DOI 10.11603/2411-1597.2026.2.16466
УДК 615.885:004.896:616.832-001-08-039.76

ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ПАЦІЄНТІВ ІЗ ТРАВМАМИ СПИННОГО МОЗКУ: РОЗГЛЯД ДОКАЗІВ ТА ПРАКТИЧНІ ВИСНОВКИ

Діана Котєрєва, Дарія Попович

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, Тернопіль, Україна

Вступ. Травма спинного мозку є однією з найтяжчих форм ураження нервової системи, що супроводжується стійкими моторними, сенсорними і вегетативними порушеннями. Такі зміни суттєво обмежують функціональну незалежність пацієнтів, знижують рівень їх соціальної активності, ускладнюють повсякденне життя і негативно впливають на психоемоційний стан. Традиційні методи реабілітації не завжди забезпечують достатню інтенсивність, точність і повторюваність рухових вправ, необхідних для стимуляції нейропластичності та відновлення втрачених функцій. Тому особливої актуальності набуває використання роботизованих технологій, зокрема систем роботизованого тренування ходи і носимих екзоскелетів, які відкривають нові можливості для відновлення рухових функцій і підвищення ефективності реабілітаційного процесу.

Мета роботи – проаналізувати сучасні наукові дані щодо ефективності застосування роботизованих технологій у реабілітації пацієнтів із травмами спинного мозку і визначити їх клінічне значення.

Основна частина. Роботизовані технології в нейрореабілітації забезпечують високий рівень інтенсивності, точності й повторюваності рухів, що є важливою умовою формування нових моторних зв'язків та активації механізмів нейропластичності. Використання роботизованих систем для тренування ходи і носимих екзоскелетів сприяє покращенню швидкості пересування, дистанції ходьби, координації, рівноваги та рівня функціональної незалежності пацієнтів. Найбільш виражений позитивний ефект відзначають у хворих із неповними ураженнями спинного мозку, в яких зберігається потенціал до часткового відновлення локомоторної функції. Крім фізичних переваг, такі технології позитивно впливають на психоемоційний стан пацієнтів, підвищують мотивацію до занять, сприяють активнішій участі в реабілітаційному процесі та покращують якість життя. Водночас широке впровадження цих методів обмежується високою вартістю обладнання, потребою у спеціалізованому навчанні персоналу, а також необхідністю індивідуального підбору реабілітаційних програм і ретельного відбору пацієнтів відповідно до клінічних показань та протипоказань.

Висновки. Роботизовані технології є перспективним напрямом сучасної нейрореабілітації та доцільні як складова комплексного відновлення пацієнтів із травмами спинного мозку. Їх застосування сприяє покращенню ходьби, функціональної активності та загального стану пацієнтів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на стандартизацію протоколів, оцінку довгострокових результатів і підвищення доступності цих методів у клінічній практиці.

Ключові слова: травма спинного мозку; нейрореабілітація; роботизоване тренування ходи; екзоскелети; нейропластичність; відновлення ходи.

USE OF ROBOTIC TECHNOLOGIES IN THE REHABILITATION OF PATIENTS WITH SPINAL CORD INJURIES: REVIEW OF EVIDENCE AND PRACTICAL IMPLICATIONS

Diana Kotierieva, Dariya Popovych

I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ternopil, Ukraine

Introduction. Spinal cord injury is one of the most severe forms of damage to the nervous system and is accompanied by persistent motor, sensory, and autonomic impairments. Such changes significantly limit patients' functional independence, reduce their level of social activity, complicate daily life, and negatively affect their psycho-emotional state. Traditional rehabilitation methods do not always provide sufficient intensity, accuracy, and repetition of motor exercises required to stimulate neuroplasticity and restore lost functions. In this regard, the use of robotic technologies, particularly robotic gait training systems and wearable

© Діана Котєрєва, Дарія Попович, 2026

exoskeletons, is becoming increasingly relevant, as they open new opportunities for restoring motor functions and improving the effectiveness of the rehabilitation process.

The aim of the study – to analyze current scientific data on the effectiveness of robotic technologies in the rehabilitation of patients with spinal cord injuries and to determine their clinical significance.

The main part. Robotic technologies in neurorehabilitation provide a high level of intensity, accuracy, and repeatability of movements, which is an important condition for the formation of new motor connections and the activation of neuroplasticity mechanisms. The use of robotic gait training systems and wearable exoskeletons contributes to improvements in walking speed, walking distance, coordination, balance, and the level of functional independence in patients. The most pronounced positive effect is observed in patients with incomplete spinal cord injuries, who retain the potential for partial recovery of locomotor function. In addition to physical benefits, such technologies positively influence patients' psycho-emotional state, increase motivation for therapy, encourage more active participation in the rehabilitation process, and improve quality of life. At the same time, the widespread implementation of these methods is limited by the high cost of equipment, the need for specialized staff training, as well as the necessity for individualized selection of rehabilitation programs and careful patient selection according to clinical indications and contraindications.

Conclusions. Robotic technologies are a promising direction in modern neurorehabilitation and are advisable as a component of comprehensive recovery programs for patients with spinal cord injuries. Their use contributes to improvements in gait, functional activity, and the overall condition of patients. Further research should focus on the standardization of treatment protocols, evaluation of long-term outcomes, and increasing the accessibility of these methods in clinical practice.

Keywords: spinal cord injury; neurorehabilitation; robotic gait training; exoskeletons; neuroplasticity; gait recovery.

Вступ. Травма спинного мозку є одним із найсерйозніших видів ушкоджень, яких може зазнати нервова система, що спричиняє хронічні моторні, сенсорні та автономні розлади, які значно обмежують функціональну незалежність пацієнтів. Щороку у світі реєструють тисячі нових випадків травм спинного мозку, які в основному виникають унаслідок дорожньо-транспортних пригод, падінь з висоти, спортивних травм та військових дій. Соціально-політична ситуація в Україні на сьогодні підкреслює важливість реабілітації осіб із травмами спинного мозку, оскільки значна їх частина належить до працездатного населення.

Травма спинного мозку також викликає порушення провідності нервових шляхів, що призводить до парезу або паралічу, втрати контролю над функціями тазових органів, розвитку вторинних ускладнень та зниження якості життя. Відновлювальне лікування завжди спиралося на більш традиційні методи реабілітації, до яких належать лікувальна фізкультура, кінезотерапія і тренування підтримуваної ходи. Але рівень виконання значною мірою залежить від інтенсивності, тривалості та повторюваності моторних завдань, що може бути менш ефективним, якщо працівники не навчені та не контролюються.

Поточний підхід до нейрореабілітації базується на принципах нейропластичності – здатності нервової системи функціонально реорганізовуватися під впливом цілеспрямованої стимуляції. Саме тому так багато уваги приділяють новітнім технологіям, які полегшують численні повторення рухів з контролем параметрів навантаження та об'єктивним моніторингом пацієнта і його прогресу. Роботизовані системи (роботизовані пристрої для тренування ходи, носимі екзоскелети) мають значний потенціал для відновлення локомоторної функції, вертикалізації та покращення функціональної незалежності в осіб з різними рівнями травм спинного мозку [1].

З потенційними перевагами роботизованих технологій також виникають питання щодо їх клінічної ефективності, безпеки та економічної доцільності. Цей випадок підкреслює, наскільки важливо вивчати сучасні дані, основані на доказах, щоб зрозуміти найкращі способи інтеграції роботизованих технік у комплексну програму реабілітації і знайти найкращі методи застосування роботів до цих підходів до реабілітації.

Мета роботи – проаналізувати сучасні наукові дані щодо ефективності застосування роботизованих технологій у реабілітації пацієнтів із травмами спинного мозку і визначити їх клінічне значення.

Основна частина. Роботизоване тренування ходи і носимі екзоскелети забезпечують виконання великої кількості повторень крокового циклу з контрольованою підтримкою маси тіла. Нейрофізіологічною основою ефективності є активація центральних генераторів патерну та стимуляція залишкових кортикоспінальних шляхів [2]. Клінічні

дослідження демонструють покращення швидкості пересування, дистанції ходьби і рівня функціональної незалежності, особливо у пацієнтів з неповними ураженнями спинного мозку. Найкращі результати досягаються при поєднанні роботизованих методик із традиційною фізичною терапією [2, 3].

Сучасний підхід до нейрореабілітації базується на концепціях інтенсивності, повторюваності та специфічності моторних завдань. Роботизовані технології, особливо роботизоване тренування ходи (RAGT) і носимі екзоскелети, є одним з успішних та перспективних напрямків. Ці системи дозволяють виконувати багато повторень циклу ходьби, контролювати параметри руху та поступово регулювати рівень підтримки пацієнта. Саме можливість дозованої інтенсивної стимуляції створює передумови для активації механізмів нейропластичності [4]. Нейрофізіологічна основа роботизованої реабілітації корелює з активацією центральних генераторів ритму, які містяться в спинному мозку і здатні генерувати ритмічну активність ходьби навіть при частковому порушенні супраспінального контролю. Повторювана аферентна стимуляція під час тренування підсилює сенсорний зворотний зв'язок, активує залишкові кортикоспінальні шляхи та функціональну реорганізацію нейронних мереж [2, 4]. У пацієнтів з неповними ураженнями це може проявлятися покращенням координації, сили та швидкості ходьби.

Роботизоване тренування ходи зазвичай проводять на біговій доріжці з підтримкою маси тіла за допомогою екзоскелетної системи (Lokomat). Пристрій визначає фізіологічну траєкторію руху нижніх кінцівок, що дозволяє пацієнту виконувати велику кількість кроків безпечно. Поступове зменшення підтримки маси тіла та збільшення активної участі пацієнта є основними принципами успішного застосування. Дослідження показують, що RAGT у поєднанні з традиційною терапією покращує швидкість пересування, дистанцію ходьби, силу м'язів та показники функціональної незалежності [4, 5].

Носимі роботизовані екзоскелети використовують для вертикалізації та ходьби по рівних поверхнях при підтримці допоміжних пристроїв (табл.). Вони досягають формування крокового патерну за умов, максимально наближених до реального середовища. Крім потенційного впливу на локомоторну функцію, екзоскелети сприяють підвищенню серцево-судинної активності, покращенню психоемоційного стану і збільшенню мотивації пацієнта [3, 6]. Але їх ефективність значною мірою залежить від рівня травми, збереженої моторної функції та ретельного відбору кандидатів.

Таблиця. **Порівняльна характеристика роботизованих технологій**

Критерій	RAGT (Lokomat)	Носимі екзоскелети
Тип застосування	Стаціонарна система з підтримкою маси тіла	Мобільна система для ходьби
Терапевтична мета	Відновлення крокового патерну	Вертикалізація та функціональна ходьба
Показання (AIS)	AIS C–D	AIS C–D; AIS A – вертикалізація
Клінічні ефекти	Покращення швидкості пересування і дистанції ходьби	Поліпшення толерантності до навантаження
Обмеження	Висока вартість, стаціонарність	Потреба в допоміжних засобах

Основним прогностичним фактором є ступінь ураження за шкалою ASIA. Пацієнти з неповними ураженнями (AIS C–D) мають найбільший потенціал для відновлення ходьби, тоді як при повних ураженнях (AIS A) роботизовані системи переважно використовують для вертикалізації та запобігання розвитку ускладнень [3, 7]. Інтенсивне тренування, яке проводять у підгострий період, також пов'язане з покращенням функціональних результатів.

Роботизовані технології, крім потенційних переваг, мають і обмеження. Потенційна небезпека пов'язана з падіннями, надмірним навантаженням на верхні кінцівки при використанні милиць, подразненням шкіри в місцях фіксації та іншими ускладненнями остеопорозу і контрактур. Потрібні ретельний контроль за клінічним скринінгом, навчанням персоналу та моніторинг безпеки при їх використанні.

Економічні елементи все ще залишаються однією з основних перешкод для застосування роботизованої реабілітації. Ці технології доступні не всім через обмежені фінансові ресурси, високу вартість обладнання та необхідність технічного обслуговування і спеціалізованого навчання персоналу [7]. Потрібні подальші дослідження, зосереджені на довгостроковій економічній доцільності, яка є специфічною для системи охорони здоров'я в Україні.

Висновки. Робототехнічні технології є одним із нових напрямків реабілітації при травмах спинно-

го мозку. Відновлюються всі функції руху пацієнта, покращується координація рухів, підвищується витривалість, поліпшуються навички ходьби. Роботи відомі своєю здатністю до повторення і дозування, щоб максимізувати нейронну стійкість і ефект нейропластичності при нейротравмах в їх пацієнтів. Крім прямого впливу на моторне середовище, екзоскелети і роботизовані комплекси допомагають пацієнтам стати більш функціональними, більш психічно стабільними, емоційно зібраними, сильнішими особистостями / партнерами. Також, через цю різницю, вони повинні підходити пацієнтам, що допомагає не менше, а то й більше. Але їх застосування потребує індивідуального підходу, клінічного обґрунтування, а також продовження досліджень щодо довгострокової ефективності.

Це дослідження загалом підсилює необхідність і користь робототехнічних технологій у реабілітації пацієнтів із травмами спинного мозку. Терапевтичний ефект найбільший, коли вибір пацієнтів добре спланований, коли вони повністю функціональні, коли роботизовані втручання інтегровані разом із традиційною реабілітацією, коли наявні параметри для успішної реабілітаційної процедури та тренування і критерії лікування. Можливими напрямками в майбутньому є довгострокове дослідження роботизованого втручання для характеристики довгострокових результатів і порівняння з роботизованим лікуванням, а також створення найнадійніших алгоритмів для зцілення та кращого процесу тренування. Для досягнення такого успіху довгострокове використання роботизованого лікування з іншими терапевтичними техніками / технологіями повинно бути стандартизованим разом із вивченням застосування роботизованого лікування у клінічній нейрореабілітації.

Джерела фінансування. Дослідження не мало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів:

Діана Котєрєва – формування концепції дослідження; аналіз літератури; написання тексту статті.

Дарія Попович – узагальнення результатів; редагування тексту; затвердження фінальної версії статті.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Інформація про використання штучного інтелекту. Під час підготовки статті технологій штучного інтелекту автори не застосовували.

REFERENCES

1. van Dijsseldonk, R.B., van Nes, I.J.W., & Geurts, A.C.H. (2020). Exoskeleton home and community use in people with spinal cord injury. *Scientific Reports, 10,* 1-8.

2. Park, J.M., Lee, H., & Kim, S. (2024). Robot-assisted gait training in individuals with spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 21*, 1-15.

3. Miller, L.E., Zimmermann, A.K., & Herbert, W.G. (2016). Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Medical Devices: Evidence and Research, 9,* 455-466.

4. Fabbri, I., D'Andrea, S., & Bertolucci, F. (2023). Gait quality after robot-assisted therapy compared with conventional approaches: focus on Lokomat in incomplete spinal cord injury. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 20,* 1-12.

5. Zhang, L., Li, Y., & Chen, X. (2022). Lokomat versus wearable exoskeleton-assisted walking in spinal cord injury: systematic review and network meta-analysis. *Clinical Rehabilitation, 36* (8), 1045-1057.

6. Tan, K., Wong, C., & Tan, J. (2021). Wearable robotic exoskeleton for gait reconstruction in patients with spinal cord injury. *Frontiers in Neurorobotics, 15,* 1-10.

7. Model Systems Knowledge Translation Center (MSKTC) (2020). *Robotic exoskeletons for overground walking for people with spinal cord injury: factsheet*. Birmingham: University of Alabama at Birmingham.

Надійшла до редакції: 03.04.2026
Прийнято після рецензування: 13.04.2026
Подано до друку: 21.05.2026