

## КОМПЛЕКСНА МОРФОМЕТРИЧНА, ЕЛЕКТРОФІЗИОЛОГІЧНА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОЇ ПЛАСТИКИ СІДНИЧНОГО НЕРВА ПРИ ЙОГО ВЕЛИКОМУ ДЕФЕКТІ У ЩУРІВ В ЕКСПЕРИМЕНТІ

В. І. Цимбалюк, І. Б. Третяк, О. О. Гацький, І. І. Буржуш, О. М. Базік  
ДУ "Інститут нейрохірургії ім. акад. А. П. Ромоданова НАМН України", м. Київ

### COMPLEX MORPHOMETRIC, ELECTROPHYSIOLOGIC AND FUNCTIONAL EVALUATION OF EFFICACY OF COMBINED PLASTY OF THE SCIATIC NERVE IN ITS LARGE DEFECT IN RATS IN EXPERIMENT

V. I. Tsymbaliuk, I. B. Tretiak, O. O. Gatskyi, I. I. Burkush, O. M. Bazik

The purpose of the study was complex morphometric, electrophysiologic and functional evaluation of efficacy of combined plasty of the 10 mm sciatic nerve defect in rats.

For complex evaluation of regeneration of the sciatic nerve of the rat three main common methods were used: morphometric, electrophysiologic and functional methods.

The  $A_{MW}$  index in animal groups № 7, 8, 9, 10, 11 and 12 was:  $2.56 \pm 1.1$  mV,  $2.04 \pm 0.75$  mV,  $3.2 \pm 0.87$  mV,  $2.44 \pm 0.57$  mV,  $0.61 \pm 0.32$  mV and  $1.87 \pm 0.48$  mV respectively, the  $V_{MF}$  index was 12.19 mm/ms, 12.8 mm/ms, 13.9 mm/ms, 13.3 mm/ms, 11.6 mm/ms and 13.3 mm/ms respectively. Mean density of fibers which were regenerated in animal groups № 7, 8, 9, 10, 11 and 12 was:  $2580 \pm 300.66$ ,  $2740 \pm 250.19$ ,  $4600 \pm 258.84$ ,  $4920 \pm 178.88$ ,  $5120 \pm 156.20$ ,  $5340 \pm 150.33$  per  $mm^2$  respectively. Rate of myelination of regenerated fibers in animal groups № 8, 10 and 12 was 46%, 73% and 86% respectively. The SFI index in animal groups № 7, 8, 9, 10, 11 and 12 was:  $-26.834 \pm 9.335$ ,  $-22.16 \pm 7.35$ ,  $-23.48 \pm 4.06$ ,  $-25.57 \pm 3.05$ ,  $-23.259 \pm 5.2$  and  $-24.124 \pm 4.8$  respectively.

The use of combined plasty variants (nerve entubulation by means of tube prosthesis filled with gel composite Neurogel™, and nerve entubulation by means of tube prosthesis filled with gel composite Neurogel™ impregnated with rat growth factor of nerves NGF-B (in dose 80 ng/kg) achieves the functional regeneration level comparable with autoneuroplasty quantitatively as well as qualitatively.

Key words: morphometry, electroneuromyography, functional regeneration, entubulation, combined plasty, large nerve defect, sciatic nerve of the rat.

### КОМПЛЕКСНАЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ, ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИКИ СЕДАЛИЩНОГО НЕРВА ПРИ ЕГО БОЛЬШОМ ДЕФЕКТЕ У КРЫС В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В. И. Цымбалюк, И. Б. Третяк, А. А. Гацкий, И. И. Буржуш, А. М. Базик

Целью проведенной экспериментальной работы была комплексная морфометрическая, электрофизиологическая и функциональная оценка эффективности комбинированной пластики при 10 мм дефекте седалищного нерва у крыс.

Для комплексной оценки регенерации седалищного нерва крысы были использованы 3 основных общепринятых метода: морфометрический, электрофизиологический и функциональный.

Показатель  $A_{MB}$  в группах животных № 7, 8, 9, 10, 11 и 12 равнялся:  $2,56 \pm 1,1$  мВ,  $2,04 \pm 0,75$  мВ,  $3,2 \pm 0,87$  мВ,  $2,44 \pm 0,57$  мВ,  $0,61 \pm 0,32$  мВ и  $1,87 \pm 0,48$  мВ соответственно, показатель  $Ш_{PB}$  равнялся 12,19 мм/мс, 12,8 мм/мс, 13,9 мм/мс, 13,3 мм/мс, 11,6 мм/мс и 13,3 мм/мс соответственно. Средняя плотность расположения волокон, которые регенерировали в группах животных № 7, 8, 9, 10, 11 и 12, равнялась:  $2580 \pm 300,66$ ,  $2740 \pm 250,19$ ,  $4600 \pm 258,84$ ,  $4920 \pm 178,88$ ,  $5120 \pm 156,20$  и  $5340 \pm 150,33$  в  $mm^2$  соответственно. Уровень миелинизации волокон, которые регенерировали в группах животных № 8, 10 и 12, составлял 46%, 73% и 86% соответственно. Показатель SFI в группах животных № 7, 8, 9, 10, 11 и 12 составил:  $-26,834 \pm 9,335$ ,  $-22,16 \pm 7,35$ ,  $-23,48 \pm 4,06$ ,  $-25,57 \pm 3,05$ ,  $-23,259 \pm 5,2$  и  $-24,124 \pm 4,8$  соответственно.

Использование вариантов комбинированной пластики (тубаж нерва трубчатым протезом, заполненным гелевым композитом Neurogel™, и тубаж трубчатым протезом, заполненным гелевым композитом Neurogel™, насыщенным крысиным фактором роста нервов NGF-B (в дозе 80 нг/кг)) обеспечивает сопоставимый с аутонейропластикой как количественный, так и качественный (функциональный) уровень регенерации.

Ключевые слова: морфометрия, электронейромиография, функциональная регенерация, тубаж, комбинированная пластика, большой дефект нерва, седалищный нерв крысы.

## Вступ

Процеси регенерації ушкодженого периферичного нерва (ПН) інтенсивно вивчаються протягом останніх років [5].

Значний негативний вплив травми ПН на якість життя людини, збільшення медичних та соціальних вимог до рівня медичної допомоги призвели до бурхливого розвитку великої кількості хірургічних методик для з'єднання кінців ураженого нерва [8]. Найбільш поширені — *анастомоз кінець-в-кінець* з використанням епіневрального шва, який виконують за умов наближення відрізків нерва без “натягу” із мінімальним залишковим діастазом в 1 мм, та *пластика ПН аутологічним трансплантатом*, яка виконується при неможливості усунути діастаз між відрізками ушкоджених нервів [14].

Дотепер, результати аутотрансплантації залишаються залежними від розміру діастазу між кінцями ушкодженого ПН, а, відповідно, і від довжини трансплантата [12]. За даними різних авторів, “критичні” розміри діастазу становлять від 4 до 15 см [11].

Ще в 1881 р. запропоновано альтернативну методику для подолання дефекту периферичного нерва, яка отримала назву — техніка тубажу [13]. *Тубаж нерва* (англ. — *entubulation*) — це хірургічна методика, яка передбачає з'єднання дистального та проксимального кінця ушкодженого ПН шляхом уміщення та фіксації останніх у трубчастий протез зі збереженням діастазу між кінцями нерва [11]. Для поліпшення процесів регенерації ушкодженого нерва порожнину трубчастого протеза заповнюють як синтетичними матеріалами різної хімічної структури, так і біологічними субстанціями, субстратами та клітинами, формуючи всередині протеза унікальне мікрооточення, що сприяє процесам регенерації ушкодженого нерва [11]. Ця методика має назву *комбінованої пластики*.

Для вивчення процесів регенерації периферичного нерва в експерименті розроблено та використано велику кількість різних експериментальних моделей [17]. Використання сідничного нерва у щура як об'єкта дослідження є найбільш прийнятним [9, 16], що зумовлено цілим рядом факторів, зокрема: доступністю великої кількості тварин з однаковим генотипом, великим регенераторним потенціалом нерва, що дорівнює такому у приматів тощо [9].

Регенерацію периферичного нерва в експерименті оцінюють за допомогою трьох основних широковживаних методів: електрофізіологічного, гістоморфометричного та різних функціональних тестів [3, 15, 16, 18].

**Мета** роботи — комплексна морфометрична, електрофізіологічна та функціональна оцінка ефективності комбінованої пластики сідничного нерва при його великому дефекті у щурів.

## Матеріали і методи

Робота була виконана на 60 білих безпородних щурах-самцях масою  $200 \pm 25$  г. Тварин згідно з завданням було розподілено на 12 груп по 5 тварин у кожній — 6 *груп контролю* (групи № 1–6) та 6 *експериментальних груп* (групи № 7–12).

## Методика виконання дефекту сідничного нерва

Хірургічне втручання у подальшому виконували в стерильних умовах під перитонеальним наркозом сумішшю каліпсола та седазину на 0,9% розчині хлориду натрію. Дози препаратів становили відповідно 5 і 2 мг на 100 г маси. Доступ виконувався у верхній і середній третині стегна за проєкційною лінією сідничного нерва на лівому стегні. Після обробки операційного поля розтинали м'які тканини, а потім тупо за допомогою затискача типу “москіт” виділяли сідничний нерв (рис. 1а). Лівий сідничний нерв у середній третині стегна (на відстані  $20 \pm 1,5$  мм від точки виходу сідничного нерва з порожнини малого таза — вимірювалася за допомогою лінійки) пересікали лезом безпечної бритви та висікали ділянку до  $10 \pm 2$  мм, таким чином формували дефект (рис. 1б), інтраопераційно підтверджували неможливість самовільного наближення кінців нерва навіть у положенні максимального згинання кінцівки в колінному суглобі.

### • Групи контролю

Для виконання дослідження у групах контролю застосовані такі *хірургічні втручання*:

1) у *групах № 1–2* — робили дефект сідничного нерва;

2) у *групах № 3–4* — після перерізування сідничного нерва накладали 3–6 мікрохірургічних епіпериневральних шва до задовільного співставлення пучків (рис. 1в);

3) у *групах № 5–6* — після виконання дефекту сідничного нерва виконували аутонейропластику дефекту сідничного нерва “вставкою” з попередньо висіченого сідничного нерва довжиною  $10 \pm 2$  мм. На обидва кінці “вставки” та сідничного нерва накладали 3–6 мікрохірургічних епіпериневральних шва до задовільного співставлення пучків (рис. 1г);

4) у *групах № 3–6* — шви накладали за допомогою атравматичної голки з монофіламентною поліамідною ниткою 10/0 фірми Ethicon®. Операцію виконували з використанням операційного мікроскопа при збільшенні  $\times 12$ .

В усіх групах контролю після проведення гемостазу рану ретельно зашивали.

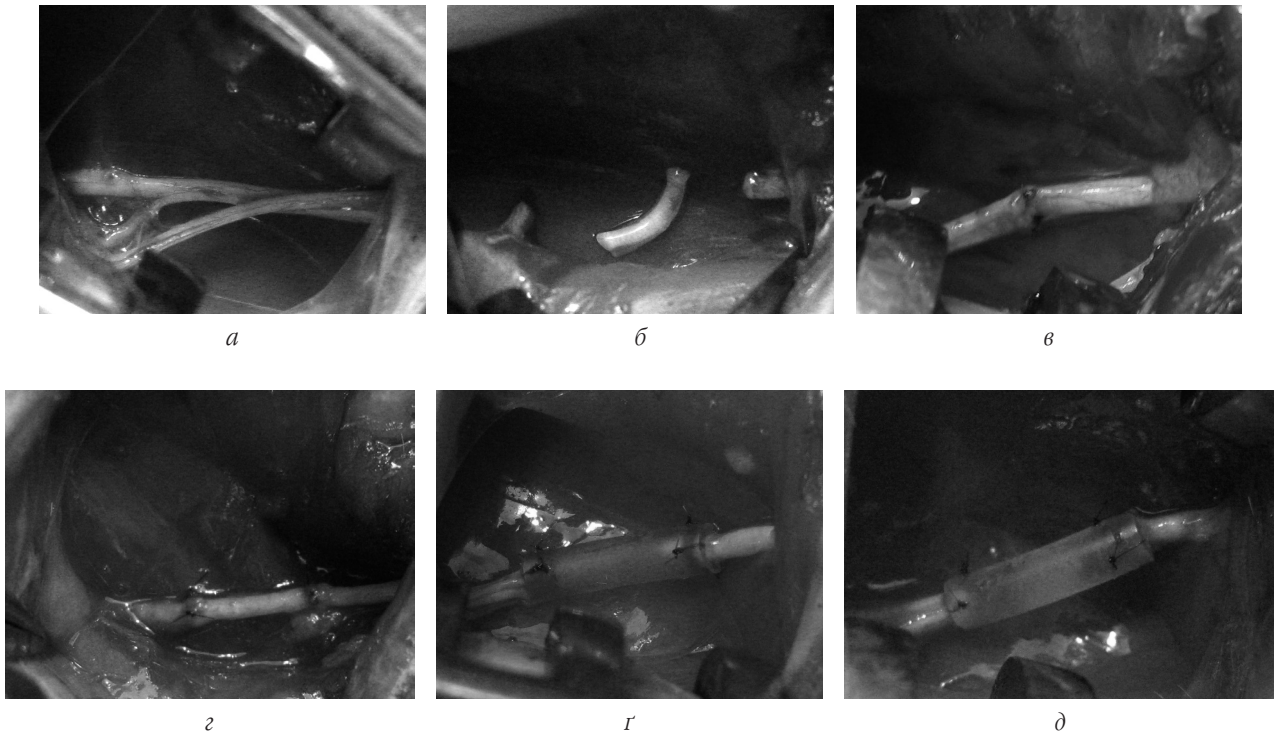
### • Експериментальні групи

Для виконання дослідження в експериментальних групах застосовані такі *хірургічні втручання*:

1) у *групах № 7–12* — для виконання тубажу як трубчастий протез використовували порожнисту трубку з поліхлорвінілу, дозволеного для медичного використання, стерилізованої  $\gamma$ -промінням та упакованої в індивідуальні поліетилєнові контейнери за відомою методикою, довжиною  $10 \pm 2$  мм, внутрішнім просвітом трубки 2 мм та товщиною стінки трубки  $0,5 \pm 0,05$  мм;

2) у *групах № 9–10* — для виконання комбінованої ксенопластики порожнину трубчастого протеза попередньо туго заповнювали стерильним дегідратованим (для забезпечення умов максимальної гідрофільності) гелевим композитом — Neurogel™ — високо гідрофільний полі [N-(2-гідроксіпропіл) метакриламід] (PHRMA) [15] за допомогою шпателя загальним об'ємом до  $31 \text{ мм}^3$  — групи;

3) у *групах № 11–12* — попередньо дегідратований стерильний Neurogel™ насичували розчином, що містить щурячий фактор росту нервів NGF-B у дозі 80 пг/кг.



**Рис. 1.** Мікрохірургічні методи, використані для відновлення функції сідничного нерва у щурів:  
*а* — загальний вигляд сідничного нерва; *б* — виконання дефекту сідничного нерва; *в* — шов сідничного нерва;  
*г* — аутопластика сідничного нерва; *д* — тубаж сідничного нерва порожнистим трубчастим протезом;  
*е* — тубаж сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™

В усіх експериментальних групах після виконання дефекту сідничного нерва за наведеною вище методикою проксимальний та дистальний кінці нерва вводили в порожнину трубчастого протеза на глибину до 0,5 мм та фіксували до його стінок за допомогою епіневральних швів з 4 сторін атравматичною голкою з монофіламентною поліамідною ниткою 10/0 фірми Ethicon® (рис. 1г, д). Фасцикули проксимального та дистального кінців нерва просторово орієнтували в порожнині трубчастого протеза так, щоб максимально виключити процеси гетеротопної реіннервації. Операцію виконували з використанням операційного мікроскопа при збільшенні  $\times 12$ . Після проведення гемостазу рану ретельно зашивали.

#### Утримання тварин після операції

Після хірургічного втручання усі піддослідні тварини отримували внутрішньом'язово одноразово антибактеріальний препарат цефтріаксон у дозі 20 мг/кг. Усі контрольні й експериментальні тварини отримували однаково харчування згідно з нормами віварію.

#### Стимуляційна електроміографія

Для оцінки ступеня відновлення рухових волокон сідничного нерва виконували пряму *стимуляційну електронейроміографію* (СЕНМГ) на двоканальному електронейроміографі «Нейрософт» (Росія) через 30 (*групи №1, 3, 5, 7, 9, 11*) та через 60 днів після операції (*групи №2, 4, 6, 8, 10, 12*).

СЕНМГ у щурів виконували під перитонеальним наркозом сумішшю каліпсолу та седазину на 0,9% розчині

хлориду натрію у дозах, що наводилися раніше. Після наркотизації тварини за допомогою мікрохірургічного інструментарію виділяли сідничний нерв від місця виходу з малого таза до місця розподілу на гілки на оперованому та інтактному стегні. Для попередження контактування нерва з оточуючими електропровідними тканинами порожнину операційної рани заповнювали підігрітим до  $37,5^{\circ}\text{C}$  вазеліновим маслом.

Стимуляцію проксимальної частини сідничного нерва виконували на відстані 5 мм від місця виходу його з малого таза за допомогою біполярного стимулюючого електроду, який був виготовлений з двох загнутих у вигляді гачка платинових голок з кінчиками діаметром 0,22 мм, фіксованими в тefлоновій канюлі на відстані 2,5 мм одна від одної. Стимуляцію проводили до моменту відсутності подальшого зростання амплітуди М-відповіді супрамаксимальною інтенсивністю стимулу від 10 до 20 мА та частотою 1–2 Гц.

Основні показники СЕНМГ реєстрували за допомогою концентричного голкового електроду довжиною 25 мм, діаметром 0,3 мм, площею відведення  $0,015\text{ мм}^2$ , який вводили у рухову точку литкового м'яза — *m. soleus* (найбільш виступаюча ділянка черевця м'яза), відповідно до проекції на шкіру зони кінцевих пластинок нерва. Відстань (В) між стимулюючими та реєструючими електродами становила близько 20 мм і була однаковою як на експериментальній, так і на інтактній кінцівках.

Металізована стрічка, змочена 0,9% розчином хлориду натрію, шириною 2 см та довжиною 10 см, була



використана як заземлюючий електрод, який розміщували вздовж хребта щура та фіксували лейкопластиром.

Під час виконання СЕНМГ усі піддослідні тварини знаходились у стандартному фізіологічному фіксуючому положенні.

Форму кривої М-відповіді (рис. 2), амплітуду М-відповіді ( $A_{MB}$ , мВ), латенцію М-відповіді ( $L_{MB}$ , мс) та похідний від нього показник — швидкість проведення імпульсу руховими волокнами ( $Ш_{PB}$ , мм/мс) (вираховували за формулою  $Ш_{PB} = V/L_{MB}$ ) [4] використовували для оцінки ступеня відновлення рухових волокон сідничного нерва щура.

Отримані дані систематизували, вираховували середнє значення та середньоквадратичне відхилення показників для усіх груп тварин. Достовірність різниці отриманих показників між групами тварин проводили за допомогою U-тесту Mann–Whitney.

Як “*позитивний*” контроль (норма “+”) використовували показники СЕНМГ інтактної кінцівки, як “*негативний*” контроль (норма “–”) використовували показники оперованої кінцівки, отримані в *групах № 1–2*, де виконували перетинання та створення дефекту сідничного нерва без подальшого мікрохірургічного відновлення його цілісності.

#### Морфометричне дослідження

Як матеріал для морфометричного дослідження використовували такі ділянки сідничного нерва:

- у *групах № 1–2*, де робили дефект сідничного нерва без подальшого відновлення його цілісності, морфометричне дослідження не проводилось;
- у *групах № 3–4* — як матеріал для морфометричного дослідження використовували ділянку сідничного нерва довжиною 5 мм дистальніше зони мікрохірургічного зшивання;
- у *групах № 5–6* — як матеріал для морфометричного дослідження використовували ділянку сідничного

нерва довжиною 5 мм дистальніше зони мікрохірургічного зшивання з аутогранулятом;

- у *групах № 7–12* — як матеріал для морфометричного дослідження використовували ділянку сідничного нерва довжиною 5 мм дистальніше зони мікрохірургічного зшивання з трубкою з поліхлорвінілу.

Відібрані за вказаною вище методикою матеріали готували за стандартною методикою: фіксували в 10% нейтральному розчині формаліну протягом 24–48 годин і потім заливали в парафін [2].

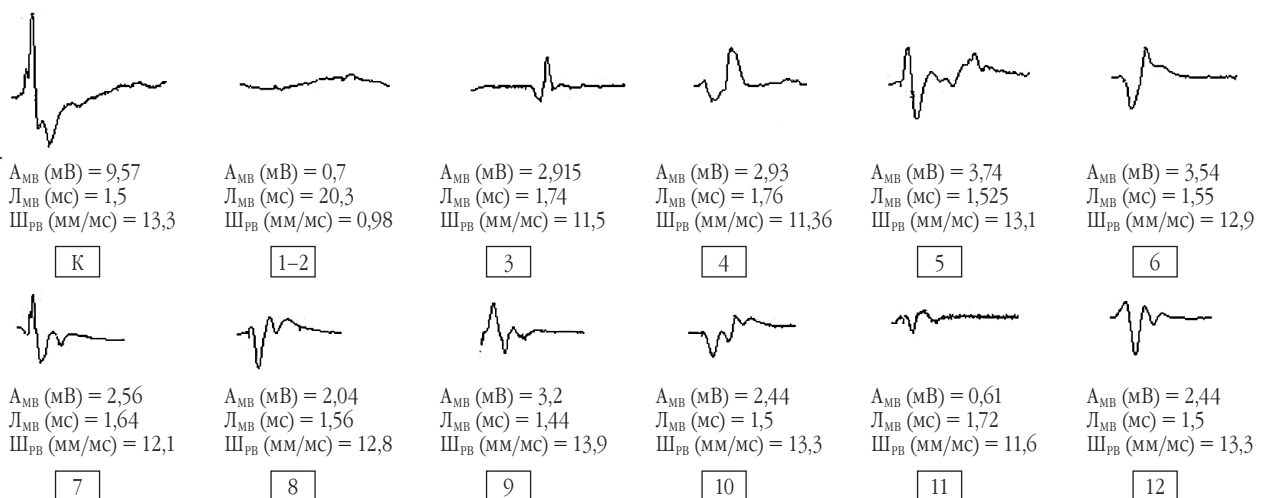
Для оцінки морфологічних змін гістологічні зрізи сідничного нерва товщиною 5–7 мкм виготовляли за допомогою автоматичного мікротома HM 360 (CarlZeissJena GmbH, Німеччина). Для оцінки стану нейрофібрил використовували імпрегнацію сріблом за Більшовським-Грос, для ідентифікації мієлінових волокон — за Шпільмейером [1, 5]. Для морфометричного дослідження відбирали зрізи, товщина яких після фарбування та фіксації при визначенні найвищої та найнижчої точки зрізу при збільшенні об'єктива мікроскопа  $\times 100$  відрізнялася не більше ніж на 0,2 мкм.

Мікроскопію і фотографування гістологічних препаратів проводили за допомогою світлового мікроскопа OLIMPUS BX 41 при збільшеннях у 40, 100, 200 і 400 разів. Отримували і обробляли знімки, проводили морфометрію та статистичну обробку за допомогою програми “Quick PHOTO MICRO 2.3”. Підрахунок середньої щільності розташування нервових волокон в 1 мм<sup>2</sup> проводили в п'яти ділянках площею 0,49 мм<sup>2</sup> для кожного зрізу.

Цифровий матеріал статистично обробляли за допомогою комп'ютерної програми “Excel” з пакету “Microsoft Office 2003”. Достовірність різниці одержаних морфометричних показників між групами тварин проводили за допомогою U-тесту Mann–Whitney.

#### Оцінка функціонального відновлення

Контроль за ступенем функціонального відновлення сідничного нерва виконували через 30 (*групи № 1, 3,*



**Рис. 2.** Криві М-відповіді, отримані при стимуляції сідничного нерва у щурів через 30 (*групи № 1, 3, 5, 7, 9, 11*) та через 60 днів (*групи № 2, 4, 6, 8, 10, 12*) після проведення реконструкції його дефекту з використанням різних мікрохірургічних методик (цифрами позначені номери груп): К — інтактна кінцівка (“позитивний” контроль); групи № 1–2 — резекція 10 мм сідничного нерва (“негативний” контроль); групи № 3–12 — після відновлення нерва різними хірургічними методами

5, 7, 9, 11) та 60 днів після операції (групи №2, 4, 6, 8, 10, 12). Для контролю функціонального відновлення сідничного нерва використовували “Тест ходьби на доріжці” (“Walking track analysis”) за методикою Johnston et al. [10], як фарбник використовували офіційний спиртовий розчин смарагдового зеленого. Після одержання відбитків підшовних поверхонь обох стоп проводили вимірювання наступних показників лівої (експериментальна — літера Е перед позначенням показника) та правої кінцівки (інтактна — літера N перед позначенням показника) у однієї й тієї ж тварини (рис. 3):

*PL* (print length) — відстань у мм від п'яти до III пальця;

*TS* (toe spread) — відстань у мм від I до V пальця;

*ITS* (intermediate toe spread) — відстань у мм від II до IV пальця (рис. 3а).

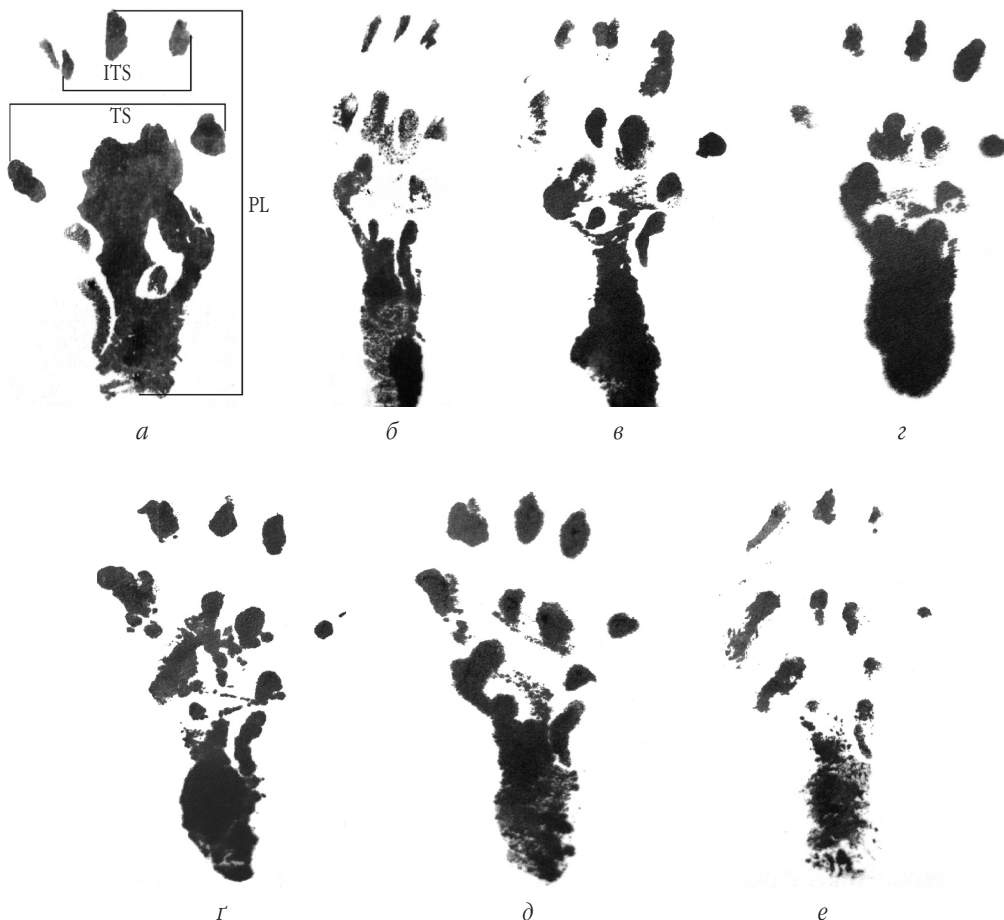
Отримані дані обраховували за допомогою формули  $SFI = -38,3 \left( \frac{EPL-NPL}{NPL} \right) + 109,5 \left( \frac{ETS-NTS}{NTS} \right) + 13,3 \left( \frac{EIT-NIT}{NIT} \right) - 8,8$  за Bain-Mackinnon-Hunter [6] та оцінювали функціональний індекс сідничного нерва (*SFI*-sciatic functional index).

Отримані дані систематизували, вираховували середнє значення та середньоквадратичне відхилення показника для усіх груп тварин. Після підрахунку *SFI* оцінювали отримані результати, причому за “0” вважали нормальну функцію сідничного нерва, за «-100” — повне порушення функції [7]. Достовірність різниці одержаних показників *SFI* між групами тварин визначали за допомогою U-тесту Mann-Whitney.

### Результати та їх обговорення

У 4 (6,7%) тварин серед 12 груп спостерігали формування контрактур гомілково-стопного суглоба експериментальної кінцівки, при яких тварини використовували при ходьбі внутрішньо-медіальну частину лівої стопи — 2 (3,3%) тварини з групи №1 та №2; 1 (1,7%) — з групи №3 та 1 (1,7%) — з групи №11.

У 3 (5%) тварин з групи №1 (2–3,3%) та №2 (1–1,7%) спостерігали виражені трофічні зміни на п'яті лівої експериментальної кінцівки.



**Рис. 3.** Відбитки підшовних поверхонь стоп щурів, отримані за допомогою “Walking track analysis” за методикою Johnston et al. (1991) через 60 днів після проведення реконструкції дефекту сідничного нерва з використанням різних мікрохірургічних методик: *а* — відбиток інтактної (правої) стопи; *б* — відбиток стопи після резекції 10 мм сідничного нерва; *в* — відбиток стопи після шва сідничного нерва; *г* — відбиток стопи після аутонейропластики сідничного нерва; *д* — відбиток стопи після тубажу сідничного нерва порожнистим трубчастим протезом; *е* — відбиток стопи після тубажу сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™; *ж* — відбиток стопи після тубажу сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™ та насиченого розчином NGF-B у дозі 80 пг/кг

Ампутацій фаланг, пальців чи частини стопи протягом 30 та 60 діб експерименту зафіксовано не було.

*Результати стимуляційної електроміографії*

Явно високі чи низькі показники амплітуди М-відповіді ( $A_{MB}$ ), латенції М-відповіді ( $L_{MB}$ ) та швидкості проведення імпульсу руховими волокнами ( $Ш_{PB}$ ) відкидали, причому кількість тварин, що залишалась у групі, дозволяла провести достовірний статистичний аналіз (табл. 1).

При аналізі показників, отриманих за допомогою СЕНМГ, ми брали до уваги такі факти:

1) показник  $A_{MB}$  є електрофізіологічним віддзеркаленням кількості волокон, що беруть участь у процесі скорочення м'яза;

2) показник  $Ш_{PB}$ , похідний від  $L_{MB}$ , віддзеркалює ступінь мієлінізації товстих рухових волокон у процесі відновлення периферичного нерва.

У групах тварин № 1 (30 доба) та № 2 (60 доба) після перерізування та виконання дефекту сідничного нерва спостерігалось повне порушення провідності сідничним нервом; змін електрофізіологічних параметрів у динаміці не спостерігалось.

У групах тварин № 3 (30 доба) та № 4 (60 доба) після перерізування та проведення мікрохірургічного шва сідничного нерва  $A_{MB}$  становила ~31% від норми і суттєво не змінювалась у динаміці; низький показник  $L_{MB}$  (приблизно в 1,17 рази більше норми) та висока  $Ш_{PB}$  (~86% від норми) свідчать про високий ступінь мієлінізації волокон, що регенерували, уже на 30 добу (див. рис. 3).

У групах тварин № 5 (30 доба) та № 6 (60 доба) після заміщення дефекту сідничного нерва методом аутопластики  $A_{MB}$  становила 39,1% (30 доба) та 36,9% (60 доба)

від норми;  $L_{MB}$  була приблизно в 1,025 рази більше норми;  $Ш_{PB}$  — ~98% від норми.

В експериментальних групах тварин № 7–8 при заміщенні дефекту сідничного нерва порожнистим трубчастим протезом  $A_{MB}$  становила 26,8% (30 доба) та 21,3% (60 доба) від норми;  $L_{MB}$  була в 1,1 рази (30 доба) та в 1,04 рази (60 доба) більше норми;  $Ш_{PB}$  становила 90,1% (30 доба) та 96,2% (60 доба) від норми. Що характерно, показник  $Ш_{PB}$  достовірно змінюється в динаміці ( $U_{смп}=0$ ;  $U_{кр}=2$ ;  $p \leq 0,05$ ), що свідчить про більш високий рівень мієлінізації аксонів, які регенерують на 60 добу порівняно з 30 добою після заміщення дефекту сідничного нерва порожнистим трубчастим протезом.

Подібна тенденція до збільшення показника  $Ш_{PB}$  та зниження  $L_{MB}$  спостерігається і в групах № 9–12, у яких для заміщення дефекту сідничного нерва використовували методи комбінованої пластики (тубаж нерва в поєднанні з гелевим композитом Neurogel™ та щурячим фактором росту NGF-B). Подібна тенденція свідчить про те, що виконання комбінованої пластики підтримує в активному стані процеси мієлінізації аксонів, що регенерують, у динаміці протягом щонайменше 60 діб.

При порівнянні показника  $A_{MB}$  між групами тварин № 5–6, де був використаний “золотий стандарт” (аутонейропластика) при заміщенні дефекту сідничного нерва, та групами № 9–12, у яких для заміщення дефекту сідничного нерва використовували методи комбінованої пластики (тубаж нерва в поєднанні з гелевим композитом та фактором росту), останній достовірно був більший у групах № 5–6, що безумовно свідчить про регенерацію більшої кількості аксонів та, відповідно, більш повноцінне відновлення нервово-м'язового зв'язку

Таблиця 1

**Показники амплітуди М-відповіді ( $A_{MB}$ ), латенції М-відповіді ( $L_{MB}$ ) та швидкості проведення імпульсу руховими волокнами ( $Ш_{PB}$ ) в експериментальних та контрольних групах тварин через 30 та 60 діб після виконання реконструкції дефекту сідничного нерва з використанням різних мікрохірургічних методик**

Мікрохірургічна методика	№ групи	С ( $A_{MB}$ )± $\delta$ , мВ		С ( $L_{MB}$ )± $\delta$ , мс		Ш <sub>PB</sub> , мм/мс	
		30 діб	60 діб	30 діб	60 діб	30 діб	60 діб
<i>Групи контролю</i>							
Дефект сідничного нерва	1	—	0,7±0,045	—	20,3±0,096	—	0,98
	2	0,7±0,045	—	20,3±0,096	—	0,98	—
Мікрохірургічний шов сідничного нерва	3	—	2,915 ±1,075	—	1,74±0,22	—	11,5
	4	2,93±0,925	—	1,76±0,265	—	11,36	—
Аутонейропластика сідничного нерва	5	—	3,74±1,51	—	1,525±0,05	—	13,1
	6	3,54±1,24	—	1,55±0,07	—	12,9	—
<i>Експериментальні групи</i>							
Тубаж нерва порожнистим трубчастим протезом	7	—	2,56±1,1	—	1,64±0,22	—	12,19
	8	2,04±0,75	—	1,56±0,092	—	12,8	—
Тубаж нерва + гелевий композит Neurogel™	9	—	3,2±0,87	—	1,44±0,18	—	13,9
	10	2,44±0,57	—	1,5±0,01	—	13,3	—
Тубаж нерва + гелевий композит Neurogel™ + щурячий фактор росту NGF-B	11	—	0,61±0,27	—	1,72±0,32	—	11,6
	12	1,87±0,48	—	1,5±0,01	—	13,3	—
Інтактна кінцівка: “позитивний” контроль	К	1,50		9,57		13,3	

Примітка. С — середнє арифметичне значення показника;  $\delta$  — середнє квадратичне відхилення.

з більшою кількістю волокон, що беруть участь в акті скорочення м'яза.

*Результати морфометричного дослідження*

У тварин групи № 3 на 30 добу після мікрохірургічного зшивання сідничного нерва щільність розташування аксонів (надалі  $N_A$ ) у його дистальній частині складала  $4960 \pm 208,80$  на  $1 \text{ мм}^2$  (табл. 2), на 60 добу експерименту  $N_A$  у дистальній частині сідничного нерва після його мікрохірургічного зшивання в групі тварин № 4 складала  $5200 \pm 184,39$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2). Достовірного збільшення щільності розташування аксонів у дистальній частині сідничного нерва, тобто кількості аксонів, що регенерували, після його мікрохірургічного зшивання, не спостерігається ( $U=9,5$ ;  $p < 0,05$ ).

Таблиця 2

**Щільність розташування аксонів ( $N_A$ ) у дистальному відрізку сідничного нерва на  $1 \text{ мм}^2$  через 30 та 60 дів після проведення реконструкції дефекту сідничного нерва з використанням різних мікрохірургічних методик**

Мікрохірургічна методика	№ групи	Щільність розташування аксонів ( $N_A$ ) на $1 \text{ мм}^2 \pm \delta$	
		через 30 дів	через 60 дів
<i>Групи контролю</i>			
Мікрохірургічний шов сідничного нерва	3	$4960 \pm 208,80$	—
	4	—	$5200 \pm 184,39$
Аутонейропластика сідничного нерва	5	$5180 \pm 239,58$	—
	6	—	$5360 \pm 140$
<i>Експериментальні групи</i>			
Тубаж нерва порожнистим трубчастим протезом	7	$2580 \pm 300,66$	—
	8	—	$2740 \pm 250,19$
Тубаж нерва + гелевий композит Neurogel™	9	$4600 \pm 258,84$	—
	10	—	$4920 \pm 178,88$
Тубаж нерва + Neurogel™ + щурячий фактор росту NGF-B	11	$5120 \pm 156,20$	—
	12	—	$5340 \pm 150,33$

**Примітка.**  $\delta$  — середнє квадратичне відхилення.

У групі тварин № 5 на 30 добу після заміщення дефекту сідничного нерва методом аутонейропластики  $N_A$  у його дистальній частині складала  $5180 \pm 239,58$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2), на 60 добу експерименту  $N_A$  у дистальній частині сідничного нерва в групі тварин № 6 складала  $5360 \pm 140$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2). Достовірного збільшення щільності розташування аксонів у дистальній частині сідничного нерва, тобто кількості аксонів, що регенерували, після заміщення його дефекту методом аутонейропластики не спостерігається ( $U=9,0$ ;  $p < 0,05$ ).

У групі тварин № 7 на 30 добу після тубажу дефекту сідничного нерва порожнистим трубчастим протезом  $N_A$  у його дистальній частині складала  $2580 \pm 300,66$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2); на 60 добу експерименту  $N_A$  у дистальній частині сідничного нерва в групі тварин № 8 складала  $2740 \pm 250,19$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2). Достовірного збільшення щільності розташування аксонів у дистальній

частині сідничного нерва, тобто кількості аксонів, що регенерували, після тубажу його дефекту порожнистим трубчастим протезом не спостерігається ( $U=4,0$ ;  $p < 0,05$ ).

У групі тварин № 9 на 30 добу після тубажу дефекту сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™,  $N_A$  у його дистальній частині складала  $4600 \pm 258,84$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2), на 60 добу експерименту  $N_A$  у дистальній частині сідничного нерва в групі тварин № 10 складала  $4920 \pm 178,88$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2). Достовірного збільшення щільності розташування аксонів у дистальній частині сідничного нерва, тобто кількості аксонів, що регенерували, після тубажу його дефекту трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, не спостерігається ( $U=5,0$ ;  $p < 0,05$ ).

У групі тварин № 11 на 30 добу після тубажу дефекту сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, насиченим щурячим фактором росту нервів NGF-B (у дозі  $80 \text{ пг/кг}$ ),  $N_A$  у його дистальній частині складала  $5120 \pm 156,20$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2), на 60 добу експерименту  $N_A$  у дистальній частині сідничного нерва в групі тварин № 12 складала  $5340 \pm 150,33$  на  $1 \text{ мм}^2$  (див. табл. 2). Достовірного збільшення щільності розташування аксонів у дистальній частині сідничного нерва, тобто кількості аксонів, що регенерували, після тубажу його дефекту трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, насиченим щурячим фактором росту нервів NGF-B (у дозі  $80 \text{ пг/кг}$ ) не спостерігається ( $U=7,5$ ;  $p < 0,05$ ).

При порівнянні показника  $N_A$  між групами тварин № 5–6, де був використаний “золотий стандарт” (аутонейропластика) при заміщенні дефекту сідничного нерва, та групами № 9–12, у яких для заміщення дефекту сідничного нерва використовували методи комбінованої пластики (тубаж нерва в поєднанні з гелевим композитом та фактором росту), на 30 добу експерименту показник  $N_A$  достовірно вище в групі № 5, ніж у групі № 9 ( $U=0$ ;  $p < 0,05$ ). На 60 добу експерименту показник  $N_A$  в групі тварин № 6 достовірно не відрізняється від такого в групі тварин № 10 ( $U=2,5$ ;  $p < 0,05$ ), що вказує на регенерацію тотожної кількості аксонів. Відповідно, трубчастий протез, заповнений гелевим композитом Neurogel™, який використано для заміщення дефекту сідничного нерва, володіє тотожним аутонейропластиці регенераторним потенціалом.

При співставленні показників  $N_A$  в групах тварин № 5–6 та № 11–12 можна стверджувати, що на 30 та 60 добу експерименту показники  $N_A$  достовірно не відрізняються:  $U=12,5$ ;  $p < 0,05$  та  $U=12,5$ ;  $p < 0,05$  відповідно. Таким чином, можна стверджувати, що метод тубажу дефекту сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, насиченим щурячим фактором росту нервів NGF-B (у дозі  $80 \text{ пг/кг}$ ) володіє тотожним аутонейропластиці регенераторним потенціалом, що не залежить від терміну, відведеного на процеси регенерації.

Не менш важливим показником, що характеризує регенераторний потенціал варіантів комбінованої пластики, є ступінь мієлінізації аксонів, що регенерували. Оскільки процес ремієлінізації розтягнутий у часі, а процеси відновлення кількісного складу аксонів



відбуваються паралельно, але не одночасно із процесами їх мієлінізації, ступінь мієлінізації аксонів, які регенерували, проводили лише на 60 добу експерименту.

У групі тварин № 12 спостерігали більш високий відсоток мієлінових волокон (86%) у порівнянні з групами тварин № 8 та № 10, де кількість мієлінованих волокон становила 46% та 73% відповідно (рис. 4).

*Результати дослідження функціонального відновлення*

Явно високі чи низькі показники SFI, що свідчили про недостатній чи завищений рівень функціонального відновлення, відкидали, причому кількість тварин, що залишалась у групі, дозволяла провести достовірний статистичний аналіз.

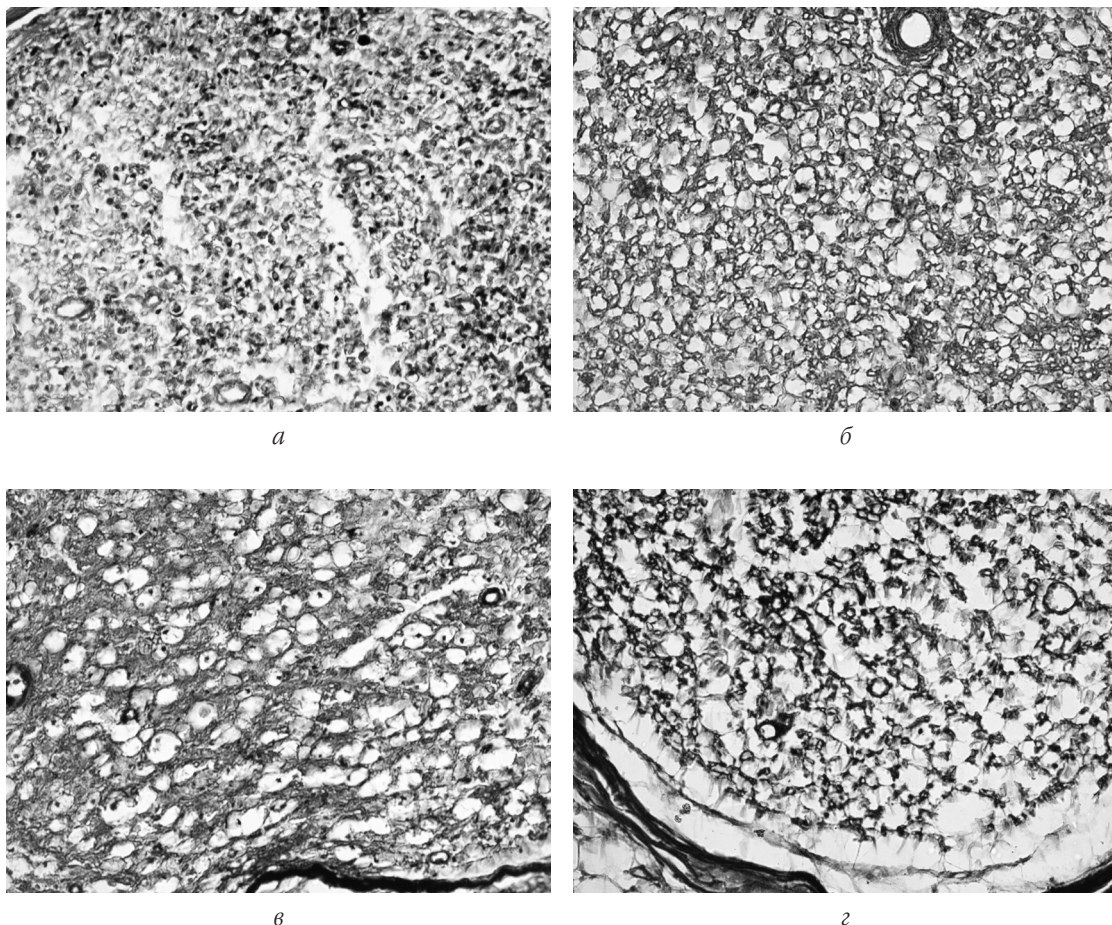
Показники SFI в групах контролю та в експериментальних групах наведені в табл. 3.

У групах тварин № 1 (30 доба) та № 2 (60 доба) після пересічення та виконання дефекту сідничного нерва спостерігається повне порушення функції сідничного нерва (показник SFI наближується до -100), причому в динаміці спостерігається статистично достовірна тенденція до “псевдорегресу” функціонального дефіциту

( $U_{\text{смп}}=0$ ,  $U_{\text{кр}}=1$ ;  $p \leq 0,01$ ), що можна пояснити пристосуванням тварини до користування паретичною кінцівкою (див. табл. 3).

У групах тварин № 3 (30 доба) та № 4 (60 доба) після пересічення та проведення мікрохірургічного шва сідничного нерва було досягнуто задовільного рівня функціонального відновлення при порівнянні з групами контролю (№ 1–2). Усереднене значення показника SFI у вищезазначених групах незначно змінювалося в динаміці, статистично різниця була не достовірною ( $U_{\text{смп}}=3$ ,  $U_{\text{кр}}=0$ ;  $p \leq 0,05$ ). Таку незначну відмінність у показнику SFI можна пояснити тим, що ступінь відновлення функції сідничного нерва після виконання мікрохірургічного шва вже на 30 добу досягає певного рівня, що дозволяє забезпечити тварині функцію ходьби, хоча повного функціонального відновлення, як видно з показника SFI навіть на 60 добу, не досягається (див. табл. 3).

У групах тварин № 5 (30 доба) та № 6 (60 доба) після заміщення дефекту сідничного нерва методом аутонейропластики спостерігається задовільне відновлення його функції при порівнянні з групами контролю (№ 1–2), при порівнянні значень SFI на 30 та 60 добу достовірної



**Рис. 4.** Мієлінізація осевих циліндрів через 60 діб після проведення реконструкції дефекту сідничного нерва з використанням різних мікрохірургічних методик. Забарвлення за Шпільмейером: а — після аутонейропластики сідничного нерва ( $\times 200$ ); б — після тубажу дефекту сідничного нерва порожнистим трубчастим протезом ( $\times 400$ ); в — після тубажу сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™ ( $\times 400$ ); г — після тубажу сідничного нерва трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, що насичений щурячим фактором росту NGF-B ( $\times 200$ )



Таблиця 3

**Показники SFI в експериментальних і контрольних групах тварин через 30 та 60 діб після проведення реконструкції дефекту сідничного нерва з використанням різних мікрохірургічних методик**

Мікрохірургічна методика	№ групи	SFI±δ	
		через 30 діб	через 60 діб
<i>Групи контролю</i>			
Виконання дефекту сідничного нерва	1	— 71,23±8,12	—
	2	—	— 55,15±7,68
Мікрохірургічний шов сідничного нерва	3	— 27,17±0,7	—
	4	—	— 25,098±2,28
Аутонейропластика сідничного нерва	5	— 16,027±2,65	—
	6	—	— 17,55±4,87
<i>Експериментальні групи</i>			
Тубаж нерва порожнистим трубчастим протезом	7	— 26,834±9,335	—
	8	—	— 22,16±7,35
Тубаж нерва + гелевий композит Neurogel™	9	— 23,48±4,06	—
	10	—	— 25,57±3,05
Тубаж нерва + Neurogel™ + щурячий фактор росту NGF-B	11	— 23,259±5,2	—
	12	—	— 24,124±4,8

**Примітка.** δ — середнє квадратичне відхилення.

тенденції до поліпшення функціонального статусу не спостерігається ( $U_{\text{емп}}=4$ ,  $U_{\text{кр}}=0$ ;  $p \leq 0,05$ ). Також слід зазначити, що показник функціонального відновлення сідничного нерва не суттєво відрізнявся між групами № 3–4 та № 5–6 (див. табл. 3). Таким чином, ми можемо підтвердити той факт, що виконання аутонейропластики нерва, “золотого стандарту” при заміщенні його дефекту, з дотриманням усіх правил мікрохірургічної техніки, дозволяє досягти рівня відновлення функції нерва, подібного до того, який ми можемо отримати при виконанні мікрохірургічного шва кінець-в-кінець.

В експериментальних групах тварин № 7–12 рівень відновлення сідничного нерва за показником SFI суттєво не змінювався в динаміці (на 30 та 60 добу) (див. табл. 3). Рівень функціонального відновлення при заміщенні дефекту сідничного нерва методом комбінованої пластики (тубаж нерва в поєднанні з гелевим композитом та фактором росту) можна співставити з таким при виконанні як шва, так і аутонейропластики нерва. Причому достовірної різниці між показником SFI навіть після заміщення дефекту сідничного нерва методом аутонейропластики та методом тубажу порожнім трубчастим протезом зафіксовано не було ( $U_{\text{емп}}=2$ ,  $U_{\text{кр}}=0$ ;  $p \leq 0,05$ , 30 доба). Що характерно, достовірної різниці між ступенем функціонального відновлення сідничного нерва при заміщенні його дефекту різними методами комбінованої пластики також не зафіксовано. Слід зазначити, що повного функціонального відновлення сідничного нерва при використанні як тубажу порожнім трубчастим протезом, так і комбінованої пластики досягти не вдалось.

**Висновки**

1. Використання варіантів комбінованої пластики — тубаж трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, та тубаж трубчастим протезом, заповненим гелевим композитом Neurogel™, насиченим щурячим фактором росту нервів NGF-B (у дозі 80 пг/кг), забезпечує кількісну та якісну (функціональну) складову регенерації сідничного нерва щура, що тотожний аутонейропластиці.

2. Це експериментальне дослідження створює надійний фундамент для подальшого вдосконалення методик комбінованої пластики та використання їх у клінічній практиці.

**Література**

1. Автандилов Г.Г. Основы патологоанатомической практики : [Руководство] (изд. 3-е доп.). — М. : Рос. мед. академия последипломного образования. — 2007. — 480 с.
2. Грабовий О.М. Ізопропанол-целоїдин-парафіновий метод заливки матеріалу для гістологічних досліджень / О.М. Грабовий, М.В. Проша // Укр. журн. мед. техніки та технології. — 1994. — № 1–2. — С. 34–36.
3. Крупаткин А.И. Нейроваскулярная регенерация нервов верхних конечностей / А.И. Крупаткин // Вопр. нейрохирургии. — 1989. — № 1. — С. 35–39.
4. Лузан Б.М. Вплив аlogenної трансплантації ембріональної нервової тканини на регенерацію ушкоджених периферичних нервів : дисертація на здобуття наук. ступеня канд. мед. наук : спец. 14.01.05 “Нейрохірургія” / Лузан Борис Миколайович. — К., 2000. — 171 с.
5. Сапожников А.Г., Доросевич А.Е. Гистологическая и микроскопическая техника : [Руководство]. — Смоленск : САУ, 2000. — 476 с.
6. Bain J.R. Functional evaluation of complete sciatic, peroneal, and posterior tibial nerve lesions in the rat / Bain J.R., Mackinnon S.E., Hunter D.A. // Plast. Reconstr. Surg. — 1989. — Vol. 83. — P. 129–138.
7. Carlton J.M. / Quantitating integrated muscle function following reinnervation / J.M. Carlton, N.H. Goldberg // Surg. Forum. — 1986. — Vol. 37. — P. 611–614.
8. Dellon A.L. Selection of the appropriate parameter to measure neural regeneration / A.L. Dellon, S.E. Mackinnon // Ann. Plast. Surg. — 1989. — Vol. 23. — P. 197–202.
9. Gramsbergen A. Sciatic nerve transection in the adult rat : abnormal EMG patterns during locomotion by aberrant innervation of hindleg muscles / A. Gramsbergen, M.F. Meek // Exp. Neurol. — 2000. — Vol. 161. — P. 183–193.
10. Improved imaging of rat hindfoot prints for walking track analysis. / Johnston R.B., Zachary L., Dellon A.L. [et al.] // J. Neuroscience Methods. — 1991. — Vol. 38. — P. 111–114.
11. Kanaya F. Sciatic function index, nerve conduction tests, muscle contraction, and axon morphometry as indicators of regeneration / Kanaya F., Firrell J.C., Breidenbach W. C // Plast. Reconstr. Surg. — 1996. — Vol. 98. — P. 1264–1272.
12. Lack of association between outcome measures of nerve regeneration / Munro C.A., Szalai J.P., Mackinnon S.E., Midha R. // Muscle Nerve. — 1998. — Vol. 21. — P. 1095–1097.

13. Mackinnon S.E. Changes in nerve fiber numbers distal to a nerve repair in the rat sciatic nerve model / Mackinnon S.E., Dellon A.L., O'Brien J.P. // Muscle Nerve. — 1991. — Vol. 14. — P. 1116–1122.
14. Mackinnon S.E. Histologic assessment of nerve regeneration in the rat / Mackinnon S.E., Hudson A.R., Hunter D.A. // Plast. Reconstr. Surg. — 1985. — Vol. 75. — P. 384–388.
15. Neural tissue formation within porous hydrogels implanted in brain and spinal cord lesions: ultrastructural, immunohistochemical, and diffusion studies / Woerly S., Petrov P., Sykova E. [et al.] // Tissue Engineering. — 1999. — № 5. — P. 467–488.
16. Rat walking tracks do not reflect maximal muscle force capacity / Urbancsek M.S., Chung K.C., Asato H. [et al.] // J. Reconstr. Microsurg. — 1999. — Vol. 15. — P. 143–149.
17. Walking track analysis: an assessment method for functional recovery after sciatic nerve injury in the rat / Sarikcioglu L., Sarikcioglu L., Demirel B.M. [et al.] // Folia Morphol. — 2009. — Vol. 68, № 1. — P. 1–7.
18. Wong B.J. Experimental nerve regeneration. A review / B.J. Wong, D.E. Mattox // Otolaryngol. Clin. North. Am. — 1991. — Vol. 24, № 3. — P. 739–752.

УДК 617.57:616.72-002.77:612.76

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯМ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ТІБІО-ФЕМОРАЛЬНІЙ ЗОНІ В УМОВАХ ПОЄДНАНИХ УШКОДЖЕНЬ СУГЛОБОВОГО ХРЯЦА ТА ПІСЛЯОПЕРАЦІЙНОГО ДЕФЕКТУ МЕНІСКА**

*I. A. Лазарев, О. А. Костогрыз, М. В. Скибан  
ДУ “Інститут травматології та ортопедії НАМН України”, м. Київ*

### **MATHEMATICAL MODELLING WITH DEFINITION OF STRESS-AND-STRAIN CONDITION IN TIBIO-FEMORAL ZONE IN COMBINED INJURIES OF ARTICULAR CARTILAGE AND POSTOPERATIVE MENISCUS DEFECTS**

*I. A. Lazarev, O. A. Kostobryz, M. V. Skiban*

*It is necessary to restore anatomical structure and function of the knee joint after damages caused by combined injury of the articular cartilage and meniscus. Stress-and-strain condition of biomechanical pattern elements of the knee joint that is medial epicondyle of the femur, articular cartilage with 5mm, 10mm, 15mm and 20 mm defect and 6 types of medial meniscus postoperative defects were defined on the basis of mathematical modeling by the finite-element method. Articular cartilage strain increased with increase of its defect size and it also depended from meniscus defect type. In increase of cartilage defect size from 5 to 20 mm the cartilage strain (3.5 MPa intact) increased from 55.3% in postoperative defect of 50% medial meniscus body to 182.2% in the total defect of posterior horn and medial meniscus body. In increase of cartilage defect from 5 mm to 20 mm the meniscus strain (5.13 MPa intact) increased from 3% in postoperative defect of 50% medial meniscus body and posterior horn to 80.1% in total posterior horn defect of the medial meniscus. Under condition of dynamic loads that is walking in everyday life such strains can lead to the fast progress of degenerate changes of the knee joint. These calculations aim the surgeon at the definition of surgery tactics directed on unloading of the affected area in the tibio-femoral zone.*

*Key words: knee joint, tibio-femoral zone, articular cartilage defect, finite elements modeling, strain and deformations.*

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ТИБИО-ФЕМОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ В УСЛОВИЯХ СОЧЕТАННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СУСТАВНОГО ХРЯЦА И ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО ДЕФЕКТА МЕНИСКА**

*I. A. Лазарев, О. А. Костогрыз, М. В. Скибан*

*Существует необходимость восстановления анатомического строения и функции коленного сустава, вызванных сочетанной травмой суставного хряща и мениска. На основе математического моделирования методом конечных элементов определено напряженно-деформированное состояние элементов биомеханической модели коленного сустава — медиального надмыщелка бедренной*