

DOI: 10.21802/artm.2024.1.29.227
УДК 738.147:615.8-051]:355.1-057.36

СУЧАСНІ РЕАБІЛІТАЦІЙНІ ІНТЕРВЕНЦІЇ У ФІЗИЧНІЙ ТЕРАПІЇ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ ІЗ ТРАВМАТИЧНИМ УРАЖЕННЯМ ПЕРИФЕРИЧНИХ НЕРВІВ НИЖНІХ КІНЦІВОК

О.О. Беспалова¹, А.М. Сітовський², О.О. Якобсон², В.В. Степаненко², І.В. Савчук³¹Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка, м. Суми, Україна,²Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна³Академія рекреаційних технологій і права, м. Луцьк, Україна,

ORCID ID: 0000-0002-0081-6021, e-mail: i-ozon777@i.ua

ORCID ID: 0000-0002-7434-7475, e-mail: andriy.sitovskiy@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-7340-2014, e-mail: Jacobson.Helen@vnu.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-8361-5507, e-mail: stlsmu@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-5724-0078, e-mail: savthuk.viva@gmail.com

Резюме. Мета: теоретичний аналіз ефективності застосування реабілітаційних інтервенцій у реабілітації військовослужбовців із ушкодженням периферичної нервів нижніх кінцівок.

Методи. Аналіз та систематизація теоретичних даних щодо особливостей вогнепальних поранень периферичних нервів нижніх кінцівок та ефективності застосування ключових реабілітаційних інтервенцій.

Результати. Військовий конфлікт призводить до збільшення кількості ушкоджень периферичних нервів, зокрема нижніх кінцівок. Одним із наслідків травматичної дії вибухових снарядів є ураження нервів, наслідком якого є периферичні нейропатії, що спричиняють зниження м'язової сили і тонусу, порушення амплітуди рухів у суглобах нижніх кінцівок, зміни характеру ходьби та провокують розвиток ускладнень.

Ключову роль у функціональному відновленні хворих із периферичними нейропатіями відіграє нейрореабілітація. До сучасних засобів фізичної терапії, спрямованих на функціональне відновлення пацієнтів і зниження ризику розвитку супутніх ускладнень, відносять: кінезіотерапії (пасивні, активно-пасивні та активні вправи), механотерапію, електростимуляцію, різні форми сенсорної перепідготовки та кросс-модального тренування. Кожен із зазначених вище засобів і методів вирішує локальну проблему, а їх сумісне застосування значно підвищує шанси на одужання та повноцінне функціонування пацієнтів.

Висновки. Серед бойових поранень військовослужбовців найбільш поширеним є вибуховий механізм, одним із наслідків якого є нейропатія периферичних нервів нижніх кінцівок, яка супроводжується моторними та сенсорними порушеннями. Застосуванням реабілітаційних інтервенцій знижує ризики розвитку посттравматичних ускладнень, сприяє функціональному відновленню військовослужбовців.

Ключові слова: військовослужбовці, вибухове поранення, периферичні нерви, нейропатія, функціональне відновлення, реабілітаційні інтервенції, терапевтичні вправи, механотерапія, електростимуляція, сенсорне перевиховання.

Вступ. Сьогодні в умовах воєнного стану питання лікування та реабілітації пацієнтів із травматичними пошкодженнями периферичної нервової системи набувають особливої актуальності.

Периферична нейропатія є результатом пошкодження периферичних нервів, та викликає м'язову слабкість (атрофію з часом), оніміння та біль (у більшості випадків в кінцівках) [1].

Відкладеним у часі наслідком такого пошкодження є інвалідність та розвиток хронічного нейропатичного болю, що впливає на функціонування людини та якість її життя.

Пошкодження периферичних нервів кінцівок можуть мати різні функціональні наслідки в залежності від типу та кількості травмованих нервів (одного або декількох) [2], та супроводжуватися моторними, сенсорними та вегетативними порушеннями дистальніше місця пошкодження.

Обґрунтування дослідження. Сучасна гібридна війна відрізняється застосуванням великої кількості мінно-вибухових пристроїв, які розташовуються безпосередньо на землі або у поверхневих її шарах.

Саме тому, при їх розриві найчастіше травмуються нижні кінцівки, зокрема дистальні її відділи. Унаслідок такого ураження виникають вибухові поранення та вибухові травми, складність яких залежить від сили, швидкості та інших фізичних характеристик різних типів вибухової зброї. При цьому, механізм дії вибухових снарядів є однаковим та включає пряму і непряму уражаючу їх дію на організм людини.

При аналізі балістики вибухових поранень встановлено, що первинне ураження виникає через ударну хвилю високого тиску, яку створюють вибухові сили, що створює ризики до розтягування периферичних нервів. При цьому велику кількість такої енергії сприймають саме м'язи тканини тіла людини (м'язи, судини, нерви). Через розрив уражаючого елемента відбувається розліт осколкових та уламкових фрагментів, що призводить, у більшості випадків, до проникаючих поранень (вторинний механізм), що може призводити до здавлювання (компресійної нейропатії - нейропраксії), повного та/або часткового перерізання нервів (аксономезис або нейротмезис). Під впливом вибухової хвилі тіло людини може бути переміщене на певну відстань

із подальшим падінням та виникненням тупої травми (третинний механізм). Небезпечним для травмування нервів також є опіки [3, 4].

Пошкодження периферичного нерва може відбуватися у будь-якому місці, починаючи від сидничного нерва і до кінцевих гілок у стопі і гомілковостопному суглобі [5]. При ураженні одного із периферичних нервів нижньої кінцівки (стегового, мало- або великогомілкового) розвивається його мононейропатія. У випадку, якщо травмуючий фактор уражає одразу декілька з них, мова буде йти про полінейропатію.

Нейропатії супроводжуються великою кількістю різноманітних симптомів, прояв яких залежить від типу ураженого нерва. Зокрема, при пошкодженні сенсорних волокон з'являється поколювання, оніміння та невротичний біль. Наслідком пошкодження рухових волокон є зниження сили та тону м'язів, порушення амплітуди рухів. При здійсненні функціональних рухів виникають труднощі у ходьбі, підйомі та спуску по сходах, стоянні, утриманні рівноваги. Також пацієнти скаржаться на швидку втомлюваність і зниження повсякденної активності.

Важливим для функціонального відновлення пацієнтів із нейропатіями якнайшвидше створити сприятливі умови для регенерації травмованого нерва, які передбачають певний алгоритм медичного та реабілітаційного втручання.

Посттравматична регенерація нерва – це складний біологічний процес, результат якого залежить від багатьох біологічних факторів і факторів навколишнього середовища [6].

Серед чинників, які впливають на ефективність процесів реінервації та функціонального відновлення після пошкодження периферичного нерва, відзначають: відстань від місця пошкодження до денервованих тканин, яка обумовлює тривалість денервації м'язів, повільне відростання аксона поза місцем пошкодження, зниження підтримки регенерації дистальним нервом і денервованими клітинами Шванна, неточна реінервація органів-мішеней, а також важка атрофія м'язів і дегенерація м'язових волокон [7].

Знання анатомічної локалізації та патофізіологічної тяжкості порушення нерву дає розуміння щодо реабілітаційного прогнозу та тривалості відновлення пацієнта. Зокрема, незначне руйнування сполучнотканинних компонентів оболонки нерва обумовлює більш швидку та повну регенерацію аксона. Серйозне пошкодження оболонки із залученням периневрію вказує на неможливість самостійного функціонального відновлення [8].

Після повного переривання периферичного нерва відбувається втрата чутливих і рухових функцій денервованої кінцівки, а ступінь відновлення її функцій залишається достатньо низьким.

При будь-якому ступеню ураження периферичного нерва спостерігаються періоди короткочасного або тривалого порушення або зміни нервового зв'язку між нервом та м'язами, які він інервує. Навіть у випадку негайного відновлення цілісності нерва, цільовий м'яз упродовж певного часу (інколи декількох тижнів) залишається денервованим, що призводить до його атрофії.

З метою мінімізації ризиків розвитку атрофічних процесів поряд із медикаментозним лікуванням застосовується сучасні реабілітаційні інтервенції [9].

Але, не зважаючи на наявність науково доказової бази щодо успішного їх застосування, при пошкодженні периферичних нервів, функціональне відновлення пацієнтів залишається клінічною проблемою.

Для планування реабілітаційного втручання для пацієнтів із пошкодженнями периферичних нервів нижніх кінцівок нами був проведений аналіз сучасних реабілітаційних інтервенцій, ефективність яких науково доведена практичним шляхом.

Мета дослідження: теоретичний аналіз ефективності застосування сучасних засобів фізичної терапії у реабілітації військовослужбовців із ушкодженнями периферичної нервів нижніх кінцівок.

Матеріали та методи: теоретичні методи: науковий пошук, аналіз та систематизація сучасних теоретичних даних щодо особливостей вогнепального поранення периферичних нервів нижніх кінцівок, та практичних знань і висновків щодо ефективності застосування ключових реабілітаційних інтервенцій.

Результати дослідження. Найбільш поширеними медичними стратегіями втручання при пошкодженні периферичних нервів є мікрохірургія, яка передбачає з'єднання нервових закінчень, вживлення штучних та природних нервових трансплантатів і полімерних каналів (при великих проміжках між двома кінцями ушкодженого нерва) для спрямування аксонального шляху та клітинна терапія [1].

При важких ступенях ураження периферичних нервів мікрохірургія є першочерговим етапом лікування, який передбачає відновлення порушеної структури нерва та відновлення нервового зв'язку. При цьому, на функціональному рівні повноцінному відновленню будуть перешкоджати хронічні запальні процеси, які гальмують регенерацію нерва, утворення рубця та обривання сенсорних і моторних аксонів [1].

Зафіксовано окремі важкі випадки, коли відновити морфологію нерву не вдається, а отже неможливим є і функціональне відновлення кінцівки. Це спонукало науковців упродовж останніх десятиліть до пошуку нетрадиційних стратегій втручання.

Сьогодні успішною для прискорення ремієлінізації виявилася клітинна терапія, яка тестувалася на тваринних моделях окремо або в поєднанні з магнітним націлюванням [7].

Зокрема, прогрес у клітинній терапії пов'язаний із використанням клітин Шванна, мезенхімальних стовбурових клітин, стромальних стовбурових клітин кісткового мозку та клітин-попередників шкіри [7]. При цьому, стовбурові клітини МСК можуть секретувати різні фактори росту та підтримувати як нервові клітини, так і клітини Шванна.

Паралельно із структурним медичним відновленням травматичних ушкоджень обов'язковим є реабілітаційне відновлення функцій, активності та участі пацієнтів.

Аналізуючи сучасні підходи до реабілітації при порушенні периферичних нервів нижніх кінцівок, виявлені найефективніші науково доказові методи та засоби фізичної терапії, серед яких кінезіотерапія, механотерапія, сенсорні кросс-модальні стратегії, різні види електростимуляції, кінезіотейпування тощо.

Основна мета застосування кінезіотерапії залежить від реабілітаційного періоду, а серед загальних завдань є створення умов для повторної реінервації відповідних органів-мішеней, підтримання та відновлення нормальної амплітуди рухів в суглобах нижньої кінцівки, попередження розвитку м'язових атрофій, зниження рівня прояву болю, покращення обмінних процесів та зниження набряку, підвищення м'язової сили та витривалості.

Серед засобів кінезіотерапії ключова роль належить пасивним терапевтичним вправам, які виконуються у суглобах із денервованими м'язами, активно-пасивним та активним терапевтичним вправам для тих суглобів, рух у яких частково або повністю збережений.

За відсутності самостійних рухів у нижній кінцівці ефективними є механотерапевтичні засоби, які дозволяють підтримувати амплітуду рухів у знерухомлених суглобах. Зокрема, сьогодні ефективним у нейрореабілітації пацієнтів із порушенням функцій малогомілкового нерва, яке супроводжується падінням стопи, є тренування зі зворотним зв'язком, яке включає відпрацювання підошовного та тильного згинання із застосуванням роботизованого екзоскелету (HAL). Він включає інтерактивну систему біологічного зворотного зв'язку, яка поєднує м'язи і нервову систему (мозок/периферичні нерви) з HAL [10]. Це дає змогу користувачеві під час довільного тренування спостерігати за власними біоелектричними сигналами від переднього великогомілкового та литкового м'язів у режимі реального часу [11], та здійснювати безпечний біомеханічний рух із збереженням фізіологічного паттерну.

Результати дослідження вказують, що використання гомілковостопного HAL покращує рух, перетворюючи довільну м'язову активність користувача у фактичний рух. Завдяки багаторазовому виконанню конкретних завдань відбувається відновлення або реструктуризація відповідного рухового навчання пропроцесивного зворотного зв'язку, що суттєво покращує функціональні можливості пацієнтів [11].

Для підтримання сили м'язів у програму реабілітації, за умови відсутності протипоказань, включаються ізометричні вправи.

Основними вправами стають аеробні, силові та функціональні вправи, спрямовані на відновлення повноцінного самостійного функціонування з урахуванням обмежень та протипоказань. А саме, у результаті наукового пошуку встановлено, що аеробні вправи різної інтенсивності із застосуванням тренажерних пристроїв здійснюють позитивний регенеративний вплив на нервову і м'язову тканину, та підвищують швидкість проростання аксональної кулки.

Зокрема, науковцями доведена ефективність аеробних вправ на бігівій доріжці при травматичному ушкодженні периферичних нервів, але на тривалість відновлення нервів та повернення функції денервованих м'язів вирішальне значення має час їх застосування. Це пов'язано із низкою складних процесів, зокрема функціонуванням сателітних клітин.

Відомо, що стовбурові клітини скелетних м'язів, або сателітні клітини є критично важливими для росту міофібрил після пошкодження периферичних нервів, яке супроводжується денервацією м'язів.

Їх рання активація може впливати на м'язову гіпертрофію [12]. Доведено, чим триваліша денервація м'язів, тим вищий ризик розвитку їх атрофії. При цьому, довготривала денервація виснажує пул сателітних клітин і поступово зменшує їх популяцію у скелетних м'язах [13], що ще раз підкреслює значущість раннього реабілітаційного втручання.

Упродовж останніх десятиліть науковцями був здійснений порівняльний аналіз впливу вправ на бігівій доріжці, розпочатих при перших ознаках реінервації м'язів, з ефективністю відстроченого їх застосування після пошкодження периферичного нерва.

Двотижнева щоденна рухова активність помірної інтенсивності, розпочата через три дні після нейротомезису та відновлення нерва, сприяла активному росту аксонів [14], що прискорює процес реінервації цільових м'язів.

У експериментальних дослідженнях на моделях гризунів вивчалася терапевтична дія аеробних вправ низької інтенсивності на хронічні пластичні зміни після перерізання сідничного нерва з довгим проміжком (10мм), які розпочиналися у пізньому періоді реабілітації. Доведено, що вправи на бігівій доріжці суттєво полегшують регенерацію нервів і запобігають атрофії м'язів, покращуючи, таким чином, сенсомоторні функції та продуктивність ходьби, а також зменшують запалення пошкодженого нерва [12].

Зокрема, при аналізі процесів ремієлінізації аксонів у щурів, які виконували фізичні вправи, регеновані нейронні волокна були більшими за розміром та мали товстішу мієлінову оболонку у порівнянні з тими гризунами, які вправи не виконували.

Виявлені також об'ємні, мікроструктурні, метаболічні та нейрональні зміни активності в супраспинальних регіонах (соматосенсорна кора, моторна кора, гіпокамп тощо) та можливості позитивних змін неадаптивної пластичності під час виконання бігу на доріжці [12].

Доведено також, що регулярне аеробне тренування низької інтенсивності на бігівій доріжці навіть при відстроченій у часі реабілітації сприяє локальному збільшенню щільності сателітних клітин у денервованих м'язах [12], що є сприятливим фактором для гіпертрофії [15].

Плавання після пошкодження сідничного нерва, яке виконувалися щурами щоденно упродовж 30 хвилин протягом 2 тижнів в гострому та пізньому періодах після аксонотомезису, призвели до регенерації нервових волокон, збільшенню діаметру аксона та нервових волокон, та сприяли синаптичному усуненню [16].

Таким чином, виконання фізичних вправ є найважливішою реабілітаційною інтервенцією у відновленні пацієнтів із пошкодженнями периферичних нервів, і ефективно незалежно від часу початку їх застосування.

Не менш важливим стало вивчення ефективності застосування різних програм фізичних вправ для пацієнтів за статевою ознакою.

Науково підтверджено, що екзогенне застосування пацієнтами андрогенів впливає на експресію нейротрофічного фактора мозку (BDNF) і його рецептора *trkB*, що посилює регенерацію аксонів після їх пошкодження. Такий же фізіологічний ефект

спостерігається при систематичному фізичному тренуванні. Зокрема доведено, що фізичні вправи призводять до збільшення експресії BDNF у різних областях мозку і в мотонейронах спинного мозку та в нейронах, аксони яких регенерують і передають сигнали через рецептори андрогенів [17].

Враховуючи гормональний вплив на ефективність відновлення нервів після їх пошкодження, нами проаналізовані праці науковців, які вивчали дію різних програм фізичних вправ на травмованих різної статеві приналежності. Важливими при вивченні впливу унікальних змінних у регенерації периферичних нервів для оптимізації лікування та відновлення залишаються дослідження, проведені на тваринах.

Так, швидкій регенерації аксонів у самців сприяла програма аеробних циклічних вправ - безперервна повільна ходьба на біговій доріжці упродовж години щоденно зі швидкістю приблизно 10 м/с. Науковцями було висунуто припущення, що така програма призвела до подовження регенеруючих аксонів за рахунок збільшення гонадних андрогенів (підвищення рівня тестостерону у сироватці крові), які в поєднанні з активністю моторних і сенсорних нейронів посилюють нейрональну експресію BDNF і його рецептора *trkB*. У кастрованих щурів безперервне тренування не мало такого ефекту [18].

Для самок ефективним виявився режим інтервального тренування: короткий спринт зі швидкістю 20 м/с упродовж 2 хвилини з наступним 5-тихвилинним періодом відпочинку, які повторювалися 4 рази.

Ефективність інтервальних тренувань для жінок може бути результатом експресії андрогенних рецепторів скелетних м'язів, інгібування ароматази, яка стимулює локальний вплив андрогенів на регенеруючі аксони. Доведено також, що для чоловіків такий режим виявився неефективним [18].

Фізичні вправи не тільки прискорюють регенерацію аксонів та функціональну реінервацію [19], а й є ефективним засобом зниження рівня прояву болю при ушкодженнях периферичних нервів, впливаючи на декілька областей коркових ділянок, які відповідають за висхідні шляхи, зони опрацювання та гальмівні низхідні шляхи болю.

Зокрема, у дослідженнях Kami et al. (2020) доведений регулюючий вплив фізичних вправ на активність збудливих/гальмівних нейронів у лімбічній зоні мозку, який має вирішальне значення для емоційного аспекту хронічного болю, такого як страх, тривога та депресія [20].

Не менш ефективним засобом впливу на стан м'язів та периферичних нервів при їх ушкодженні має електростимуляція.

Аналіз результатів наукових досліджень вказує на те, що на сьогодні питання часового профілю щодо початку застосування електричної стимуляції після травми периферичного нерва залишається дискусійним.

Вивчення впливу різних профілів часу застосування високо- або низькочастотної електростимуляції дозволило встановити, що як раннє, так і пізнє проведення електростимуляції високої частоти призводить до суттєвого покращення рухової функції, ніж низькочастотна.

Так, досліджуючи комбінований вплив електричної стимуляції і фізичних вправ різної інтенсивності на нейронну активність в процесі регенерації аксонів при пошкодженні периферичного нерва, групою авторів встановлено, що тварини, які отримували електропроцедури у гострому періоді та/або виконували бігові вправи на доріжці, мали високий рівень реінервації м'язів і збільшення кількості регенерованих мієлінізованих аксонів [21].

На протидію попереднім даним, у наукових працях Gigo-Benato D. et al. (2010) зазначено, що щоденне застосування електричної стимуляції під час аксонального відновлення вздовж дистальної кукси нерва може здійснювати гальмівну дію на функціональне нервово-м'язове відновлення [22].

Також негайна високочастотна електростимуляція показала високий потенціал для виникнення у пацієнтів нейропатичного болю, що підкреслює доречність відстрочення щодо її застосування для полегшення регенерації нерва без збільшення ризику нейропатичного болю [23].

Групою інших науковців зазначено, що для досягнення ефективного клінічного результату застосування електростимуляції має оптимальне часове вікно, яке триває від першого до 21 дня після пошкодження [23]. При затримці стимуляції більше ніж на 3 місяці ознак посилення реінервації м'язів вже не спостерігається.

В залежності від механізму ушкодження нерва, електростимуляція може чинити різний вплив на його регенерацію.

Наприклад, при розтрощенні нерва електрична стимуляція може мати шкідливий вплив на його відновлення, зменшувати збудливість м'язів, експресію молекули адгезії нейронних клітин, цілісність нервово-м'язових з'єднань і площу поперечного перерізу м'язового волокна [22]. Також, за висновками Love F.M., Son Y.J., Thompson W.J. (2003), електростимуляція на частково інерованому м'язі несприятливо впливає на решту неушкоджених нервів, оскільки формування нервових зв'язків з м'язом відбувається у асинхронізований спосіб, а проведення у цей час стимуляції компрометує функціональну реінервацію.

Таким чином, в ході аналізу науково-методичної літератури доведено, що ES є прогресивним допоміжним методом терапії, який сприяє прискоренню регенерації аксонів і функціональному відновленню травмування периферичних нервів.

Сучасні реабілітаційні стратегії у функціональному відновленні нижніх кінцівок після пошкодження периферичних нервів різного ступеня зосереджуються на модуляції центральних нервових процесів [6], яка передбачає перекартування кори головного мозку. «Тиха зона», яка утворюється у корі при денервації м'язів – мішеней, потребує постійної стимуляції.

З цією метою для підтримання активності нейронної системи застосовують різні реабілітаційні інтервенції: сенсорне перенавчання; сенсорне перенавчання, засноване на діяльності [24] та різні форми крос-модальних стратегій сенсорної заміни [8].

Уперше методику сенсорного відновлення у наукову практику було впроваджено Wynn-Parry and Salter (1976).

Серед методик сенсорного перенавчання застосовуються зорове спостереження та зорово-тактильне навчання, а також моторні образи.

У дослідженнях, опублікованих Bassolino M., Campanella M., Bove M. (2014) зазначається, що з метою запобігання пригнічення кори головного мозку у практиці фізичного терапевта ефективно застосовується зорове спостереження за виконання рухових дій. Така реабілітаційна стратегія підвищує нейронну активність у ланцюгу «кора великих півкуль - спинний мозок - периферичні нерви, які інervують м'язи, функція яких порушена [26].

У подальшому увага науковців була зосереджена на комплексному застосуванні візуального спостереження та електростимуляції пошкоджених нервів. Зокрема, Bisio et al. (2015) запропонував пацієнтам під час візуального спостереження за тими моделями рухів, виконання яких неможливе, паралельно застосовувати електростимуляцію пошкодженого нерва. Така комбінація призвела до підвищення пластичності моторної кори великих півкуль та активізації сенсорної їх зони [27].

За рекомендаціями Evertsson L., Carlsson C., Turesson C., Ezer M.S. (2023) у найкоротший час після отримання травми периферичного нерва у програму реабілітаційного втручання необхідно включати методики раннього сенсорного перенавчання [25], які включають зорово-тактильні стратегії - тактильне подразнення [6]. Її застосування сприяє підвищенню активності кортикальної зони нижньої кінцівки. Методика полягає у спостереженні пацієнтом за власною кінцівкою під час тактильного її подразнення фізичним терапевтом. Окрім того, для створення ілюзії дотику на кінцівці із травмованим нервом, методика тактильного подразнення поєднується із дзеркальною терапією.

Ефективними у напрямку активізації моторної зони вважають також моторні образи - це активний процес внутрішнього відтворення у робочій пам'яті репрезентації дії без будь-якого явного руху [6].

Дія - це засіб, за допомогою якого людина взаємодіє або реагує на зовнішній світ.

Дію можна описати як кінцевий результат опрацювання сенсорної інформації: намір, програмування, підготовка та виконання. Зокрема, цілеспрямована дія є внутрішньо генерованою, і тому включає моторне уявлення (образ) (Jeannerod, 1997).

Існують наукові підтвердження функціонального взаємозв'язку між наміром, імітацією, спостереженням і виконанням дії, які лягли в основу концепції спільних моторних уявлень (Gallese and Goldman, 1998) для пояснення вродженої системи взаємозалежності сприйняття та планування рухових дій.

Так, під час розумової візуалізації певної рухової дії травмованою кінцівкою каталізується процес її функціонального відновлення через активацію або модуляцію кіркових карт, навіть якщо у ній рух фізично неможливий [24, 26].

Прикладом такої активізації є дослідженнями Jacobsen E. (1931), який експериментальним шляхом довів, що при свідомій розумовій імітації згинання руки у ліктьовому суглобі відбувається активізація двоголового м'язу плеча.

Окрім того, уявне відтворення моторних образів викликає відповідні вегетативні реакції, які характерні для реальної рухової активності. При цьому, рівень прояву вегетативних реакцій (зокрема ЧСС, споживання кисню, ЧД тощо) при виконанні уявного рухового завдання прямо пропорційний ступеню докладених зусиль. Таким чином, уявне відтворення моторних образів активізує відповідні м'язові паттерни та нейронні процеси таким чином, ніби рухова дія дійсно виконується.

Таким чином, відтворюючи подумки втрачений рух, моторна візуалізація сприяє відновленню змінених карт кори головного мозку до їх початкових уявлень і зберігає цілісність сусідніх ділянок [24].

Вважається, що дана форма сенсорного перевищання може бути ефективно застосована для пацієнтів також і у передопераційний період з метою полегшення післяопераційного відновлення.

Чіткий зворотній зв'язок головного мозку і нижньою кінцівкою з пропріорецептивним та тактильним введенням відповідають за регуляцію руху. Менш важливими є отримання інформації головним мозком про тактильні відчуття під час функціонального дотику. Ефективним засобом відновлення такого сенсомоторного контролю є функціональне тренування, заснованого на діяльності, із багаторазовим повторенням вправи та використанням ефективного зворотного зв'язку [29]. Моторне перенавчання використовується для повторного засвоєння рухових паттернів, відновлення м'язового дисбалансу та моторного кортикального пере налаштування.

Обговорення результатів. Військовий конфлікт призводить до збільшення кількості травм периферичних нервів, зокрема нижніх кінцівок, що обумовлене відсутністю елементів індивідуального засобів захисту цих сегментів тіла, та застосуванням великої кількості вибухових боєприпасів, більшість з яких закладається у поверхневого ґрунті. Одним із наслідків травматичної дії різних видів вибухових снарядів є пошкодження нервів нижніх кінцівок, наслідком якого є периферичні моно- або поліневропатії. Клінічні симптоми кожної з них залежить від виду ушкодженого нерва (сідничного, велико- та малогомілкового нерву), типу нервового волокна (моторні, сенсорні, вегетативні) та їх комбінації, та ступеня пошкодження (нейрапраксія, аксонотмезис та нейротмезис). Серед ключових проблем пацієнта, які впливають на рівень їх функціональної активності, найбільш поширеними є зниження м'язової сили (або параліч) та м'язового тонуусу, порушення амплітуди рухів у суглобах нижніх кінцівок, що у сукупності призводить до зміни паттерну ходьби і провокує подальший розвиток ортопедичних ускладнень, а також порушення стабілізації суглобів, статичної та динамічної рівноваги. Окрім того, пацієнти скаржаться на біль

Ключову роль у функціональному відновленні пацієнтів із невропатіями периферичних нервів нижніх кінцівок відіграє нейрореабілітація, яка дозволяє, починаючи із гострого періоду, зберігати фізіологічну амплітуду рухів, силу та тонус відповідних м'язів, та підтримувати активність кортикального поля нижньої кінцівки, що має чіткий взаємозв'язок із функціональним відновленням таких пацієнтів.

Серед ключових реабілітаційних інтервенцій провідна роль належить кінезіотерапії, основними завданнями якої є профілактика м'язових атрофій та суглобових контрактур, порушень ключових моторних паттернів. Серед засобів кінезіотерапії ефективними є пасивні вправи, які можуть виконуватися самим пацієнтом, фізичним терапевтом, або за допомогою роботизованих пристроїв. Зокрема, науково доведено, що роботизовані екзоскелети (HAL) з біологічним зворотним зв'язком не тільки знижують ризики розвитку вторинних ускладнень, а й підтримують кортикальну активність головного мозку [10, 11].

Для підтримання рівня загальної витривалості та підвищення рівня функціонування рекомендовано силові та аеробні вправи. Найпершими серед силових рекомендовано виконувати ізометричні вправи.

Науково доведено, що аеробні вправи різної інтенсивності значно полегшують аксональну регенерацію, а також запобігають м'язовим атрофіям, покращують обмін речовин та зменшують запальні процеси в області травми, покращують сенсомоторні функції та продуктивність ходьби [12]. Порівняльна характеристика швидкості регенерації периферичних нервів на моделях щурів дозволила встановити, що темп виконання терапевтичних вправ та метод їх організації мають відмінності за статевою ознакою. Зокрема, швидкій регенерації аксонів у самців сприяли аеробні циклічні вправи, які виконувалися на біговій доріжці у повільному темпі [18]. Для щурів жіночої статі більш ефективним виявилось інтервальне тренування, яке включало швидкісні переміщення із 5-тихвилинними інтервалами відпочинку.

У сучасній реабілітаційній практиці для прискорення регенерації нервів та повторної цільової реінервації органів-мішеней, а також зменшення невропатичного болю ефективно застосовується електрична стимуляція. У пацієнтів, які отримали процедури електростимуляції, спостерігалася суттєвий рівень зворотної м'язової реінервації та більша кількість відновлених мієлінізованих аксонів [30].

Науково доведено, що тривале знерухомлення сегменту кінцівки призводить до зниження кортикальної активності відповідної зони головного мозку, що впливає на подальше функціональне відновлення пацієнтів. Серед ефективних реабілітаційних стратегій для підтримання нейронної активності у відповідній корковій зоні кори застосовують: сенсорне перенавчання, серед яких зорово-тактильні практики, що передбачають тактильне подразнення різними текстурами, предметами різної температури із різною силою тиску [6]; сенсорне перенавчання, засноване на діяльності [24], під час якого пацієнт багаторазово відпрацьовує функціональні рухи, та різні методики сенсорної заміни [25].

Ефективність кожного із перерахованих засобів та методів реабілітаційного втручання доведеною науково-практичним шляхом, отже може бути застосовано у клінічних умовах медичних закладів.

Висновки.

1. Серед бойових поранень військовослужбовців найбільш поширеним є вибуховий механізм ураження (до 75 %), у результаті якого спостерігаються надскладні поранення із локалізацією у нижніх кінцівках. Одним із частих наслідків бойового поранення є

нейропатія периферичних нервів (одного або декількох), яка розвивається унаслідок травматичного пошкодження периферичних нервів (стиснення, розчавлення, частковий або повний перетин). Прояв клінічних симптомів залежить від ступеня пошкодження (нейрапраксія, аксонотмезис, нейротмезис), виду нерва (сідничний, велико- та малогомілковий) та типу нервових волокон (моторних, сенсорних та вегетативних) або їх сукупності.

2. Серед сучасних засобів реабілітаційного втручання, спрямованих на максимально можливе функціональне відновлення пацієнтів та зниження ризику розвитку супутніх ускладнень, застосовують кінезіотерапію (пасивні, активно-пасивні та активні вправи), механотерапію, електростимуляцію, різні форми сенсорного перенавчання та кросс-модальні стратегії. Кожен із вище зазначених засобів та методів фізичної терапії спрямований на вирішення локального завдання, а сукупне їх застосування значно підвищує шанси пацієнтів на одужання та повноцінне функціонування.

Перспективи подальших досліджень вбачаємо у проведенні реабілітаційного обстеження військовослужбовців із травматичними пошкодженнями периферичних нервів нижніх кінцівок, отриманих внаслідок вибухового ураження, та формулюванні їх категоріального профілю згідно МКФ.

References.

1. Soto PA, Fernández van Raap MB, Setton-Avruj CP. The best of both worlds: mastering nerve regeneration combining biological and nanotechnological tools. *Neural Regen Res.* 2023;18(3):556-557. doi: 10.4103/1673-5374.350201.
2. Lavorato A, Aruta G, De Marco R, Zeppa P, Titolo P, Colonna MR, Galeano M, Costa AL, Vincitorio F, Garbossa D, Battiston B. Traumatic peripheral nerve injuries: a classification proposal. *J Orthop Traumatol.* 2023;24(1):20. doi: 10.1186/s10195-023-00695-6.
3. Guriev SO, Kukuruz Ya., Yalovenko VA et al. Analiz dosvidu likuvannia vognepal'nyh poranen' kintsivok. *Ekstrena medytsyna: vid nauky do praktyky.* 2014;2:25-32.
4. Konwinski RR, Singh A, Soto J. Imaging of lower extremity trauma from Boston Marathon bombing. *Emerg Radiol.* 2016;23:433-437. doi: 10.1007/s10140-016-1414-1.
5. Poage C, Roth C, Scott B. Peroneal Nerve Palsy: Evaluation and Management. *J Am Acad Orthop Surg.* 2016;24(1):1-10. doi: 10.5435/JAAOS-D-14-00420.
6. Lundborg G, & Rosén B. Hand function after nerve repair. *Acta Physiologica.* 2007;189, 207-217. 10.1111/j.1748-1716.2006.01653.x
7. Kubiak CA, Grochmal J, Kung TA, Cederna PS, Midha R, Kemp SWP. Stem-cell-based therapies to enhance peripheral nerve regeneration. *Muscle Nerve.* 2020;61(4):449-459. doi: 10.1002/mus.26760.
8. Bage T, Power DM. Iatrogenic peripheral nerve injury: a guide to management for the orthopaedic limb surgeon. *EFORT Open Reviews.* 2021;6(8):607- 617. PMID:34532069.
9. Armada-da-Silva PA, Pereira C, Amado S, Veloso AP. Role of physical exercise for improving posttraumatic

- nerve regeneration. *Int Rev Neurobiol.* 2013;109:125–149.
10. Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, et al. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. *J. Spinal Cord Med.* 2019;42:517–525. doi: 10.1080/10790268.2018.1525975.
 11. Soma Y, Tokunaga K, Kubota S, Muraoka M, Watanabe S, Sakai M, Ohya W, Arakawa D, Sasage T, Yamazaki M. New Neuromuscular Training for Peripheral Nerve Disorders Using an Ankle Joint Hybrid Assistive Limb: A Case Series. *Medicina (Kaunas).* 2023;59(7):1251. doi: 10.3390/medicina59071251.
 12. Kong Y, Kuss M, Shi Y, Fang F, Xue W, Shi W, Liu Y, Zhang C, Zhong P, Duan B. Exercise facilitates regeneration after severe nerve transection and further modulates neural plasticity. *Brain Behav Immun Health.* 2022;26:100556. doi: 10.1016/j.bbih.2022.100556.
 13. Wong A, Pomerantz JH. The Role of Muscle Stem Cells in Regeneration and Recovery after Denervation: A Review. *Plast Reconstr Surg.* 2019;143(3):779-788. doi: 10.1097/PRS.00000000000005370.
 14. Gordon T, English AW. Strategies to promote peripheral nerve regeneration: electrical stimulation and/or exercise. *Eur J Neurosci.* 2016;43(3):336-50. doi: 10.1111/ejn.13005.
 15. Bazgir B, Fathi R, Rezazadeh Valojerdi M, Mozdziaik P, Asgari A. Satellite Cells Contribution to Exercise Mediated Muscle Hypertrophy and Repair. *Cell J.* 2017;18(4):473-484. doi: 10.22074/cellj.2016.4714.
 16. Maugeri G, D'Agata V, Trovato B, Roggio F, Castorina A, Vecchio M, Di Rosa M, Musumeci G. The role of exercise on peripheral nerve regeneration: from animal model to clinical application. *Heliyon.* 2021;7(11):e08281. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08281.
 17. Thompson NJ, Sengelaub DR, English AW. Enhancement of peripheral nerve regeneration due to treadmill training and electrical stimulation is dependent on androgen receptor signaling. *Dev Neurobiol.* 2014;74(5):531-40. doi: 10.1002/dneu.22147.
 18. Wood K, Wilhelm JC, Sabatier MJ, Liu K, Gu J, English AW. Sex differences in the effectiveness of treadmill training in enhancing axon regeneration in injured peripheral nerves. *Dev Neurobiol.* 2012;72(5):688-98. doi: 10.1002/dneu.20960.
 19. Wilhelm JC, Xu M, Cucoranu D, Chmielewski, Holmes T, Lau KS, Bassell GJ, English AW. Cooperative roles of BDNF expression in neurons and Schwann cells are modulated by exercise to facilitate nerve regeneration. *The Journal of Neuroscience : the Official Journal of the Society for Neuroscience.* 2012; 32(14):5002-5009. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1411-11.2012>
 20. Kami K, Tajima F, Senba E. Plastic changes in amygdala subregions by voluntary running contribute to exercise-induced hypoalgesia in neuropathic pain model mice. *Mol Pain.* 2020;16:1744806920971377. doi: 10.1177/1744806920971377.
 21. Elena Asensio-Pinilla, Esther Udina, Jessica Jaramillo, Xavier Navarro. Electrical stimulation combined with exercise increase axonal regeneration after peripheral nerve injury. *Experimental Neurology.* 2009;219(1):258-265. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2009.05.034>
 22. Gigo-Benato D, Russo TL, Geuna S, Domingues NR, Salvini TF, Parizotto NA. Electrical stimulation impairs early functional recovery and accentuates skeletal muscle atrophy after sciatic nerve crush injury in rats. *Muscle Nerve.* 2010;41(5):685–693. doi: 10.1002/mus.21549.
 23. Su HL, Chiang CY, Lu ZH, Cheng FC, Chen CJ, Sheu ML, Sheehan J, Pan HC. Late administration of high-frequency electrical stimulation increases nerve regeneration without aggravating neuropathic pain in a nerve crush injury. *BMC Neurosci.* 2018;19:37. doi: 10.1186/s12868-018-0437-9.
 24. Macuga KL, & Frey SH. Neural representations involved in observed, imagined, and imitated actions are dissociable and hierarchically organized. *NeuroImage.* 2012; 59, 2798–2807. [10.1016/j.neuroimage.2011.09.083](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.083)
 25. Evertsson L, Carlsson C, Turesson C, Ezer MS, Arner M, Navarro CM. Incidence, demographics and rehabilitation after digital nerve injury: A population-based study of 1004 adult patients in Sweden. 2023;18(4):e0283907. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283907>
 26. Bassolino M, Campanella M, Bove M, Pozzo T, Fadiga L. Training the motor cortex by observing the actions of others during immobilization. *Cereb Cortex.* 2014;24(12):3268-76. doi: 10.1093/cercor/bht190.
 27. Bisio A, Avanzino L, Lagravinese G, Biggio M, Ruggeri P, Bove M. Spontaneous movement tempo can be influenced by combining action observation and somatosensory stimulation. *Front Behav Neurosci.* 2015;9:228. doi: 10.3389/fnbeh.2015.00228.
 28. Lu Y, Liu H, Hua X, Xu WD, Xu J., Gu YD. Supplementary motor cortical changes explored by resting-state functional connectivity in brachial plexus injury. *World Neurosurgery.* 2016; 88, 300–305. [10.1016/j.wneu.2015.12.036](https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.12.036)
 29. Novak CB, von der Heyde RL. Rehabilitation of the upper extremity following nerve and tendon reconstruction: when and how. *Semin Plast Surg.* 2015; 29(1): 73-80. doi: 10.1055/s-0035-1544172.
 30. Su HL, Chiang CY, Lu ZH, Cheng FC, Chen CJ, Sheu ML, Sheehan J, Pan HC. Late administration of high-frequency electrical stimulation increases nerve regeneration without aggravating neuropathic pain in a nerve crush injury. *BMC Neurosci.* 2018;19(1):37. doi: 10.1186/s12868-018-0437-9.

UDK 738.147:615.8-051]:355.1-057.36

**MODERN REHABILITATION INTERVENTIONS
IN THE PHYSICAL THERAPY OF MILITARY
SERVICEMEN WITH TRAUMATIC DAMAGE TO
THE PERIPHERAL NERVES OF THE LOWER
EXTREMITIES**O.O. Bespalova¹, A.M. Sitovskiy², O.O. Yakobson²,
V.V. Stepanenko², I.V. Savchuk³²*Lesya Ukrainka Volyn National University,
Lutsk, Ukraine*¹*Sumy State Pedagogical University named after
A.S. Makarenko, Sumy, Ukraine,*³*Private Higher Education Institution Academy of
Recreational Technologies and Law, Luts, Ukraine*

ORCID ID: 0000-0002-0081-6021,

e-mail: i-ozon777@i.ua

ORCID ID: 0000-0002-7434-7475,

e-mail: andriy.sitovskiy@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-7340-2014,

e-mail: Jacobson.Helen@vnu.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-8361-5507,

e-mail: stlsmu@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-5724-0078,

e-mail: savthuk.viva@gmail.com

Abstract. Purpose: theoretical analysis of the effectiveness of the use of modern means of physical therapy in the rehabilitation of servicemen with damage to the peripheral nerves of the lower extremities.

Methods. theoretical methods: scientific search, analysis and systematization of modern theoretical data regarding the peculiarities of gunshot wounding of the peripheral nerves of the lower extremities, and practical knowledge and conclusions regarding the effectiveness of the use of key rehabilitation interventions.

The results. The military conflict leads to an increase in the number of injuries to peripheral nerves, in particular to the lower extremities, due to the lack of elements of individual means of protection of these body segments, and the use of a large number of explosive ammunition, most of which are planted in the surface soil. One of the consequences of the traumatic effect of various types of explosive shells is damage to the nerves of the lower extremities, the result of which is peripheral mono- or polyneuropathies. The clinical symptoms of each of them depends on the type of damaged nerve (sciatic, great

and fibular nerve), the type of nerve fiber (motor, sensory, autonomic) and their combination, and the degree of damage (neurapraxia, axonotmesis and neurotmesis). Among the key problems of the patient, which affect the level of their functional activity, the most common are a decrease in muscle strength (or paralysis) and muscle tone, a violation of the amplitude of movements in the joints of the lower extremities, which collectively leads to a change in the walking pattern and provokes further development of orthopedic complications, as well as disruption of joint stabilization, static and dynamic balance. In addition, patients complain of pain

A key role in the functional recovery of patients with peripheral neuropathies of the lower extremities is played by neurorehabilitation, which allows, starting from the acute period, to preserve the physiological amplitude of movements, the strength and tone of the corresponding muscles, and to maintain the activity of the cortical field of the lower extremity, which has a clear relationship with functional recovery of such patients.

Among the modern means of rehabilitation intervention, aimed at the maximum possible functional recovery of patients and reducing the risk of developing associated complications, kinesiotherapy (passive, active-passive and active exercises), mechanotherapy, electrical stimulation, various forms of sensory retraining and cross-modal strategies are used. Each of the above-mentioned means and methods of physical therapy is aimed at solving a local problem, and their combined use significantly increases the chances of patients' recovery and full functioning.

Conclusions. Among the combat injuries of military personnel, the most common is the explosive mechanism of injury (up to 75%), as a result of which there are extremely complex injuries localized in the lower extremities. One of the frequent consequences of a combat wound is neuropathy of the peripheral nerves, which are accompanied by motor and sensory disturbances. Physical therapy using modern evidence-based rehabilitation interventions reduces the risk of developing secondary post-traumatic complications, and creates conditions for the maximum possible functional recovery and improvement of the quality of life of servicemen.

Keywords: military personnel, blast injury, peripheral nerves, neuropathy, functional recovery, rehabilitation interventions, therapeutic exercises, mechanotherapy, electrical stimulation, sensory re-education.

Стаття надійшла в редакцію 10.01.2024 р.

Стаття прийнята до друку 03.03.2024 р.