

УДК 616.7:612.76:168.3(048.8)

DOI <https://doi.org/10.32782/pub.health.2025.1.5>**Бойко Валентина Іванівна,**

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання
Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6906-2494>
SCOPUS: 57426832500

Попович Дарія Володимирівна,

доктор медичних наук, професор,
завідувач кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання
Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5142-2057>
SCOPUS: 56044870700

Гевко Уляна Петрівна,

кандидат медичних наук,
асистент кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання
Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5265-2842>
SCOPUS: 57221292190

Гавриленко Андрій Васильович,

асистент кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання
Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2296-8858>
SCOPUS: 59390374500

Миндзів Катерина Володимирівна,

асистент кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання
Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1025-973X>
SCOPUS: 57427383200

Вайда Олена Валентинівна,

кандидат медичних наук,
асистент кафедри фізичної терапії, ерготерапії та фізичного виховання
Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-7850>
SCOPUS: 57427383300

НАУКОВО-ДОКАЗОВИЙ ПІДХІД ДО БІОМЕХАНІЧНИХ АСПЕКТІВ ДІЯЛЬНОСТІ ОПОРНО-РУХОВОГО АПАРАТУ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Анотація. Актуальність. Сучасна реабілітація базується на принципах доказової медицини, де біомеханічний аналіз відіграє ключову роль у розробці індивідуальних програм фізичної терапії. Об'єктивні методи оцінки, як-от 3D-аналіз руху, електроміографія тощо, забезпечують точну діагностику функціональних порушень та

моніторинг динаміки відновлення. Актуальність теми зумовлена необхідністю впровадження науково обґрунтованих підходів у клінічну практику для підвищення ефективності реабілітаційних заходів і покращення якості життя пацієнтів.

Мета роботи – формування цілісного уявлення про науково-доказовий підхід до біомеханічних аспектів діяльності опорно-рухового апарату, який сприяє глибшому розумінню механізмів руху та функціонування тіла.

Матеріали та методи. Науково-доказовий підхід до біомеханічних аспектів опорно-рухового апарату. Для досягнення мети проведено бібліосемантичний аналіз літературних джерел, представлених у Scopus (ScienceDirect), з акцентом на найбільш актуальні дослідження, що стосуються цієї теми.

Результати дослідження. Аналіз сучасної наукової літератури підтверджує, що науково-доказовий підхід у біомеханіці значно підвищує ефективність фізичної терапії. Використання таких технологій, як 3D-аналіз руху та цифрова діагностика, дає змогу об'єктивно оцінювати стан опорно-рухового апарату. Індивідуалізація реабілітаційних програм на основі біомеханічних параметрів сприяє зниженню ризику повторних травм і пришвидшенню відновлення. Центр маси тіла та його положення мають вирішальне значення для рівноваги, особливо в умовах ампутації або деформацій. Біомеханіка як наука є важливим інструментом у розробці сучасних методів лікування, ортезування й протезування. Рухова функція людини підпорядковується законам механіки, а кожна частина тіла має свій центр ваги, що впливає на загальний баланс. Завдяки застосуванню біомеханічного аналізу можливо не лише виявити патології, а й розробити ефективні стратегії для їх корекції у фізичній терапії.

Висновки. Біомеханіка людини є ключовою для розуміння механізмів руху, підтримки рівноваги та адаптації опорно-рухового апарату під час фізичної активності й реабілітації. Завдяки сучасним технологіям, як-от 3D-аналіз руху та цифрова діагностика, можливе точне оцінювання функціонального стану пацієнта та індивідуалізація терапевтичних втручань. Поглиблене знання про анатомічні особливості, центр маси й механізми локомоції дає змогу підвищити ефективність лікування та покращити якість життя.

Ключові слова: науково-доказовий підхід, біомеханіка, фізична терапія, опорно-руховий апарат, аналіз руху.

Boiko V.I., Popovych D.V., Hevko U.P., Havrulenکو A.V., Myndziv K.V., Vayda O.V. Scientific-evidence-based approach to biomechanical aspects of musculoskeletal activity: an analytical review of the scientific literature

Abstract. Topicality. Modern rehabilitation is based on the principles of evidence-based medicine, where biomechanical analysis plays a key role in the development of individualized physical therapy programs. Objective assessment methods, such as 3D motion analysis, electromyography, etc., provide accurate diagnosis of functional disorders and recovery dynamics monitoring. The relevance of the topic is determined by the necessity to implement evidence-based approaches into clinical practice in order to enhance the effectiveness of rehabilitation measures and improve patients' quality of life.

The aim of this study is to develop a comprehensive understanding of a scientifically grounded approach to the biomechanical aspects of the musculoskeletal system, contributing to a deeper comprehension of movement mechanisms and overall body function.

Materials and Methods. Scientific and evidence-based approach to the biomechanical aspects of the musculoskeletal system. To achieve this objective, we conducted a bibliosemantic analysis of literature sources available in Scopus (ScienceDirect), focusing on the most relevant and up-to-date research pertaining to the topic.

Research results. The analysis of contemporary scientific literature confirms that an evidence-based approach to biomechanics significantly enhances the effectiveness of physical therapy. The application of technologies such as 3D motion analysis and digital diagnostics enables objective assessment of the condition of the musculoskeletal system. The individualization of rehabilitation programs based on biomechanical parameters helps to reduce the risk of re-injury and accelerates recovery. The body mass center and its position are crucial for balance, particularly in cases involving amputation or deformity. Biomechanics as a science is an important tool in the development of modern methods of treatment, orthotics and prosthetics. The human motor function subjects to the laws of mechanics, and each part of the body has its own center of gravity, which affects the overall balance. Through biomechanical analysis, it is possible not only to identify pathologies but also to develop effective strategies for their correction within physiotherapy practices.

Conclusions. Human biomechanics is fundamental to understanding the mechanisms of movement, balance, and adaptation of the musculoskeletal system during physical activity and rehabilitation. With the aid of modern technologies such as 3D motion analysis and digital diagnostics, clinicians can accurately evaluate the functional state of a patient and tailor therapeutic interventions accordingly. In-depth knowledge of anatomical features, the center of mass, and locomotion mechanisms can enhance treatment outcomes and improve quality of life.

Key words: scientific and evidence-based approach, biomechanics, physical therapy, musculoskeletal system, movement analysis.

Вступ. Сучасна реабілітація ґрунтується на принципах доказової медицини, яка передбачає інтеграцію найкращих наукових доказів, клінічного досвіду та індивідуальних потреб пацієнта. Одним із важливих аспектів сучасної реабілітації є біомеханічний аналіз, що дає змогу оцінити

кінематику та кінетику руху, розробити індивідуалізовані програми фізичної терапії та контролювати динаміку відновлення. Використання об'єктивних інструментальних методів, як-от тривимірний аналіз руху, платформні динамометричні дослідження та електроміографія, сприяє

точнішому діагностуванню функціональних порушень і добору оптимальних методів реабілітації. Науково-доказовий підхід до біомеханічних аспектів опорно-рухового апарату є важливим етапом для глибшого розуміння функціонування людського тіла та розробки ефективних методів реабілітації і профілактики різноманітних порушень. Біомеханіка опорно-рухового апарату вивчає механічні характеристики рухів, зокрема сили та моменти, що виникають під час руху, а також їх взаємодію з різними частинами тіла. Цей підхід не лише дає змогу оцінити ефективність рухових процесів, а й сприяє розробці методів лікування та адаптації людей з порушеннями функцій опорно-рухового апарату, включно з пацієнтами з ампутаціями, травмами або дегенеративними змінами. Науково-доказова основа дає змогу забезпечити високу точність у визначенні оптимальних терапевтичних стратегій та поліпшенні якості життя пацієнтів через точне врахування біомеханічних принципів. Актуальність зумовлена необхідністю впровадити науково обґрунтовані стратегії в клінічний реабілітаційний процес, що забезпечить підвищення ефективності терапевтичних заходів, зменшення ризику ускладнень і покращення якості життя пацієнтів з різними нозологіями.

Мета та завдання. Метою є формування цілісного уявлення про науково-доказовий підхід до біомеханічних аспектів опорно-рухового апарату, який сприяє глибшому розумінню механізмів руху та функціонування тіла.

Завдання оглядової статті: проаналізувати сучасні науково-доказові дослідження, що стосуються біомеханіки опорно-рухового апарату людини; за даними джерел інформації закордонних публікацій схарактеризувати основні біомеханічні принципи, які лежать в основі рухової активності та функціонування скелетно-м'язової системи; висвітлити механізми регуляції рухів та навантаження на різні структури опорно-рухового апарату з урахуванням клінічних і спортивних аспектів; оцінити роль біомеханічного аналізу в діагностиці, профілактиці та реабілітації порушень опорно-рухового апарату; систематизувати дані щодо застосування біомеханічних досліджень у фізичній терапії; визначити перспективні напрями подальших досліджень у сфері біомеханіки опорно-рухового апарату з опорою на доказову медицину.

Методи дослідження. Науково-доказовий підхід до біомеханічних аспектів опорно-рухового апарату. Для досягнення мети проведено бібліосемантичний аналіз літературних джерел, пред-

ставлених у Scopus (ScienceDirect), з акцентом на найбільш актуальні дослідження, що стосуються цієї теми.

Результати дослідження. Аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що науково-доказовий підхід у спеціалізованій біомеханіці значно підвищує ефективність реабілітаційного процесу. Систематичні огляди та метааналізи підтверджують, що використання доказових підходів у фізичній терапії, розроблених на основі рандомізованих контрольованих досліджень (RCTs), сприяє покращенню функціональних показників та якості життя пацієнтів із неврологічними, ортопедичними та серцево-судинними захворюваннями. У сфері біомеханіки впровадження сучасних технологій, як-от 3D-аналіз руху, дослідження ходи в нормі та при патології, та цифрова інструментальна діагностика дає змогу об'єктивно оцінювати стан опорно-рухового апарату й ефективність реабілітаційних втручань. Доказова база підтверджує, що індивідуалізація реабілітаційних програм з урахуванням біомеханічних параметрів значно знижує ризик повторних травм і пришвидшує процес відновлення пацієнтів [1–3].

Г. Муасан, К. Робб, К. Мейнвіль та В. Бланшетт (2022) [2], Р. Мартінес, Н. Ассіла, Е. Губо та М. Бегон (2020) [3] відмічають, що біомеханіка людини – це розділ прикладних наук, який вивчає статику та рухові функції людського тіла. Вона поєднує в собі знання з багатьох дисциплін, як-от механіка, математика, функціональна анатомія, фізіологія та інші. Цю науку активно використовують лікарі, фізичні терапевти, ортезисти, протезисти, інженери тощо. У біомеханіці людини важливо те, що тіло має двобічну симетрію – серединна площина, яка ділить його на дві дзеркально подібні частини. Для кращого розуміння розташування окремих частин тіла відносно одна одної використовують анатомічні площини та напрями. За даними Л. Чжан, Р. Ма, Х. Лі, Х. Ван, П. Сюй, А. Чжу та П. Вей (2024) [5], фізична терапія, яка базується на відновленні втрачених функцій організму, базується на глибокому знанні будови рухової системи людини та розумінні основних принципів виконання рухів тіла. З погляду біомеханіки, кожна людина є унікальною: навіть один і той самий індивід ніколи не повторює два однакові кроки. Водночас є загальні закономірності, які дають змогу відрізнити нормальний стан опорно-рухової системи від патологічного.

Аналіз літературних джерел у Scopus (ScienceDirect) свідчить, що для оцінки пропорцій тіла за довжиною його окремих частин, тулуба

і кінцівок, а також за співвідношенням поперечних і передньо-задніх розмірів, що формують загальний вигляд тіла й залежать від будови скелета, використовують поняття антропометричної норми. У напрямі діяльності фізичної терапії, протезування та ортезування ця норма визначає залежність між лінійними розмірами сегментів тіла та зростом людини. Для розрахунків застосовується умовна одиниця – «парс» (П), яка становить $1/56$ від зросту людини. У парсах вимірюють довжину й ширину всіх сегментів тіла. Ці показники зручно використовувати, наприклад, у випадках ампутації. Якщо необхідно визначити довжину гомілки після двобічної ампутації нижніх кінцівок, достатньо знати довжину передпліччя з витягнутою кистю, скажімо, 44 см, що дорівнює 14 П. Оскільки гомілка дорівнює 17 П, обчислюємо її довжину так: $44 : 14 \times 17 = 53$ см. Довжина стопи становить 8 П, відповідно: $44 : 14 \times 8 = 25$ см. [3; 4; 6]. Основною функцією нижніх кінцівок є забезпечення опори (стояче положення) та руху (локомоції), як-от ходьба чи біг. На відміну від верхніх кінцівок, функціонування нижніх значно залежить від розташування загального центру мас (далі – ЗЦМ) тіла. Для точнішого аналізу рекомендується визначати проекцію ЗЦМ у трьох анатомічних площинах: фронтальній, сагітальній і поперечній. При цьому не варто вважати, що в сагітальній площині ЗЦМ обов'язково розташований посередині – хоча б тому, що права частина тіла зазвичай важча за ліву приблизно на 500 г (через більші розміри печінки та краще розвинену мускулатуру). ЗЦМ має велике значення при аналізі механіки рухів, адже саме його положення впливає на рівновагу тіла та стійкість, а також використовується як критерій оцінки статури людини [3; 4; 6]. Висота розміщення центру мас змінюється в різних людей, що зумовлено низкою чинників: статтю, віком, ступенем розвитку м'язової та жирової тканини, а також масою скелета. Можливі навіть коливання висоти ЗЦМ протягом доби, спричинені фізичним навантаженням і пов'язаними з ним деформаціями суглобів. У жінок у вертикальному положенні ЗЦМ, як правило, розташований нижче, ніж у чоловіків. У чоловіків він зазвичай розташований на рівні передньо-нижнього краю тіла п'ятого поперекового хребця (індивідуальні відхилення – від третього поперекового до п'ятого крижового хребця), а в жінок – на рівні першого крижового хребця (можливі варіації – від п'ятого поперекового до першого куприкового хребця). У фронтальній площині ЗЦМ трохи зміщений праворуч – у середньому на 2,6 мм у чоловіків і

на 1,3 мм у жінок, що свідчить про дещо більше навантаження на праву ногу. Маса тіла людини є важливою інерційною характеристикою [3; 4; 6].

Р. Каллістер, В. Чутер, М. Хос, Ф. Хоук, Б. Петерсон, С. Садлер та М. Спінк (2021) [7], Дж. М. Вейкілінг, М. Фебрер-Нафрія і Ф. Де Грут (2023) [3] та інші науковці відмічають, що в біомеханіці велике значення має аналіз положення центру ваги тіла, його проекції на площину опори, а також просторових співвідношень між вектором сили тяжіння та окремими суглобами. На схемах, які використовують у біомеханіці, положення загального центру мас тіла зазвичай позначається символом – кружечком із точкою всередині, розміщеним у ділянці таза. Центр ваги голови показаний у верхній частині тіла, а центр ваги кисті – у її ділянці. Поперечні осі суглобів верхніх і нижніх кінцівок, а також атлanto-потилічного суглоба зображуються у вигляді чорних крапок. Якщо відомо, де розташовані центри ваги двох з'єднаних між собою частин тіла (наприклад, плеча та передпліччя, стегна й гомілки), то можна розрахувати загальний центр ваги для цієї ділянки. Він буде розміщений на прямій лінії, що з'єднує центри ваги обох сегментів, і ділитиме цю пряму у співвідношенні, зворотному до маси кожного з них. За аналогічним принципом визначається загальний центр мас у більш складних системах, як-от усе тіло людини. Рух людини в просторі значно залежить від того, де розташований центр ваги її тіла. Кожна частина тіла має власний центр ваги, і їх комбінація формує загальний центр мас тіла. Для того щоб тіло залишалося в рівновазі, вертикальна лінія, що проходить через його загальний центр мас, повинна перебувати всередині площини опори [3; 7; 8].

У праці С. П. Бродан, Д. В. Еванс, Л. Хоу, К. МакМанус, К. Мей та Б. Х. В. Лів (2025) [8] акцентовано на центрі мас людини, який завжди розташовується над тими частинами опорно-рухового апарату, що беруть участь у русі. Людське тіло використовує три основні біомеханічні механізми для підтримки рівноваги. Втрата хоча б одного з них ускладнює інтуїтивне підтримання рівноваги, що є важливим фактором для пацієнтів з ампутацією чи деформаціями зокрема [2; 6; 8]:

а) постійна м'язова активність (тонус), яка необхідна для збереження ротаційної рівноваги (це показано на рисунку як пружини, які перебувають у рівновазі та перешкоджають ротації);

б) правильне розташування осей ротації, що допомагають рухатися тільки в одному напрямку;

в) запобігання ротації в одному напрямку завдяки механізму позитивного блокування.

Відсутність суглобових зчленувань стопи, гомілковостопного та колінного суглобів, а також їх м'язовий контроль є критично важливим для пацієнтів з ампутацією на рівні стегна. Надійність механічних зчленувань може бути забезпечена лише через ці механізми. Стійкість тіла залежить від площі опори, висоти розташування центру мас і місця проходження вертикалі, що опускається із центру мас до площини опори. Що більша площа опори й нижче розташований центр мас, то вища стійкість тіла [2; 6; 8].

Серед усіх фізіологічних функцій організму рухова функція є єдиною, що забезпечує активну взаємодію людини з навколишнім середовищем, подолання його опору та адаптацію до зовнішніх умов. Рухи людини підпорядковуються законам механіки. З механічного боку людина є системою, що складається з рухомо з'єднаних частин, які мають певні розміри, масу, моменти інерції та управляються м'язовими двигунами. У працях Е. М. Флоркевич, Іст К. Х., М. С. Кроуелл, А. Н. Верт, Г. М. Фрайзінгер і Д. Л. Госс (2025) [9] та С. У. Шеху, А. Е. Їлмаз, А. Оршелік, Т. Коджахан & Б. Акіноглу (2025) [10] та інших фахівців відмічено, що ходьба є найбільш природною формою локомоції для людини. Під час ходьби завжди зберігається контакт з опорною поверхнею, на відміну від бігу, де періоди двохопного стану змінюються відривом обох ніг від землі – періодом польоту. Ходьба є складним циклічним рухом, основним елементом якого є крок. Переміщення тіла в просторі під час ходьби відбувається завдяки взаємодії внутрішніх (скорочення м'язів) та зовнішніх сил (маса тіла, опір опорної поверхні тощо). У кожному кроці, виконаному правою та лівою ногою, розрізняють періоди опори та переносу. Характерною рисою всіх видів ходьби, порівняно з бігом чи стрибками, є постійний контакт однієї ноги з опорою (період одиночної опори) або обох ніг (період подвійної опори). Будь-яке дослідження фізики руху людини не буде повним без застосування основних законів Ісаака Ньютона про рух та взаємозв'язок гравітації, сили й маси, що діють на тіло. Його відкриття забезпечили глибше розуміння та стали основою для сучасних наукових досліджень нашого всесвіту [9–11].

Аналіз функціональної організації кроку, що містить кінематику, кінетику та активність м'язів нижньої кінцівки, здійснюється в трьох етапах подвійного кроку в сагітальній площині [11; 12]:

- від фази перекату через п'ятку до фази опори на всю стопу;
- від фази опори на всю стопу до фази відриву носка від опорної поверхні;
- фаза переносу.

У цих етапах описуються рухи гомілковостопного, колінного та тазостегнового суглобів. Науково-доказовий підхід до біомеханічних аспектів опорно-рухового апарату значно підвищує ефективність реабілітаційних втручань та сприяє покращенню функціональних показників і якості життя пацієнтів. Використання сучасних технологій, як-от 3D-аналіз руху та цифрова інструментальна діагностика, дає змогу об'єктивно оцінювати стан опорно-рухового апарату та ефективність реабілітаційних заходів. Індивідуалізація реабілітаційних програм з урахуванням біомеханічних параметрів є важливим елементом для зниження ризику травм і пришвидшення відновлення [5; 8; 13].

Варто відмітити, що біомеханіка людини, як наука, що вивчає рухи та статику людського тіла, є важливим інструментом для дослідження рухових функцій і для розробки ефективних методів лікування, фізичної терапії, ортезування та протезування. Особливості кожної людини, зокрема індивідуальна симетрія тіла, біомеханічні параметри та антропометричні показники, є важливими аспектами, що визначають ефективність лікування й реабілітації. Аналіз руху людини в просторі, зокрема ходьби, дає змогу визначити важливість розташування загального центру мас для підтримки рівноваги й стійкості. Для підтримки цієї рівноваги використовують три основні біомеханічні механізми, втрата яких ускладнює інтуїтивне підтримання рівноваги, що особливо важливо для пацієнтів з ампутацією чи деформаціями [1; 10; 12].

У результаті досліджень і застосування науково-доказового підходу можливо значно покращити якість життя пацієнтів із різними патологіями, а також розробити ефективні методи лікування та реабілітації, що базуються на точному розумінні біомеханічних закономірностей руху людини.

Перспективи подальших досліджень. Узагальнення сучасної наукової літератури, присвяченої біомеханічним аспектам функціонування опорно-рухового апарату, свідчить про наявність низки нерозв'язаних питань, які надають широкі перспективи для подальших досліджень. Перспективними є дослідження, спрямовані на інтеграцію біомеханічних моделей з нейрофізіологічними та психоемоційними факторами, які впливають на ефективність рухових стратегій. Подальшого наукового обґрунтування потребують методики об'єктивного оцінювання функціонального стану опорно-рухового апарату з використанням високоточних технологій (3D-аналіз

рухів, кінезіотрекінг, комп'ютерне моделювання тощо), а також вивчення ефективності інтервенційних методів (кінезіотерапії, мануальної терапії, ортопедичних втручань) з позиції доказової медицини.

Висновки. Біомеханіка людини є важливою для розуміння механізмів руху й підтримки рівноваги в процесі фізичної діяльності, реабілітації та адаптації до змін опорно-рухового апарату. Використання науково-доказового підходу в біомеханіці, зокрема через застосування 3D-аналізу рухів, цифрової діагностики та індивідуалізацію реабілітаційних програм, значно покращує ефективність відновлення пацієнтів після травм чи хірургічних втручань. Технологічні інструменти та методи, що дають змогу точно оцінювати стан опорно-рухового апарату, є важливими для оцінки

функціональних порушень і підвищення точності терапевтичних втручань. Оскільки кожна людина має унікальні анатомічні та біомеханічні характеристики, знання про центр мас, осі ротації та механізми підтримки рівноваги є критичними для розробки індивідуальних планів реабілітації. Особливо важливою є роль біомеханіки в аналізі локомоції, зокрема ходьби, що є базовим руховим процесом для людини. Поглиблене розуміння фізіології і механіки рухів дає змогу розробляти більш ефективні методи лікування та адаптації, що, своєю чергою, сприяє поліпшенню якості життя пацієнтів. Усі ці аспекти, ураховуючи антропометричні норми та функціональні вимоги, формують базу для подальших досліджень і практичного застосування біомеханічних принципів у клінічній практиці та реабілітації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Sacco I. C. N., Trombini-Souza F., Suda E. Y. Impact of biomechanics on therapeutic interventions and rehabilitation for major chronic musculoskeletal conditions: A 50-year perspective. *Journal of Biomechanics*. 2023. № 154. P. 111604.
2. Moisan G., Robb K., Mainville C., Blanchette V. Effects of foot orthoses on the biomechanics of the lower extremities in adults with and without musculoskeletal disorders during functional tasks: A systematic review. *Clinical Biomechanics*. 2022. № 95. P. 105641.
3. Wakeling J. M., Febrer-Nafria M., De Groote F. A review of the efforts to develop muscle and musculoskeletal models for biomechanics in the last 50 years. *Journal of Biomechanics*. 2023. № 155. P. 111657.
4. Martinez R., Assila N., Goubault E., Begon M. Sex differences in upper limb musculoskeletal biomechanics during a lifting task. *Applied Ergonomics*. 2020. № 86. P. 103106.
5. Zhang L., Ma R., Li H., Wan X., Xu P., Zhu A., Wei P. Comparison of knee biomechanical characteristics during gait between patients with knee osteoarthritis and healthy individuals. *Heliyon*. 2024. № 10(17). P. e36931.
6. Payen É., Acien M., Isabelle P.-L., Turcot K., Begon M., Abboud J., Moisan G. Impact of different foot orthoses on gait biomechanics in individuals with chronic metatarsalgia. *Gait & Posture*. 2025. № 118. P. 17–24.
7. Callister R., Chuter V., Hawes M., Hawke F., Peterson B., Sadler S., Spink M. Biomechanical and musculoskeletal measures as risk factors for running-related injury in non-elite runners: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2021. № 24(1). P. S42.
8. Brogan S. P., Evans D. W., Howe L., McManus C., Mei Q., Liew B. X. W. The relationship between fear of movement and ankle biomechanical strategies in a 180° change of direction task. *Gait & Posture*. 2025. № 118. P. 39–44.
9. Florkiewicz E. M., East K. H., Crowell M. S., Weart A. N., Freisinger G. M., Goss D. L. The effects of telehealth running gait retraining on biomechanics, pain, and function in patients with lower extremity injuries: A randomized clinical trial. *Clinical Biomechanics*. 2025. № 121. P. 106381.
10. Shehu S. U., Yilmaz A. E., Örsçelik A., Kocahan T., Akinoğlu B. Comparison of balance performance, gait, foot function, lower extremity biomechanical alignment and muscle strength in individuals with unilateral and bilateral plantar fasciitis. *Gait & Posture*. 2025. № 119. P. 143–149.
11. Kawabata R., Yokoyama M., Matsumoto Y., Kubota K., Kosuge S., Sunaga Y., Kanemura N. Lower limb biomechanics and control of center of mass during walking phases in daily gait. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2025. № 80. P. 102959.
12. Johnson R. T., Umberger B. R. Biomechanical mechanisms for modulating stride frequency in walking. *Journal of Biomechanics*. 2025. № 181. P. 112549.
13. Zhang Y., Tao C., Wang H., Fan Y. Biomechanical effects of human-mobility aid interaction: A narrative review. *Gait & Posture*. 2025. № 118. P. 1–12.

REFERENCES:

1. Sacco, I. C. N., Trombini-Souza, F., & Suda, E. Y. (2023). Impact of biomechanics on therapeutic interventions and rehabilitation for major chronic musculoskeletal conditions: A 50-year perspective. *Journal of Biomechanics*, 154, 111604. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111604> [in English]
2. Moisan, G., Robb, K., Mainville, C., & Blanchette, V. (2022). Effects of foot orthoses on the biomechanics of the lower extremities in adults with and without musculoskeletal disorders during functional tasks: A systematic review. *Clinical Biomechanics*, 95, 105641. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2022.105641> [in English]
3. Wakeling, J. M., Febrer-Nafria, M., & De Groote, F. (2023). A review of the efforts to develop muscle and musculoskeletal models for biomechanics in the last 50 years. *Journal of Biomechanics*, 155, 111657. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111657> [in English]

4. Martinez, R., Assila, N., Goubault, E., & Begon, M. (2020). Sex differences in upper limb musculoskeletal biomechanics during a lifting task. *Applied Ergonomics*, 86, 103106. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103106> [in English]
5. Zhang, L., Ma, R., Li, H., Wan, X., Xu, P., Zhu, A., & Wei, P. (2024). Comparison of knee biomechanical characteristics during gait between patients with knee osteoarthritis and healthy individuals. *Heliyon*, 10(17), e36931. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36931> [in English]
6. Payen, É., Acien, M., Isabelle, P.-L., Turcot, K., Begon, M., Abboud, J., & Moisan, G. (2025). Impact of different foot orthoses on gait biomechanics in individuals with chronic metatarsalgia. *Gait & Posture*, 118, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.01.022> [in English]
7. Callister, R., Chuter, V., Hawes, M., Hawke, F., Peterson, B., Sadler, S., & Spink, M. (2021). Biomechanical and musculoskeletal measures as risk factors for running-related injury in non-elite runners: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 24(Suppl 1), S42. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2021.09.108> [in English]
8. Brogan, S. P., Evans, D. W., Howe, L., McManus, C., Mei, Q., & Liew, B. X. W. (2025). The relationship between fear of movement and ankle biomechanical strategies in a 180° change of direction task. *Gait & Posture*, 118, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.01.029> [in English]
9. Florkiewicz, E. M., East, K. H., Crowell, M. S., Weart, A. N., Freisinger, G. M., & Goss, D. L. (2025). The effects of telehealth running gait retraining on biomechanics, pain, and function in patients with lower extremity injuries: A randomized clinical trial. *Clinical Biomechanics*, 121, 106381. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2024.106381> [in English]
10. Shehu, S. U., Yilmaz, A. E., Örsçelik, A., Kocahan, T., & Akinoğlu, B. (2025). Comparison of balance performance, gait, foot function, lower extremity biomechanical alignment and muscle strength in individuals with unilateral and bilateral plantar fasciitis. *Gait & Posture*, 119, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.03.003> [in English]
11. Kawabata, R., Yokoyama, M., Matsumoto, Y., Kubota, K., Kosuge, S., Sunaga, Y., & Kanemura, N. (2025). Lower limb biomechanics and control of center of mass during turning phases in daily gait. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 80, 102959. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2024.102959>
12. Johnson, R. T., & Umberger, B. R. (2025). Biomechanical mechanisms for modulating stride frequency in walking. *Journal of Biomechanics*, 181, 112549. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112549> [in English]
13. Zhang, Y., Tao, C., Wang, H., & Fan, Y. (2025). Biomechanical effects of human-mobility aid interaction: A narrative review. *Gait & Posture*, 118, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.01.009> [in English]