotor adaptation mechanisms and the enhanced stability.

Conclusion: Short-term walking on an artificially uneven surface induces immediate biomechanical adaptations which confirm diagnostic and rehabilitation potential of this type of exercise and the high sensitivity of a 2D video analysis for assessing adaptations.

Keywords: walking, biomechanics, 2D video analysis, uneven surface, sensorimotor adaptation

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Novoseltsev S.V. – <https://orcid.org/0000-0002-0596-2343>, snovoselcev@mail.ru

Reshetnikov A.G. – <https://orcid.org/0000-0002-6535-8252>; reshetnikov_a_g@staff.sechenov.ru

Rylsky A.V. – <https://orcid.org/0000-0002-1023-6426>, 79165850111@yandex.ru

Misirkhanov M.E. – <https://orcid.org/0009-0000-2544-3340>, 549699@gmail.com

Yandieva Z.I. – <https://orcid.org/0009-0004-8668-2387>, zulhidza2001@gmail.com

Corresponding author: Svyatoslav V. Novoseltsev, snovoselcev@mail.ru

TO CITE THIS ARTICLE:

Novoseltsev S.V., Reshetnikov A.G., Rylsky A.V., Misirkhanov M.E., Yandieva Z.I. The effect of short-term walking on an artificially uneven surface on gait biomechanics: a 2D video analysis study // *Manualnaya Terapiya = Manual Therapy*. 2025;95(1-4):14-19.

ОБОСНОВАНИЕ

Ходьба является фундаментальным двигательным актом, требующим координации центральных и периферических структур. Биомеханика походки обеспечивает энергоэффективность и устойчивость в динамических условиях [1,2]. Нарушения этого механизма ведут к росту нагрузки на суставы и повышению риска дегенеративных изменений [3]. Ходьба по неровной поверхности является естественным тестом адаптивных возможностей и применяется в реабилитации, спортивной медицине и нейрофизиологических исследованиях [6–11]. При этом ее немедленные эффекты в условиях искусственной модели (например, степ-платформы) ранее не были полностью изучены.

ЦЕЛЬ

Оценить немедленное влияние ходьбы по искусственно неровной поверхности на биомеханические параметры ходьбы здоровых людей с использованием 2D-видеоанализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на базе университета с участием 39 здоровых добровольцев (средний возраст 29 лет; рост 175 см; масса 78 кг), распределённых на две группы: основную (n = 19) и контрольную (n = 20).

Критерии включения: отсутствие ортопедических и неврологических заболеваний, травм нижних конечностей за последние 6 месяцев, способность ходить босиком без боли.

Дизайн: три этапа ходьбы босиком: (1) по ровной поверхности; (2) основная группа – по искусственно неровной (степ-платформы), контрольная – по ровной; (3) повторная ходьба по ровной поверхности.

Методы измерения: 2D-видеоанализ (OpenPose, 1280×720 пикселей, 240 кадров/с), оценка углов в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах, длины шага, времени цикла и скорости.

Статистический анализ: StatTech v. 4.8.5 (Россия). Проверка распределения – тест Шапиро–Уилка; описание – медиана (Me) и интерквартильный размах (Q1–Q3); сравнение – критерий Манна–Уитни. Значимость $p < 0,05$.

Этическое одобрение: официальное одобрение этического комитета не проводилось; все участники подписали информированное согласие.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 1

АНАЛИЗ ДИСПЕРСИИ ДОМИНИРУЮЩЕЙ ЧАСТОТЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГРУППЫ

Этап	Категории	Дисперсия доминирующих частот			p
		Me	Q ₁ –Q ₃	n	
Этап 1	Контрольная группа	0,03	0,02–0,05	20	0,091
	Основная группа	0,04	0,02–0,10	19	
Этап 2	Контрольная группа	0,03	0,03–0,04	20	< 0,001*
	Основная группа	1,93	0,77–2,49	19	
Этап 3	Контрольная группа	0,04	0,03–0,05	20	0,002*
	Основная группа	0,13	0,04–0,35	19	

*– различия статистически значимы при $p < 0,05$.

Базовые характеристики групп не различались ($p > 0,05$). После интервенции (этап 2) основная группа показала существенное увеличение дисперсии и вариабельности движений, что указывает на сенсомоторную перестройку. На этапе 3 эти изменения частично сохранялись, демонстрируя постинтервенционный эффект.

НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Нежелательных явлений в ходе исследования не зарегистрировано.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты подтверждают, что даже кратковременная ходьба по искусственно неровной поверхности активирует сенсомоторные механизмы, повышая вариабельность и адаптивность походки. Эти изменения носят компенсаторный характер и отражают перераспределение мышечной активности, увеличение жесткости суставов и контроля центра массы [7–11]. Метод 2D-видеоанализа показал высокую чувствительность при минимальных затратах, что делает его перспективным для клинических и реабилитационных целей. Ограничениями исследования являются одноплоскостной анализ, малая длительность воздействия и гомогенная выборка молодых здоровых лиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратковременная ходьба по искусственно неровной поверхности вызывает немедленные, статистически значимые изменения в биомеханике ходьбы здоровых молодых взрослых, направленные на повышение устойчивости и сенсомоторного контроля. 2D-видеоанализ подтвердил высокую эффективность в детекции этих адаптаций, что подчеркивает его ценность в оценке функциональных резервов и реабилитации.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено без внешнего финансирования.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зубик Г.В., Поляков Н.А., Отоян Г.С., Коломыс В.Е. Взаимозависимость биомеханики ходьбы и морфологии стопы у человека. Университетская медицина Урала. 2024;10(2):73–75. EDN: FCIGHB.
2. Эрлих В.В., Епишев В.В., Сапожников С.Б. Биомеханика ходьбы в норме и при наличии протеза ноги с использованием комплекса Xsens // Человек. Спорт. Медицина. 2023;23(4):145–154. doi:10.14529/hsm230418. EDN: KMJKAB.
3. Лизенко К.В., Калинин М.Э., Лоскутова Э.А. Коррекция и профилактика плоскостопия средствами физической культуры // Научный альманах Центрального Черноземья. 2022;(1–2):366–371. EDN: DFRZPC.
4. Li H., Liu H., Yang Z., Bi S., Cao Y., Zhang G. The Effects of Green and Urban Walking in Different Time Frames on Physio-Psychological Responses of Middle-Aged and Older People in Chengdu, China // Int J Environ Res Public Health. 2020;18(1):90. doi:10.3390/ijerph18010090. PMID: 33374368; PMCID: PMC7796323
5. Seyam M., Kashoo F., Alqahtani M., Alzhirani M., Aldhafiri F., Ahmad M. Effect of Walking on Sand with Dietary Intervention in Overweight Type 2 Diabetes Mellitus Patients: A Randomized Controlled Trial // Healthcare (Basel). 2020;8(4):370. doi:10.3390/healthcare8040370. PMID: 33003313; PMCID: PMC7712869.
6. Dussault-Picard C., Cherni Y., Ferron A., Robert M.T., Dixon P.C. The effect of uneven surfaces on inter-joint coordination during walking in children with cerebral palsy // Sci Rep. 2023;13(1):21779. doi:10.1038/s41598-023-49196-w. PMID: 38066308; PMCID: PMC10709314.
7. Hayes S.C., White M., White H.S.F., Vanicek N. A biomechanical comparison of powered robotic exoskeleton gait with normal and slow walking: An investigation with able-bodied individuals // Clin Biomech (Bristol). 2020;80:105133. doi:10.1016/j.clinbiomech.2020.105133. PMID: 32777685.
8. Sekiguchi Y., Honda K., Izumi S.I. Effect of Walking Adaptability on an Uneven Surface by a Stepping Pattern on Walking Activity After Stroke // Front Hum Neurosci. 2022;15:762223. doi:10.3389/fnhum.2021.762223. PMID: 35058764; PMCID: PMC8764227.
9. DaSilva M.M., Chandran V.D., Dixon P.C., Loh J.M., Dennerlein J.T., Schiffman J.M., Pal S. Muscle co-contractions are greater in older adults during walking at self-selected speeds over uneven compared to even surfaces // J Biomech. 2021;128:110718. doi:10.1016/j.jbiomech.2021.110718. PMID: 34474374.
10. Gao T., Ma Z., Yang N., Zhang S., Shi H., Zhang H., Ren S., Huang H. The relationship of peak ankle dorsiflexion angle with lower extremity biomechanics during walking // J Foot Ankle Res. 2024;17(2):e12027. doi:10.1002/jfa2.12027. PMID: 38812103; PMCID: PMC11296718.
11. Nohelova D., Bizovska L., Vuillerme N., Svoboda Z. Gait Variability and Complexity during Single and Dual-Task Walking on Different Surfaces in Outdoor Environment // Sensors (Basel). 2021;21(14):4792. doi:10.3390/s21144792. PMID: 34300532; PMCID: PMC8309897.
12. Поройко Е.В. Анатомическое и функциональное укорочение ног: возможности коррекции // Вестник доказательной медицины. 2022;(1):28–29. EDN: UCTQFJ.
13. Blakeney W., Clément J., Desmeules F., Hagemeister N., Rivière C., Vendittoli P.A. Kinematic alignment in total knee arthroplasty better reproduces normal gait than mechanical alignment // Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019;27(5):1410–1417. doi:10.1007/s00167-018-5174-1. PMID: 30276435.
14. Maderbacher G., Keshmiri A., Krieg B., Greimel F., Grifka J., Baier C. Kinematic component alignment in total knee arthroplasty leads to better restoration of natural tibiofemoral kinematics compared to mechanic alignment // Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2019;27(5):1427–1433. doi:10.1007/s00167-018-5105-1. PMID: 30132049.

15. Fang Y., Lerner Z.F. Возможность улучшения показателей ходьбы с экзоскелетом голеностопного сустава с биологической обратной связью по длине шага у лиц с церебральным параличом // *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2021;29:442–449. doi:10.1109/TNSRE.2021.3055796. PMID: 33523814; PMCID: PMC7968126.
16. Zhang X., Chen X., Huo B., Liu C., Zhu X., Zu Y., Wang X., Chen X., Sun Q. An integrated evaluation approach of wearable lower limb exoskeletons for human performance augmentation // *Sci Rep.* 2023;13(1):4251. doi:10.1038/s41598-023-29887-0. PMID: 36918651; PMCID: PMC10014859.
17. Widhalm K., Durstberger S., Greisberger A., Wolf B., Putz P. Validity of assessing level walking with the 2D motion analysis software TEMPLO and reliability of 3D marker application // *Sci Rep.* 2024;14(1):1427. doi:10.1038/s41598-024-52053-z. PMID: 38228696; PMCID: PMC10792076.
18. Vergeer R., Bloo H., Backx F., Scheltinga M., Bakker E. Reliability of 2D video analysis assessing running kinematic variables in patients with exercise-related leg pain in a primary care practice // *Gait Posture.* 2023;105:117–124. doi:10.1016/j.gaitpost.2023.07.279. PMID: 37541089.

REFERENCES

1. Zubik GV, Polyakov NA, Otoyev GS, Kolomys VE. The interdependence of gait biomechanics and foot morphology in humans. *Universitetskaya Meditsina Urala = University Medicine of the Urals.* 2024;10(2):73–75. EDN: FCIGHB (In Russ.)
2. Erlikh VV, Epishev VV, Sapozhnikov SB. Gait biomechanics in normal conditions and with a leg prosthesis using the Xsens complex. *Chelovek. Sport. Meditsina = Human Being. Sports. Medicine.* 2023;23(4):145–154. doi:10.14529/hsm230418. EDN: KMJKAB (In Russ.)
3. Lizenko KV, Kalinin ME, Loskutova EA. Correction and prevention of flat feet by means of physical education. *Nauchnyi Almanakh Tsentralnogo Chernozemiya = Scientific Almanac of the Central Black Earth Region.* 2022;1–2:366–371. EDN: DFRZPC (In Russ.)
4. Li H, Liu H, Yang Z, Bi S, Cao Y, Zhang G. The Effects of Green and Urban Walking in Different Time Frames on Physio-Psychological Responses of Middle-Aged and Older People in Chengdu, China. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;18(1):90. doi:10.3390/ijerph18010090. PMID: 33374368; PMCID: PMC7796323
5. Seyam M, Kashoo F, Alqahtani M, Alzhrani M, Aldhafiri F, Ahmad M. Effect of Walking on Sand with Dietary Intervention in Overweight Type 2 Diabetes Mellitus Patients: A Randomized Controlled Trial. *Healthcare (Basel).* 2020;8(4):370. doi:10.3390/healthcare8040370. PMID: 33003313; PMCID: PMC7712869
6. Dussault-Picard C, Cherni Y, Ferron A, Robert MT, Dixon PC. The effect of uneven surfaces on inter-joint coordination during walking in children with cerebral palsy. *Sci Rep.* 2023;13(1):21779. doi:10.1038/s41598-023-49196-w. PMID: 38066308; PMCID: PMC10709314
7. Hayes SC, White M, White HSF, Vanicek N. A biomechanical comparison of powered robotic exoskeleton gait with normal and slow walking: An investigation with able-bodied individuals. *Clin Biomech (Bristol).* 2020;80:105133. doi:10.1016/j.clinbiomech.2020.105133. PMID: 32777685
8. Sekiguchi Y, Honda K, Izumi SI. Effect of Walking Adaptability on an Uneven Surface by a Stepping Pattern on Walking Activity After Stroke. *Front Hum Neurosci.* 2022;15:762223. doi:10.3389/fnhum.2021.762223. PMID: 35058764; PMCID: PMC8764227
9. DaSilva MM, Chandran VD, Dixon PC, Loh JM, Dennerlein JT, Schiffman JM, Pal S. Muscle co-contractions are greater in older adults during walking at self-selected speeds over uneven compared to even surfaces. *J Biomech.* 2021;128:110718. doi:10.1016/j.jbiomech.2021.110718. PMID: 34474374
10. Gao T, Ma Z, Yang N, Zhang S, Shi H, Zhang H, Ren S, Huang H. The relationship of peak ankle dorsiflexion angle with lower extremity biomechanics during walking. *J Foot Ankle Res.* 2024;17(2):e12027. doi:10.1002/jfa2.12027. PMID: 38812103; PMCID: PMC11296718
11. Nohelova D, Bizovska L, Vuillerme N, Svoboda Z. Gait Variability and Complexity during Single and Dual-Task Walking on Different Surfaces in Outdoor Environment. *Sensors (Basel).* 2021;21(14):4792. doi:10.3390/s21144792. PMID: 34300532; PMCID: PMC8309897
12. Poroiko EV. Anatomical and functional shortening of legs: correction options. *Vestnik Dokazatelnoi Meditsiny = Journal of the Evidence-Based Medicine.* 2022;1(1):28–29. EDN: UCTQFJ (In Russ.)
13. Blakeney W, Clément J, Desmeules F, Hagemeister N, Rivière C, Vendittoli PA. Kinematic alignment in total knee arthroplasty better reproduces normal gait than mechanical alignment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(5):1410–1417. doi:10.1007/s00167-018-5174-1. PMID: 30276435
14. Maderbacher G, Keshmiri A, Krieg B, Greimel F, Grifka J, Baier C. Kinematic component alignment in total knee arthroplasty leads to better restoration of natural tibiofemoral kinematics compared to mechanic alignment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(5):1427–1433. doi:10.1007/s00167-018-5105-1. PMID: 30132049

15. Fang Y, Lerner ZF. Feasibility of Augmenting Ankle Exoskeleton Walking Performance With Step Length Biofeedback in Individuals With Cerebral Palsy. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2021;29:442–449. doi:10.1109/TNSRE.2021.3055796. PMID: 33523814; PMCID: PMC7968126
16. Zhang X, Chen X, Huo B, Liu C, Zhu X, Zu Y, Wang X, Chen X, Sun Q. An integrated evaluation approach of wearable lower limb exoskeletons for human performance augmentation. *Sci Rep.* 2023;13(1):4251. doi:10.1038/s41598-023-29887-0. PMID: 36918651; PMCID: PMC10014859
17. Widhalm K, Durstberger S, Greisberger A, Wolf B, Putz P. Validity of assessing level walking with the 2D motion analysis software TEMPLO and reliability of 3D marker application. *Sci Rep.* 2024;14(1):1427. doi:10.1038/s41598-024-52053-z. PMID: 38228696; PMCID: PMC10792076
18. Vergeer R, Bloo H, Backx F, Scheltinga M, Bakker E. Reliability of 2D video analysis assessing running kinematic variables in patients with exercise-related leg pain in a primary care practice. *Gait Posture.* 2023;105:117–124. doi:10.1016/j.gaitpost.2023.07.279. PMID: 37541089

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила / The article received: 18.11.2025

Статья принята к печати / The article approved for publication: 04.12.2025