DOI: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2025.06(193).06
УДК: 796.012.1+531.3

Гах Р. В.
кандидат педагогічних наук, доцент, кафедра фізичної реабілітації і спорту,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль,
https://orcid.org/0000-0001-8668-3102
Сапрун С. Т.
кандидат наук з фізичного виховання і спорту, доцент,
кафедра теорії і методики олімпійського та професійного спорту,
Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. м. Тернопіль,
https://orcid.org/0000-0003-4129-4271
Пришляк В. М.
аспірант кафедри олімпійського і професійного спорту, спортивних ігор та туризму,
Харківський національний педагогічний університет імені Г. С. Сковороди. м. Харків, Україна,
https://orcid.org/0009-0004-5303-5917

ОПТИМІЗАЦІЯ НАВАНТАЖЕННЯ В СПОРТИВНОМУ ТРЕНУВАННІ НА ОСНОВІ БІОМЕХАНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РУХОВИХ ДІЙ

Анотація. *Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності тренувального процесу шляхом використання біомеханічного моделювання для оптимізації навантаження. Традиційні підходи, що базуються на загальних фізіологічних критеріях і суб'єктивних оцінках тренерів, не забезпечують достатньої точності у визначенні рівня фізичних навантажень, що може призводити до перенавантаження або недостатнього розвитку фізичних якостей спортсменів. Біомеханічне моделювання дає змогу об'єктивно оцінювати кінематичні та динамічні параметри рухової діяльності, що є ключовим фактором для індивідуалізації тренувального процесу.*

Метою дослідження є обґрунтування використання біомеханічного аналізу для регулювання тренувального навантаження та підвищення ефективності підготовки спортсменів.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел для визначення сучасних підходів до оптимізації навантаження, біомеханічний аналіз кінематичних та динамічних характеристик рухів, моделювання рухових процесів для оцінки впливу навантаження, а також порівняльний аналіз наявних методик корекції рухової діяльності.

У ході дослідження встановлено, що біомеханічне моделювання дозволяє забезпечити точний контроль рухових параметрів та адаптувати навантаження відповідно до фізіологічних і технічних особливостей спортсменів. Виявлено основні проблеми впровадження цього підходу, серед яких технологічні бар'єри, складність інтерпретації отриманих даних та недостатня інтеграція біомеханічного аналізу у тренувальні програми. Запропонована методика інтеграції біомеханічних моделей у процес підготовки спортсменів передбачає етапи діагностики, аналізу отриманих даних, розробки індивідуального тренувального плану та динамічного моніторингу рухових характеристик. Доведено, що застосування цієї методики сприяє зменшенню ризику травм, підвищенню ефективності тренувального процесу та вдосконаленню спортивної техніки.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою доступніших технологічних рішень для біомеханічного аналізу та стандартизацією методик оцінки рухових характеристик у різних видах спорту.

Ключові слова: *індивідуалізація тренувального процесу, кінематичний аналіз, динамічні параметри, оптимізація рухових дій, технічна підготовка спортсменів, адаптація навантажень.*

Roman Gakh, Stanislav Saprun, Vitalii Pryshliak Optimisation of load in sports training on the basis of biomechanical modelling of motor actions. *The relevance of the study is due to the need to improve the efficiency of the training process by using biomechanical modelling to optimise the load. Traditional approaches based on general physiological criteria and subjective assessments of coaches do not provide sufficient accuracy in determining the level of physical activity, which can lead to overload or insufficient development of physical qualities of athletes. Biomechanical modelling makes it possible to objectively assess the kinematic and dynamic parameters of motor activity, which is a key factor in the individualisation of the training process.*

The aim of the study is to substantiate the use of biomechanical analysis to regulate training load and improve the efficiency of athletes' training.

The research methods include analysis of scientific sources to determine modern approaches to load optimisation, biomechanical analysis of kinematic and dynamic characteristics of movements, modelling of motor processes to assess the impact of load, and comparative analysis of existing methods of motor activity correction.

The study found that biomechanical modelling allows for accurate control of motor parameters and adaptation of the load in accordance with the physiological and technical characteristics of athletes. The main problems of implementing this approach have been identified, including technological barriers, the complexity of interpreting the data obtained and the insufficient integration of biomechanical analysis into training programmes. The proposed methodology for integrating biomechanical models into the process of training athletes involves the stages of diagnostics, analysis of the data obtained, development of an individual training plan and dynamic monitoring of motor characteristics. It is proved that the application of this methodology helps to reduce the risk of injury, increase the efficiency of the training process and improve sports technique.

Prospects for further research are associated with the development of more accessible technological solutions for biomechanical analysis and standardisation of methods for assessing motor performance in various sports.

Key words: *individualisation of the training process, kinematic analysis, dynamic parameters, optimisation of motor actions, technical training of athletes, adaptation of loads.*

Постановка проблеми. Оптимізація навантаження в спортивному тренуванні є ключовим завданням сучасної спортивної науки, оскільки ефективний розподіл фізичних зусиль забезпечує підвищення результативності спортсменів і мінімізує ризики перенавантаження та травматизму. Традиційні підходи до регулювання тренувальних навантажень базуються на суб'єктивних оцінках тренерів і спортсменів, що може призводити до неточностей у визначенні оптимального рівня фізичного навантаження. Використання біомеханічного моделювання дозволяє об'єктивно аналізувати рухові дії спортсменів, визначати найбільш ефективні параметри техніки та коригувати навантаження відповідно до індивідуальних особливостей рухової діяльності.

Застосування методів біомеханічного аналізу дає можливість оцінювати кінематичні та динамічні характеристики рухів, що сприяє вдосконаленню спортивної техніки та підвищенню рівня тренувальної адаптації. Завдяки математичному моделюванню рухових процесів можна прогнозувати ефективність тренувальних впливів, оптимізувати розподіл навантажень та розробляти індивідуальні програми підготовки спортсменів. Використання таких підходів є особливо актуальним у видах спорту, що вимагають високої точності рухів, значного рівня фізичних навантажень та швидкої адаптації до змінних умов.

Розробка та впровадження біомеханічних моделей в процес спортивного тренування сприятиме більш точному контролю рухових параметрів, підвищенню ефективності тренувального процесу та зменшенню ризику виникнення перевантажень. Наукове обґрунтування цих підходів дозволить удосконалити методики спортивної підготовки, що матиме суттєве значення для практики тренувального процесу та досягнення високих результатів у спорті.

Аналіз літературних джерел.

Аналіз досліджень щодо застосування біомеханічного моделювання для оптимізації навантаження у спортивному тренуванні охоплює ключові напрями, що демонструють досягнення у використанні сучасних технологій для вдосконалення тренувального процесу та зниження ризику травм.

Перший напрям стосується використання біомеханічних сенсорів для аналізу кінематичних та динамічних характеристик рухів спортсменів. M. Gorski та співавт. дослідили можливості цифрових сенсорів медичного класу для реального часу моніторингу спортсменів під час змагань, що забезпечує точність аналізу рухових характеристик та дозволяє адаптувати навантаження відповідно до їхнього стану [1]. T. Guarda та співавт. вивчили вплив сенсорних технологій на контроль техніки виконання вправ, підкреслюючи їхню ефективність у корекції помилок у русі [2]. Л. Meng дослідив створення системи автоматизованого контролю фізичних параметрів спортсменів на основі біомеханічного аналізу, що сприяє персоналізації тренувального процесу [3]. Попри досягнення у цій сфері, подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці більш доступних та інтегрованих рішень, що можуть застосовуватися як у професійному, так і в аматорському спорті.

Другий напрям фокусується на носимих біомеханічних пристроях для моніторингу навантажень під час тренувального процесу. D. Seshadri та співавт. продемонстрували ефективність використання сенсорів для вимірювання внутрішніх та зовнішніх навантажень, що дозволяє тренерам оптимізувати інтенсивність вправ та запобігати перенавантаженням [4]. Л. Da Silva дослідив застосування носимих пристроїв для постійного контролю змін у рухових характеристиках, що забезпечує корекцію тренувальних навантажень в режимі реального часу [5]. P. Düking та співавт. проаналізували ефективність біомеханічного моніторингу на основі аналізу змін суглобової кінематики та м'язової активності для адаптації навантажень, доводячи, що цей підхід зменшує ризик травматизації [6]. Подальший розвиток у цьому напрямі має включати інтеграцію носимих біомеханічних сенсорів із тренувальними програмами, що дозволить більш точно прогнозувати оптимальний рівень навантаження.

Третій напрям присвячений аналізу біомеханічних параметрів рухів для регулювання навантаження. G. Assalve та співавт. розглянули застосування датчиків тиску та силових платформ для визначення параметрів рівноваги й ефективності рухів, що сприяє вдосконаленню техніки виконання вправ [7]. M. Flockhart та F. Larsen продемонстрували, що постійний моніторинг кінетичних характеристик під час тренувань дозволяє адаптувати тренувальні навантаження відповідно до індивідуальних особливостей спортсменів [8]. S. C. Dileepkumar та співавт. акцентували на використанні смарттехнологій для аналізу фаз руху з метою виявлення помилок у техніці та їхньої своєчасної корекції [9]. Подальші дослідження мають включати розширення аналізу біомеханічних параметрів для різних видів спорту, особливо з урахуванням специфіки рухів та навантажень.

Четвертий напрям охоплює застосування штучного інтелекту для персоналізації тренувального процесу на основі біомеханічного аналізу. H. Qin та співавт. розробили алгоритм машинного навчання для визначення оптимального навантаження на основі індивідуальних рухових характеристик спортсмена [10]. Z. Pu та співавт. у систематичному огляді висвітлили можливості спортивної аналітики для прогнозування навантажень та аналізу ефективності рухів [11]. Додаткові дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів аналізу біомеханічних даних для більш точного прогнозування оптимального рівня навантаження.

П'ятий напрям стосується правових та етичних аспектів використання біомеханічних даних у спортивному тренуванні. B. Osborne дослідила ризики, пов'язані зі збором та використанням персональних біомеханічних даних спортсменів, наголошуючи на необхідності їхнього захисту [12]. Важливим завданням є розробка міжнародних стандартів використання біомеханічних даних у спортивній практиці, що забезпечить дотримання етичних норм і прав спортсменів.

Таким чином, дослідження підтверджують ефективність біомеханічного моделювання у спортивному тренуванні, зокрема для контролю навантаження, вдосконалення техніки рухів, зменшення ризиків травм та персоналізації підготовки спортсменів.

Попри значний прогрес у застосуванні біомеханічного моделювання в спортивному тренуванні, низка аспектів залишається невирішеною. Зокрема, відсутні комплексні алгоритми інтеграції біомеханічних даних у систему регулювання навантажень, що ускладнює їх адаптацію до індивідуальних особливостей спортсменів. Більшість досліджень зосереджені на аналізі окремих рухових характеристик, проте бракує підходів, які б враховували взаємозв'язок кінематичних, динамічних і фізіологічних параметрів у тренувальному процесі. Додатковими проблемами є висока вартість технологічного обладнання, складність інтерпретації отриманих даних та обмежена підготовка тренерів до роботи з біомеханічними системами.

Запропоноване дослідження сприяє в розв'язанню цих проблем шляхом розробки методики інтеграції біомеханічних моделей у тренувальний процес, яка враховує кінематичні та динамічні характеристики рухів, дозволяє адаптувати навантаження до рівня підготовки спортсмена та забезпечує оперативний контроль тренувальних параметрів

Мета статті (постановка завдань). Метою статті є обґрунтування використання біомеханічного моделювання для оптимізації навантаження в спортивному тренуванні з урахуванням кінематичних та динамічних параметрів рухів спортсменів. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності тренувального процесу, мінімізацію ризику перенавантаження та вдосконалення індивідуальних програм підготовки.

Завдання статті:

1. Оцінити сучасні підходи до оптимізації навантаження у спортивному тренуванні та можливості застосування біомеханічного моделювання для аналізу кінематичних і динамічних характеристик рухів спортсменів.
2. Розробити методику інтеграції біомеханічних моделей у тренувальний процес для індивідуалізації навантаження та виявити основні проблеми впровадження цього підходу, включаючи технологічні, методологічні та організаційні бар'єри.
3. Сформулювати рекомендації щодо практичного використання біомеханічного аналізу для регулювання тренувального навантаження, підвищення ефективності підготовки спортсменів та мінімізації ризику травм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оптимізація навантаження у спортивному тренуванні є важливим аспектом підготовки спортсменів, оскільки дозволяє досягти високих результатів за умови раціонального розподілу фізичних зусиль. Традиційно процес регулювання навантаження базується на фізіологічних і біохімічних критеріях, а також на суб'єктивних оцінках стану спортсмена. Сучасні технології дозволяють застосовувати більш точні методи аналізу навантаження, включаючи біомеханічне моделювання, що забезпечує об'єктивний контроль кінематичних і динамічних параметрів руху. Залежно від обраного підходу, визначаються різні параметри навантаження, зокрема об'єм, інтенсивність та структура вправ (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика сучасних підходів до оптимізації навантаження у спортивному тренуванні

Підхід до оптимізації навантаження	Основні характеристики	Переваги	Обмеження
Традиційний метод (емпіричний підхід)	Оцінка навантаження на основі досвіду тренера та фізичних показників спортсмена	Простота застосування, індивідуальний підхід	Суб'єктивність, висока ймовірність перенавантаження
Фізіологічний контроль	Визначення навантаження через вимірювання частоти серцевих скорочень, рівня лактату, VO2 max	Об'єктивність, можливість адаптації до фізичного стану спортсмена	Потреба у спеціальному обладнанні, варіативність фізіологічних показників
Біомеханічне моделювання	Аналіз рухових дій через кінематичні та динамічні параметри (швидкість, сила, траєкторія)	Висока точність оцінки навантаження, можливість корекції техніки	Складність вимірювань, потреба у програмному забезпеченні, високі фінансові витрати
Автоматизовані системи моніторингу	Використання сенсорів, GPS, трекерів для аналізу рухової активності	Постійний контроль навантаження, зменшення ризику травм	Висока вартість технологій, потреба в навичках роботи з даними

Джерело: сформовано автором на підставі [2, с. 130; 4; 9, с. 401; 11, с. 41; 14, с. 67; 15]

Застосування біомеханічного моделювання в сучасному спортивному тренуванні дозволяє значно підвищити точність регулювання навантаження та запобігати травмам. У практиці професійного спорту активно використовуються системи відеоаналізу рухів, платформи для вимірювання сили реакції опори, датчики тиску та інші технологічні рішення. Це дозволяє тренерам та спортсменам отримувати детальну інформацію про технічні характеристики рухів, визначати найефективніші траєкторії та оцінювати фізіологічні показники у реальному часі.

Наприклад, у видах спорту, що вимагають високої точності рухів, таких як легка атлетика, важка атлетика або гімнастика, біомеханічний аналіз допомагає виявляти помилки у виконанні технічних елементів та коригувати їх ще до появи ознак перевтоми або дисбалансу в навантаженні. У командних видах спорту, зокрема у футболі та баскетболі, автоматизовані системи моніторингу навантаження дозволяють визначати оптимальну інтенсивність тренувань для кожного спортсмена, враховуючи його індивідуальні можливості.

Біомеханічне моделювання є одним із найперспективніших методів аналізу рухової діяльності спортсменів, що дозволяє об'єктивно оцінювати кінематичні та динамічні параметри рухів [11, с. 52]. Використання математичних моделей та спеціалізованого програмного забезпечення дає змогу детально аналізувати траєкторії, швидкість, прискорення, кутові характеристики та розподіл сил у структурі руху. Такий підхід сприяє покращенню техніки виконання вправ, мінімізації травматизму та підвищенню загальної ефективності тренувального процесу. Завдяки застосуванню сучасних технологій, зокрема відеоаналізу, тривимірного моделювання та датчиків руху, можна визначати оптимальні механізми рухових дій та коригувати техніку спортсмена в режимі реального часу (табл. 2).

Таблиця 2

Методи аналізу кінематичних і динамічних характеристик рухових дій спортсменів та їх практичне значення

Кінематичні та динамічні характеристики	Методи аналізу	Практичне значення
Траєкторія руху	Відеоаналіз, трекінг маркерів	Визначення оптимального шляху руху для зменшення енергетичних затрат
Швидкість і прискорення	Інфрачервоні камери, IMU-сенсори	Контроль рівномірності руху, оцінка ефективності техніки
Кутові характеристики суглобів	3D-моделювання, електрогоніометрія	Аналіз амплітуди руху, виявлення помилок у техніці
Сили та моменти сил	Динамографія, платформи зворотної реакції опори	Оцінка розподілу навантажень на опорно-руховий апарат
М'язова активність	Електроміографія (ЕМГ)	Визначення рівня залучення м'язових груп у русі

Джерело: сформовано автором на підставі [1, с. 38; 2, с. 132; 3, с. 2090; 4; 7; 13]

Застосування біомеханічного моделювання в сучасному спортивному тренуванні забезпечує можливість персоналізованого підходу до корекції рухової діяльності та вдосконалення техніки [6, с. 1181]. Наприклад, у легкій атлетиці використання високошвидкісних камер та трекінгових маркерів дозволяє аналізувати траєкторії бігу, визначаючи відхилення від ідеальних параметрів руху. У важкій атлетиці вимірювання силових показників за допомогою динамографічних платформ допомагає тренерам оцінювати ефективність розподілу навантаження під час виконання підйомів. У командних видах спорту трекінгові системи та IMU-сенсори використовуються для оцінки прискорення та змін швидкості, що дозволяє створювати індивідуальні плани навантаження для гравців з урахуванням їхнього фізіологічного стану. Отримані дані дають можливість розробляти стратегії тренувального процесу, що забезпечують високу ефективність рухових дій та зниження ризику перевантажень.

Інтеграція біомеханічних моделей у тренувальний процес є важливим напрямом персоналізації спортивної підготовки, що базується на детальному аналізі кінематичних та динамічних характеристик рухової діяльності. Така методика дозволяє адаптувати навантаження до фізіологічних можливостей спортсмена, що сприяє підвищенню ефективності тренувань та зниженню ризику травм. На відміну від традиційних підходів, що орієнтуються на загальні нормативи фізичної підготовки, використання біомеханічних моделей забезпечує точний контроль рухових параметрів у режимі реального часу. Методика побудована на основі комплексного аналізу рухів, що включає вимірювання сили, швидкості, прискорення, кутових характеристик та м'язової активності, що дозволяє обґрунтовано коригувати тренувальні програми.

Запропонована методика передбачає декілька етапів: первинну діагностику рухових характеристик за допомогою біомеханічних вимірювань, аналіз отриманих даних для виявлення слабких місць у техніці, розробку індивідуального тренувального плану з корекцією навантаження, а також постійний моніторинг змін параметрів руху для динамічного коригування тренувального процесу. Це дозволяє ефективно адаптувати навантаження відповідно до рівня підготовленості спортсмена, враховуючи його індивідуальні особливості (табл. 3).

Таблиця 3

Методика інтеграції біомеханічних моделей у тренувальний процес для індивідуалізації навантаження

Етапи інтеграції біомеханічних моделей	Методи реалізації	Очікуваний ефект
Первинна діагностика рухової діяльності	Аналіз кінематичних і динамічних характеристик за допомогою відеоаналізу, датчиків руху, електроміографії	Визначення індивідуальних особливостей техніки виконання вправ
Аналіз отриманих даних	Порівняння з оптимальними параметрами рухів, виявлення помилок і ризиків перевантаження	Виявлення ключових недоліків у техніці спортсмена
Розробка індивідуального тренувального плану	Визначення оптимальних навантажень, розробка спеціальних вправ з урахуванням біомеханічних особливостей	Підвищення ефективності тренувального процесу та зниження ризику травм
Моніторинг змін параметрів руху	Регулярний аналіз біомеханічних показників у динаміці, корекція навантажень	Оперативна адаптація тренувального процесу до поточного стану спортсмена

Оцінка ефективності методики	Порівняння досягнутих результатів із початковими показниками, коригування програми підготовки	Оптимізація довгострокової підготовки та підвищення спортивних результатів

Джерело: власна розробка автора

Практичне впровадження цієї методики дозволяє значно покращити якість підготовки спортсменів, оскільки дає змогу не лише враховувати загальні тренувальні принципи, а й адаптувати навантаження до конкретних потреб спортсмена. Наприклад, у легкоатлетів використання біомеханічного аналізу допомагає коригувати траєкторію руху та оптимізувати розподіл сил під час старту та прискорення, що покращує результати у бігу на короткі дистанції. У силових видах спорту, таких як важка атлетика, методика дозволяє аналізувати навантаження на суглоби та хребет, забезпечуючи корекцію техніки виконання вправ, що сприяє зменшенню ризику перевантажень. В ігрових видах спорту, таких як баскетбол або футбол, постійний моніторинг кінематичних характеристик допомагає тренерам адаптувати тренувальний процес до фізичного стану гравців, оптимізуючи їх витривалість та реакцію.

Впровадження біомеханічного моделювання у спортивну підготовку зіштовхується з низкою проблем, що обмежують його ефективне використання в реальних умовах тренувального процесу. Основні бар'єри можна розділити на технологічні, методологічні та організаційні, кожен з яких впливає на можливість широкого застосування цього підходу в спорті.

Технологічні проблеми пов'язані з необхідністю використання високоточних систем збору та аналізу біомеханічних даних, зокрема інфрачервоних камер, трекінгових систем, електроміографії, динамографічних платформ та інших спеціалізованих пристроїв [7]. Такі технології потребують значних фінансових витрат, що робить їх доступними переважно для професійних спортивних команд та наукових центрів. Крім того, велика кількість зібраних даних потребує складної обробки та інтерпретації, що вимагає залучення кваліфікованих спеціалістів у сфері біомеханіки, спортивної науки та програмування.

Методологічні бар'єри стосуються складності розробки універсальних алгоритмів аналізу рухових характеристик, які б відповідали специфіці різних видів спорту. Оскільки кожен вид спорту має власні вимоги до техніки виконання рухів, біомеханічне моделювання потребує індивідуальної адаптації для кожної дисципліни [11, с. 53]. Це ускладнює створення стандартних методик оцінювання ефективності рухових дій та інтеграцію отриманих даних у загальну систему підготовки спортсменів. Також важливим викликом є необхідність узгодження отриманих біомеханічних параметрів із фізіологічними та психологічними показниками, оскільки ефективність рухової діяльності залежить не лише від механіки виконання вправ, а й від рівня фізичної підготовленості, витривалості та стресостійкості спортсмена [9, с. 390].

Організаційні проблеми включають недостатній рівень впровадження сучасних біомеханічних технологій у навчальні програми спортивних установ та обмежену кількість тренерів, які володіють необхідними навичками роботи з такими системами [2, с. 135]. Впровадження біомеханічного аналізу потребує змін у структурі тренувального процесу, зокрема створення спеціалізованих лабораторій, розробки методичних рекомендацій та підготовки персоналу. Відсутність чітких стандартів щодо використання біомеханічного моделювання в спортивній практиці ускладнює його інтеграцію у традиційні тренувальні програми та гальмує широке впровадження цього підходу на різних рівнях спортивної підготовки.

Практичне використання біомеханічного аналізу у регулюванні тренувального навантаження сприяє підвищенню ефективності підготовки спортсменів за рахунок персоналізованого підходу та точного контролю рухових характеристик. Для успішної інтеграції біомеханічних методів у тренувальний процес необхідно враховувати кілька ключових аспектів, зокрема використання сучасних технологій моніторингу, адаптацію тренувальних програм відповідно до отриманих біомеханічних даних та забезпечення тісної співпраці між тренерами, науковцями та спортсменами.

Рекомендується впровадження системи постійного контролю кінематичних і динамічних параметрів рухів, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення у техніці та коригувати навантаження відповідно до індивідуальних потреб спортсмена. Застосування інфрачервоних камер, трекінгових датчиків, платформ для вимірювання сили реакції опори та електроміографії сприятиме отриманню об'єктивних даних про ефективність виконання рухових дій. На основі цих показників доцільно коригувати інтенсивність тренувань, оптимізувати періодизацію навантажень та підбирати найбільш ефективні вправи для розвитку необхідних фізичних якостей.

Окрему увагу слід приділити інтеграції біомеханічних моделей у процес відновлення після навантажень, що дозволяє аналізувати м'язову активність, рівень втоми та ризик перенавантаження. Важливо розробити методики індивідуальної корекції тренувального процесу на основі аналізу змін у рухових характеристиках, що дозволить своєчасно вносити коригування у план підготовки та мінімізувати ризик травм.

Для забезпечення широкого застосування біомеханічного аналізу необхідно створити навчальні програми для тренерів та спортсменів, які б сприяли підвищенню рівня розуміння принципів роботи біомеханічних систем та їхньої ролі у вдосконаленні спортивної техніки. Використання спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу рухів має бути інтегроване у процес підготовки спортсменів різного рівня, що дозволить систематизувати отримані дані та використовувати їх для довгострокового планування тренувального процесу.

Загалом, практичне використання біомеханічного аналізу у спортивній підготовці сприяє підвищенню точності оцінки рухових характеристик, ефективнішому плануванню навантажень та зниженню ризиків травматизму.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Встановлено, що біомеханічне моделювання є ефективним інструментом оптимізації навантаження у спортивному тренуванні, забезпечуючи об'єктивну оцінку кінематичних та динамічних характеристик рухів. Основними проблемами впровадження є висока вартість технологій, складність інтерпретації даних та недостатня інтеграція у тренувальні програми. Запропонована методика інтеграції біомеханічних

моделей дозволяє адаптувати навантаження до індивідуальних особливостей спортсменів, підвищуючи ефективність підготовки та знижуючи ризик травм. Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці більш доступних технологічних рішень і стандартизації методів аналізу біомеханічних параметрів у різних видах спорту.

Reference

1. Gorski, M. A., et al. (2021). Real-time digital biometric monitoring during elite athletic competition: System feasibility with a wearable medical-grade sensor. *Digital Biomarkers, 5*(1), 37–43. DOI: https://doi.org/10.1159/000513222 (date of access: 24.01.2025).

2. Guarda, T., Villao, D., & Augusto, M. F. (2023). Impact of biometric sensors on physical activity. In: Guarda, T., Portela, F., & Diaz-Nafria, J. M. (Eds.). *Advanced Research in Technologies, Information, Innovation and Sustainability. ARTIIS 2023. Communications in Computer and Information Science* (Vol. 1936). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48855-9_10 (date of access: 24.01.2025).

3. Meng, L. V. (2024). Construction of athletes' physical condition monitoring and analysis system using biometrics recognition technology. *Journal of Electrical Systems, 20*(6s), 2082–2091. Retrieved from https://www.proquest.com/openview/b1bbf597aaa8d81eb3ca53af47f3740c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=4433095 (date of access: 24.01.2025).

4. Seshadri, D. R., Li, R. T., Voos, J. E., et al. (2019). Wearable sensors for monitoring the internal and external workload of the athlete. *npj Digital Medicine, 2*, Article 71. DOI: https://doi.org/10.1038/s41746-019-0149-2 (date of access: 24.01.2025).

5. Da Silva, L. (2024). Wearable technology in sports monitoring performance and health metrics. *Revista De Psicología Del Deporte (Journal of Sport Psychology, 33*(2), 250–258. Retrieved from https://rpd-online.com/rpd/article/view/1718 (date of access: 24.01.2025).

6. Düking, P., Zinner, C., Trabelsi, K., Reed, J. L., Holmberg, H. C., Kunz, P., & Sperlich, B. (2021). Monitoring and adapting endurance training on the basis of heart rate variability monitored by wearable technologies: A systematic review with meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport, 24*(11), 1180–1192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsams.2021.04.012 (date of access: 24.01.2025).

7. Assalve, G., Lunetti, P., Di Cagno, A., De Luca, E. W., Aldegheri, S., Zara, V., & Ferramosca, A. (2024). Advanced wearable devices for monitoring sweat biochemical markers in athletic performance: A comprehensive review. *Biosensors, 14*(12), Article 574. Retrieved from https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=%22Ferramosca%20A%22%5BAuthor%5D (date of access: 24.01.2025).

8. Flockhart, M., & Larsen, F. J. (2024). Continuous glucose monitoring in endurance athletes: Interpretation and relevance of measurements for improving performance and health. *Sports Medicine, 54*, 247–255. DOI: https://doi.org/10.1007/s40279-023-01910-4 (date of access: 24.01.2025).

9. Dileepkumar, S. C., Gouda, R., & Kumasi, B. (2025). Precision and performance: Smart healthcare technologies in sports medicine wellness. In: *Driving Global Health and Sustainable Development Goals With Smart Technology*. IGI Global Scientific Publishing, 389–410. Retrieved from https://www.igi-global.com/chapter/precision-and-performance/365275 (date of access: 24.01.2025).

10. Qin, H., Qian, S., Cai, X., & Guo, D. (2024). Athletic skill assessment and personalized training programming for athletes based on machine learning. *Journal of Electrical Systems, 20*(9s), 1379–1387. Retrieved from https://www.proquest.com/openview/a5a2dbf5f4d245121803e2586be23fc4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=4433095 (date of access: 24.01.2025).

11. Pu, Z., Pan, Y., Wang, S., Liu, B., Chen, M., & Ma, H. (2024). Orientation and decision-making for soccer based on sports analytics and AI: A systematic review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 11*(1), 37–57. DOI: https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123807 (date of access: 24.01.2025).

12. Osborne, B. (2017). Legal and ethical implications of athletes' biometric data collection in professional sport. *Marquette Sports Law Review, 28*, Article 37. Retrieved from https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/mqslr28&div=6&id=&page= (date of access: 24.01.2025).

13. Roa, J. A. (2024). *The science of peak sports performance: A guide to the assessment, control, and monitoring of training.* Jaime A. Roa. Retrieved from https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=W24lEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=Biometric+Indicators+of+Recovery+Status+in+High-Performance+Athletes.&ots=e2wuoLEvPL&sig=ks9KBoVhY6bdIIQSwK2TJ4hoELA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (date of access: 24.01.2025).

14. Karatieieva, S., Slobodyan, O., Honchar, H., Penzai, S., & Karatieieva, A. (2020). Morfometrychni doslidzhennia v haluzi sportu [Morphometric studies in the field of sports]. *Klinichna anatomiia ta operatyvna khirurhiia [Clinical Anatomy and Operative Surgery], 19*(4), 65–71. Retrieved from https://doi.org/10.24061/1727-0847.19.4.2020.54. [in Ukrainian].

15. Kitsantas, A., Kavussanu, M., Corbatto, D., & van de Pol, P. (2018). Self-regulation in sports learning and performance. *Handbook of Self-Regulation of Learning and Performance, 5*(2), 194–207. Retrieved from https://core.ac.uk/download/pdf/267301336.pdf (date of access: 24.01.2025).