

УДК: 616.833.34-001-089.844:616.74-089.843-009.5  
HTTPS://DOI.ORG/10.37647/0132-2486-2022-115-4-24-35

## Визначення передумов успішної етапної реконструкції сегментів верхньої кінцівки для відновлення її глобальної функції при тотальному варіанті ушкодження плечового сплетення (на основі випадку з клінічної практики)

Гацький О.О.<sup>1</sup>, Третяк І.Б.<sup>1</sup>, Цимбалюк В.І.<sup>1</sup>, Чирка Ю.Л.<sup>2</sup>,  
Цзян Хао<sup>1</sup>, Цимбалюк Я.В.<sup>1</sup>✉, Третьякова А.І.<sup>1</sup>

**Резюме. Актуальність.** Ефективність селективної невротизації (СН), направленої на відновлення дистальних (ДМ) щодо рівня травми м'язів, має вкрай негативний прогноз. Трансплантація вільних м'язово-шкірних клаптів (МСФ) позбавлена численних недоліків СН. Комбінація СН та МСФ дозволяє розширити можливості відновлення глобальної функції верхньої кінцівки (ВК) при тотальних варіантах травматичного ушкодження плечового сплетення (тв-ТУ ПС). **Мета дослідження.** Визначити теоретичні та клінічні передумови для кожного з етапів (Е) реконструкції сегментів ВК для відновлення її глобальної функції при тв-ТУ ПС. **Матеріали і методи.** 38-річному пацієнту через 3 міс. після тв-ТУ ПС виконано СН (Е1) м'язово-шкірного нерва за рахунок діафрагмального нерва, надлопаткового та пахвового нервів за рахунок гілок додаткового нерва. Через 36 міс. після Е1 виконано артророздування (Е2) променево-зап'ясткового (ПЗС) та трапецієметакарпального (ТМКС) суглобів. Через 43 міс. після Е1 виконано трансплантацію МСФ т. gracilis (Е3). Клініко-неврологічне, електронейроміографічне (ЕНМГ), рентгенологічне дослідження проводились у передбачувані терміни (t) досягнення очікуваного результату після відповідних етапів реконструкції. **Результати.** Через 26 міс. після Е1 спостерігали клінічно ефективно відновлення т. biceps brachii, т. deltoideus (М4) та неефективно відновлення силових характеристик т. supra-infraspinatus (М3). Стабільного артророздувального ефекту в ПЗС та ТМКС досягнуто через 42 міс. загалом. Через незадовільні клінічні та електрофізіологічні дані щодо відновлення функції переміщеного т. gracilis (Е3) в t виконання Е4 відстрочено на невизначений термін із клінічним та ЕНМГ контролем кожні 3 міс. **Висновки.** Клінічні ознаки відновлення функції не можуть бути передумовою використання первинного нерва-реципієнта (НР) як вторинного нерва-донора (НД); кількість рухових волокон у НД має бути підтверджена об'єктивними даними морфометричних та гістохімічних експрес-методів; теоретичні засади використання методики "sitting donor" є найбільш перспективними для етапного відновлення рухової функції ДМ ВК.

**Ключові слова:** плечове сплетення; ушкодження; невротизація; діафрагмальний нерв; м'язово-шкірний нерв; додатковий нерв; затульний нерв; тонкий м'яз; вільна пересадка м'яза.

### Вступ

Протягом останнього десятиріччя використання селективної реіннервації (невротизації, СН)

докорінно змінило прогноз відновлення функції верхньої кінцівки у випадках ушкодження плечового сплетення (ТУ ПС) травматичного генезу [1, 2]. Незважаючи на вказані вище досягнення у галузі реконструктивної хірургії, успішне відновлення довільних функцій в усіх сегментах верхньої кінцівки у випадках тотальних варіантів ТУ ПС усе ще залежить від трьох основних чинників: 1) наявності достатньої кількості іпсі-/контралатеральних інтра-

✉ Цимбалюк Я.В., yaroslav.neuro@gmail.com

<sup>1</sup>ДУ "Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України", відділення відновлювальної нейрохірургії з рентгеноопераційною, м. Київ  
<sup>2</sup>КНП "Вінницька обласна клінічна психоневрологічна лікарня ім. акад. О.І. Ющенко Вінницької обласної ради", м. Вінниця

чи екстраплексусних нервів-донорів (НД) [3], втрата функції яких суттєво не впливає на ефективність функції сегментарного апарату, якому вони належать [3]; 2) відстані, яку нерв-донор, що регенерує, має подолати на шляху до нового м'яза-ефектора [3]; 3) часу, який витрачається НД, що регенерує, на подолання відстані до нового м'яза-ефектора за умови, що останній усе ще залишається життєздатним [3]. Простіше кажучи, активна хірургічна реконструкція методом СН є змагальним процесом між двома протилежно направленими фізіологічними та патофізіологічними явищами – регенерації нерва [4, 5] та дегенерації м'яза [4, 5] – “перегонами на час на довгу відстань” [4, 5].

Враховуючи все сказане вище, більшість клініцистів та дослідників у галузі хірургії периферичної нервової системи погоджуються з тезою, що відновлення дистальних (щодо рівня травми) м'язів та їх груп має вкрай негативний прогноз [3] та практично не залежить від використаного методу хірургічної реконструкції.

Бурхливий розвиток пластичної мікрохірургії, зокрема досягнення в галузі закриття поширених дефектів м'яких тканин за допомогою вільних м'язово-шкірних клаптів (MCF), дозволив відкрити нову главу хірургії периферичної нервової системи [3]. Трансплантація MCF стала стандартною методикою відновлення функції згинання у ліктьовому суглобі при субтотальних та тотальних варіантах ТУ ПС у пізній період травми [3, 6], коли заздалегідь відомо, що використання конвенційних методів реконструкції не забезпечить бажаного функціонального результату [3, 6]. Оскільки MCF позбавлена більшості недоліків, що пов'язані з процесами регенерації нерва / денервації м'яза через вкрай короткий період деваскуляризації / денервації донорського шкірно-м'язового комплексу, ця методика почала активно використовуватись також і при ТУ ПС із переважним ураженням нижніх стовбурів (C8-Th1) [3, 6].

Комбінація методів СН із методами пластичної мікрохірургії дозволила по-справжньому переосмислити можливості відновлення глобальної функції верхньої кінцівки при тотальних варіантах ушкодження плечового сплетення, здебільшого нівелювати обмеження, зумовлені негативним впливом основних факторів, часу та відстані [3], на прогноз відновлення рухових функцій як дистальних сегментів, так і глобальної функції верхньої кінцівки загалом.

**Мета дослідження:** визначити теоретичні та клінічні передумови кожного з етапів реконструкції сегментів верхньої кінцівки для відновлення її глобальної функції при тотальному варіанті ушкодження плечового сплетення.

## Матеріали і методи

### *Клінічна характеристика пацієнта*

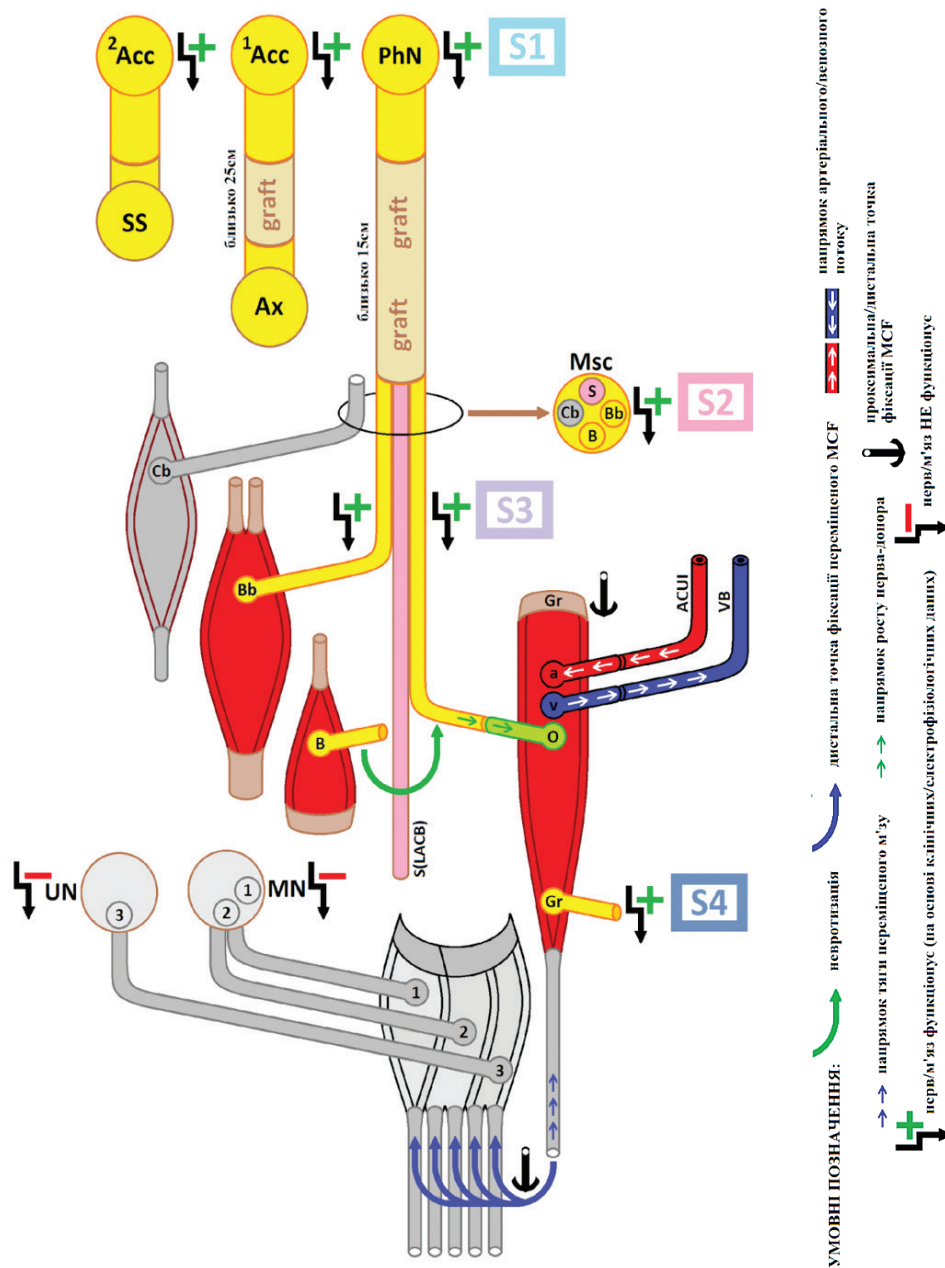
Пацієнт чоловічої статі, вік 38 років, правша, отримав закриту тупу надключичну травму правого плечового сплетення внаслідок дорожньо-транспортної пригоди (мотоциклетна). Через 3 міс. після травми пацієнту було проведено первинне обстеження в нашому відділенні. За даними клінічного неврологічного огляду встановлено відсутність будь-яких довільних рухів у м'язах плечового поясу та вільної верхньої кінцівки – плегія за периферичним типом, а також анестезію долонної поверхні кисті, що супроводжувалась невропатичним болем персистентного характеру до 1-2 балів за ВАШ [7]. Клінічно підтверджено збереження функції іпсилатеральної низхідної та висхідної порцій трапецієподібного м'яза (M5 за British Medical Research Council Scale – MRC [8]). Збережена функція правого купола діафрагми була підтверджена за допомогою функціональної рентгенографії ОГК [9]. Дані МРТ шийного відділу хребта опосередковано [10] підтверджували незворотній характер ушкодження плечового сплетення (авульсію) – наявність псевдоменінгоцеле [10] між C6-C7-Th1 хребцями – рівень 1-2 за Chuang [11]. Електронейроміографічне дослідження (ЕНМГ) підтвердило наявність тривалого денерваційного процесу у м'язах плечового поясу та вільної верхньої кінцівки.

Враховуючи вихідні клінічні та інструментальні дані, пацієнту було запропоновано проведення етапного хірургічного відновлення сегментарних функцій правої верхньої кінцівки. Загальний план запропонованих етапних реконструктивних втручань представлений на рис. 1.

### *Характеристика хірургічних процедур на кожному з етапів*

*Етап 1 (S1) – реіннервація м'язово-шкірного, пахвового та надлопаткового нервів.*

Положення пацієнта на спині, голова повернута вліво, силіконовий валик розташований між лопатками на рівні Th2-4 хребців для забезпечення гіперекстензії в шийному відділі хребта. Виконано два S-подібних розрізи шкіри та м'яких тканин: 1) у лопатково-ключичному трикутнику в надключичній області; 2) вздовж дельтоподібно-грудної складки по передній стінці пахвової ямки. У надключичній ямці ідентифіковано рубцево перероджені передні гілки спінальних нервів C5 та C6, C7-Th1 – відсутні. Функція діафрагмального нерва (PhN) підтверджена шляхом прямого подразнення електричним струмом 0,2-0,5 мА. У пахвовій ямці ідентифіковано латеральний стовбур плечового сплетення, м'язо-



**Рис. 1.** Етапний план реконструкції сегментарних функцій верхньої кінцівки:

S1 – перший етап; <sup>2</sup>Acc – нерв-донор, гілка додаткового нерва до висхідної порції трапецієподібного м'яза; <sup>1</sup>Acc – нерв-донор, гілка додаткового нерва до кивального м'яза; PhN – діафрагмальний нерв; SS – надлопатковий нерв; Ax – пахвовий нерв; Msc – м'язово-шкірний нерв; graft – аутологічний нервовий трансплантат; S2 – другий етап; Msc(S) – волокнини латерального шкірного нерва передпліччя в структурі загального стовбура Msc; Msc(Cb) – волокнини до *m. coracobrachialis* в структурі загального стовбура Msc; Msc(Bb) – волокнини до *m. biceps brachii* в структурі загального стовбура Msc; Msc(B) – волокнини до *m. brachialis* у структурі загального стовбура Msc; Cb – кінцеві рухові гілки Msc до *m. coracobrachialis*; Bb – кінцеві рухові гілки Msc до *m. biceps brachii*; B – кінцеві рухові гілки Msc до *m. brachialis*; S3 – третій етап; Gr – *m. gracilis*; a – власна артеріальна судина *m. gracilis*; v – власна венозна судина *m. gracilis*; o – затульний нерв; ACUI – нижня колатеральна ліктьова артерія; VB – базиллярна вена; S(LACB) – латеральний шкірний нерв передпліччя; S4 – четвертий етап; UN – ліктьовий нерв; MN – серединний нерв; UN(3) – волокнини до глибоких згиначів 4-5 пальців у структурі UN; MN(2) – волокнини до глибокого згинача 3-го пальця в структурі MN; MN(1) – волокнини до глибокого згинача 2-го пальця та довгого згинача 1-го пальця в структурі MN; 3 – сухожилки глибоких згиначів 4-5-го пальців; 2 – сухожилок глибокого згинача 3-го пальця; 1 – сухожилки глибокого згинача 2-го пальця та довгого згинача 1-го пальця; сірий колір – денервоване черевце м'яза; червоний колір – реіннервоване (функціонуюче) черевце м'яза

шкірний нерв (Msc) ідентифіковано анатомічно. Діафрагмальний нерв пересічено ростральніше дуги підключичної артерії на передній поверхні переднього драбинчастого м'яза. Виконано невротизацію діафрагмальним нервом м'язово-шкірного нерва через один аутологічний нервовий трансплантат із литкового нерва довжиною близько 15 см. Виконання мікроанастомозів проведено з використанням мікроскопічного збільшення  $\times 8$  шовним матеріалом 9/0, що не розсмоктується, без натягу (tension-free manner). Найбільш проксимальні гілки м'язово-шкірного нерва до *m. coracobrachialis* (Cb) були виключені із зони кооптації між аутологічним нервовим трансплантатом та стовбуром м'язово-шкірного нерва (рис. 1, схематично).

Виконано ще один S-подібний розріз шкіри та м'яких тканин уздовж переднього краю верхньої третини кивального м'яза. Виконання повної міотомії м'яза завершилось ідентифікацією загального стовбура додаткового нерва. Гілки до трапецієподібного та кивального м'яза (<sup>1</sup>Acc) ідентифіковано анатомічно та шляхом прямого подразнення електричним струмом 0,1-0,2 мА. У пахвовій ямці ідентифіковано задній стовбур плечового сплетення, пахвовий нерв (Ax) ідентифіковано анатомічно. Гілки додаткового нерва до кивального м'яза пересічено. Виконано невротизацію гілками додаткового нерва до кивального м'яза пахвового нерва через один аутологічний нервовий трансплантат із литкового нерва довжиною близько 25 см. Виконання мікроанастомозів проведено з використанням мікроскопічного збільшення  $\times 8$  шовним матеріалом 9/0, що не розсмоктується, без натягу (tension-free manner) (рис. 1, схематично).

Реіннервацію надлопаткового нерва (SS) виконано за рахунок гілки додаткового нерва до висхідної порції трапецієподібного м'яза (<sup>2</sup>Acc) за методикою J. Vaһm [12] (рис. 1, схематично).

*Етап 2 (S2) – забезпечення стабільності променево-зап'ясткового та трапецієметакарпального суглобів шляхом артрорезування.*

Через 36 міс. після проведення реіннерваційного хірургічного втручання пацієнту виконано артрорезування променево-зап'ясткового (Т-подібна пластина) та трапецієметакарпального (спиця та проволока) суглобів за стандартними методиками [13, 14] (рис. 1, схематично).

*Етап 3 (S3) – вільна пересадка м'язово-шкірного клаптя (MCF).*

Через 43 міс. після проведення реіннерваційного хірургічного втручання (через 7 міс. після S2) виконано вільну пересадку м'язово-шкірного клаптя

– вільну пересадку *m. gracilis* (Gr). Положення пацієнта на спині, голова повернута вліво, права верхня кінцівка відведена в плечовому суглобі до кута 90° та розігнута в ліктьовому суглобі до кута 180°. Виконано S-подібний розріз шкіри та м'яких тканин по внутрішній поверхні плеча. М'язово-шкірний нерв ідентифіковано в середній третині плеча між черевцями *m. biceps brachii* та *m. brachialis*. Кінцеві рухові гілки м'язово-шкірного нерва до *m. biceps brachii* (Bb) та *m. brachialis* (B) ідентифіковано анатомічно та шляхом прямого подразнення електричним струмом 0,1-0,2 мА. Гілки до *m. brachialis* було прослідковано до входження в товщу м'яза та пересічено. Мобілізовано плечову артерію, анатомічно ідентифіковано нижню колатеральну ліктьову артерію (ACUI) та базиллярну вену (VB). Після визначення донорських артеріальної та венозної судин рухового нерва-донора виконано вільну пересадку *m. gracilis* за стандартною методикою [15]. Медіальна міжм'язова перегородка на межі середньої та нижньої третини внутрішньої поверхні плеча визначена як проксимальна точка фіксації черевця переміщеного *m. gracilis*, фіксовано за допомогою біорозкладного шовного матеріалу 1/0. Дистальною точкою фіксації сухожилка *m. gracilis* визначено сухожилок *m. flexor carpi radialis* на межі нижньої та середньої третин передньої поверхні передпліччя, фіксовано за допомогою біорозкладного шовного матеріалу 1/0. Двоточкова фіксація переміщеного *m. gracilis* виконана з помірним розтягненням м'язових волокон у положенні розгинання в ліктьовому суглобі до 180°. Дистальна точка фіксації визначена як проміжна.

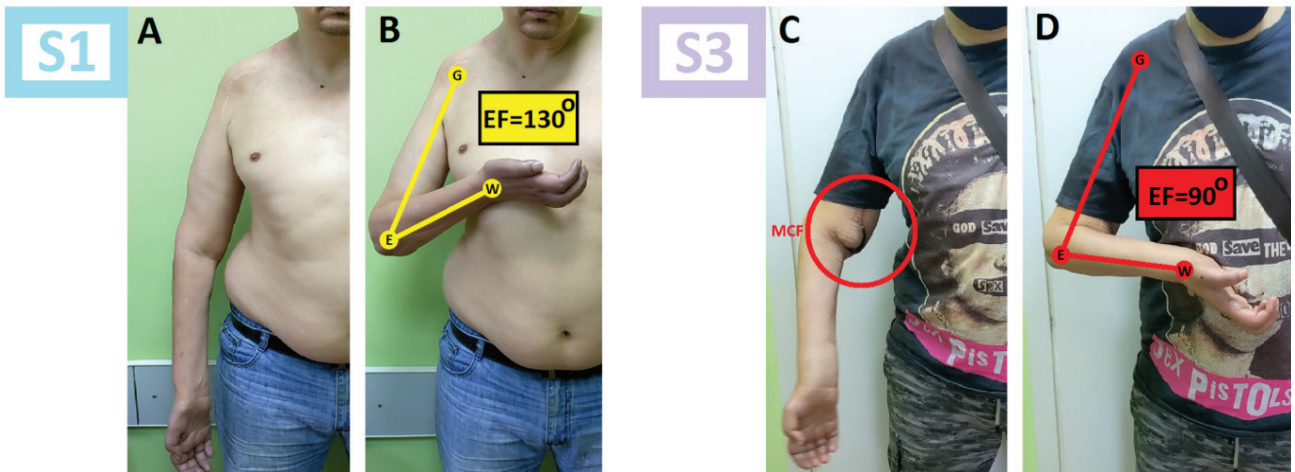
*Етап 4 (S4) – переміщення дистальної точки фіксації m. gracilis.*

Відстрочено. Причини детально обґрунтовані в "Обговоренні".

## Результати

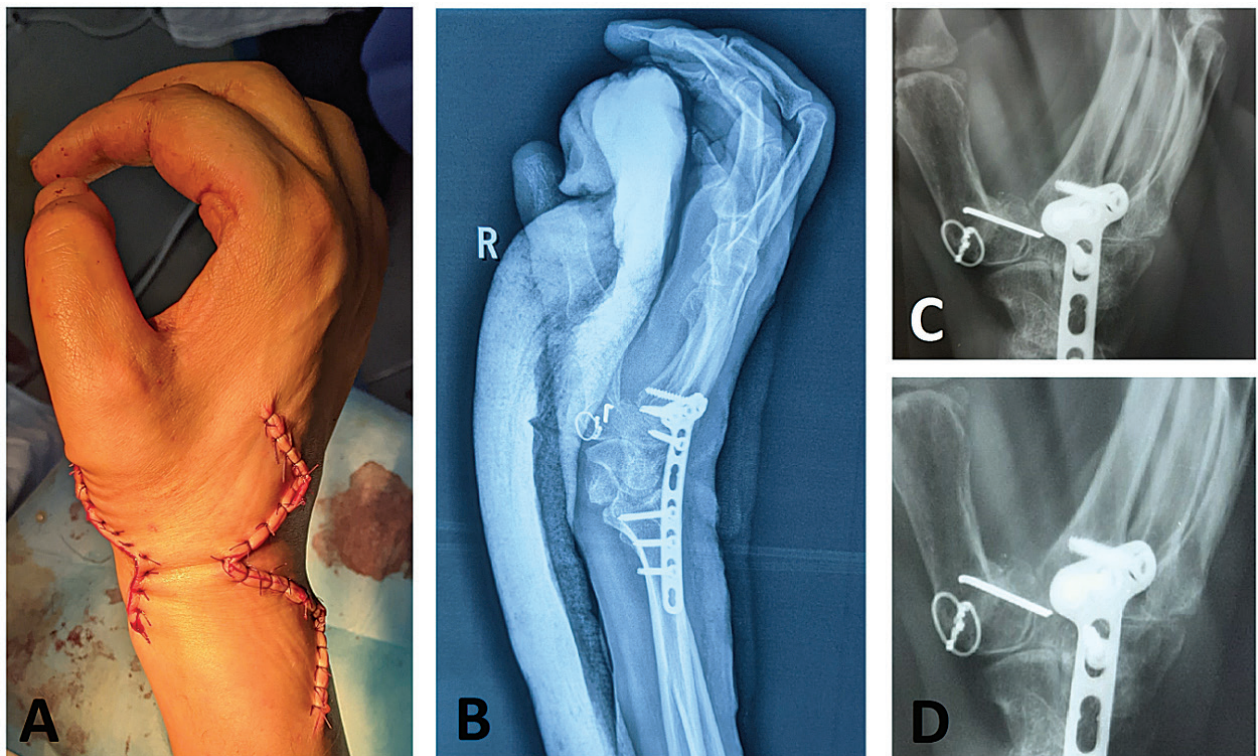
Через 26 міс. після *Етапу 1 (S1)* хірургічної реконструкції функції м'язів плечового поясу та передньої поверхні плеча (пріоритетних функцій 1-го та 2-го порядків за Mario G. Siqueira M. G. [10]) спостерігали клінічно ефективно відновлення силових характеристик *m. biceps brachii* (до M4 за MRC) та ефективного відновлення функції згинання в ліктьовому суглобі [16] до 130°.

Рис. 2 (А та В) показує ефективно відновлення силових характеристик дельтоподібного м'яза (до M4 за MRC) та неефективно відновлення функції згинання в плечовому суглобі [16] до близько 80°, неефективно відновлення силових характеристик



**Рис. 2.** Порівняння ефективності функції пари *m. biceps brachii* / *m. brachialis* через 26 міс. після виконання *Emanu 1* (S1) та ефективності ізолюваної функції *m. biceps brachii* через 2 міс. після виконання *Emanu 3* (S3):

В – максимальне згинання в ліктьовому суглобі при довільній активації (скороченні) функціональної пари *m. biceps brachii* / *m. brachialis*; D – максимальне згинання в ліктьовому суглобі при довільній активації (скороченні) лише *m. biceps brachii*; EF – кут згинання в ліктьовому суглобі (elbow flexion) при максимальному довільному скороченні *m. biceps brachii*; MCF – переміщений вільний шкірно-м'язовий клапоть *m. gracilis*; G – плечовий суглоб; E – ліктьовий суглоб; W – променево-зап'ястковий суглоб



**Рис. 3.** Положення кисті та 1-го пальця в ранній післяопераційний період та через 6 міс. після виконання артродезуючих хірургічних втручань:

A – інтраопераційна фотографія після закриття шкірних доступів, досягнуто функціонального протиставлення 1-го пальця; B – рентгенологічний контроль на 3-й день післяопераційного періоду; C та D – рентгенологічний контроль на 6 міс., досягнуто зрощення 1-ї п'ясної та трапецієподібної кісток

над- та підостьового м'язів (M3 за MRC) та неефективне відновлення інтегральної функції зовнішньої ротації / відведення плеча [16] – до близько 45° та 15°, відповідно.

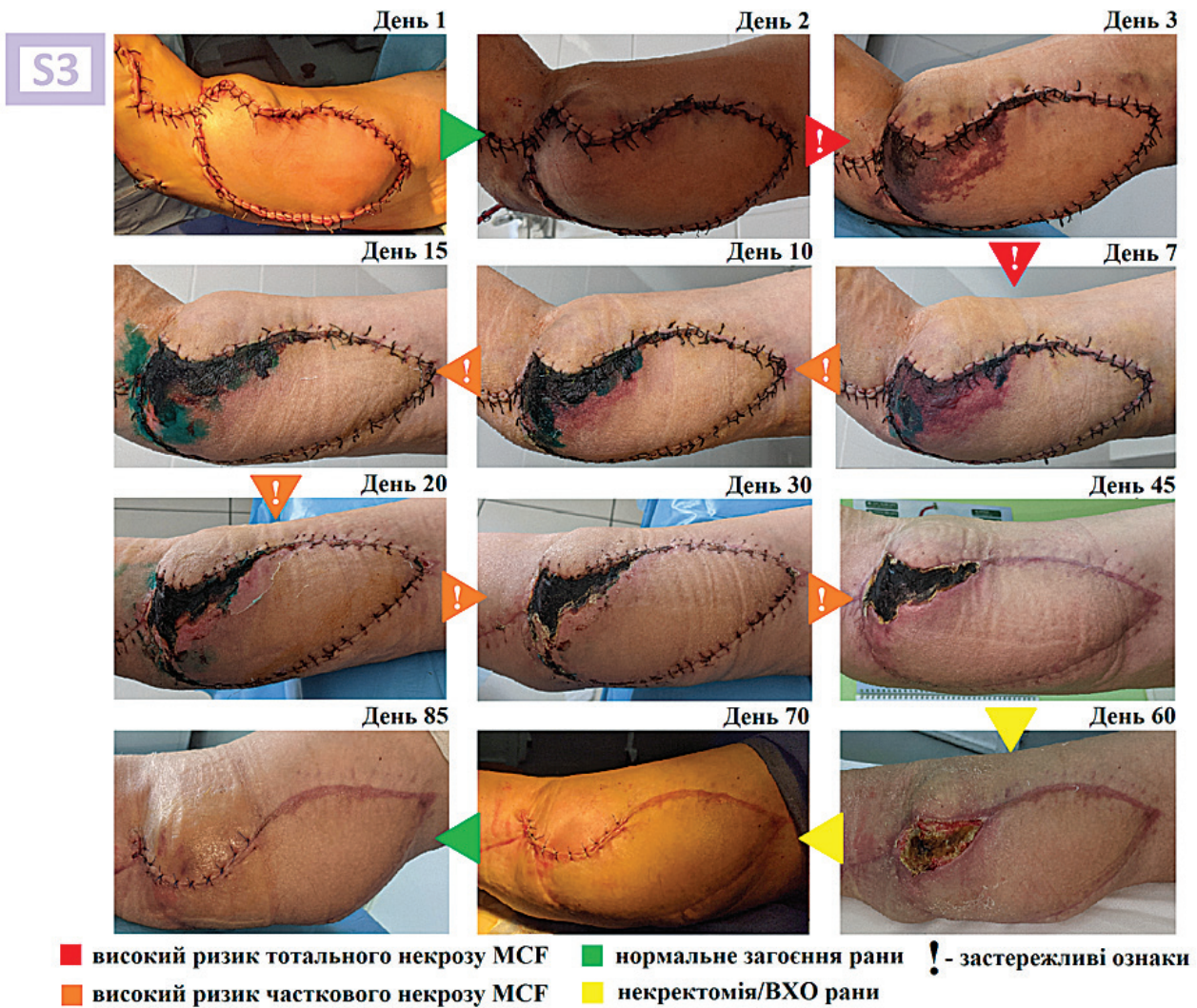
Ще через 12 міс. (36 міс. від моменту проведення первинного хірургічного втручання, *Eman 1*, S1) якісний компонент відновлення пріоритетних функцій 1-го та 2-го порядків не зазнав суттєвих змін.

Стабільного артродезуючого ефекту в променево-зап'ястковому та трапецієметакарпальному суглобах (рис. 3, С та D) досягнуто через 6 міс. від моменту проведення *Emanu 2* (S2) та 42 міс. загалом.

Клінічні ознаки життєздатності переміщеного вільного шкірно-м'язового клаптя (MCF) остаточно сформувались на 45-й день після виконання

*Emanu 3* (S3) (рис. 4). Висока функціональність виконаного судинного (венозного та артеріального анастомозів) MCF опосередковано підтверджена функцією перфорантних шкірних судин – уже на 20 день післяопераційного періоду не реєструвались ознаки артеріальної (ішемії шкіри) [17] та венозної (венозного стазу) [17] недостатності (рис. 4). Коагуляційний некроз (30-60 день), що займав близько 15% площі поверхні шкірного клаптя, був обумовлений технічною недосконалістю виконання забору MCF – перфорантні судини були зруйновані при плануванні шкірного клаптя (рис. 4).

Вторинна хірургічна обробка (60 день, рис. 4.) – видалення нежиттєздатних тканин некротизованого шкірно-підшкірного шару – завершилась загоєн-



**Рис. 4.** Контроль життєздатності на основі опосередкованих клінічних ознак змін найменш стійкого до судинного колапсу шару шкіри в структурі переміщеного м'язово-шкірного клаптя протягом 85 днів після *Emanu 3* (S3)

ням рани без будь-яких інфекційних ускладнень (80 день, рис. 4).

Через 2 міс. після проведення трансплантації MCF здійснено контрольний клінічний неврологічний огляд пацієнта. Ефективні силові характеристики відновленого *m. biceps brachii* (до M4 за MRC) не зазнали змін після проведення *Emanu 3* (S3), проте його ізольована функція не здатна була забезпечити ефективного згинання в ліктьовому суглобі [16] – згинання до 90° (рис. 2, С та D; рис. 5, С та D). Через 13 міс. (57 міс. після S1, через 20 міс. після S2) після *Emanu 3* (S3) проведено контрольний клінічний неврологічний огляд та електронейроміографічне дослідження. Протягом 13 міс. після виконання *Emanu 3* (S3) ізольована функція *m. biceps brachii*, що була відновлена під час *Emanu 1* (S1), вже була знову здатна забезпечити ефективне згинання в ліктьовому суглобі [16] – згинання до 130° (рис. 5, F). Через незадовільне клінічне відновлення силових характеристик переміщеного *m. gracilis* у прогнозовані терміни регенерації, присутність потенціалів рухових одиниць, наближених до нормальних за амплітудою та тривалістю [18] лише в проксимальних відділах м'яза при максимальному довільному скороченні (індукується згинанням в ліктьовому суглобі), ухвалено рішення відстрочити проведення *Emanu 4* (S4) на невизначений термін з обов'язковим клінічним та електрофізіологічним контролем кожні 3 міс.

## Обговорення

Успішне відновлення будь-якої функції (рухової чи сенсорної) при виконанні селективної хірургічної реіннервації (селективної невротизації, СН) першочергово залежить, окрім, звичайно, врахування впливу фактору часу [3, 6] та відстані [3, 6], від визначеного числового співвідношення кількості волокнин (аксонів) у нерві-донорі та нерві-реципієнті – так званий *axon count ratio* (ACR) [19]. Зіставлення результатів клінічного емпіричного (особливо на початкових етапах впровадження методу в 1990-2000 рр.) та історичного (ретроспективного аналізу ефективності методу та його різних методик) застосування СН та даних морфометричних досліджень [19] дозволило стверджувати, що ідеальним співвідношенням між загальною кількістю волокнин у поперечному перетині нерва-донора (НД) та нерва-реципієнта (НР) – ACR – для досягнення ефективного відновлення функції (рухової, зокрема) має становити щонайменше 0,7 до 1 [19]. Морфометричні дослідження [19], проведені протягом останнього десятиріччя, що, власне, й були спрямовані на визначення загальної кількості волокнин у структурі НД та НР на усіх рівнях елементів периферичної нервової системи, дозволили сформувати пул потенційних найбільш ефективних інтра- та екстраплексусних НД [3, 19], відповідно НР, для відновлення ефективною функції верхньої кінцівки.



**Рис. 5.** Ефективність ізольованої функції *m. biceps brachii* через 13 міс. після виконання *Emanu 3* (S3) та до виконання *Emanu 4* (S4):

В – максимальне згинання в ліктьовому суглобі при довільній активації (скороченні) лише *m. biceps brachii*; D – максимальне згинання в ліктьовому суглобі при довільній активації (скороченні) лише *m. biceps brachii* через 2 міс. після денервації *m. brachialis*; F – максимальне згинання в ліктьовому суглобі при довільній активації (скороченні) лише *m. biceps brachii* через 13 міс. після денервації *m. brachialis*; EF – кут згинання в ліктьовому суглобі (elbow flexion) при максимальному довільному скороченні *m. biceps brachii*; MCF – переміщений вільний шкірно-м'язовий клапоть *m. gracilis*; G – плечовий суглоб; E – ліктьовий суглоб; W – променево-зап'ястковий суглоб

Без упередження зрозумілим є факт, що для відновлення саме рухової функції шляхом реіннервації рухового НР руховий НД має містити в своєму складі якомога більше мієлінізованих (рухових) волокон, аксонів. На жаль, відповідних числових показників ACR для розв'язання вказаної вище ситуативної задачі визначено не було. Однак, ґрунтуючись на результатах роботи J.J. Schreiber et al. [19] можна припустити, що критичне значення ACR і для рухових волокон суттєво не відрізняється і має становити щонайменше 0,7 до 1.

Одним з основних непорушних принципів СН є правило використання одного рухового (чи сенсорного) НД для відновлення функції лише одного рухового (чи сенсорного) НР – один донор – одна функція [20]. Більшість випадків первинної селективної реіннервації органа-ефектора з дотриманням зазначеного вище принципу дозволяє досягти прогнозованого відновлення бажаної рухової (чи сенсорної) функції в прогнозовані терміни [1, 2, 3, 6]. Можливість використання (реіннервованого) нерва, що знову функціонує, як вторинного НД обговорювалась усно лише у вкрай вузьких колах профільних спеціалістів. Відповідно, потенційне використання первинного НР як вторинного НД мало лише суто теоретичне обґрунтування та до цього часу не знайшло відображення в науковій літературі. Виходячи з літературних даних, які чітко визначають терміни настання незворотних (дегенераційних) змін в органі-ефекторі, що забезпечує рухову (чи сенсорну) функції, використання вторинного НД для відновлення дистального (як щодо місця травми, так і щодо первинно реіннервованого органа-ефектора) органа-ефектора є недоцільним. Потенційним реципієнтом (насправді реципієнтом лише рухової функції) вторинного НД може стати неушкоджений м'яз або неушкоджений шкірно-апоневротично-м'язовий комплекс (MCF). Під неушкодженим ми розуміємо донорський м'яз або вказаний вище комплекс, який на момент ухвалення рішення про виконання вторинної реіннервації має непорушене кровопостачання та іннервацію. Були представлені методи подовження (елонгації) [21] НД із метою наближення потенційного донора рухової функції до більш дистальних сегментів (передпліччя чи кисть) кінцівки, де, власне, й планували розмістити MCF. У таких випадках питання наявності необхідної кількості рухових волокон (або загальної кількості волокон) у потенційному НД та й ACR, відповідно, підпорядковувалось загальному правилу – 0,7 до 1 [19].

Представлений випадок із клінічної практики етапної реконструкції сегментів верхньої кінцівки при тотальному варіанті ушкодження плечово-

го сплетення може частково дати відповіді (А) на питання, які раніше не мали відповідей (Q), представлених у наукових літературних джерелах. По-перше (Q1), чи здатний первинний НР на момент відновлення ефективної функції органа-ефектора виступити як вторинний НД, виходячи з наявних об'єктивних клінічних даних. По-друге (Q2), яким чином виключення частини волокон первинного НР (для використання його як вторинного НД) із синергетичної пари органа-ефектора позначиться на ефективності первинно відновленої функції. По-третє (Q3), визначити перспективні шляхи об'єктивізації потенційної можливості використання вторинних НД. По-четверте (Q4), об'єктивно оцінити первинний план етапної реконструкції сегментів верхньої кінцівки, внести зміни для подальшого перспективного використання цієї моделі з урахуванням його переваг і недоліків (помилки) на основі отриманого клінічного досвіду.

**A1:** відновлення первинного органа-ефектора – м'язів-згиначів у ліктьовому суглобі, а саме *m. biceps brachii* та *m. brachialis* – методом СН було виконано з урахуванням належного (хоча й мінімально допустимого) значення ACR [19] для рухових волокон – 0,75 до 1 (табл. 1). Клінічне ефективне відновлення функції *m. biceps brachii* дозволяло припустити належне відновлення функції більш дистально розташованого *m. brachialis* із цієї синергетичної пари. Голкова ЕНМГ не дозволила в повному об'ємі підтвердити чи спростувати клінічно значуще відновлення *m. brachialis*. Пряме подразнення кінцевих рухових гілок м'язово-шкірного нерва до *m. brachialis* електричним струмом 0,1-0,2 мА при виконанні *Emanu 3 (S3)* дозволило клінічно підтвердити відновлення нервово-м'язового зв'язку, відповідно, підтвердило можливість залучення вказаних вище рухових гілок (первинного НР) як вторинного НД для реіннервації MCF.

**A2:** виключення частини волокон (кінцевих рухових гілок м'язово-шкірного нерва до *m. brachialis*) первинного НР, що забезпечував ефективне функціонування синергетичної пари *m. biceps brachii* та *m. brachialis*, призвело до тимчасового погіршення відновленої функції згинання в ліктьовому суглобі (рис. 5) у контексті її ефективності [16] та без регресу її силового компонента. Частково збережена функція первинного НР, відновлені силові характеристики *m. biceps brachii* з первинно реіннервованої синергетичної пари згиначів у ліктьовому суглобі дозволили компенсувати втрату ефективності функції протягом короткого часу (рис. 5).

**A3:** із найбільшою ймовірністю причиною не-ефективної реіннервації MCF стало порушення



**Співвідношення загальної кількості та кількості рухових волокнин  
у потенційних нервах-донорах та нерві-реципієнти**

			Потенційні нерви-донори					
			ICN (MAP=30%)		PhN (MAP=27%)		Acc (MAP=30%)	
			загалом	рухових	загалом	рухових	загалом*	рухових**
ACR			1200***	375***	4600	1200	4300	1300
<b>Msc</b>	загалом	26000	0,14:1	-	0,18:1		0,16:1	-
	рухових	1600	-	0,7:1		0,75:1	-	0,55:1

ICN – три міжреберні нерви; PhN – діафрагмальний нерв; Acc – додатковий нерв; MAP – *motor axon proportion*, кількість рухових волокнин у структурі загального стовбура нерва у %; Msc – м'язово-шкірний нерв; ACR – *axon count ratio*, співвідношення кількості волокнин у нерві-донорі та нерві-реципієнти.

\* – у загальному стовбурі додаткового нерва [25, 26];

\*\* – на рівні верхнього краю ключиці [25, 26];

\*\*\* – в одному міжреберному нерві [27]

принципу, що передбачає наявність належного співвідношення рухових волокнин у НД (вторинному в цьому випадку) та НР [16], оскільки сама методика трансплантації повністю нівелює вплив фактору часу та відстані на ефективність реіннервації. Наявність комплексу клінічних ознак реіннервації синергетичної пари згиначів у ліктьовому суглобі не є достатньою для ухвалення рішення щодо можливості залучення первинного НР як вторинного НД.

Єдиним прийнятним шляхом об'єктивізації готовності вторинного НД стати джерелом достатньої загальної кількості волокон та рухових волокнин, зокрема, для забезпечення належного співвідношення ACR між потенційним НД та НР є морфометричні [22] та гістохімічні методи [19, 21, 23].

**A4:** первинний план реконструкції, використаний у цьому дослідженні, м'язів плечового поясу та проксимальних сегментів верхньої кінцівки (*Eman 1*, рис. 1, S1) відповідав поставленій задачі, оскільки він здатний був забезпечити ефективне відновлення пріоритетних функцій 1-го та 2-го порядків [10] – згинання в ліктьовому суглобі та стабільність (проте не ефективні рухи) в плечовому суглобі. Первинний план реконструкції, використаний у цьому дослідженні з відновлення складової пріоритетної функції 5-го та 7-го порядків [10], відповідав поставленій задачі, оскільки він здатний був забезпечити стабільність у променево-зап'ястковому та трапецієметакарпальному суглобах (*Eman 2*, рис. 1, S2). Внесення

наступних технічних змін у цю модель етапної реконструкції сегментів верхньої кінцівки дозволить виправити недоліки методів, використаних на *Emani 3* (S3): 1) впровадження морфометричних [22] та гістохімічних [19, 21, 23] експрес-методів визначення кількості волокнин у потенційному НД, первинному чи вторинному для забезпечення належного ACR; 2) із метою уникнення потенційної можливості погіршення відновленої на попередніх етапах функції при використанні первинно реіннервованого НР як вторинного НД необхідно впровадити методику елонгації НД [21] (так звану методику "sitting donor"), що так само не матиме прив'язки до фактору часу, проте первинно зможе забезпечити належний ACR, який, звісно, можна буде об'єктивізувати в динаміці за допомогою морфометричних [19, 21, 22, 23] та гістохімічних [19, 21, 23] експрес-методів. У випадках тотальних варіантів ТУ ПС, таким потенційним НД можуть стати іпсилатеральні гілки додаткового нерва до поперечної порції трапецієподібного м'яза [24] чи гілки до м'яза, що підіймає кут лопатки [24, 25] (табл. 2).

Реіннервація м'язів скапуло-гумеральної групи та відстрочене заміщення м'язів передньої поверхні передпліччя за допомогою трансплантації / реіннервації MCF із використанням одного НД (гілок додаткового нерва) не суперечить принципу один донор – одна функція [20], оскільки процеси перенавчання будуть рознесені у часі, який буде цілком достатнім для реалізації пластичності [28, 29] центральної нервової системи.

**Співвідношення загальної кількості та кількості рухових волокнин у потенційних нервах-донорах та нерві-реципієнті**

			Потенційні нерви-донори			
			Асс (MAP=30%)		MLAS***	
			загалом*	рухових**	загалом	рухових
ACR			4300	1300	-	1100
Obt	загалом	-	4,7:1	-	-	-
	рухових	940	-	1,4:1	-	1,2:1

Асс – додатковий нерв; MAP – *motor axon proportion*, кількість рухових волокнин у структурі загального стовбура нерва у %; MLAS – м'яз, що підіймає кут лопатки; ACR – *axon count ratio*, співвідношення кількості волокнин у нерві-донорі та нерві-реципієнті.

\* – в загальному стовбурі додаткового нерва [25, 26];

\*\* – на рівні верхнього краю ключиці [25, 26];

\*\*\* – дві гілки від C3 та C4 до м'яза, що підіймає кут лопатки [25]

## Висновки

1. Відновлення глобальної функції верхньої кінцівки передбачає етапну реконструкцію сегментарного апарату, що пов'язано із відсутністю достатньої кількості нервів-донорів рухової функції в безпосередній близькості до бажаного м'яза-ефектора.

2. Клінічні ознаки не можуть слугувати обов'язковою передумовою використання первинно реіннервованого нерва-реципієнта, що забезпечив ефективне відновлення силових характеристик м'яза-ефектора для використання його як джерела вторинного нерва-донора для переміщеного м'язово-шкірного клаптя.

3. Здатність вторинного нерва-донора забезпечити достатню кількість рухових волокнин для реіннервації переміщеного м'язово-шкірного клаптя обов'язково має бути підтверджена об'єктивними даними морфометричних та гістохімічних експрес-методів.

4. Використання вторинного нерва-донора має потенційний ризик погіршення ефективності функції, відновленої на попередніх етапах.

5. Теоретичні засади використання методики "sitting donor" є найбільш перспективними для відновлення функції дистальних сегментів верхньої кінцівки, проте потребують клінічного підтвердження в серії випадків.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів під час підготовки статті.

## References

- Moore AM (2014) Nerve transfers to restore upper extremity function: a paradigm shift. *Front. Neurol.* 5:40. DOI: 10.3389/fneur.2014.00040.
- Domeshek LE, Novak CB, Patterson JMM, et al. Nerve Transfers-A Paradigm Shift in the Reconstructive Ladder. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2019;7(6):e2290. Published 2019 Jun 25. DOI: 10.1097/GOX.0000000000002290.
- Chuang DC. Brachial plexus injury: nerve reconstruction and functioning muscle transplantation. *Semin Plast Surg.* 2010;24(1):57-66. DOI: 10.1055/s-0030-1253242.
- Gordon T. Peripheral Nerve Regeneration and Muscle Reinnervation. *Int J Mol Sci.* 2020;21(22):8652. Published 2020 Nov 17. DOI: 10.3390/ijms21228652.
- Grinsell D, Keating CP. Peripheral nerve reconstruction after injury: a review of clinical and experimental therapies. *Biomed Res Int.* 2014;2014:698256. DOI: 10.1155/2014/698256.
- Martin E, Senders JT, DiRisio AC, Smith TR, Broekman MLD. Timing of surgery in traumatic brachial plexus injury: a systematic review [published online ahead of print, 2018 May 1]. *J Neurosurg.* 2018;1-13. DOI: 10.3171/2018.1.JNS172068.
- Delgado DA, Lambert BS, Boutris N, et al. Validation of Digital Visual Analog Scale Pain Scoring With a Traditional Paper-based Visual Analog Scale in Adults. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev.* 2018;2(3):e088. Published 2018 Mar 23. DOI: 10.5435/JAAOSGlobal-D-17-00088.
- Matthews WB. Aids to the examination of the peripheral nervous system. *J Neurol Sci.* 1977;33(1-2):299.
- Hata A, Yamada Y, Tanaka R, et al. Dynamic Chest X-Ray Using a Flat-Panel Detector System: Technique and Applications. *Korean J Radiol.* 2021;22(4):634-651. DOI: 10.3348/kjr.2020.1136.
- Siqueira MG, Martins RS. Surgical treatment of adult traumatic brachial plexus injuries: an overview. *Arg Neuropsiquiatr.* 2011;69(3):528-535. DOI: 10.1590/s0004-282x2011000400023.
- Chuang DC. Brachial plexus reconstruction based on

- the new definition of level of injury. *Injury*. 2008;39 Suppl 3:S23-S29. DOI: 10.1016/j.injury.2008.05.012.
12. Bahm J, Noaman H, Becker M: The dorsal approach to the suprascapular nerve in neuromuscular reanimation for obstetric brachial plexus lesions. *Plast Reconstructive Surg*, 115(1):240-244, 2005.
  13. Hayden RJ, Jebson PJ. Wrist arthrodesis. *Hand Clin*. 2005;21(4):631-640. DOI: 10.1016/j.hcl.2005.08.004.
  14. Amadei F. Trapeziometacarpal arthrodesis. *Hand Surg Rehabil*. 2021;40S:S102-S105. DOI: 10.1016/j.hansur.2020.09.010.
  15. Yang Y, Zou XJ, Fu G, et al. Neurotization of free gracilis transfer with the brachialis branch of the musculocutaneous nerve to restore finger and thumb flexion in lower trunk brachial plexus injury: an anatomical study and case report. *Clinics (Sao Paulo)*. 2016;71(4):193-198. DOI: 10.6061/clinics/2016(04)03.
  16. Gates DH, Walters LS, Cowley J, Wilken JM, Resnik L. Range of Motion Requirements for Upper-Limb Activities of Daily Living. *Am J Occup Ther*. 2016;70(1):7001350010p1-7001350010p10. DOI: 10.5014/ajot.2016.015487.
  17. Chao AH, Lamp S. Current approaches to free flap monitoring. *Plast Surg Nurs*. 2014;34(2):52-58. DOI: 10.1097/PSN.0000000000000037.
  18. Strafun S.S. Kliniko-elektromiografichni stadii denervatsiino-reinnervatsiinoho protsesu u miazakh kintsivok pry ushkodzhenni peryferychnykh nerviv / S.S. Strafun, O.H. Haiko // *Travma*. — 2012. — T.13, No4. — S.121–127.
  19. Schreiber JJ, Byun DJ, Khair MM, Rosenblatt L, Lee SK, Wolfe SW. Optimal axon counts for brachial plexus nerve transfers to restore elbow flexion. *Plast Reconstr Surg*. 2015;135(1):135e-141e. DOI: 10.1097/PRS.0000000000000795.
  20. Luft M, Klepetko J, Muceli S, et al. Proof of concept for multiple nerve transfers to a single target muscle. *Elife*. 2021;10:e71312. Published 2021 Oct 1. DOI: 10.7554/eLife.71312.
  21. Bahm J, Ocampo-Pavez C. Free functional gracilis muscle transfer in children with severe sequelae from obstetric brachial plexus palsy. *J Brachial Plex Peripher Nerve Inj*. 2008;3:23. Published 2008 Oct 30. DOI: 10.1186/1749-7221-3-23.
  22. Meyer R, Claussen GC, Oh SJ. Modified trichrome staining technique of the nerve to determine proximal nerve viability. *Microsurgery*. 1995;16(3):129-132. DOI: 10.1002/micr.1920160302.
  23. Hattori Y, Doi K, Kaneko K, Heong TS. Intraoperative measurement of choline acetyltransferase activity to evaluate the functional status of donor nerve during reinnervated free muscle transfer: a preliminary report. *J Hand Surg Am*. 1998;23(6):1034-1037. DOI: 10.1016/S0363-5023(98)80011-7.
  24. Nicoson MC, Franco MJ, Tung TH. Donor nerve sources in free functional gracilis muscle transfer for elbow flexion in adult brachial plexus injury. *Microsurgery*. 2017;37(5):377-382. DOI: 10.1002/micr.30120.
  25. Saltzman EB, Krishnan K, Winston MJ, Das De S, Lee SK, Wolfe SW. A Cadaveric Study on the Utility of the Levator Scapulae Motor Nerve as a Donor for Brachial Plexus Reconstruction. *J Hand Surg Am*. 2021;46(9):812.e1-812.e5. DOI: 10.1016/j.jhsa.2020.11.022.
  26. Gesslbauer B, Hrubby LA, Roche AD, Farina D, Blumer R, Aszmann OC. Axonal components of nerves innervating the human arm. *Ann Neurol*. 2017;82(3):396-408. DOI: 10.1002/ana.25018.
  27. Mahmood B, Marshall D, Wolfe SW, Lee SK, Fufa DT. Anatomic evaluation of the obturator branch to the gracilis muscle to optimize its use as a free functional muscle transfer for elbow flexion reanimation. S50-S51 *The Journal of Hand Surgery*. 2018;43.
  28. Socolovsky M, Malessy M, Lopez D, Guedes F, Flores L. Current concepts in plasticity and nerve transfers: relationship between surgical techniques and outcomes. *Neurosurg Focus*. 2017;42(3):E13. DOI: 10.3171/2016.12.FOCUS16431.
  29. Shen, Jun. (2022). Plasticity of the Central Nervous System Involving Peripheral Nerve Transfer. *Neural Plasticity*. 2022. 10.1155/2022/5345269.

## Preconditions for the Successful Segmental Step-Wise Reconstruction of the Global Function of the Upper Extremity in Case of the Complete Brachial Plexus Injury (Case Report)

Hatskyi O.O.<sup>1</sup>, Tretiak I.B.<sup>1</sup>, Tymbaliuk V.I.<sup>1</sup>, Chyrka Yu.L.<sup>2</sup>, Jiang Hao<sup>1</sup>, Tymbaliuk Ya.V.<sup>1</sup>, Tretiakova A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>Vynnytsia Yushchenko Regional Psychoneurological Hospital, Vynnytsia

**Summary. Background.** The prognosis of recovery of the distal muscles (dM) of the upper extremity (UE) in complete brachial plexus injuries (cBPI) after any selective nerve transfer (NT) is poor. Free functioning muscle transfer (FFMT) is deprived of the disadvantages of NT. By combining NT and FFMT one can achieve recovery of the global functionality of UE in cBPI. **Objective:** to define theoretical and clinical preconditions for each stage (S) of the segmental reconstruction of UE in cBPI. **Materials and Methods.** 38 years old male patient 3 months after cBPI underwent NT (S1) of the phrenic to musculocutaneous nerve; branches of the spinal accessory nerve were transferred to axillary and suprascapular nerves. 36 months after S1 the patient underwent wrist (WA) and trapeziometacarpal arthrodesis (TMCA) (S2). 43 months after S1 the patient underwent FFMT of the gracilis muscle (S3). Clinical and neurological, electroneuromyographic (EMG), and X-ray examinations were carried out within the expected time to achieve the expected result

---

after the corresponding stages of reconstruction. **Results.** 26 months after S1 *m. biceps brachii* and *m. deltoideus* recovered to M4; *m. supra-infraspinatus* ineffectively recovered to M3. A stable arthrodesis effect in WA and TMCA was achieved after 42 months in general. Poor clinical and EMG recovery of the gracilis muscle (S3) within the expected time led to indefinite postponement of S4, with clinical and EMG control every 3 months. **Conclusions.** Clinical signs of functional recovery cannot be a prerequisite for using a primary recipient nerve as a secondary donor nerve; the number of motor fibers in the donor nerve must be confirmed by objective data of morphometric and histochemical express methods; theoretical preconditions of the “sitting donor” technique appear to be the most promising in terms of recovery of dM of UE.

**Key words:** brachial plexus; injury; nerve transfer; phrenic nerve; musculocutaneous nerve; spinal accessory nerve; obturator nerve; gracilis muscle; free functional muscle transfer.