

ОГЛЯДИ ТА РЕЦЕНЗІЇ

УДК 616-089.873:616.8-009.627](045)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-59872025283-91>**Способи реіннервації після ампутацій у пацієнтів із наслідками бойових уражень (огляд літератури)****О. А. Бур'янов¹, О. О. Смик², М. С. Саленко²**¹ Національний медичний університет ім. О. О. Богомольця, Київ. Україна² Військово-медичний клінічний лікувально-реабілітаційний цент, Ірпінь. Україна

The full-scale aggression of the Russian Federation against Ukraine has significantly increased the number of cases and the structure of factors leading to the performance of such surgical interventions as amputation. There are no reliable statistics on the number of limb amputations performed since the beginning of the full-scale invasion of the Russian Federation into the territory of Ukraine due to objective factors, however, according to preliminary estimates, their number exceeds 50 thousand people. One of the significant problems after limb amputations is pain syndrome, which is observed in 60 to 86 % of patients, which is divided into two types: residual limb pain (RLP) and phantom limb pain (PLP). This problem is relevant for modern world orthopedics and traumatology, the solution of which requires a multidisciplinary approach, and further study will allow to improve treatment tactics and improve the final results. The purpose was to determine the optimal surgical technologies for performing amputations in victims with combat injuries and analyze modern reinnervation methods by studying literary sources. Methods. An assessment of modern publications, systematic reviews, and current recommendations published recently was conducted, which are devoted to methods of treatment and prevention of neuroma formation in limb amputations. A search was conducted in the PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar, databases using the following terms: «amputation», «RPNI», «VDMT», «TMR», «phantom», «clinical effectiveness», «post-amputation pain», «BNA», «ANA», «RLP», «PLP», «stump neuroma», «symptomatic neuroma», «pain neuroma». Relevant articles were included after reading the full text and determining the necessary parameters. The review was prepared in accordance with the recommendations of the “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines”. Conclusions. The results of scientific studies indicate that reinnervation methods (TMR, RPNI, VDMT) are clinically more effective than traditional amputation. These methods can be used with equal effectiveness both for the prevention of late post-amputation complications (symptomatic neuromas, phantom limb pain, residual limb pain) and for their treatment. Keywords. Polystructural limb injuries, amputations, reinnervation methods.

Повномасштабна агресія російської федерації проти України суттєво збільшила кількість випадків і змінила показання чинників щодо виконання таких оперативних втручань, як ампутація. Достеменних статистичних даних стосовно кількості проведених ампутацій кінцівок із початку повномасштабного вторгнення немає через об'єктивні фактори, проте за попередніми підрахунками їхня кількість перевищує 50 000 осіб. Однією зі суттєвих проблем після ампутацій кінцівок є больовий синдром, який спостерігається від 60 до 86 % пацієнтів та поділяється на два типи: біль у куксі (RLP — Residual Limb Pain) і фантомний біль у кінцівках (PLP — Phantom Limb Pain). Це питання є актуальним для сучасної світової ортопедії і травматології, його розв'язання потребує мультидисциплінарного підходу, а подальше вивчення дозволить удосконалити лікувальну тактику та покращити кінцеві результати. Мета. Визначити оптимальні хірургічні технології проведення ампутацій у постраждалих із бойовими ураженнями та проаналізувати сучасні реіннерваційні способи шляхом вивчення літературних джерел. Методи. Проведено дослідження сучасних публікацій, системних оглядів, діючих рекомендацій стосовно методик лікування та профілактики утворення невром за ампутацій кінцівок. Здійснено пошук у базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar, за ключовими словами: «amputation», «RPNI», «VDMT», «TMR», «phantom», «clinical effectiveness», «post-amputation pain», «BNA», «ANA», «RLP», «PLP», «stump neuroma», «symptomatic neuroma», «pain neuroma». Огляд підготовлений згідно з рекомендаціями «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines». Висновки. Результати наукових досліджень указують, що реіннерваційні способи (TMR, RPNI, VDMT) є клінічно ефективніші як порівняти з традиційною ампутацією. Ці методики з однаковою продуктивністю можуть застосовуватись як для профілактики пізніх постампутаційних ускладнень (симптоматичні неврони, фантомний або біль безпосередньо в куксі), так і під час їхнього лікування.

Ключові слова. Поліструктурні ушкодження кінцівок, ампутації, способи реіннервації

Вступ

Ампутація — оперативне втручання, яке направлене на усічення кінцівки. Основними її чинниками є судинні захворювання, діабет і захворювання периферичних артерій (54 %), травми (45 %) і онкологічні захворювання (приблизно 2 %). Дослідження з використанням показників із Nationwide Inpatient Sample, найбільшої бази даних про стаціонарну допомогу в Сполучених Штатах Америки, виявили, що майже 115 000 людей потребують ампутації нижніх кінцівок щорічно [1, 2, 20].

Військові конфлікти, які характеризуються застосуванням різноманітної зброї з високою кінетичною енергією, призводять до важких поліструктурних уражень кінцівок (більше 50 %), що унеможливує застосування сучасної реконструктивної хірургії для забезпечення позитивних функціональних результатів серед постраждалих цієї категорії. Так, за даними публікацій щодо поранених учасників антитерористичної операції Об'єднаних сил (АТО/ООС), основною причиною ампутації була мінно-вибухова травма (МВТ) — у 78,4 % випадків. Достеменних статистичних значень стосовно кількості проведених ампутацій кінцівок із початку повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України немає через об'єктивні чинники, проте за попередніми підрахунками їх більше 50 тисяч осіб [1].

Однією зі суттєвих проблем після ампутацій кінцівок є больовий синдром, який спостерігається від 60 до 86 % пацієнтів та поділяється на два типи: біль у куксі (RLP) і фантомний біль у кінцівках (PLP) [9].

PLP клінічно визначається як відчуття болю або дискомфорту в кінцівці, якої немає, а також може проявлятися широким клінічним спектром і різним ступенем тяжкості. Він, раніше відомий як «біль у куксі», є болем, що походить від фактичного місця ампутованої кінцівки, найчастіше виникає в ранньому післяопераційному періоді і має тенденцію зникати в процесі загоєння рани. У більше половини випадків відбувається поєднання цих станів. Чинники розвитку RLP: формування невроми, компресії нерва, ішемія, ушкодження шкіри або інфекція [6, 12].

PLP і RLP є актуальними питаннями з точки зору епідеміології та терапевтичних труднощів. Відомо, що 95 % пацієнтів відчувають біль, пов'язаний з ампутацією, причому 79,9 — фантомний, 67,7 % — безпосередньо в куксі [8].

Ураховуючи викладені проблеми, визначення оптимальних хірургічних технологій проведення ампутації загалом і обробки нервових структур зокрема є актуальним питанням сучасної ортопедії.

Мета: визначити оптимальні хірургічні технології проведення ампутацій у постраждалих із бойовими ураженнями та проаналізувати сучасні реіннерваційні способи шляхом вивчення літературних джерел.

Матеріал і методи

Проведено аналіз сучасних публікацій, системних оглядів, діючих рекомендацій щодо методик лікування та профілактики утворення невром у разі ампутацій кінцівок. Здійснено пошук у базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar за ключовими словами: «amputation», «RPNI», «VDMT», «TMR», «phantom», «clinical effectiveness», «post-amputation pain», «BNA», «ANA», «RLP», «PLP», «stump neuroma», «symptomatic neuroma», «pain neuroma». Огляд підготовлено згідно з рекомендаціями «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines».

Критерії включення: 1) ампутації кінцівок у пацієнтів унаслідок бойової травми; 2) пізні постампутаційні ускладнення, такі як: неврома, фантомний біль, біль у куксі, іннервація рубців; 3) використання реіннерваційних способів: VDMT, TMR, RPNI; 4) статті з рівнем доказовості I–IV; 5) тривалість спостереження не менше року.

Критерії виключення: 1) ампутації внаслідок не бойової травми; 2) рецензії, тези або статті, які не включали достатньо даних; 3) нестандартизовані способи реіннервації.

Відповідно до заданих критеріїв два незалежних дослідники перевірили результати пошуку за назвою, анотацією та повним текстом. Отримані дані включали: першого автора, рівень доказовості, рік публікації, дизайн дослідження, вид ампутації, кількість і вік пацієнтів, реіннерваційні методи.

Метааналіз виконано з використанням пакета Meta для генерування коефіцієнтів ризику для категорійних результатів, середньої різниці для постійних результатів і 95 % довірчих інтервалів (CI).

Отримані результати досліджень із приводу виникнення симптоматичних невром і фантомного больового синдрому в разі ампутацій верхніх і нижніх кінцівок наведені в таблиці 3.

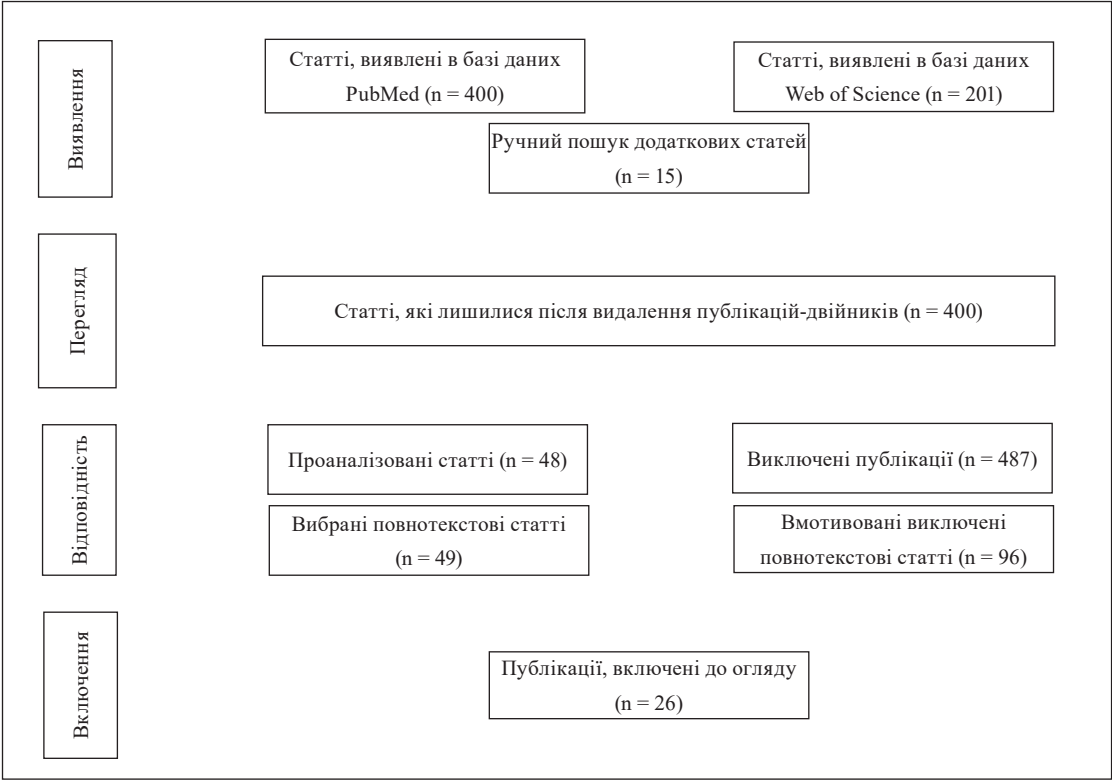


Рисунок. Блок-схема відбору статей для дослідження

Таблиця 1

Дослідження реіннерваційних хірургічних способів

Автор, рік, країна	Характеристика моделей	Спосіб реіннервації
C. S. Best зі співавт., 2024, USA [4]	Ампутації нижніх кінцівок на різних рівнях	RPNI
C. A. Kubiak зі співавт., 2021, USA [14]	Ампутації нижніх кінцівок на різних рівнях	RPNI
J. B. Bowen зі співавт., 2019, USA [5]	Транстібіальні ампутації (BNA)	TMR
S. Pejкова зі співавт., 2022, Northern Macedonia [22]	Ампутації нижніх кінцівок на різних рівнях	RPNI
F. Mereu зі співавт., 2021, Italy [19]	Ампутації верхніх кінцівок	TMR
Z. W. Fulton зі співавт., 2022, USA [10]	Ампутації верхніх і нижніх кінцівок	TMR
P. J. Hanwright зі співавт., 2023, USA [11]	Ампутації нижніх кінцівок	VDMT

Таблиця 2

Аналіз клінічних результатів лікування пацієнтів зі застосуванням різних реіннерваційних способів

Автор, рік, країна	Ампутація	Спосіб реіннервації		Дизайн дослідження
V. Suresh, зі співавт., 2023, USA [25]	Верхніх кінцівок	VDMT — 9	Традиційна ампутація — 4	Ретроспективне
Z. Lin зі співавт., 2023, China [17]	Нижніх кінцівок	RPNI — 7	Традиційна ампутація — 7	Ретроспективне
C. A. Kubiak зі співавт., 2019, USA [15]	Верхніх і нижніх кінцівок	RPNI — 45	Традиційна ампутація — 45	Рандомізоване
E. Pettersen зі співавт., 2024, USA [23]	Верхніх і нижніх кінцівок	TMR — 37 RPNI — 37	Традиційна ампутація — 37	Проспективне

Результати профілактики та лікування пізніх місцевих постампутаційних ускладнень подано в таблиці 4.

Дослідження виникнення ризику повторних операцій після виконання реіннерваційних хірургічних методів і традиційної ампутації (табл. 5).

Таблиця 3

**Результати досліджень із приводу виникнення симптоматичних невром
і фантомного больового синдрому в разі ампутацій кінцівок**

Автор, рік, країна	Характеристика дослідження	Підсумок
C. A. Kubiak зі співавт., 2019, USA [15]	Проаналізовано результати лікування пацієнтів, яким виконано ампутацію з використанням методу RPNI та без нього	Виконання RPNI в осіб з ампутаціями кінцівок привів до меншої частоти як симптоматичних невром, так і фантомного болю в кінцівках порівняно з контрольною групою, якій проводили ампутацію без RPNI. Це свідчить про те, що профілактика симптоматичних невром після ампутації може зменшити центральні механізми болю, які, у свою чергу, призводять до фантомного болю в кінцівках
Z. Linзі співавт., 2023, China [17]	Наведено показники осіб з ампутаціями нижньої кінцівки. Зібрано клінічні дані включно зі загальною інформацією, патологією основного захворювання, історією хірургічного лікування, рівнем невротомії, шкали болю: шкала чисельної оцінки (NRS — Numeric Rating Scale) та Манчестерський індекс болю та інвалідності (MFPDI — Manchester Foot Pain and Disability Index). Через 3 міс. після ампутації за допомогою ультразвуку вимірювали поперечний діаметр, передньо-задній діаметр і площу поперечного перерізу невром кукси, і порівнювали їх із нормальними нервами протилежної кінцівки на тому ж рівні	Показники NRS і MFPDI пацієнтів у групі RPNI були значно нижчими, ніж у групі традиційної ампутації, і зменшувалися зі збільшенням часу спостереження, що вказує на те, що RPNI може зменшити симптоматичний біль за невром
A. L. O'Brien зі співавт., 2022, USA [21]	Проаналізовано дані хворих після ампутації кінцівок із проведенням TMR. Результати включали тяжкість PLP і RLP, про яку повідомляли пацієнти, виміряну за шкалою чисельної оцінки (NRS). Вторинні результати склалися в опитувальники інформаційної системи вимірювання результатів, про які повідомляли пацієнти (PROMIS — Patient-Reported Outcomes Measurement Information System)	Через 3 міс. після операції всі результати PLP і RLP порівнювались з попередньо наданими даними, які продемонстрували перевагу порівняно з ампутаціями без TMR. Лінійний регресійний аналіз змішаної моделі виявив, що показники тяжкості PLP за шкалою NRS продовжували покращуватися протягом періоду дослідження ($p = 0,022$). Решта результатів щодо тяжкості RLP і показників якості життя PROMIS продемонстрували, що ці дані залишалися стабільними протягом періоду дослідження ($p > 0,05$). TMR є ефективною хірургічною процедурою, яка покращує шанси на зменшення RLP і PLP, якщо її виконують під час ампутації
V. Suresh зі співавт., 2023, USA [25]	Розглянуто наслідки лікування пацієнтів, яким виконано ампутацію верхньої кінцівки з використанням методу VDMT, як профілактичного заходу проти утворення невром	Середній термін спостереження становив $(5,6 \pm 4,1)$ міс. (ДІ 0,5–13,2). Середній бал післяопераційного болю становив 1,1 (ДІ 0–8). Це дослідження продемонструвало сприятливі короткострокові результати в осіб, яким виконано VDMT на верхній кінцівці

Обговорення

Неврома виникає за умов пересіченого периферичного нерва, який регенерує, та не має дистальної мішені для реіннервації. Симптоматичні неврони є поширеним чинником болю після ампутації, який може призвести до значної втрати працездатності в осіб молодого віку [4].

Незважаючи на те, що для лікування симптоматичних невром запропоновано багато втручань, звичайні методики спричиняють високу частоту рецидивів, тому залишається значна розбіжність щодо найбільш оптимальної стратегії лікування та профілактики PLP і RLP [14]. Ріннерваційні способи, такі як RPNI (Regenerative Peripheral Nerve Interface), VDMT (vascularized denervated muscle

Таблиця 4

Результати профілактики та лікування пізніх місцевих постампутаційних ускладнень
(виникнення симптоматичних постампутаційних невром, PLP, RLP)

Автор, рік, країна	Flynn критерій, %				Підсумок (порівняно з традиційною ампутацією)
	В	Д	З	НЗ	
C. S. Best зі спіавт., 2024, USA [4]	91,2 (RPNI) 7,1 (TA)	5,4 (RPNI) 5,3 (TA)	2,2 (RPNI) 16,2 (TA)	1,2 (RPNI) 71,4 (TA)	RPNI забезпечує зменшення частоти виникнення як симптоматичних невром, так і фантомного болю в кінцівках
C. A. Kubiak зі спіавт., 2021, USA [15]	93,2 (RPNI) 2,3 (TA)	5,2 (RPNI) 17,3 (TA)	1,6 (RPNI) 12,1 (TA)	— 68,3 (TA)	RPNI забезпечує меншу частоту виникнення симптоматичних невром і фантомного болю в кінцівках
J. B. Bowen зі спіавт., 2019, USA [5]	72,4 (TMR) 32,1 (TA)	22,6 (TMR) 58,6 (TA)	5,0 (TMR) 9,3 (TA)	— —	TMR показав кращі клінічні результати: зменшилась частота виникнення симптоматичних невром, а також інтенсивність фантомного болю
Z. Lin зі спіавт., 2023, China [17]	81,2 (RPNI) 2,9 (TA)	8,4 (RPNI) 67,3 (TA)	10,4 (RPNI) 22,8 (TA)	— 7,0 (TA)	Показники больового синдрому (RLP, PLP) NRS і MFPIDІ пацієнтів у групі RPNI були значно нижчими
A. L. O'Brien зі спіавт., 2022, USA [21]	84,5 (TMR) 3,8 (TA)	14,2 (TMR) 29,1 (TA)	1,3 (TMR) 1,7 (TA)	— 65,4 (TA)	TMR показав кращі клінічні результати: показники тяжкості PLP за шкалою NRS нижчі
V. Suresh зі спіавт., 2023, USA [25]	74,1 (VDMT) 15,3 (TA)	22,5 (VDMT) 13,5 (TA)	3,4 (VDMT) 68,4 (TA)	— 2,8 (TA)	VDMT забезпечує меншу частоту виникнення симптоматичних невром, а також зменшення PLP (за показниками шкали MFPIDІ)

Примітки: В — відмінно; Д — добре; З — задовільно; НЗ — незадовільно.

Таблиця 5

Ризик повторних хірургічних втручань після виконання
реіннерваційних хірургічних методик (TMR,VDMT, RPNI) та традиційної ампутації

Автор, рік, країна	Ризик повторних хірургічних втручань за Flynn критерієм, %		Підсумок
	традиційна ампутація	реіннерваційні методи (RPNI, VDMT, TMR)	
C. S. Best зі спіавт., 2024, USA [4]	37,2	2,4	Забезпечують менший ризик повторного хірургічного втручання з приводу пізніх постампутаційних ускладнень (симптоматичні невроми)
P. J. Hanwright зі спіавт., 2023, USA [11]	27,4	2,6	Приводять до меншого ризику повторної операції з приводу пізніх постампутаційних ускладнень (PLP, RLP)
S. Pejкова зі спіавт., 2022, Northern Macedonia [22]	25,1	1,9	Викликають менший ризик повторного хірургічного втручання з приводу пізніх постампутаційних ускладнень (симптоматичні невроми)

target), TMR (Targeted Muscle Reinnervation), спрямовані на профілактику специфічного нейропатичного болю після ампутації [7].

Методика RPNI виконується шляхом імплантації дистального кінця пересіченого периферичного нерва у вільний неваскуляризований трансплантат скелетного м'яза. Неврому або вільний кінець ураженого нерва ідентифікують, нерв пересікають і мобілізують проксимальніше. Виконують забір вільного м'язового трансплантата безпосередньо з рани кукси або з іншої ана-

томічної ділянки. Кінець кожного пересіченого периферичного нерва імплантують у центр вільного м'язового трансплантата з використанням нерезорбтивного шовного матеріалу 6–0. RPNI можна зробити безпосередньо під час ампутації або як планову процедуру в будь-який час після операції.

Трансплантат скелетних м'язів в ідеалі повинен мати приблизно 35 мм завдовжки, 20 мм завширшки та 5 мм товщиною, щоб забезпечити виживання та запобігти центральному некрозу.

Таблиця 6

Результати дослідження індексу якості життя (PROMIS) після виконання реіннерваційних хірургічних методик (TMR,VDMT, RPNI) та традиційної ампутації

Автор, рік, країна	Функт критерій, %				Підсумок
	В	Д	З	НЗ	
A. L. O'Brien зі співавт., 2022, USA [21]	74,5* 52,1**	19,3* 2,1**	3,8* 44,8**	2,4* 1,0**	Показники PROMIS у пацієнтів після виконання реіннерваційних хірургічних методик вищі від аналогічних даних після проведення традиційної ампутації
M. Byl зі співавт., 2024, USA [6]	72,1* 48,4 **	24,1* 14,9**	1,2* 32,3**	2,6* 4,4**	
M. Diers зі співавт., 2022, USA [8]	83,6* 22,1**	12,4* 24,6**	2,4* 42,3**	1,6* 11,0**	

Примітки: В — відмінно; Д — добре; З — задовільно; НЗ — незадовільно; * — реіннерваційні методи (RPNI, VDMT, TMR); ** — традиційна ампутація.

Забір можна проводити за допомогою вигнутих ножиць Мейо. Кінець пересіченого периферичного нерва слід імплантувати паралельно напрямку м'язових волокон, а епіневрій слід підшити до вільного м'язового трансплантата в 1 або 2 місцях. Слід використати один шов для фіксації дистального кінця епіневрія до середини ложа м'язового трансплантата. Потім він огортається навколо нерва у вигляді циліндра з фіксацією швами. Потрібно уникати розташування RPNI у ділянці навантажуваної поверхні кукси. Він має бути глибоко в м'язовій тканині, подалі від підшкірної клітковини та дерми. Для великих нервів варто виконати інтраневральну дисекцію на окремі структури, щоб створити кілька (зазвичай 2–4) окремих RPNI, щоб уникнути занадто значної кількості регенеруючих аксонів в одному вільному м'язовому трансплантаті. Перевагою RPNI є технічна простота й універсальність.

Регенерація відбувається за допомогою прямої невротизації м'язового трансплантата. Ураховуючи розуміння того, що невроми утворюються, коли регенеруючі аксони не мають кінцевих органів для реіннервації, будь-яка стратегія, яка зменшує кількість безцільних аксонів у залишковій кінцівці, повинна сприяти мінімізації симптоматичних невром. Використання вільних м'язових трансплантатів пропонує величезний запас денервованих м'язових мішеней для регенерації нервових аксонів і сприяє відновленню нервово-м'язових з'єднань без шкоди для денервації інших м'язів кукси [4].

Оскільки RPNI є неваскуляризованими м'язовими трансплантатами, вони спочатку повинні виживати через дифузію поживних речовин із навколишнього ранового ложа до реваскуляриза-

ції. Якщо вони занадто великі, щоб забезпечити достатню дифузію поживних речовин, виникне некроз. Навіть коли невеликий м'язовий трансплантат поміщається в ідеальне ранове ложе, очікується певний ступінь фіброзу та резорбції м'язів під час процесу загоєння. Це викликає сумніви щодо того чи забезпечують RPNI достатню мішень для сприйняття всіх аксонів, що регенерують із кукси периферичного нерва, особливо коли методика застосовується на нервах великого калібру.

Подібно до RPNI, VDMT використовуються для перенаправлення регенеруючих аксонів із пересіченого нерва в денервованій м'яз, щоб запобігти утворенню невроми. Забезпечуючи васкуляризовану м'язову мішень, яка реіннервується шляхом прямої невротизації, VDMT має переваги порівняно з іншими хірургічними варіантами. Виконання VDMT передбачає спочатку підйом острівця м'яза на судинній ніжці таким чином, щоб він був денервований, залишаючись васкуляризованим. Потім куксу нерва імплантують у денервованій м'язовий клапот або обертають ним аналогічно RPNI. Ця методика подібна до RPNI, але, на відміну від останньої, дозволяє використовувати м'язові трансплантати більших розмірів без ризику їх некрозів. VDMT, по-суті, є васкуляризованим RPNI [25].

TMR — це хірургічна техніка, під час якої кукси периферичних нервів підшиваються до сусідньої м'язової гілки. Ці нервові переміщення забезпечують шлях для росту аксонів, обмежуючи дезорганізований варіант регенерації нервових закінчень, що призводить до утворення невроми. Цей спосіб також застосовується для покращення контролю біонічним протезом за рахунок збіль-

шення кількості незалежних м'язових сигналів [3, 26].

За аналогічним хірургічним принципом виконується Targeted Sensory Reinnervation (TSR) під час якої кукса сенсорного периферичного нерва підшивається до дрібної шкірної гілки або просто імплантується в підшкірно-жирову клітковину для «нейрогенного захоплення» шкірних рецепторів. TSR може бути використаний для лікування симптоматичних невром, хоча це не основна його мета. Переважно застосовується для покращення сенсорної відповіді від протеза. На сьогодні TSR для лікування та профілактики симптоматичних невром використовується не частіше, ніж інші описані методики і потребує подальших досліджень.

За результатами дослідження C. S. Best та співавт., спосіб RPNI для лікування болю після ампутації, показав сприятливі результати, зі значним зменшенням болю під час невроми та фантомного больового синдрому приблизно через 7 міс. після операції. Показники болю за невроми зменшилися на 71 %, а оцінка фантомного болю за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ) — на 53 %. Профілактична операція RPNI також пов'язана зі значно нижчою частотою симптоматичних невром (0 проти 13,3 %) і нижчим рівнем фантомного болю в кінцівках (51,1 проти 91,1 %) порівняно з показниками у пацієнтів, які проходили традиційну ампутацію [4].

У дослідженні з вивчення первинної та вторинної TMR, проведеному Z. W. Fulton зі співавт., у більшості хворих спостерігалось зникнення болю за невроми (86,2 %) і загальне зменшення/зникнення болю (90,7 %). Не виявлено відмінностей між первинним і вторинним TMR. Попередні дані вказують на те, що TMR є ефективним для запобігання або лікування болю в пацієнтів з ампутацією, незалежно від того, чи використовується в гострому або відтермінованому періоді [10].

Згідно з інформацією V. Suresh зі співавт., опублікованою у 2023 р., із 9 осіб, включених у ретроспективне дослідження VDMT, 7 перенесли операцію VDMT як профілактичний захід проти утворення невроми, а 2 мали симптоматичні невроми, які лікувалися VDMT. Середній термін спостереження склав ($5,6 \pm 4,1$) міс. Середній бал післяопераційного болю становив 1–2 бали за шкалою ВАШ [25].

J. B. Bowen зі співавт. провели аналіз, до якого включили 17 досліджень, у 14 з яких оцінювали TMR (366 пацієнтів), а в 3 — RPNI (75 осіб).

У ньому визначено, що для лікування болю TMR і RPNI його зменшили під час невроми в 75–100 % хворих і фантомний біль у кінцівках у 45–80 % випадків. Коли TMR або RPNI проводили з профілактичною метою, багато пацієнтів повідомляли про відсутність болю безпосередньо в куксі (48–100 %) або фантомного в кінцівках (45–87 %) під час спостереження. Рівень ускладнень коливався від 13 до 31 %, найчастіше сповільнене загоєння рани [5].

Аналіз результатів порівнянь традиційної ампутації та методик реіннервації в ампутаційній хірургії вказує, що недоліком традиційного способу є підвищений ризик виникнення пізніх ускладнень (симптоматичні невроми, фантомний і біль безпосередньо в куксі) [4, 5, 14, 17, 21].

Реіннерваційні методи мають більше переваг для лікування PLP і RLP, одночасно дозволяючи пацієнтам з ампутуваними кінцівками повернутися до повсякденної діяльності, покращити якість життя та збільшити термін використання протезів без корекції. Останні дослідження в галузі реіннерваційних методів демонструють великий потенціал для встановлення нового стандарту в ампутаційній хірургії [4, 10, 14, 17, 25].

Описані методики реіннервації мають значний вплив на протезування, забезпечуючи кращу інтеграцію та взаємодію з нервовою системою, що, у свою чергу, підвищує функціональність, комфорт і якість життя пацієнтів. Ці технології дозволяють краще адаптуватися до своїх нових умов життя, покращити точність управління протезом і знизити психологічний стрес від втрати кінцівки.

Поданий аналіз літературних джерел має певні обмеження: термін спостереження у проаналізованих дослідженнях на момент написання статті не перевищує 3–4 років, зважаючи на що отримані результати можуть відрізнятися від показників виявлених за більший термін спостереження.

Висновки

Результати наукових досліджень вказують, що реіннерваційні способи (RPNI, VDMT, TMR) є клінічно ефективніші порівняно з традиційною ампутацією. Ці методики можуть застосовуватись як для профілактики пізніх постампуаційних ускладнень (симптоматичні невроми, фантомний і біль безпосередньо в куксі), так і для їхнього лікування.

Клінічні результати, які базуються на даних опитувальників (PROMIS, ВАШ, MFPDI, NRS), візуалізаційних досліджень і функціональних

даних, вказують на те, що реіннерваційні методи запобігають виникненню пізніх постампуаційних ускладнень, які призводять до зменшення частоти повторних оперативних втручань. Поряд із цим індекс якості життя залишається стабільно високим після проведення будь-якого з наведених методів реіннервації, на відміну від традиційної ампутації, що є важливим для комфортної інтеграції пацієнта в побутові умови звичного життя.

Сучасні реіннерваційні методи, які використовуються в ампутаційній хірургії, відіграють важливу роль у покращенні функціональності та якості життя людей, яким здійснили ампутацію кінцівки, особливо коли мова йде про протезування.

RPNI, VDMT і TMR дозволяють зменшити відчуття болю та дискомфорту безпосередньо в куксі, а також мінімізувати рівень фантомного болю під час користування протезом, адже нерви отримують нові шляхи для передавання імпульсів, як наслідок, покращується контроль над протезом, що має позитивний психологічний ефект на пацієнтів, оскільки це дає їм відчуття повернення до нормального життя та забезпечує більшу незалежність у повсякденних справах.

Конфлікт інтересів. Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

Перспективи подальших досліджень. Напрямок проведених досліджень відповідає викликам сьогодення. Застосування сучасних методик лікування дозволяє підвищити якість життя постраждалих та потребує на подальший розвиток, удосконалення та впровадження реіннерваційних технологій в ампутаційній хірургії.

Інформація про фінансування. Автори заявляють про відсутність сторонньої фінансової підтримки цього дослідження.

Внесок авторів. Бур'янов О. А. — концепція і дизайн дослідження; Смик О. О. — систематизація літературних джерел, збирання і обробка матеріалів, аналіз отриманих результатів, написання тексту; Саленко М. С. — відбір та аналіз літературних джерел, написання тексту.

Список літератури

1. Besspalenko, A. A., Shcheglyuk, O. I., ..., & Kikh, A. Yu. (2020). Algorithm for rehabilitation of military personnel with limb amputation based on a multiprofessional and individual approach. Current aspects of diagnostics and treatment. *Ukrainian journal of military medicine*, 1(1), 64–72. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2020.1\(1\)-064](https://doi.org/10.46847/ujmm.2020.1(1)-064).
2. Sidorova, N. M., Kazmirchuk, A. P., ..., & Kazmirchuk, K. A. (2023). Therapeutic consequences of limb amputation for a combatant: justification of the PATRIOT study design and our own data. *Current aspects of military medicine*, 30(2), 162–182. <https://doi.org/10.32751/2310-4910-2023-30-2-16>.
3. Bergmeister, K. D., Salminger, S., & Aszmann, O. C. (2021). Targeted muscle Reinnervation for prosthetic control. *Hand clinics*, 37(3), 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2021.05.006>.
4. Best, C. S., Cederna, P. S., & Kung, T. A. (2024). Regenerative peripheral nerve interface (RPNI) surgery for mitigation of neuroma and Postamputation pain. *JBJS essential surgical techniques*, 14(1). <https://doi.org/10.2106/jbjs.st.23.00009>.
5. Bowen, J. B., Ruter, D., Wee, C., West, J., & Valerio, I. L. (2019). Targeted muscle Reinnervation technique in below-knee amputation. *Plastic & reconstructive surgery*, 143(1), 309–312. <https://doi.org/10.1097/prs.00000000000005133>.
6. Byl, M., Tram, J., Kalasho, B., Pangarkar, S., & Pham, Q. G. (2024). Postamputation pain management. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 35(4), 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2024.06.003>.
7. Chang, B. L., Mondshine, J., Fleury, C. M., Attinger, C. E., & Kleiber, G. M. (2022). Incidence and nerve distribution of symptomatic neuromas and phantom limb pain after below-knee amputation. *Plastic & reconstructive surgery*, 149(4), 976–985. <https://doi.org/10.1097/prs.0000000000000895>.
8. Diers, M., Krumm, B., Fuchs, X., Bekrater-Bodmann, R., Milde, C., Trojan, J., Foell, J., Becker, S., Rümenapf, G., & Flor, H. (2022). The prevalence and characteristics of phantom limb pain and non-painful phantom phenomena in a nationwide survey of 3,374 unilateral limb amputees. *The journal of pain*, 23(3), 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2021.09.003>.
9. Eskridge, S. L., Macera, C. A., Galarneau, M. R., Holbrook, T. L., Woodruff, S. I., MacGregor, A. J., Morton, D. J., & Shaffer, R. A. (2012). Injuries from combat explosions in Iraq: Injury type, location, and severity. *Injury*, 43(10), 1678–1682. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2012.05.027>.
10. Fulton, Z. W., Boothby, B. C., & Phillips, S. A. (2022). Targeted muscle Reinnervation for trauma-related amputees: A systematic review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.28474>.
11. Hanwright, P. J., Suresh, V., Shores, J. T., Souza, J. M., & Tuffaha, S. H. (2023). Current concepts in lower extremity amputation: A primer for plastic surgeons. *Plastic & reconstructive surgery*, 152(4), 724e–736e. <https://doi.org/10.1097/prs.00000000000010664>.
12. Hanyu-Deutmeyer, A. A., Cascella, M., & Varacallo, M. (2024). Phantom limb pain. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
13. Janes, L. E., Fracol, M. E., Dumanian, G. A., & Ko, J. H. (2021). Targeted muscle Reinnervation for the treatment of neuroma. *Hand clinics*, 37(3), 345–359. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2021.05.002>.
14. Kubiak, C. A., Adidharma, W., Kung, T. A., Kemp, S. W., Cederna, P. S., & Vemuri, C. (2022). “Decreasing Postamputation pain with the regenerative peripheral nerve interface (RPNI)”. *Annals of vascular surgery*, 79, 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.avsg.2021.08.014>.
15. Kubiak, C. A., Kemp, S. W., Cederna, P. S., & Kung, T. A. (2019). Prophylactic regenerative peripheral nerve interfaces to prevent Postamputation pain. *Plastic & reconstructive surgery*, 144(3), 421e–430e. <https://doi.org/10.1097/prs.00000000000005922>.
16. Lans, J., Groot, O. Q., Hazewinkel, M. H., Kaiser, P. B., Lozano-Calderón, S. A., Heng, M., Valerio, I. L., & Eberlin, K. R. (2022). Factors related to neuropathic pain following lower extremity amputation. *Plastic & reconstructive surgery*, 150(2), 446–455. <https://doi.org/10.1097/prs.00000000000009334>.
17. Lin, Z., Yu, P., Chen, Z., & Li, G. (2023). Regenerative peripheral nerve interface reduces the incidence of neuroma in the lower limbs after amputation: A retrospective study based on ultrasound. *Journal of orthopaedic surgery and research*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13018-023-04116-6>.
18. Liston, J. M., Forster, G. L., Samuel, A., Werner, B. C., Strainix, J. T., & DeGeorge, B. R. (2022). Estimating the impact of Postamputation pain. *Annals of plastic surgery*, 88(5), 533–537. <https://doi.org/10.1097/sap.00000000000003009>.
19. Mereu, F., Leone, F., Gentile, C., Cordella, F., Gruppioni, E., & Zollo, L. (2021). Control strategies and performance assessment of upper-limb TMR prostheses: A review. *Sensors*, 21(6), 1953. <https://doi.org/10.3390/s21061953>.

20. Molina, C. S., & Faulk, J. B. (2022). Lower Extremity Amputation. StatPearls.
21. O'Brien, A. L., West, J. M., Gokun, Y., Janse, S., Schulz, S. A., Valerio, I. L., & Moore, A. M. (2022). Longitudinal durability of patient-reported pain outcomes after targeted muscle Reinnervation at the time of major limb amputation. *Journal of the american college of surgeons*, 234(5), 883–889. <https://doi.org/10.1097/xcs.0000000000000117>
22. Pejnova, S., Nikolovska, B., Srbov, B., Tusheva, S., Jovanoski, T., Jovanovska, K., & Georgieva, G. (2022). Prophylactic regenerative peripheral nerve interfaces in elective lower limb amputations. *PRILOZI*, 43(1), 41–48. <https://doi.org/10.2478/prilozi-2022-0004>
23. Pettersen, E., Sassu, P., Pedrini, F. A., Granberg, H., Reinholdt, C., Breyer, J. M., Roche, A., Hart, A., Ladak, A., Power, H. A., Leung, M., Lo, M., Valerio, I., Eberlin, K. R., Ko, J., Dumanian, G. A., Kung, T. A., Cederna, P., & Ortiz-Catalan, M. (2024). Regenerative peripheral nerve interface: Surgical protocol for a randomized controlled trial in Postamputation pain. *Journal of visualized experiments*, (205). <https://doi.org/10.3791/66378>
24. Sheean, A. J., Krueger, C. A., Napierala, M. A., Stinner, D. J., & Hsu, J. R. (2014). Evaluation of the mangled extremity severity score in combat-related type III open tibia fracture. *Journal of orthopaedic trauma*, 28(9), 523–526. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000054>
25. Suresh, V., Schaefer, E. J., Calotta, N. A., Giladi, A. M., & Tuffaha, S. H. (2023). Use of vascularized, denervated muscle targets for prevention and treatment of upper-extremity neuromas. *Journal of hand surgery global online*, 5(1), 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.jhsg.2022.06.001>
26. Tuffaha, S. H., Glass, C., Rosson, G., Shores, J., Belzberg, A., & Wong, A. (2020). Vascularized, denervated muscle targets: A novel approach to treat and prevent symptomatic neuromas. *Plastic and reconstructive surgery — global open*, 8(4), e2779. <https://doi.org/10.1097/gox.00000000000002779>

Стаття надійшла до редакції 12.04.2025	Отримано після рецензування 12.05.2025	Прийнято до друку 14.05.2025
---	---	---------------------------------

METHODS OF REINNERVATION AFTER AMPUTATIONS IN PATIENTS WITH THE CONSEQUENCES OF COMBAT INJURIES (LITERATURE REVIEW)

O. A. Burianov ¹, O. O. Smyk ², M. S. Salenko ²

¹ Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

² Military Medical Clinical Treatment and Rehabilitation Center, Irpin, Ukraine

✉ Olexandr Burianov, MD, Prof.: kaftraum@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2174-1882>

✉ Oleh Smyk: oleg_olegovi4@ukr.net; <https://orcid.org/0009-0003-3412-5557>

✉ Maryna Salenko: salenkomarina10@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-0914-2409>