

Ukr Neurosurg J. 2022;28(4):41-48  
doi: 10.25305/unj.265680

## Селективна хірургічна реіннервація пахвового нерва у пацієнтів із наслідками травматичного ушкодження первинних стовбурів (надключичні) плечового сплетення: результати використання, аналіз причин неефективності

Гацький О.О., Третяк І.Б., Цимбалюк В.І., Цимбалюк Я.В., Цзян Хао

Відділення відновлювальної нейрохірургії, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 09.10.2022  
Прийнята до публікації 21.11.2022

### Адреса для листування

Цимбалюк Ярослав Віталійович,  
Відділення відновлювальної нейрохірургії, Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, Україна, 04050, e-mail: yaroslav.neuro@gmail.com

**Мета:** провести ретроспективний аналіз результатів селективної невротизації (СН) пахвового нерва (Ах) у пацієнтів із надключичними травматичними ушкодженнями плечового сплетення (Н-ТУ ПС).

**Матеріали і методи.** У групі із 42 пацієнтів (середній вік – 31,2 року) проведено 25 СН Ах із використанням екстраплексусних нервів-донорів (е-НД): 9 при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС та 16 при тотальних варіантах Н-ТУ ПС. Виконано 17 СН Ах із використанням інтраплексусних нервів-донорів (і-НД) при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС. Селективну невротизацію Ах 29 (69%) пацієнтам проведено в терміни до 6 міс, 13 (31%) – пізніше 6 міс. Усім пацієнтам виконували неврологічне, електрофізіологічне дослідження на початку дослідження та через 6, 9, 15 і 17 міс. Ефективність відновлення силових (Ер) характеристик дельтоподібного м'яза (D) визначали за Medical Research Council Scale (MRC Scale). Ефективність функції (Еф) D – шляхом вимірювання кута згинання в плечовому суглобі в сагітальній площині.

**Результати.** Відновлення Ер D досягнуто у 12 (28%) пацієнтів (у терміни до 6 міс – у 31%, пізніше 6 міс – у 23%), зокрема при використанні і-НД – у 9 (52%) осіб (у терміни до 6 міс – у 60%, пізніше 6 міс – у 43%), при використанні е-НД – у 3 (12%) пацієнтів (у терміни до 6 міс – у 16%, пізніше 6 міс – у жодному випадку), відновлення Еф D – в 11 (26%) випадках (у терміни до 6 міс – у 31%, пізніше 6 міс – у 15%), зокрема при використанні і-НД – у 8 (53%) пацієнтів (у терміни до 6 міс – у 60%, пізніше 6 міс – у 29%), при використанні е-НД – у 3 (12%) осіб (у терміни до 6 міс – у 16%, пізніше 6 міс – у жодному випадку). Відновлення Еф D при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС досягнуто у 10 випадках при використанні як і-НД, так і е-НД (ефективність 38%). Використання е-НД при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС дало змогу відновити Еф D у 2 випадках (ефективність 22%), застосування і-НД – у 8 (ефективність 47%). Відновлення Еф D при тотальних варіантах Н-ТУ ПС досягнуто в 1 випадку (ефективність 6%).

**Висновки.** Використання е-НД може бути виправданим для забезпечення стабільності плечового суглоба при тотальних варіантах Н-ТУ ПС у терміни до 6 міс. Застосування і-НД дає змогу відновити Еф D при субтотальних Н-ТУ ПС у терміни до 6 міс.

**Ключові слова:** травма; плечове сплетення; невротизація; пахвовий нерв

### Вступ

Травматичні ушкодження первинних стовбурів (надключичні) плечового сплетення (ПС) призводять до тривалої та стійкої глобальної чи сегментарної дисфункції верхньої кінцівки [1]. Оцінювання можливості спонтанної регенерації навіть за допомогою сучасних електрофізіологічних [2–4] та рентгенологічних [5–8] методів обстеження є вкрай складним завданням, яке не гарантує успіху [1]. Очікування ймовірної спонтанної регенерації (СР) має чітку прив'язку до часового фактора [1, 9], інакше кажучи, визначені терміни [1, 9], поза якими не слід сподіватися на відновлення втраченої функції [1, 9]. Очікування відновлення в жодному разі не є пасивним процесом. Протягом визначеного [9]

періоду часу, відведеного на СР, проводять активний мультимодальний вплив на відновний процес за допомогою протокольних [10] консервативних лікувальних методів.

У міру наближення критичного кінцевого терміну, відведеного на СР, та за відсутності об'єктивних, насамперед клінічних [9], даних щодо відновлення втраченої функції необхідність застосування хірургічних реконструктивних методів виходить на перший план [9]. Принциповою відмінністю конвенційних хірургічних методів щодо впливу на регенераторний процес є їхня агресивність та селективність [1, 11–13]. Відповідно, за ступенем агресивності/селективності їх можна розташувати в такому порядку: невротиз, автологічна пластика



та невротизація. Кожен з них має певні переваги і недоліки, обмеження у використанні тощо [1, 11–14].

Протягом останнього десятиріччя збільшення частоти використання більш агресивного та селективного хірургічного методу впливу на регенераторний процес – селективної невротизації (СН) спричинило кардинальну зміну в підході до лікування не лише травматичних ушкоджень плечового сплетення, а й ушкоджень структур периферичної нервової системи (ПНС) загалом [11, 12]. Розроблені та впроваджені в практику численні методики СН дають змогу досягти прогнозованого функціонального результату в прогнозовані терміни [9, 11, 12]. Визначена пріоритетність відновлення сегментних функцій при ушкодженні структур ПНС верхньої кінцівки на будь-якому рівні [1], відповідно, визначені надійні потенційні нерви-донори (НД) і нерви-акцептори (НА).

Єдиним об'єктивним обмеженням можливості використання методу СН, окрім часового фактора [9], є особливості анатомії ушкоджень структур ПНС, зокрема надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення (Н-ТУ ПС). Це обмеження зумовлене зменшенням кількості, а, відповідно, доступності потенційних іпсилатеральних інтраплексусних НД (і-НД) у міру збільшення кількості передніх гілок спінальних нервів С5-Д1 (іноді – С4-Д2), залучених у патологічний травматичний процес [9, 12, 15]. У цьому контексті найбільші обмеження мають тотальні Н-ТУ ПС: доступними є лише іпсилатеральні екстраплексусні НД (е-НД) чи контралатеральні НД.

Пріоритетність відновлення м'язів та їхніх груп при ушкодженні структур ПС має вирішальне значення для глобальної функції верхньої кінцівки [1]. Найвищим пріоритетом для загальної функціональної спроможності верхньої кінцівки є згинання в ліктьовому суглобі (1-й порядок пріоритетності) [1]. Залучення всіх можливих е-НД та і-НД при виконанні СН направлено на відновлення саме пріоритетної функції 1-го порядку. Наступною за пріоритетністю функцією (2-й порядок пріоритетності) є стабільність та мультиаксальні рухи в плечовому суглобі. Стабільність плечового поясу певною мірою може бути забезпечена збереженою функцією лише аксіоскапулярної групи м'язів (трапецієподібного, великого та малого ромбоподібного м'язів, м'яза-підіймача лопатки [16]), іннервація яких забезпечується нервовими структурами поза ПС. З іншого боку, активні мультиаксальні рухи в плечовому суглобі забезпечуються м'язами з іннерваційного пулу саме ПС – іннерваційного пулу пахового (Ах) та надлопаткового (SS) нервів, відповідно, ймовірність їхнього відновлення за допомогою СН ще більше залежить як від черговості відновлення (2-й порядок) у визначеному порядку пріоритетності, так і від анатомії Н-ТУ ПС.

Традиційно ефективність відновлення рухової функції будь-яким консервативним чи хірургічним методом визначають за допомогою оцінювання силових характеристик м'яза (чи груп м'язів, що забезпечують мультиаксальні рухи у певному суглобі, часто – з різних іннерваційних пулів) за допомогою Medical Research Council Scale (MRC Scale) [17]. Однак силові характеристики м'яза чи груп м'язів у нормі та за патології не означають здатність цих м'язів

виконувати функцію ефективно [18]. Ефективність функції м'яза чи групи м'язів будь-якого сегмента верхньої кінцівки, обсяг максимального ефективного руху (eROM) у суглобі сегментарного апарату, який вони забезпечують, суттєво відрізняється від максимального можливого обсягу руху (mROM).

Ключовий м'яз [16] з іннерваційного пулу Ах – дельтоподібний м'яз (D) забезпечує реалізацію його основної функції – переважно згинання в плечовому суглобі (сагітальна площина) [16], а також відведення плеча [16] (фронтальна площина), mROM у плечовому суглобі в сагітальній площині, який забезпечується D, дорівнює 180° [18]. Динамічний аналіз основних видів щоденної (ADL) мономануальної та бімануальної активності дає підставу стверджувати, що eROM у плечовому суглобі в сагітальній площині дорівнює 108° [18], відповідно, ефективно відновлення силових характеристик (Ер) D та його ефективною функції (Еф) є основним завданням СН.

**Мета:** провести ретроспективний аналіз результатів селективної хірургічної реіннервації пахового нерва у пацієнтів із надключичними травматичними ушкодженнями плечового сплетення.

#### **Завдання дослідження:**

1) оцінити результати відновлення силових характеристик та ефективною функції D після проведення СН Ах;

2) визначити основні чинники, що впливають на ефективність/неефективність СН Ах у пацієнтів з Н-ТУ ПС.

#### **Матеріали і методи**

##### **Учасники дослідження**

У дослідженні взяли участь 68 пацієнтів (57 чоловічої та 11 жіночої статі) із Н-ТУ ПС (рівень 1-3 за класифікацією D.C. Chuang [13]). Від усіх пацієнтів отримано усвідомлену та добровільну письмову згоду на участь у дослідженні. Проведення дослідження схвалено комісією з етики Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України (протокол №3 від 22 листопада 2021р.).

##### **Критерії залучення:**

Пацієнти без вікових обмежень; наявність клінічно верифікованого Н-ТУ ПС (зокрема вогнепального характеру); період післяопераційного спостереження – не менше 15 міс; пацієнти, яким виконано хірургічне втручання із використанням методів невротизу, автологічної пластики та СН.

##### **Характеристики когорти пацієнтів**

Для формування когорти пацієнтів згідно із класифікацією D.C. Chuang використано спрощений підхід. Так, усі ушкодження за закритим типом (без ушкодження м'якотканинних поверхневих і глибоких структур латерального трикутника шиї) Н-ТУ ПС відповідали рівню 1-2 за класифікацією D.C. Chuang, а ушкодження за відкритим типом – рівню 3. Спрощення підходу зумовлено неможливістю виконати візуалізацію структур ПС/шийного відділу хребта в дохірургічний період за допомогою комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії протягом 2013-2014 рр., достеменно визначити випадки із прегангліонарними та постгангліонарними відривами або змішаним характером ушкодження [13].

У 63 (92%) пацієнтів Н-ТУ ПС було зумовлено високоенергетичним закритим тракційним ушкодженням без порушення цілісності поверхневих та глибоких м'якотканинних структур латерального трикутника шиї без/з переломом/остеосинтезом ключиці (рівень 1-2 за класифікацією D.C Chuang), у 5 (8%) осіб – відкритим ушкодженням структур ПС у латеральному трикутнику шиї (рівень 3).

Середній вік пацієнтів становив 28,4 року (від 0,5 до 72 років). Середній термін від моменту отримання травми до проведення СН – 7,4 міс (від 2 тиж до 6 років). Сорока шістьом (68%) пацієнтам СН (факт селективної хірургічної реіннервації) проведена в терміни до 6 міс, 22 (32%) – пізніше 6 міс. У когорті 68 пацієнтів, залучених у дослідження, анатомічні характеристики Н-ТУ ПС були такими: ушкодження передніх гілок спінальних нервів (надалі зазначено лише номер спинномозкового нерва) C5 – 1 (1,5%) випадок, C5-C6 – 18 (27%), C5-C6-C7 – 22 (32%), C5-C6-C7-C8 – 1 (1,5%), C5-C6-C7-C8-D1 (тотальний варіант Н-ТУ ПС) – 26 (38%).

Формування когорти пацієнтів ґрунтувалось на підтвердженому факті виконання селективної невротизації (СН), спрямованої на відновлення пріоритетної функції 1-го та 2-го порядків в одного пацієнта (або пріоритетної функції будь-якого одного порядку, або їх поєднання), а також поєднання порядків та субпорядків (іннерваційних пулів для пріоритетної функції 2-го порядку – Ах/SS), відповідно, кількість пацієнтів у дослідженні відповідає абсолютній кількості випадків виконання СН у дослідженні (68 пацієнтам виконано 68 СН): 55 СН, спрямованих на відновлення пріоритетної функції 1-го порядку, 42 СН, спрямованих на відновлення пріоритетної функції 2-го порядку (субпорядок 2, іннерваційний пул Ах) та 29 СН, спрямованих на відновлення пріоритетної функції 2-го порядку (субпорядок 2, іннерваційний пул SS) (**Табл.1**).

Формування досліджуваної групи пацієнтів ґрунтувалось лише на підтвердженому факті виконання СН, спрямованої на відновлення пріоритетної функції 2-го порядку – хірургічної реіннервації Ах (субпорядок 2) незалежно від наявних випадків поєднання СН, спрямованих на відновлення інших функцій у порядку чи субпорядку їхньої

пріоритетності, відповідно, група складалась із 42 пацієнтів. Середній вік пацієнтів становив 31,2 року. Двадцяти дев'ятьом (69%) пацієнтам СН Ах проведена в терміни до 6 міс, 13 (31%) – пізніше 6 міс. У цій групі анатомічні характеристики Н-ТУ ПС були такими: C5-C6 – 14 випадків (33% у групі дослідження та 21% у когорті пацієнтів у дослідженні), C5-C6-C7 – 12 (відповідно 29 і 18%), C5-C6-C7-C8-D1 (тотальний варіант Н-ТУ ПС, надалі – тотальний) – 16 (38 та 24%).

#### Дизайн дослідження

Аналітичне контрольоване ретроспективне когортне одноцентрове дослідження, проведене протягом 2013–2019 рр.

#### Характеристика хірургічних втручань

Селективну невротизацію Ах у досліджуваній групі пацієнтів виконували з використанням стандартних методик, описаних у численних літературних джерелах в останні 20 років [11, 12]. Нерви-донори, використані при проведенні СН, можна розподілити на дві основні підгрупи – і-НД та е-НД. Як основні і-НД (17 випадків використання, 41%) застосовували гілки променевого нерва до медіальної голівки триголового м'яза плеча (RN (СМТВ)) у 14 (33%) випадках та загальний стовбур грудо-спинного нерва (ThorDors) – в 1 (2%). У двох випадках як і-НД використано передню гілку переднього спінального нерва C5 за відсутності інших іпсилатеральних і-НД та е-НД та макроскопічно збереженій анатомічній цілісності останнього (життєздатність проксимальної кукси C5 не визначали за допомогою стандартних морфологічних методів [19] під час хірургічного втручання) – «донор відчаю». Як основне джерело е-НД (25 випадків використання, 41%) застосовували різноманітні гілки додаткового нерва (Асс).

У більшості випадків вибір на користь і-НД чи е-НД був зумовлений анатомією Н-ТУ ПС (тотальні варіанти ушкодження): безальтернативно е-НД у 16 (38%) випадках. У разі субтотальних варіантів Н-ТУ ПС перевага віддавали використанню і-НД перед е-НД (15 та 9 без урахування «донорів відчаю»).

Головною принциповою технічною відмінністю використання е-НД та і-НД була необхідність виконання інтерпозиції автологічного нервового трансплантата (розміри якого значно перевищували критичні розміри дефекту периферичного нерва [14]) між е-НД та

**Таблиця 1.** Кількість випадків виконання селективної невротизації, спрямованої на відновлення пріоритетної функції 1-го та 2-го порядків в одного пацієнта, або будь-якого одного порядку або їх поєднання, а також поєднання порядків та субпорядків (іннерваційних пулів для пріоритетної функції 2-го порядку – Ах/SS) у когорті пацієнтів

Порядок пріоритетності	ПФ 2-го порядку	ПФ 1-го порядку	ПФ 2-го порядку
Субпорядок	пул Ах		пул SS
Лише одна ПФ (сума фактів виконання СН лише для однієї ПФ)	42	55	29
ПФ1+ПФ2 (Ах+SS)	12		
ПФ1+ПФ2 (Ах)	35		
ПФ1+ПФ2 (SS)	8		
ПФ2 (Ах+SS)	20		20

Примітка: ПФ – пріоритетність функції (за M.G. Siqueira et al. [1]); Ах – паховий нерв; SS – надлопатковий нерв.

нервом-реципієнтом (НР) і прямим анастомозуванням і-НД-НР відповідно. У всіх випадках використання як е-НД, так й і-НД, виконували тотальну (повну або неселективну щодо гілок Ах) реіннервацію Ах.

#### **Оцінка результатів**

Усі залучені в дослідження пацієнти отримали інструкції відновити втрачену функцію та дотримуватися стандартизованих реабілітаційних програм через 3 міс після проведення СН. Усім пацієнтам після СН проводили неврологічний огляд, який доповнювали електрофізіологічним обстеженням (електронейроміографія) за стандартною методикою через 6, 9, 15 та 17 міс. Реабілітаційні програми після проведення СН формували відповідно до специфічних функцій, які первинно забезпечував НД, використаний під час хірургічного втручання: пацієнти були проінструктовані щодо необхідності виконання специфічних рухових вправ як під наглядом лікаря-реабілітолога, так і самостійно в домашніх умовах.

Первинною метою неврологічного обстеження було оцінити силові характеристики відновлення D за MRC Scale [17]: відновлення функції до рівня М4-5 вважали ефективним відновленням силових характеристик (Ер). Функціональну ефективність силових характеристик D оцінювали за допомогою вимірювання кута згинання в плечовому суглобі в сагітальній площині. Ефективною вважали функцію (Еf), якщо відновлений до М4-5 D був здатний забезпечити згинання в плечовому суглобі  $\geq 108^\circ$  (eROM). Вимога до згинання в плечовому суглобі в сагітальній площині ґрунтується на пікових показниках кутової активності D при виконанні більшості видів активної щоденної діяльності (ADL) [18].

Голкову та поверхневу електронейроміографію переважно використовували в ранні (через 9 та 12 міс) і пізні (через 15 та 17 міс) терміни після СН для підтвердження неефективної реіннервації або відсутності активності в D, що давало змогу рекомендувати проведення ортопедичних коригувальних втручання (транспозиції сухожилково-м'язового комплексу/комплексів) для відновлення згинання в плечовому суглобі у тих випадках, коли це було можливо.

#### **Статистичний аналіз**

Були наявні обмеження дослідження при проведенні статистичної обробки даних. Так, значна гетерогенність характеристик (вік, стать, терміни травми тощо) не дало змогу сформувати групи за подібними ознаками для проведення статистичного аналізу.

#### **Результати та їх обговорення**

Серед 42 пацієнтів із групи дослідження досягнуто клінічних ознак (від М2 до М5) реіннервації D у 25 (59%) випадках (Рис.1). У 17 (41%) випадках реіннервації D не відбулось після виконання СН. У терміни до 6 міс реіннервації D досягнуто у 16 (55%) пацієнтів, пізніше 6 міс – у 13 (69%). Відновлення ефективних силових характеристик (Ер) D досягнуто у 12 (28%) осіб (у терміни до 6 міс – у 9 (31%), пізніше 6 міс – у 3 (23%)). Співвідношення випадків ефективної (М4-5), неефективної (М2-3) та відсутності реіннервації D за результатами дослідження становило 12:13:17.

Використання і-НД дало змогу досягти клінічних ознак реіннервації D у 12 пацієнтів (71% від випадків використання усіх і-НД та 80% без урахування

«донорів відчаю»), у терміни до 6 міс – у 8 пацієнтів (80% від усіх випадків використання і-НД у ці терміни та 100% випадків без урахування «донорів відчаю»), пізніше 6 міс – у 4 (57%). Відновлення Ер D при використанні і-НД досягнуто у 9 (52%) пацієнтів (у терміни до 6 міс – у 6 (60%), пізніше 6 міс – у 3 (43%)). Співвідношення випадків ефективної (М4-5), неефективної (М2-3) та відсутності реіннервації D при використанні і-НД становило 9:3:5.

Застосування е-НД дало змогу досягти клінічних ознак реіннервації D у 13 (42%) пацієнтів (у терміни до 6 міс – у 8 пацієнтів (42% від усіх випадків використання е-НД у ці терміни), пізніше 6 міс – у 5 (83%)). Відновлення Ер D при використанні е-НД досягнуто у 3 (12%) пацієнтів (у терміни до 6 міс – у 3 (16%), пізніше 6 міс – у одному випадку). Співвідношення випадків ефективної (М4-5), неефективної (М2-3) та відсутності реіннервації D при використанні е-НД становило 3:10:12.

Досягнуто клінічних ознак відновлення ефективної функції (Еf) D (за умов відновлення Ер) в 11 (26%) випадках незалежно від термінів виконання СН (Рис.1) (у терміни до 6 міс – у 9 (31%), пізніше 6 міс – у 2 (15%)).

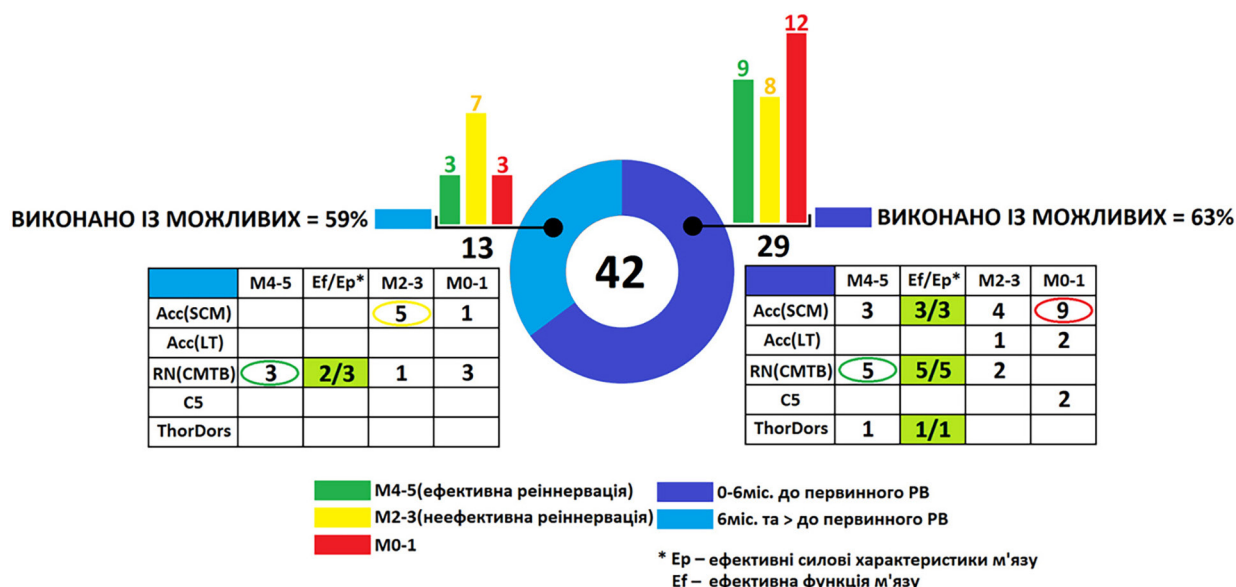
Використання і-НД дало змогу досягти відновлення Еf D у 8 (53%) випадках (у терміни до 6 міс – у 6 (60%), пізніше 6 міс – у 3 (29%)). Співвідношення випадків відновлення Еf у разі відновлення ефективних Ер D при використанні і-НД становило 8:9.

Застосування е-НД дало змогу досягти відновлення Еf D у 3 (12%) випадках (у терміни до 6 міс – у 3 (16%), пізніше 6 міс – у жодному випадку). Співвідношення випадків відновлення Еf у разі відновлення ефективних Ер D при використанні і-НД становило 3:3.

Відновлення Еf D при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС досягнуто у 10 випадках при використанні як і-НД, так і е-НД (ефективність 38%). Використання е-НД при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС дало змогу відновити Еf D у 2 випадках (ефективність 22%), застосування і-НД – у 8 (ефективність 47%). Відновлення Еf D при тотальних варіантах Н-ТУ ПС досягнуто в 1 випадку (ефективність 6%).

Головною метою хірургічної реіннервації м'язових структур є досягнення відновлення їх ефективної функції. Процеси, що супроводжують як спонтанне, так і хірургічно індуковане відновлення, підпорядковуються загальновідомим фізіологічним механізмам регенерації структур ПНС [20]. Основними чинниками, які впливають на ефективність відновлення рухової функції є відстань від місця ушкодження структури ПНС до м'яза-ефектора та інтегральний показник часу, тобто сума термінів від моменту ушкодження та прогнозованих термінів реіннервації м'яза [9, 20].

Хірургічно індукована селективна реіннервація (СН) здатна модифікувати вплив зазначених вище чинників, змінюючи чинник «відстані» та, відповідно, складової «чинника часу» (прогнозовані терміни реіннервації м'яза). Інакше кажучи, залучення нервів, що потенційно можуть стати донорами рухових волокон (до яких також висувуються певні вимоги [20, 21]), має відбуватись у безпосередній близькості до м'яза або групи м'язів із одного іннерваційного пулу. Дотримання цього принципу дає змогу певною мірою зменшити негативний вплив чинника «відстані» та складової чинника «часу». Це твердження



**Рис.1.** Ефективність відновлення силових характеристик дельтоподібного м'язу в результаті виконання невротизації із залученням нервів-донорів екстраплексусного та інтраплексусного походження в терміни до 6 міс і пізніше 6 міс після надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення: Acc(SCM) – pars sternocleidomastoideus nervi accessorii; Acc (LT) – pars trapezoideus (до pars ascendens of trapezius muscle) nervi accessorii; RN(CMTB) – рухові гілки n. radialis (від 1-3 шт.) до caput mediale m. triceps brachii; C5 – кукса передньої гілки спінального нерва C5; ThorDors – загальний стовбур грудо-спинного нерва; РВ – реконструктивне втручання

відображено в основних засадах ефективного використання методики СН [9, 14, 20]. Ефективність методики СН залежить ще від одного чинника, який неможливо модифікувати за жодних обставин, – чинника «анатомічних характеристик» ушкодження структур ПНС. У контексті використання методики СН найбільше значення має власне похідний від цього чинника – субчинник «доступності/наявності» НД рухових волокон. Загальновідомо, що найтяжчою травмою структур ПНС є надключичні та підключичні ушкодження ПС, відповідно, анатомічні характеристики ушкодження ПС більшою мірою впливають на доступність/наявність НД у безпосередній близькості до м'язу, функцію якого необхідно відновити. Оскільки джерелом таких НД здебільшого є власне ушкоджене ПС (і-НД), чинник «анатомічних характеристик» ушкодження здатний мінімізувати переваги методики СН (зменшити кількість доступних/наявних і-НД), що змушує використовувати е-НД.

Залежність використання НД від анатомії Н-ТУ ПС у проведеному дослідженні представлено у **Табл.2**.

Вартий уваги факт, що при виконанні СН у всіх тотальних варіантах Н-ТУ ПС у групі дослідження використано лише е-НД, тоді як СН при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС проведено із залученням і-НД у 17 випадках та е-НД – у 9 (36% від усіх випадків використання е-НД).

Оскільки е-НД розташовані на значній відстані від м'язу, функцію якого необхідно відновити, чинник «анатомічних характеристик» ушкодження безпосередньо впливає на чинник «відстані» та опосередковано – на складову чинника «часу». Результуючий вплив зазначених чинників призводить до неефективної реіннервації чи відсутності відновлення функції м'язу взагалі. Підтвердженням такого впливу чинників є низька частота відновлення

ефективних Ep та Ef D після СН із залученням е-НД як при субтотальних (22% випадків для Ep та Ef від проведених), так і при тотальних (6% випадків для Ep та Ef від проведених) варіантах Н-ТУ ПС (**Рис.2**).

Використання різних гілок додаткового нерва (Acc) на значній відстані від Ах (10–18 см) суттєво збільшувало вплив чинника «відстані» та складової чинника «часу». І навпаки, наявність доступних і-НД у безпосередній близькості до Ах при субтотальних Н-ТУ ПС значною мірою нівелювало вплив чинника «відстані» та складової чинника «часу». Підтвердженням цього є висока частота відновлення Ep та Ef D після СН із залученням і-НД при субтотальних Н-ТУ ПС: 60% від проведених без урахування використання «донорів відчаю» – для Ep та 53% – для Ef (Рис.2). Усунення іншої складової чинника «часу» (модуляція (зменшення) термінів від моменту ушкодження до проведення СН із залученням і-НД у терміни до 6 міс) збільшило до 75% частоту відновлення Ep та Ef D (без урахування ефективності використання «донорів відчаю»).

Поза суто «механістичним» аналізом результатів використання СН, спрямованої на відновлення пріоритетної функції 2-го порядку (субпорядок 2, іннерваційний пул Ах, D), шляхом виявлення зв'язків між причинами ефективності/неефективності СН та чинниками (а також їхніми складовими) часу і відстані, не менш важливим чинником є «філософська» складова – «готовність» профільного спеціаліста використовувати агресивніші хірургічні методи селективної реіннервації. Так, протягом 2013-2019 рр. та у міру отримання позитивних результатів СН загалом при відновленні функцій верхньої кінцівки у порядку їх пріоритетності формувалась абсолютна «готовність» профільних спеціалістів використовувати агресивніші хірургічні підходи (СН). Після отримання

**Таблиця 2.** Залежність походження використаних у дослідженні нервів-донорів від анатомічних характеристик надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення

Анатомія Н-ТУ ПС	Кількість випадків	Походження іпсилатеральних НД			
		е-НД		і-НД	
		Використано	Загалом	Використано	Загалом
Субтотальні варіанти 26 (C5-C6 та C5-C6-C7)	26	9	25	17	17
Тотальний варіант	16	16	25	0	17

Примітка: НД – нерв-донор; е-НД – екстраплексусні нерви-донори; і-НД – інтраплексусні нерви-донори.

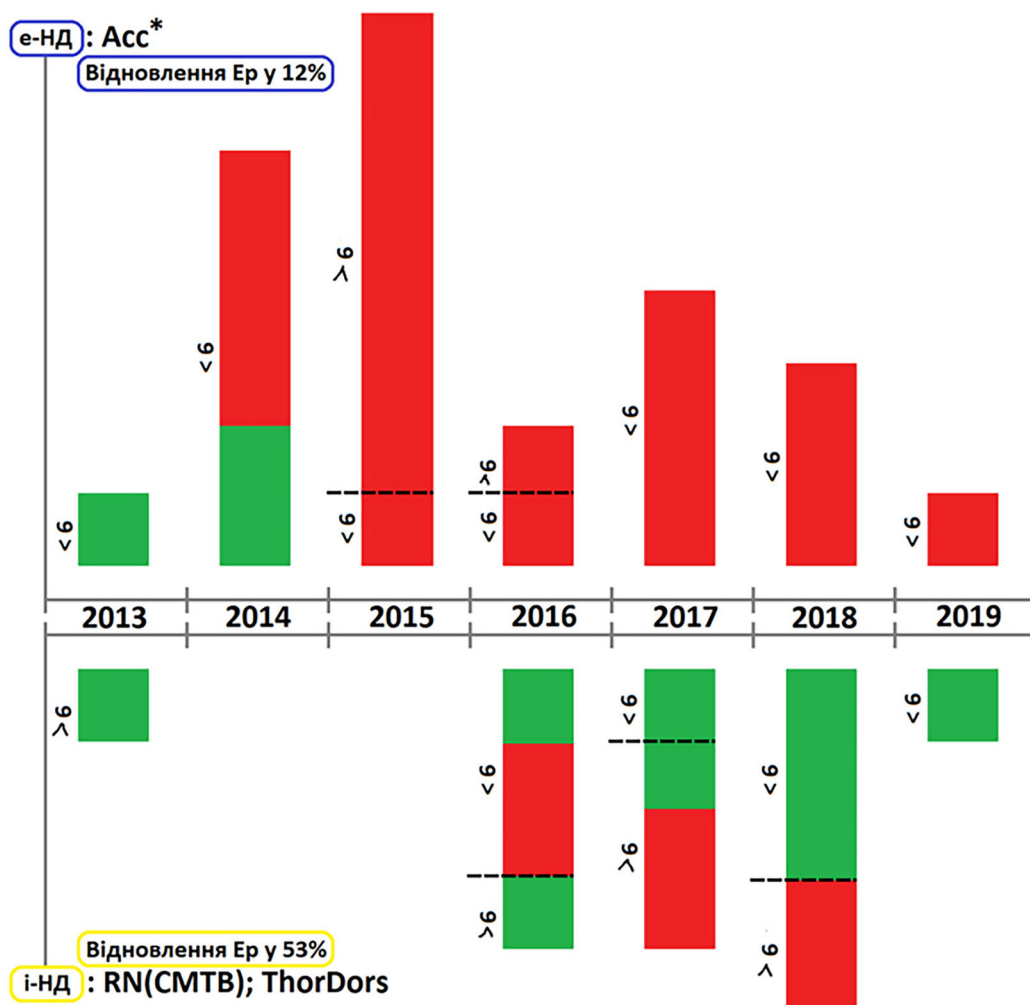
	е-НД		і-НД			
	Acc*		RN(CMTB)		ThorDors	
	Ep	Ef	Ep	Ef	Ep	Ef
C5-C6			4	4	1	1
C5-C6-C7	2	2	4	3		
Тотал.	1	1				

**Рис.2.** Залежність відновлення ефективних силових характеристик та ефективної функції дельтоподібного м'яза після селективної невротизації пахвового нерва при використанні нервів-донорів екстраплексусного та інтраплексусного походження від анатомічних характеристик надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення: е-НД – екстраплексусні нерви-донори; і-НД – інтраплексусні нерви-донори; Acc – *nervus accessorius*; RN(CMTB) – рухові гілки п. *radialis* (від 1-3 шт.) до *caput mediale m. triceps brachii*; ThorDors – загальний стовбур грудо-спинного нерва; Тотал. – тотальний варіант Н-ТУ ПС; \* – узагальнено для всіх можливих методик СН із залученням лише Acc (будь-яких гілок із будь-якого доступу)

численних негативних результатів при використанні «традиційних» методик (технік) СН із використанням е-НД (Acc) незалежно від анатомічних характеристик ушкодження (при тотальних та субтотальних варіантах Н-ТУ ПС, що характеризувались наявністю доступних і-НД) і аналізу впливу складових чинників часу та відстані (протягом 2013–2015 рр. дослідження) виникла потреба в інтенсивному використанні «нових» (які раніше не використовували взагалі або конкретним спеціалістом) методик (технік) СН із залученням нових НД. У досліджуваній групі протягом 2013–2019 рр. впроваджено 3 «нові» методики СН D – СН Ax (його порції – суперселективність) із залученням як і-НД гілки променевого нерва до медіальної голівки триголового м'яза плеча (RN(CMTB)), загального стовбура чи порції грудо-спинного нерва (ThorDors) та як е-НД – гілок додаткового нерва до висхідної порції трапецієподібного м'яза плеча (Acc(LT)). Розширення спектру НД, що на пряму пов'язано зі зміною філософії використання селективних реіннерваційних методик,

відображено на Рис.3. Використання е-НД не давало змоги нівелювати складову чинника «часу» (час, відведений на регенерацію) та поглиблювала проблему чинника «відстані» (відстань від НД до нерва-акцептора – м'яза-ефектора) як при тотальних, так і при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС: загальна ефективність «традиційних» методик дала змогу відновити Ep D загалом лише у 12% випадків використання (Рис.3). Активне впровадження «нових методик» СН дало змогу певною мірою нівелювати складову чинника «часу» (час, відведений на регенерацію) та повністю вирішити проблему чинника «відстані» при субтотальних варіантах Н-ТУ ПС: загальна ефективність «нових» методик дала змогу відновити Ep D загалом у 53% випадків використання (Рис.3).

Отже, урахування впливу багатьох чинників (часу, відстані, анатомічних характеристик ушкодження) є запорукою ефективного індивідуалізованого та системного використання методики СН при



**Рис. 3.** Динаміка використання «традиційних» та «нових» методик (технік) селективної невротизації пахвового нерва із залученням нервів-донорів екстраплексусного та інтраплексусного походження протягом 2013-2019 рр.: e-НД – екстраплексусні нерви-донори; i-НД – інтраплексусні нерви-донори; Acc – *nervus accessorius*; RN(CMTB) – рухові гілки *p. radialis* (від 1–3 шт.) до *caput mediale m. triceps brachii*; ThorDors – загальний стовбур грудо-спинного нерва; >6 – виконання СН пізніше 6 міс після ушкодження; <6 – виконання СН у терміни до 6 міс після ушкодження; Er – ефективні силові характеристики м’яза (M4-5 за MRC Scale); зелений колір – ефективне відновлення силових характеристик дельтоподібного м’яза; червоний колір – неефективне відновлення силових характеристик дельтоподібного м’яза (M1-3 за MRC Scale); \* – узагальнено для всіх можливих методик СН із залученням лише Acc (будь-яких гілок із будь-якого доступу)

ушкодженні будь-яких структур ПНС будь-якої кінцівки на будь-якому рівні.

**Висновки**

Використання екстраплексусних нервів-донорів (гілок додаткового нерва) для реіннервації пахвового нерва є неефективним у контексті забезпечення відновлення ефективної сили та функції дельтоподібного м’яза при надключичних травматичних ушкодженнях плечового сплетення (досягнуто лише у 12% пацієнтів).

Застосування екстраплексусних нервів-донорів (гілок додаткового нерва) може бути виправданим для забезпечення стабільності плечового суглоба (відновлення дельтоподібного м’яза до M2-3) (досягнуто у 40% пацієнтів).

Використання інтраплексусних нервів-донорів є ефективним у контексті забезпечення відновлення ефективних силових характеристик та ефективної функції дельтоподібного м’яза при субтотальних надключичних травматичних ушкодженнях плечового сплетення (досягнуто у 53% пацієнтів).

Екстраплексусні нерви-донори (гілки додаткового нерва) не слід застосовувати для реіннервації пахвового нерва у пацієнтів із субтотальними варіантами надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення.

Екстраплексусні нерви-донори (гілки додаткового нерва) доцільно використовувати для реіннервації пахвового нерва у пацієнтів із тотальними варіантами надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення.

Модуляція (зменшення) термінів від моменту ушкодження до проведення селективної реіннервації пахового нерва є обов'язковою при виконанні селективної невротизації із застосуванням як екстраплексусних, так і інтраплексусних нервів-донорів при відповідних варіантах надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення.

Термін 6 міс від моменту ушкодження до проведення селективної невротизації будь-якою методикою слід вважати критичним для досягнення відновлення ефективних силових характеристик та ефективної функції дельтоподібного м'яза при субтотальних надключичних травматичних ушкодженнях плечового сплетення (досягнуто у 75% пацієнтів).

Виконання селективної невротизації із застосуванням як екстраплексусних, так і інтраплексусних нервів-донорів при відповідних варіантах надключичних травматичних ушкоджень плечового сплетення пізніше 6 міс після ушкодження дає змогу забезпечити відновлення стабільності плечового суглоба (досягнуто у 46% пацієнтів).

### Розкриття інформації

#### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

#### Етичні норми

Усі процедури, виконані пацієнтам, відповідають етичним стандартам інституційного і національного комітетів із етики, Гельсінській декларації 1964 року та поправкам до неї або аналогічним етичним стандартам.

#### Інформована згода

Усвідомлену та добровільну письмову згоду на участь у дослідженні отримано у кожного пацієнта.

#### Фінансування

Дослідження виконано без спонсорської підтримки.

### Список літератури

1. Siqueira MG, Martins RS. Surgical treatment of adult traumatic brachial plexus injuries: an overview. *Arq Neuropsiquiatr.* 2011 Jun;69(3):528-35. doi: 10.1590/s0004-282x2011000400023
2. Warren J, Gutmann L, Figueroa AF Jr, Bloor BM. Electromyographic changes of brachial plexus root avulsions. *J Neurosurg.* 1969 Aug;31(2):137-40. doi: 10.3171/jns.1969.31.2.0137
3. Landi A, Copeland SA, Parry CB, Jones SJ. The role of somatosensory evoked potentials and nerve conduction studies in the surgical management of brachial plexus injuries. *J Bone Joint Surg Br.* 1980 Nov;62-B(4):492-6. doi: 10.1302/0301-620X.62B4.7430231
4. Kline DG, Happel LT. Penfield Lecture. A quarter century's experience with intraoperative nerve action potential recording. *Can J Neurol Sci.* 1993 Feb;20(1):3-10. doi: 10.1017/s0317167100047338
5. Carvalho GA, Nikkiah G, Matthies C, Penkert G, Samii M. Diagnosis of root avulsions in traumatic brachial plexus injuries: value of computerized tomography myelography and magnetic resonance imaging. *J Neurosurg.* 1997 Jan;86(1):69-76. doi: 10.3171/jns.1997.86.1.0069
6. Walker AT, Chaloupka JC, de Lotbiniere AC, Wolfe SW, Goldman R, Kier EL. Detection of nerve rootlet avulsion on CT myelography in patients with birth palsy and brachial plexus injury after trauma. *AJR Am J Roentgenol.* 1996 Nov;167(5):1283-7. doi: 10.2214/ajr.167.5.8911196
7. Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y, Takayama S. Magnetic resonance myelography in brachial plexus injury. *J Bone Joint Surg Br.* 1997 Sep;79(5):764-9. doi: 10.1302/0301-620x.79b5.7679
8. Doi K, Otsuka K, Okamoto Y, Fujii H, Hattori Y, Baliarsing AS. Cervical nerve root avulsion in brachial plexus injuries: magnetic resonance imaging classification and comparison with myelography and computerized tomography myelography. *J Neurosurg.* 2002 Apr;96(3 Suppl):277-84. doi: 10.3171/spi.2002.96.3.0277
9. Martin E, Senders JT, DiRisio AC, Smith TR, Broekman MLD. Timing of surgery in traumatic brachial plexus injury: a systematic review. *J Neurosurg.* 2018 May 1:1-13. doi: 10.3171/2018.1.JNS172068
10. Педаченко ЄГ, редактор. Стандартизація в нейрохірургії. Частина 2. Нейроонкологія. Київ: ДУ «ІНХ НАМНУ», 2020. 144 с.
11. Moore AM. Nerve Transfers to Restore upper Extremity Function: A Paradigm Shift. *Front Neurol.* 2014 Mar 31;5:40. doi: 10.3389/fneur.2014.00040
12. Hems T. Nerve transfers for traumatic brachial plexus injury: advantages and problems. *J Hand Microsurg.* 2011 Jun;3(1):6-10. doi: 10.1007/s12593-011-0031-1
13. Chuang DC. Brachial plexus reconstruction based on the new definition of level of injury. *Injury.* 2008 Sep;39 Suppl 3:S23-9. doi: 10.1016/j.injury.2008.05.012
14. Socolovsky M, Di Masi G, Battaglia D. Use of long autologous nerve grafts in brachial plexus reconstruction: factors that affect the outcome. *Acta Neurochir (Wien).* 2011 Nov;153(11):2231-40. doi: 10.1007/s00701-011-1131-1
15. Sakellariou VI, Badilas NK, Stavropoulos NA, Mazis G, Kotoulas HK, Kyriakopoulos S, Tagkalegkas I, Sofianos IP. Treatment options for brachial plexus injuries. *ISRN Orthop.* 2014 Apr 14;2014:314137. doi: 10.1155/2014/314137
16. Oatis CA. *Kinesiology : the Mechanics and Pathomechanics of Human Movement.* Third edition. Wolters Kluwer; 2017.
17. Matthews WB. Aids to the examination of the peripheral nervous system. *J Neurol Sci.* 1977;33(1-2):299.
18. 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 Jan-Feb;70(1):7001350010p1-7001350010p10. doi: 10.5014/ajot.2016.015487
19. Meyer R, Claussen GC, Oh SJ. Modified trichrome staining technique of the nerve to determine proximal nerve viability. *Microsurgery.* 1995;16(3):129-32. doi: 10.1002/micr.1920160302
20. Mackinnon SE. *Nerve Surgery.* New York: Thieme; 2015.
21. Zhang D, Varadharajan V, Bhardwaj P, Venkatramani H, Sabapathy SR. Considerations in the Selection of Donor Nerves for Nerve Transfer for Reanimation of Elbow and Shoulder in Traumatic Brachial Plexus Injuries. *J Hand Surg Asian Pac Vol.* 2022 Feb;27(1):10-21. doi: 10.1142/S242483552230002X