

DOI: 10.21802/artm.2025.4.36.112
УДК 615.825:616.833(045)

АНАЛІЗ ПАТЕРНУ ХОДИ ПІСЛЯ ПЕРЕНЕСЕНОГО ВОГНЕПАЛЬНОГО ПОРАНЕННЯ. КЛІНІЧНИЙ ВИПАДОК

А.Л. Паламарчук¹, Д.В. Паламарчук², М.А. Ільченко¹, І.Ю. Свириденко¹

¹Київський інститут реабілітації, м. Київ, Україна

²Київський медичний університет, кафедра фізіології, медичної біології та біологічної фізики, м. Київ, Україна

ORCID ID: 0000-0001-5307-6322, Scopus ID: 58247883000, e-mail: andrewpallamarchuk@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-9357-5652, Scopus ID: 58247882900, e-mail: d.shesterina@kmu.edu.ua

ORCID ID: 0009-0004-9822-7525, e-mail: m.ilchenko.st@kmu.edu.ua

ORCID ID: 0009-0008-0870-1297, e-mail: ihor.svyrydenko@gmail.com

Резюме. Вогнепальні поранення є однією з найпоширеніших причин ушкодження периферичної нервової системи під час військових дій в Україні. Фізична активність має нейропротекторний ефект і сприяє відновленню нервових аксонів після травм. Однак бракує рандомізованих досліджень, які впроваджують інновації для покращення результатів лікування, скорочення реабілітації та створення адаптивних програм із гнучкими налаштуваннями й швидким зворотним зв'язком. Метою дослідження є представлення клінічного випадку невропатії правого малогомілкового нерва з парезом правої стопи внаслідок вогнепального поранення та аналіз ефективності персоналізованої реабілітації з використанням технології «Axelero Gait & Balance».

28-річний чоловік звернувся до Київського Інституту Реабілітації зі скаргами на біль у латеральній області правої стопи, дискомфорт у нижній частині гомілки та гомілково-ступневого суглобі. Травма стала наслідком вогнепально-осколкового поранення у 2024 році, що спричинило пошкодження кісток правої стопи, дефіцит кісткової тканини та розвиток невропатії малогомілкового нерва. Обстеження виявило парез правої стопи, зниження сенсомоторних функцій, рубцеві зміни в м'яких тканинах, порушення фаз опори і маху, контрактуру колінного суглоба на протилежній кінцівці та укорочення правої ноги. Швидкість ходьби була знижена на 20 % від норми.

Під час лікування проводилася оцінка ходи за допомогою пристрою Axelero Gait & Balance (Meden Immed, Польща), що дозволило детально проаналізувати параметри ходи. Програма «Neuroforma Gait and Balance» аналізувала ширину кроку, середнє та максимальне навантаження, а також фази стійки і маху. Проведена терапія продемонструвала підвищення швидкості й довжини кроку, усунення асиметрії ходи та поліпшення стабільності. Це свідчить про вдосконалення пропріоцептивної регуляції, стабільності рухів і активацію механізмів нейропластичності.

Ключові слова: вогнепальне поранення, невропатія малогомілкового нерва, персоналізована реабілітація, аналіз ходи, нейропластичність, Axelero Gait & Balance.

Вступ. Внаслідок військового конфлікту в Україні спостерігається значне збільшення випадків травматичних ушкоджень периферичних нервів, особливо через поранення вогнепальною зброєю, серед яких 64 % складають ушкодження кінцівок, 74,8 % – ушкодження м'яких тканин, 25,2 % – вогнепальні переломи кісток. Близько 40 % травмованих осіб потребують подальших реконструктивних втручань з тривалим періодом реабілітації [1].

Малогомілковий нерв є одним із найчастіше вражених периферичних нервів, що значною мірою впливає на порушення функції ходи, підвищує ризик падінь і сприяє розвитку вторинних ортопедичних ускладнень. Визначення ступеня його пошкодження має вирішальне значення для прогнозування можливостей відновлення та розробки найбільш ефективної реабілітаційної стратегії. Традиційно вона ґрунтується на класичних класифікаціях Seddon (1943) та Sunderland (1951), які враховують рівень ураження аксона і його оболонки [2, 3]. Однак попри анатомічну цілісність нерва, процес його регенерації не завжди забезпечує повне відновлення функціональних можливостей. Така ситуація обумовлена впливом низки факторів, серед яких дегенерація м'язових волокон,

порушення нейром'язової передачі, а також зміни у системі пропріоцептивної чутливості [4, 5]. Фізична терапія в цьому випадку є ключовим компонентом мультидисциплінарного підходу, спрямованого не тільки на відновлення рухової активності, але й на відновлення сенсорної функції та покращення контролю постави. Проте відсутність стандартизованих протоколів лікування травматичних невропатій значно ускладнює прогнозування ефективності терапії [6-10]. Інноваційні технології біомеханічного аналізу, зокрема засоби для дослідження патерну ходи, надають сучасні можливості у сфері реабілітації. Їх застосування забезпечує не лише об'єктивну оцінку динаміки процесу відновлення, але й сприяє персоналізації реабілітаційних програм відповідно до індивідуальних функціональних особливостей пацієнта.

Метою дослідження є представлення клінічного випадку невропатії правого малогомілкового нерва з парезом правої стопи внаслідок вогнепального поранення та аналіз ефективності персоналізованої реабілітації з використанням технології «Axelero Gait & Balance».

Об'єкт і методи дослідження. Основа нашої роботи полягає в детальному аналізі результатів курсу медико-реабілітаційного лікування, проведеного на клінічній базі Київського інституту реабілітації. Пацієнт М., 28 років звернувся до клініки зі скаргами на біль під час ходіння в ділянці латеральної сторони правої стопи, дискомфорт у нижній третині гомілки та гомілково-ступневому суглобі з правого боку. Його травма стала наслідком вогнепально-осколкового поранення нижніх кінцівок у серпні 2024 року, що спричинило ушкодження кісток правої стопи, дефект кісткової тканини та розвиток невротії малогомілкового нерва. На момент звернення діагностували парез правої стопи, значне зниження сенсомоторної функції, рубцеві зміни м'яких тканин, порушення фаз опори й відштовхування стопи при ходьбі, контрактуру колінного суглоба на протилежній стороні та укорочення правої кінцівки. Загальна швидкість ходьби пацієнта була знижена на 20 % у порівнянні з нормою. З метою підвищення опорної функції кінцівки, стабілізації ходи та покращення фізичної витривалості було призначено реабілітаційний курс із використанням цифрової платформи Axelero Gait & Balance (Meden Inmed, Польща). Ця технологія дозволяє об'єктивно оцінювати динаміку відновлення пацієнта і забезпечує можливість персоналізації реабілітаційного протоколу. Параметри ходи реєструвалися за допомогою

тензодатчиків, розташованих під біговим полотном. Їх показники дозволяли визначити розташування центру тиску сили та вагу пацієнта. Перед тестуванням ширина і висота поручнів були адаптовані відповідно до зросту пацієнта для забезпечення комфортних умов виконання вправ. Після завершення тренувань пристрій автоматично відображав результати, включаючи тривалість заняття (у хвилинах і секундах), пройденої дистанцію (у метрах) та кількість зроблених кроків. Аналіз проведеної реабілітації здійснювався через програмне забезпечення «Neuroforma Gait and Balance», яке автоматично визначало ключові параметри, зокрема ширину кроку, середнє та максимальне навантаження, фазу стійки та фазу маху (рис. 1).

Результати дослідження та їх обговорення.

Графік ілюструє розподіл значень центру тиску для ходи: вісь абсцис (COP_x) охоплює проміжок від -0,10 до 0,06 см, водночас вісь ординат (COP_y) варіюється від -0,07 до 0,10 см. Контур графіка нагадує форму метелика і демонструє симетрію відносно нульової точки координат. Водночас помітне розсіювання даних вздовж осі ординат порівняно з абсцисою. Графік у більшості випадків має симетричну форму, але на лівій стороні видно невелике зростання показників (рис. 2).

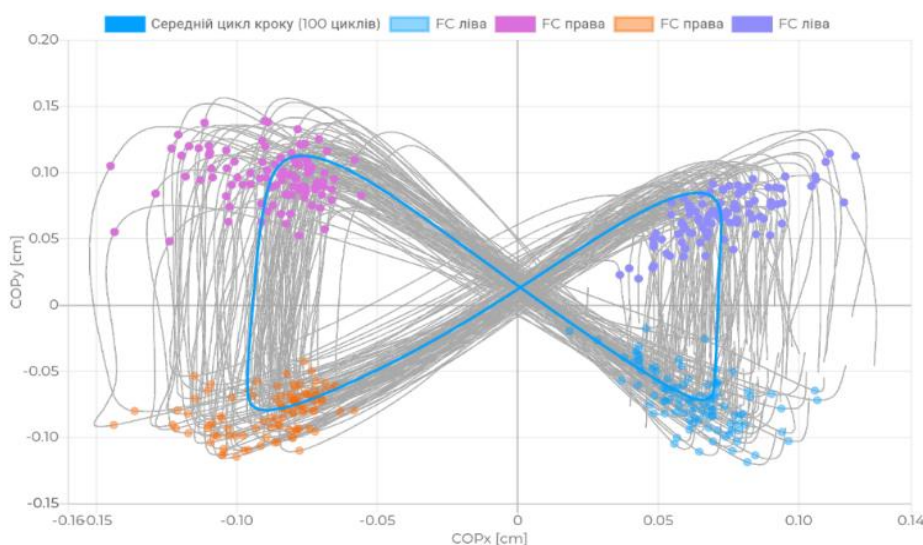


Рис. 1. Оцінка функції ходьби на початковому етапі реабілітації

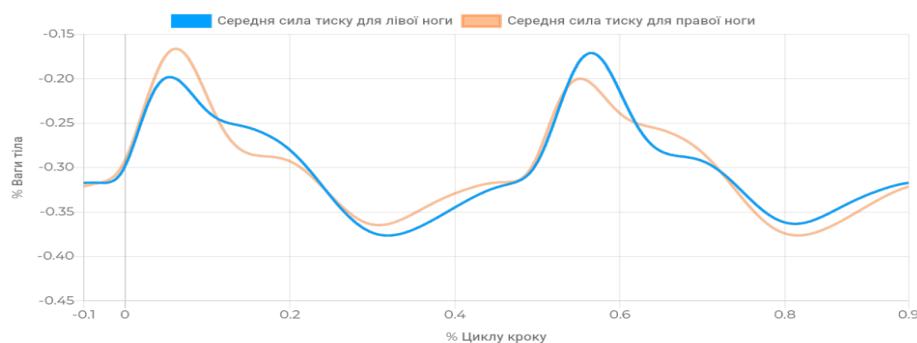


Рис. 2. Динаміка сили тиску кінцівок на первинному етапі реабілітації

Ліва кінцівка: графік демонструє знижену силу натискання під час початкової фази опори, однак у завершальній фазі параметри сили знаходяться в межах норми. Права кінцівка: у початковій фазі опори сила натискання відповідає нормальним показникам, але спостерігається незначне зниження в завершальній фазі. Порівняння графіків сили натискання обох кінцівок виявляє найбільші відхилення у двоопорному періоді ходьби. Також помітна обмежена сила тиску на початку опори правої ноги та знижена сила відштовхування наприкінці її циклу (рис. 3).

Розподіл показників центру тиску (COP_x) охоплює діапазон по осі абсцис від $-0,10$ до $0,09$ см, а по осі ординат (COP_y) – від $-0,14$ до $0,17$ см. Контури графіка нагадують форму метелика, що є відносно симетричною щодо нуля, проте спостерігається більший розкид даних уздовж осі ординат. Незважаючи на загальну симетрію форми графіка, ліві крайні частини виглядають більш масивними (рис. 4).

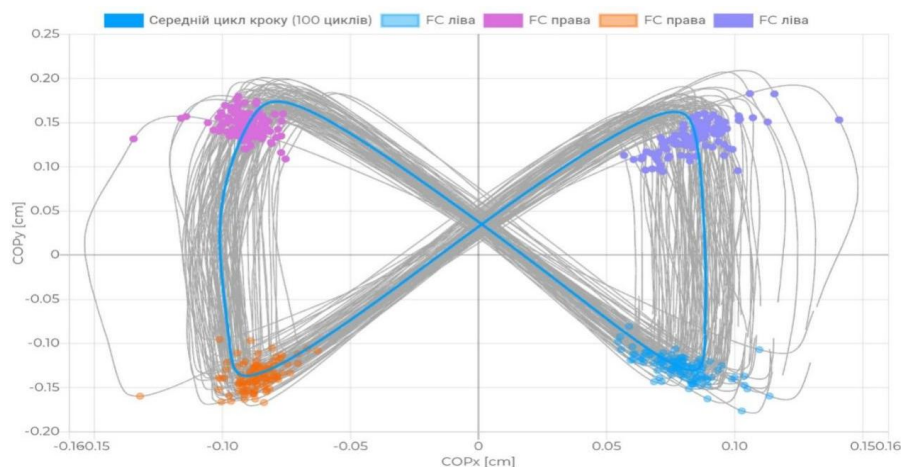


Рис. 3. Оцінка ходьби після завершення реабілітаційного курсу

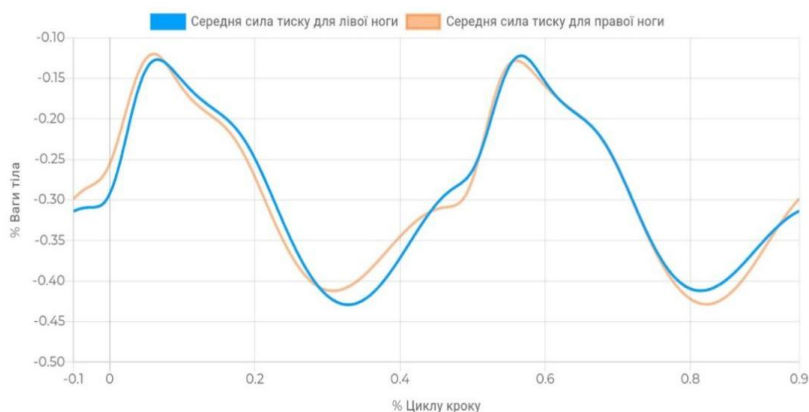


Рис. 4. Динаміка сили тиску кінцівок після завершення реабілітаційного курсу

Ліва кінцівка: графік відображає нормальний розподіл тиску на ногу протягом опорного періоду. Водночас спостерігається тенденція до підвищення пікових значень сили натискання. Права кінцівка: зафіксовано аналогічний характер розподілу тиску, який залишається в межах норми протягом усього опорного періоду, при цьому також спостерігається зростання пікових показників. Аналіз сили натискання лівої і правої кінцівок свідчить про симетричний розподіл тиску між ними, що є позитивним результатом проведеної реабілітації.

Згідно з даними таблиці 1 середня швидкість ходьби зросла на 48,39 % (з 3,1 до 4,6 км/год), а довжина кроку – з 0,44 – 0,45 м до 0,64 м. Це свідчить про покращення пропріорецепції, зростання м'язової сили та усунення контрактур. Подовження кроку потребує злагодженої роботи м'язів нижньої кінцівки та

повноцінного виконання фаз перенесення й відштовхування. Асиметрія кроків зменшилася з 2,2 % до 0 %, що вказує на відновлення координації, симетричний розподіл навантаження й покращення контролю рухів. Подібні зміни узгоджуються з результатами пропріорецептивних і силових тренувань, які позитивно впливають на статико-динамічні параметри [11-13].

Збільшення темпу ходи, подовження кроку на 8 %, скорочення тривалості фази підтримки та зменшення асиметрії (з 4,6 % до 2,6 %) свідчать про поліпшення м'язової сили, стабільності та нейром'язового контролю. Покращена активація м'язів гомілки, відновлення пропріорецепції та усунення м'язових контрактур сприяли більш впевненому перенесенню ваги тіла і формуванню симетричного патерну ходи. Хоча час фази перенесення залишився практично незмінним, значне скорочення асиметрії у цій фазі (з

14,7 % до 6,3 %) вказує на покращення координації між кінцівками та узгодженість у роботі м'язів-антагоністів і агоністів. Виявлені зміни підтверджують

ефективність реабілітаційної програми у відновленні просторових і часових характеристик ходи (Табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна оцінка результатів первинного тестування на 6-й день та кінцевого тестування на 26-й день з використанням Axelero gait & balance

Показник	Первинне тестування	Кінцеве тестування
Швидкість	3,1 км/год	4,6 км/год
Довжина кроку	Ліва кінцівка - 0,44 м, права кінцівка - 0,45 м, асиметрія - 2,2 %	Ліва та права кінцівка - 0,64 м, асиметрія - 0,0 %
Темп	102,3 кроки за хвилину	110,5 кроку за хвилину
Час фази підтримки	Ліва кінцівка - 0,87 с, права кінцівка - 0,83 с, асиметрія лівої - 2,6 %	Ліва кінцівка - 0,78 с, права кінцівка - 0,76 с, асиметрія лівої - 2,3 %
Час фази перенесення	Ліва кінцівка - 0,29 с., права кінцівка - 0,34 с, асиметрія правої - 14,7 %	Ліва кінцівка - 0,30 с, права кінцівка - 0,32 с, асиметрія правої - 6,3 %

Висновки. Використання інноваційної технології «Axelero gait & balance» у рамках реабілітаційних заходів для пацієнтів із пошкодженнями периферичної нервової системи забезпечує можливість проведення високоточної кількісної оцінки статико-динамічних параметрів. Отримані результати, такі як збільшення довжини кроку та зменшення асиметрії, вказують на значне покращення пропріоцептивної регуляції, посилення м'язової сили та зниження рівня спастичності. Відновлення симетрії рухів і поліпшення стабільності ходи свідчать про ефективність індивідуалізованих фізичних втручань. Зміни параметрів центру тиску додатково демонструють зменшення компенсаторної активності й активацію нейропластичних механізмів центральної нервової системи, що сприяє більш ефективному контролю за положенням тіла та підвищенню функціональної автономності пацієнтів.

Конфлікт інтересів: відсутній.

References:

- Kuchyn I, Horoshko V. Predictors of treatment failure among patients with gunshot wounds and post-traumatic stress disorder. *BMC Anesthesiology*. 2021; 21(1):263. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12871-021-01482-8>
- Sunderland S. A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function. *Brain*. 1951; 74(4):491-516. DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/74.4.491>
- Maugeri G, D'Agata V, Trovato B, Roggio F, Castorina A, Vecchio M. The role of exercise on peripheral nerve regeneration: from animal model to clinical application. *Heliyon*. 2021; 7(11):e08281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08281>
- Brushart TM, Tarlov EC, Mesulam MM. Specificity of muscle reinnervation after epineurial and individual fascicular suture of the rat sciatic nerve. *Journal of Hand Surgery American Volume*. 1983; 8(3):248-253. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0363-5023\(83\)80152-x](https://doi.org/10.1016/s0363-5023(83)80152-x)
- English AW, Wilhelm JC, Sabatier MJ. Enhancing recovery from peripheral nerve injury using treadmill training. *Ann Anat*. 2011; 193(4):354-361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2011.02.013>
- Chiaromonte R, Pavone V, Testa G, Pesce I, Scaturro D, Musumeci G. The Role of Physical Exercise and Rehabilitative Implications in the Process of Nerve

Repair in Peripheral Neuropathies: A Systematic Review. *Diagnostics (Basel)*. 2023; 13(3):364.

DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030364>

- Gordon T, Sulaiman O, Boyd JG. Experimental strategies to promote functional recovery after peripheral nerve injuries. *Journal of the Peripheral Nervous System*. 2003; 8(4):236-250. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1085-9489.2003.03029.x>
- Wilhelm JC, Xu M, Cucoranu D, Chmielewski S, Holmes T, Lau K, et al. Cooperative roles of BDNF expression in neurons and Schwann cells are modulated by exercise to facilitate nerve regeneration. *Journal of Neuroscience*. 2012; 32(14):5002-5009. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1411-11.2012>
- Lopes C, Gonçalves N, Gomes C, Saraiva M, Pêgo AP. BDNF gene delivery mediated by neuron-targeted nanoparticles is neuroprotective in peripheral nerve injury. *Biomaterials*. 2017; 121:83-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.12.025>
- Ghiani C, Ying Z, de Vellis J, Gomez-Pinilla F. Exercise decreases myelin-associated glycoprotein expression in the spinal cord and positively modulates neuronal growth. *Glia*. 2007; 55(9):966-975. DOI: <https://doi.org/10.1002/glia.20521>
- Yang JM, Kim SY. Correlation of knee proprioception with muscle strength and spasticity in stroke patients. *J Phys Ther Sci*. 2015; 27(9):2705-8. DOI: <https://doi.org/10.1589/jpts.27.2705>
- Laskowski ER, Newcomer-Aney K, Smith J. Refining rehabilitation with proprioception training: expediting return to play. *The Physician and Sportsmedicine*. 1997; 25(10):89-104. DOI: <https://doi.org/10.3810/psm.1997.10.1476>
- Ramsey M, Ford KR, Pexa BS, Westbrook A. Quantification of limb loading asymmetries in collegiate basketball players during basketball tasks. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2022; 54(9S):287. DOI: <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000878600.96833.ed>

UDC 615.825:616.833(045)

ANALYSIS OF GAIT PATTERN FOLLOWING A GUNSHOT WOUND: A CLINICAL CASEA.L. Palamarchuk¹, D.V. Palamarchuk², M.A. Ilchenko¹, I.Yu. Svyrydenko¹¹*Kyiv Institute of Rehabilitation, Kyiv, Ukraine*²*Kyiv Medical University, Department of Physiology, Medical Biology, and Biophysical Physics, Kyiv, Ukraine*

ORCID ID: 0000-0001-5307-6322,

Scopus ID: 58247883000,

e-mail: andrewpallamarchuk@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-9357-5652,

Scopus ID: 58247882900,

e-mail: d.shesterina@kmu.edu.ua

ORCID ID: 0009-0004-9822-7525,

e-mail: m.ilchenko.st@kmu.edu.ua

ORCID ID: 0009-0008-0870-1297,

e-mail: ihor.svyrydenko@gmail.com

Abstract. Gunshot wounds remain one of the most common causes of peripheral nervous system injuries during military conflicts in Ukraine, posing significant medical and rehabilitative challenges that impact patients' quality of life and functional independence. Scientific evidence indicates that targeted physical activity exerts neuroprotective effects and promotes regeneration of nerve axons following traumatic injury. However, there remains a significant lack of randomized controlled trials that focus on integrating modern technological innovations aimed at improving therapeutic outcomes, shortening rehabilitation timelines, and developing adaptive, patient-specific programs with flexible customization and rapid real-time feedback. The purpose of this study is to present a clinical case of right common peroneal nerve neuropathy accompanied by paresis of the right foot due to a gunshot injury, followed by an evaluation of the effectiveness of a personalized rehabilitation program employing the advanced "Axelero Gait & Balance" technology.

A 28-year-old male patient was admitted to the Kyiv Institute of Rehabilitation with complaints of pain

localized in the lateral aspect of the right foot during ambulation, discomfort in the distal third of the leg, and the right ankle joint region. The injury resulted from a gunshot and shrapnel wound sustained in August 2024, which caused multiple fractures of the bones of the right foot, a deficit in bone tissue, and development of neuropathy involving the common peroneal nerve. Comprehensive clinical and instrumental examination revealed paresis of the right foot, significant reduction of sensorimotor functions, scar tissue formation in soft tissues, impairments in the stance and swing phases of gait, contralateral knee joint contracture, and shortening of the right lower limb. Additionally, a 20 % reduction in gait speed was documented compared to normative data.

Throughout the rehabilitation process, gait assessment was conducted using the Axelero Gait & Balance system (Meden Inmed, Poland), enabling precise quantification of gait pattern parameters. The "Neuroforma Gait and Balance" software analyzed step width, average and maximal loading, as well as stance and swing phase durations. The rehabilitation protocol demonstrated significant dynamic improvements, including increases in walking speed and step length, correction of gait asymmetry, and enhanced postural stability. These findings suggest improved proprioceptive regulation, enhanced neuromuscular control, and activation of neuroplasticity mechanisms, thereby validating the effectiveness of the personalized rehabilitation approach utilizing Axelero technology.

This clinical case highlights the promising role of advanced gait analysis technologies in rehabilitation programs for individuals with peripheral nerve injuries, aiding in improved functional recovery and better overall quality of life. However, further research with larger patient groups and randomized controlled trials is essential to confirm these results and refine rehabilitation strategies for broader clinical application.

Keywords: gunshot wound, peroneal neuropathy, personalized rehabilitation, gait analysis, neuroplasticity, Axelero Gait & Balance.

Conflict of interest: absent.

Стаття надійшла в редакцію 07.08.2025 р.

Стаття прийнята до друку 27.10.2025 р.