

## Восстановление двигательной иннервации соединением периферических нервов по типу «конец-в-бок»: экспериментальное моделирование и клиничко-инструментальный контроль реиннервации

© А.Ю. НИШТ<sup>1</sup>, Н.Ф. ФОМИН<sup>1</sup>, А.И. ИМЕЛЬБАЕВ<sup>2</sup>, А.А. МИКУЛИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, ул. Академика Лебедева, д. 6, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, ул. Литовская, д. 2, Санкт-Петербург, 194100, Российская Федерация

**Обоснование.** Высокая вероятность стойкой утраты профессиональной пригодности и значительный риск инвалидизации пострадавших в результате травм конечностей с повреждениями периферических нервов способствуют как постоянному совершенствованию техники хирургических вмешательств на периферических нервах, так и выполнению экспериментальных и анатомических исследований, направленных на разработку новых способов восстановления утраченной иннервации. Различные виды травм периферических нервов отмечаются у пострадавших мирного и военного времени в 2–6% и 9,8% случаев соответственно. Высокая степень инвалидизации пациентов с последствиями травм периферических нервов требует совершенствования диагностических и реконструктивно-пластических подходов у данной категории больных. Перспективным методом восстановления дистального участка пересеченного нерва при обширных дефектах нервного ствола является его соединение с боковой поверхностью интактного нерва-донора по типу «конец-в-бок». Отсутствие однозначных взглядов на природу реиннервации в данном случае даже при наличии единичных публикаций о положительных исходах подобных вмешательств позволяют в настоящее время применять данный способ только при отсутствии возможностей для выполнения общепринятых способов замещения обширных дефектов периферических нервов.

**Цель.** В экспериментах на лабораторных животных определить особенности моделирования травмы нервных стволов применительно к отработке техники восстановления утраченной иннервации путем соединения периферических нервов по типу «конец-в-бок», определить круг простых и демонстративных методов клиничко-инструментального контроля функционального состояния восстановленных периферических нервов в условиях длительного эксперимента.

**Методы.** Комплексное экспериментальное хирургическое и клиничко-инструментальное исследование выполнено на 61 лабораторном животном (кроликах породы «Шиншилла» обоего пола, зрелых, фенотипически здоровых особях). В условиях экспериментальной операционной под внутривенной анестезией выполняли моделирование дефекта периферического нерва путем резекции общего малоберцового нерва протяженностью 1 см на уровне средней трети бедра. У животных экспериментальной группы (n=39) для восстановления иннервации выполняли соединение по типу «конец-в-бок» дистального участка пересеченного общего малоберцового нерва со специально сформированным дефектом периневральной оболочки на латеральной поверхности большеберцового нерва. В группе контроля (n=22) замещение дефекта общего малоберцового нерва не производили. Период наблюдения после экспериментальных вмешательств составлял от 1 до 290 суток. Морфофункциональное состояние восстановленных нервных стволов определяли экспериментально-клиническими, лучевыми и электрофизиологическими методами.

**Результаты.** Выполнение односторонних резекций общего малоберцового нерва у лабораторных животных (кроликов) с последующим восстановлением дистального участка пересеченного нерва путем его соединения по типу «конец-в-бок» с расположенным рядом интактным нервом-донором позволяет получать воспроизводимые в эксперименте результаты восстановления иннервации тканей. Косвенная оценка функционального состояния восстановленных нервов возможна с использованием простых и доступных экспериментально-клинических тестов. Например, амплитуда разведения пальцев стопы экспериментальных животных при исследовании безусловного рефлекса подготовки к приземлению характеризует проводимость общего малоберцового нерва. При выполнении экспериментальных исследований с многоэтапными реконструктивно-пластическими вмешательствами на периферических нервах лабораторных животных включение лучевых методов в комплекс диагностических мероприятий позволяет выполнять прижизненную визуализацию структуры периферических нервов в области оперативного вмешательства, восстановленного нервного ствола, а также иннервируемых его ветвями тканей, что дает возможность корректировки плана последующих морфологических исследований.

**Выводы.** 1. Выполнение односторонней резекции общего малоберцового нерва лабораторных животных (кроликов) на уровне средней трети бедра в качестве модели травмы периферического нерва позволяет отработать технику восстановления дистального участка пересеченного нерва путем его соединения с расположенным рядом интактным нервом-донором по типу «конец-в-бок» и создает удовлетворительные условия для наблюдения лабораторных животных в условиях длительного эксперимента. 2. Простым и наглядным способом качественной оценки функционального состояния общего малоберцового нерва у лабораторных животных является определение амплитуды разведения пальцев стопы при инициации безусловного рефлекса подготовки к приземлению. 3. Включение лучевых методов исследования в программу комплексной оценки состояния периферических нервов позволяет выполнить их прижизненную визуализацию с определением основных морфологических характеристик восстановленных при экспериментальных реконструктивно-пластических вмешательствах нервных стволов.

**Ключевые слова:** периферический нерв; травма периферических нервов; шов нерва; восстановление периферических нервов; экспериментальное моделирование; соединение нервов по типу «конец-в-бок»; реиннервация; функциональное состояние периферических нервов

## Restoration of Motor Innervation by the «End-to-Side» Neurorrhaphia: Experimental Modeling and Clinical and Instrumental Control of Reinnervation

© A.YU. NISHT<sup>1</sup>, N.F. FOMIN<sup>1</sup>, A.I. IMELBAEV<sup>2</sup>, A.A. MIKULICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg state pediatric medical University, St. Petersburg, Russian Federation

**Background.** The high probability of permanent loss of professional fitness and a significant risk of disability of the injured as a result of limb injuries with peripheral nerve damage contribute to both the continuous improvement of surgical techniques on the peripheral nerves, and the implementation of experimental and anatomical studies aimed at developing new ways to restore the lost innervation. Various types of peripheral nerve injuries are observed in peace and wartime victims in 2-6% and 9.8% of cases, respectively. The high degree of disability of patients with the consequences of peripheral nerve injuries requires improvement of diagnostic and reconstructive plastic approaches in this category of patients. A promising method of restoration of the distal part of the crossed nerve with extensive defects of the nerve trunk is its connection with the lateral surface of the intact donor nerve by the «end-to-side» neurorrhaphia. The lack of unambiguous views on the nature of reinnervation in this case, even in the presence of single publications on the positive outcomes of such interventions allow us to use this method only in the absence of the possibility of using conventional methods of replacement extensive defects of peripheral nerves.

**Aims.** In experiments on laboratory animals to determine the features of modeling trauma of nerve trunks in relation to the development of the main stages of recovery of lost innervation by connecting peripheral nerves by the «end-to-side» neurorrhaphia and to determine the range of simple and demonstrative methods of clinical and instrumental control of the functional state of the restored peripheral nerves in a long-term experiment.

**Materials and methods.** A comprehensive experimental surgical and clinical-instrumental study was performed on 61 laboratory animals (Chinchilla rabbits of both sexes, phenotypically healthy individuals). In the experimental operating room under intravenous anesthesia, modeling of peripheral nerve defect was performed by resection of the total peroneal nerve with a length of 1 cm at the level of the middle third of the thigh. In animals of the studied group (n=39) to restore innervation, the "end-to-side" neurorrhaphia of the distal portion of the crossed common peroneal nerve with a specially formed defect of the perineural membrane on the lateral surface of the tibial nerve was performed. In the comparison group (n=22) no replacement of the defect of the common peroneal nerve was performed. The follow-up period after experimental interventions ranged from 1 to 290 days. Morphofunctional state of restored nerve trunks was determined by clinical-experimental, radiological and electrophysiological methods.

**Results.** Performing unilateral resections of the common peroneal nerve in laboratory animals (rabbits) with subsequent restoration of the distal portion of the crossed nerve by connecting it by the «end-to-side» neurorrhaphia with a nearby intact donor nerve allows to obtain reproducible in the experiment results of tissue reinnervation. Indirect assessment of the functional state of the restored nerves is possible using simple and accessible clinical-experimental tests. For example, the amplitude of the abduction of the toes of experimental animals in the study of the unconditional reflex of preparation for landing characterizes the conductivity of the common peroneal nerve. When performing experimental studies with multi-stage reconstructive plastic interventions on the peripheral nerves of laboratory animals, the inclusion of radiological methods in the complex of diagnostic measures allows performing in vivo visualization of the surgical intervention area, the restored nerve trunk, as well as the tissues innervated by its branches, which makes it possible to adjust the plan of subsequent morphological studies.

**Conclusions.** 1. Performing unilateral resection of the common peroneal nerve of laboratory animals (rabbits) at the level of the middle third of the femur as a model of peripheral nerve injury allows to practice the technique of restoration of the distal section of the crossed nerve by connecting it with the adjacent intact donor nerve of the «end-to-side» neurorrhaphia and creates satisfactory conditions for the observation of laboratory animals in a long experiment. 2. A simple and clear way to qualitatively assess the functional state of the common peroneal nerve in laboratory animals is to determine the amplitude of the abduction of the toes during the initiation of the unconditional reflex of preparation for landing. 3. The inclusion of radiological research methods in the program of comprehensive assessment of the peripheral nerves allows to perform their visualization in vivo with the definition of the main morphological characteristics of the restored in experimental reconstructive plastic interventions of nerve trunks.

**Keywords:** peripheral nerves; peripheral nerve injury; nerve suture; plastic surgery of the nerves; experimental modeling; the «end-to-side» neurorrhaphia; reinnervation; functional status of peripheral nerves

Высокая вероятность стойкой утраты профессиональной пригодности и значительный риск инвалидизации пострадавших в результате травм конечностей с повреждениями периферических нервов способствуют как постоянному совершенствованию техники хирургических вмешательств на периферических нервах, так и выполнению экспериментальных и анатомических исследований, направленных на разработку новых способов восстановления утраченной иннервации.

Различные виды травм периферических нервов отмечаются у пострадавших мирного и военного вре-

мени в 2–6% и 9,8% случаев соответственно [1, 2]. Высокая степень инвалидизации пациентов с последствиями травм периферических нервов требует совершенствования диагностических и реконструктивно-пластических подходов у данной категории больных [3].

Даже выполненное на высоком техническом уровне оперативное вмешательство по поводу травмы периферического нерва не гарантирует полного восстановления утраченных функций. При травмах периферических нервов наличие любого по протяженности дефекта периферического нервного ствола

существенно ухудшает прогноз оперативного лечения вследствие нарушения соответствия между периневральными футлярами [4]. При замещении обширных дефектов нервных стволов аутонервными трансплантатами значительно увеличивается доля гетерогенно и гетеротопно реиннервируемых периневральных футляров дистального участка пересеченного нерва, что отрицательно сказывается на функциональных результатах реконструкции нервного ствола. Перспективным методом восстановления дистального участка пересеченного нерва при обширных дефектах нервного ствола является его соединение с боковой поверхностью интактного нерва-донора по типу «конец-в-бок». Отсутствие однозначных взглядов на природу реиннервации в данном случае даже при наличии единичных публикаций о положительных исходах подобных вмешательств позволяют в настоящее время применять данный способ только при отсутствии возможностей использования аутонервных трансплантатов для замещения обширных дефектов периферических нервов [5, 6].

Моделирование травм периферических нервов в эксперименте на лабораторных животных с последующими реконструктивно-пластическими вмешательствами позволяет расширить современные представления о морфофункциональных изменениях при травмах и заболеваниях периферической нервной системы, без которых невозможно дальнейшее совершенствование хирургических вмешательств в этой области [3, 7].

### Цель

В экспериментах на лабораторных животных определить особенности моделирования травмы нервных стволов применительно к отработке техники восстановления утраченной иннервации путем соединения периферических нервов по типу «конец-в-бок», определить круг простых и демонстративных методов клинко-инструментального контроля функционального состояния восстановленных периферических нервов в условиях длительного эксперимента.

### Материалы и методы

Комплексное экспериментальное хирургическое и клинко-инструментальное исследование выполнено на 61 лабораторном животном (кроликах породы «Шиншилла» обоего пола, зрелых, фенотипически здоровых особях). Все исследования, проводимые с участием лабораторных животных, соответствовали международным рекомендациям по проведению медико-биологических исследований с использованием животных. В условиях экспериментальной операции под внутривенной анестезией выполняли моделирование дефекта периферического нерва путем резекции общего малоберцового нерва протяженностью 1 см на уровне средней трети бедра. У животных экспериментальной группы (n=39) для восстановления

иннервации выполняли соединение по типу «конец-в-бок» дистального участка пересеченного общего малоберцового нерва со специально сформированным дефектом периневральной оболочки на латеральной поверхности большеберцового нерва. В группе контроля (n=22) замещение дефекта общего малоберцового нерва не производили. Период наблюдения после экспериментальных вмешательств составлял от 1 до 290 суток. Морфофункциональное состояние восстановленных нервных стволов определяли экспериментально-клиническими, лучевыми и электрофизиологическими методами. Ультразвуковое исследование производили на 180–250 сутки послеоперационного периода аппаратом «Chison ECO6» с широкополосным линейным датчиком (диапазон частот сканирования 12–18 МГц). В те же сроки выполняли обзорную рентгенографию тазовых конечностей цифровым рентгенологическим аппаратом «Униэксперт». Стимуляционную электронейромиографию выполняли двухканальным компьютерным электронейромиографом «Нейро-МВП Микро» начиная с 30 суток послеоперационного периода и далее 1 раз в неделю.

### Этическая экспертиза

Настоящее исследование с участием лабораторных животных (кроликов) одобрено независимым Этическим комитетом при Военно-медицинской ака-



Рис. 1. Общий вид седалищного нерва кролика (на схеме: 1 – икроножный нерв, 2 – большеберцовый нерв, 3 – общий малоберцовый нерв).

Fig. 1. General view of the sciatic nerve of the rabbit (in the diagram: 1 - the sural nerve, 2 - the tibial nerve, 3 - common peroneal nerve).

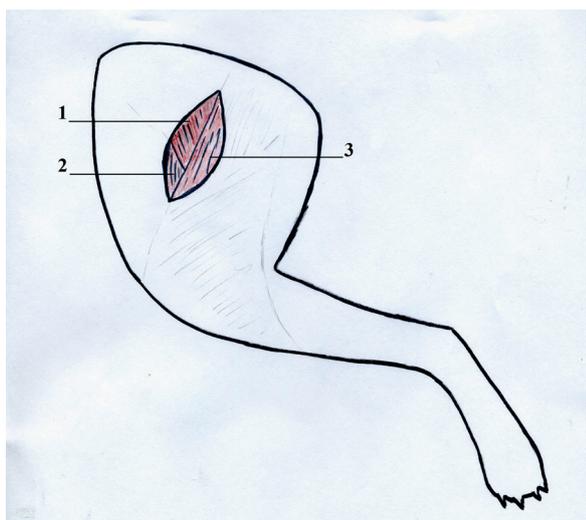


Рис. 2. Схема латерального доступа к седалищному нерву кроликов: 1 – поверхностная ягодичная мышца, 2 – мышца, напрягающая широкую фасцию, 3 – двуглавая мышца бедра.

Fig. 2. Schematic view of the lateral approach to the sciatic nerve of rabbits: 1 – superficial gluteus muscle, 2 – tensor fasciae latae muscle, a 3 – biceps femoris muscle.



Рис. 3. Вид операционной раны: к боковой поверхности большеберцового нерва подшит дистальный участок пересеченного общего малоберцового нерва.

Fig. 3. View of operating wound: to the lateral surface of the tibial nerve sutured distal portion of the crossed common peroneal nerve.

демии имени С.М. Кирова (протокол № 195 от 17 октября 2017 года).

### Результаты и их обсуждение

Наиболее частой по данным литературы моделью травмы периферических нервов для отработки техники выполнения реконструктивно-пластических вмешательств на периферических нервах является пересечение седалищного нерва у кроликов на уровне бедра. Этот подход обусловлен достаточным диаметром данного нервного ствола (около 3 мм) для выполнения экспериментальных вмешательств. На этапе планирования и подготовки к выполнению собственных экспериментальных оперативных вмешательств было выполнено прикладное топографо-анатомическое исследование, целью которого являлось определение оптимального хирургического доступа к седалищному нерву, а также наиболее подходящего уровня выполнения экспериментальных вмешательств.

лицному нерву, а также наиболее подходящего уровня выполнения экспериментальных вмешательств.

У кроликов седалищный нерв после выхода из подгрушевидного отверстия практически сразу отдает двигательные ветви к мышцам задней группы бедра и уже от границы верхней и средней трети бедра в его составе в большинстве случаев остается 3 основных пучка: большеберцовый, малоберцовый и икроножный (рис. 1). Наличие связей между периневральными футлярами данных пучков было обнаружено только в одном случае среди животных, участвовавших в исследовании. Это свидетельствует о высокой степени дифференцировки периферической нервной системы данного сегмента конечности у представителей семейства Зайцеобразные рода Кролики [8]. В вариационном ряду индивидуальной анатомической изменчивости периферической нервной системы такой тип строения нервных стволов соответствует эволюционно более поздней, концентрированной форме строения периферической нервной системы [9].

Одним из необходимых условий настоящего исследования являлось длительное наблюдение экспериментальных животных в послеоперационном периоде. Экспериментальные оперативные вмешательства выполняли на тазовых конечностях только с одной стороны с целью создания более благоприятных условий для животного при нахождении его в условиях длительного наблюдения в послеоперационном периоде. К нанесенной экспериментальным вмешательством травме животные адаптировались достаточно быстро и передвигались в пределах клетки без существенного видимого дискомфорта.

Для хирургического доступа к седалищному нерву выполняли разрез кожи по наружной поверхности средней трети бедра протяженностью около 3 см (рис. 2). После отведения двуглавой мышцы кзади, а латеральной межмышечной перегородки кпереди в ране визуализировали седалищный нерв. Таким способом удавалось добиться достаточного пространства для выполнения микрохирургического этапа вмешательств, а также сместить линию разреза кожи в область малодоступную для самостоятельного снятия животными асептической повязки с послеоперационной раны.

Животным экспериментальной группы после рассечения эпинеуральной оболочки и мобилизации малоберцового пучка, занимавшего всегда в составе седалищного нерва самое латеральное положение, выполняли его резекцию протяженностью около 1 см. Затем на латеральной поверхности периневрального футляра большеберцового нерва формировали округлый дефект, соответствовавший диаметру малоберцового пучка. Иссечение периневрия выполняли микрохирургическими ножницами, приподнимая удаляемый участок за держалочный шов. Дистальный участок малоберцового пучка соединяли по типу «конец-в-бок» с краями дефекта периневрия большеберцового пучка

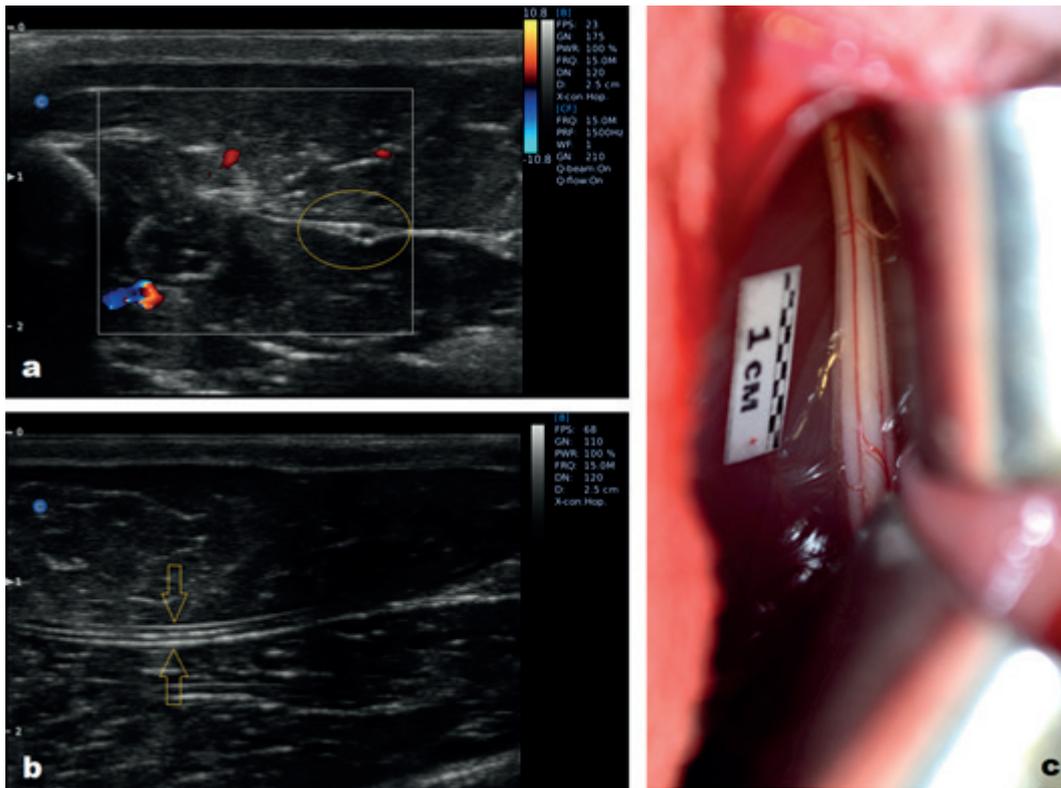


Рис. 4. Седалищный нерв кролика на уровне средней трети бедра: а – на поперечном срезе (отмечен желтым овалом); б – на продольном срезе; с – в операционной ране.  
 Fig. 4. The sciatic nerve of the rabbit at the level of the middle third of the thigh: a – on the cross section (marked with a yellow oval); b – on the longitudinal section; c – in the operating wound.

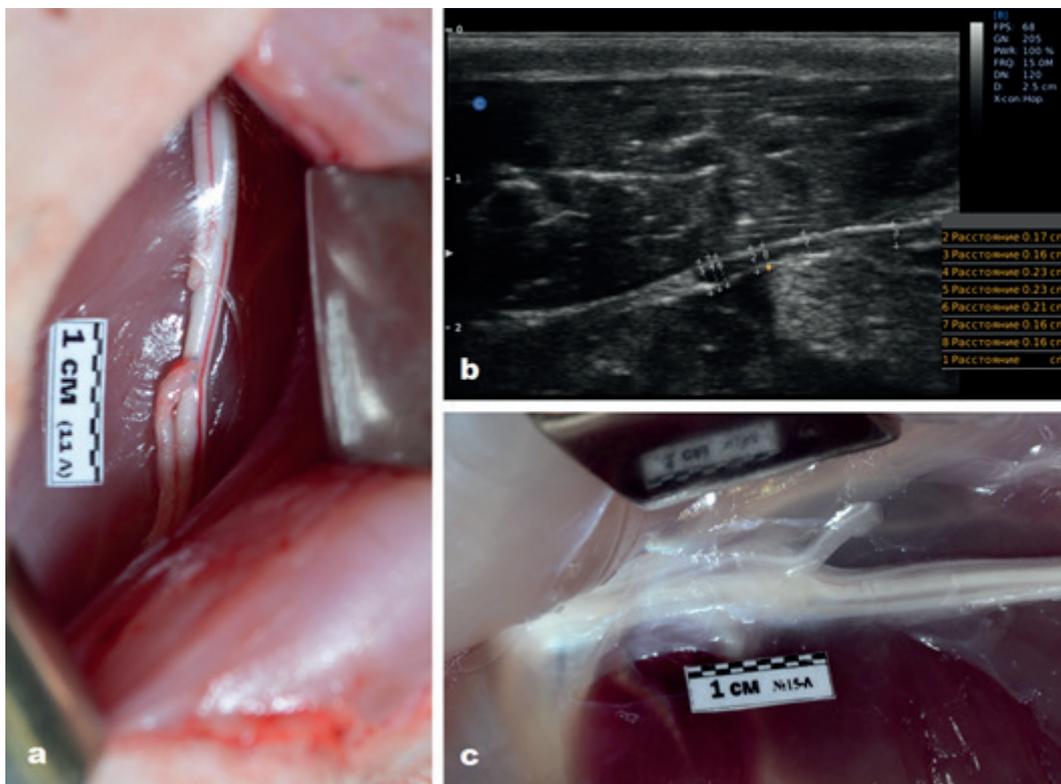


Рис. 5. Вид зоны экспериментального вмешательства: а – в операционной ране; б – при ультразвуковом сканировании на продольном срезе; с – при макроскопическом исследовании.  
 Fig. 5. Zone of the experimental nerve suture: a – in the operating wound; b – with ultrasound scanning on the longitudinal section; c – macroscopic examination.

четырьмя периневральными швами (Ethilon 9/0–10/0) (рис. 3). При наложении швов старались не повреждать нервные волокна, однако полностью избежать этого не удавалось вследствие их протрузии через сформированный дефект периневрия.

Животным контрольной группы после мобилизации общего малоберцового пучка и его резекции рану послойно ушивали без выполнения каких-либо реконструктивных вмешательств.

В послеоперационном периоде экспериментально-клиническими, электрофизиологическими и лучевыми методами определяли изменения функционального состояния восстановленных нервных стволов и таргетных зон их ветвей.

После снятия послеоперационных швов животных периодически выпускали на ровную горизонтальную поверхность для визуальной оценки степени отставания прооперированной конечности в движениях. У животных опытной и контрольной групп практически весь период наблюдения этот параметр был достаточно схожим. В обеих группах первоначально отмечалось отставание прооперированной конечности при произвольных движениях. В течение двух-трех недель животные приспосабливались к передвижениям с максимальным задействованием контралатеральной интактной конечности. Через 4 недели после операции заметить отставание прооперированной конечности в движениях животных обеих групп было практически не возможно.

Применительно к настоящему исследованию нами разработан оригинальный способ диагностики функционального состояния общего малоберцового нерва у лабораторных животных. О функциональном состоянии общего малоберцового нерва можно получить представление при сравнении амплитуды разведения пальцев стопы экспериментального животного при инициации безусловного статокинетического рефлекса приземления. В момент подготовки к приземлению животные сгибают бедра в тазобедренных суставах, разгибают голени в коленных суставах и сгибают стопу в скакательных суставах с одновременным разведением пальцев стопы. Разведение пальцев стопы у кроликов происходит при сокращении наружного разгибателя пальцев стопы, который получает иннервацию из глубокой ветви общего малоберцового нерва. Нарушение проводимости общего малоберцового нерва приводит к нарушению разведения пальцев стопы, что особенно демонстративно при сравнении оперированной и интактной конечностей [10].

Для прижизненной визуализации структуры восстановленного периферического нерва и определения состояния его таргетных зон в послеоперационном периоде выполняли ультразвуковое исследование тазовых конечностей лабораторных животных.

В настоящее время ультразвуковое исследование периферических нервов все активнее внедряется в комплекс стандартных диагностических меро-

приятий, выполняемых пациентам с травмами и заболеваниями периферических нервов. Существуют достоверные эхографические признаки, позволяющие в соответствии с данными о топографии безошибочно идентифицировать неизменные периферические нервы. В литературе описаны сонографические характеристики здоровых нервных стволов, а также ультразвуковая картина при различных патологических состояниях. Так, почти всегда при патологических состояниях периферических нервов изменяется площадь поперечного сечения и звукоотражающие свойства структур нервного ствола [11, 12].

Перед началом исследования для стандартизации результатов при ультразвуковом сканировании седалищного нерва добивались выведения на дисплее аппарата воспроизводимого среза ягодичной области с ориентировкой на большой вертел бедренной кости и начало полусухожильной мышцы. После этого при перемещении датчика в дистальном направлении на поперечных срезах определяли седалищный нерв, ориентируясь на заднюю межмышечную перегородку (рис. 4-а). На уровне средней трети бедра диаметр седалищного нерва интактных лабораторных животных (кроликов) при ультразвуковом исследовании составлял 1,3–1,9 мм.

На продольных срезах седалищный нерв определялся как линейная структура с продольной исчерченностью (рис. 4-б). Ввиду меньшего количества пучков в составе периферических нервов лабораторных животных продольная исчерченность была менее выраженной, по сравнению с таковой показанной у людей. В нижней трети бедра визуализировалось место разветвления седалищного нерва на большеберцовый и общий малоберцовый нервы. Однако, в связи с особенностями топографии данных ветвей и малыми размерами тазовой конечности лабораторного животного, на эхограмме одновременно получить изображение седалищного, большеберцового и общего малоберцового нервов не удалось.

Зону экспериментального оперативного вмешательства определяли по изменению эхогенных свойств параневральных тканей и локальному увеличению диаметра нервного ствола до 2,3–2,8 мм (рис. 5). Непосредственно в зоне оперативного вмешательства визуализировалась внутривольная неврома, характеризовавшаяся гипозхогенным центром и гиперэхогенным контуром. Дистальнее области экспериментального шва у животных опытной группы общий малоберцовый нерв сонографически существенно не отличался от интактного нерва (рис. 5-б). По сравнению с интактной контралатеральной конечностью имело место только некоторое снижение эхогенности регенерирующего нерва. Достоверного отличия диаметров интактного и восстановленного в эксперименте нервных стволов отмечено не было.

При макроскопическом исследовании области реконструктивных вмешательств на периферических

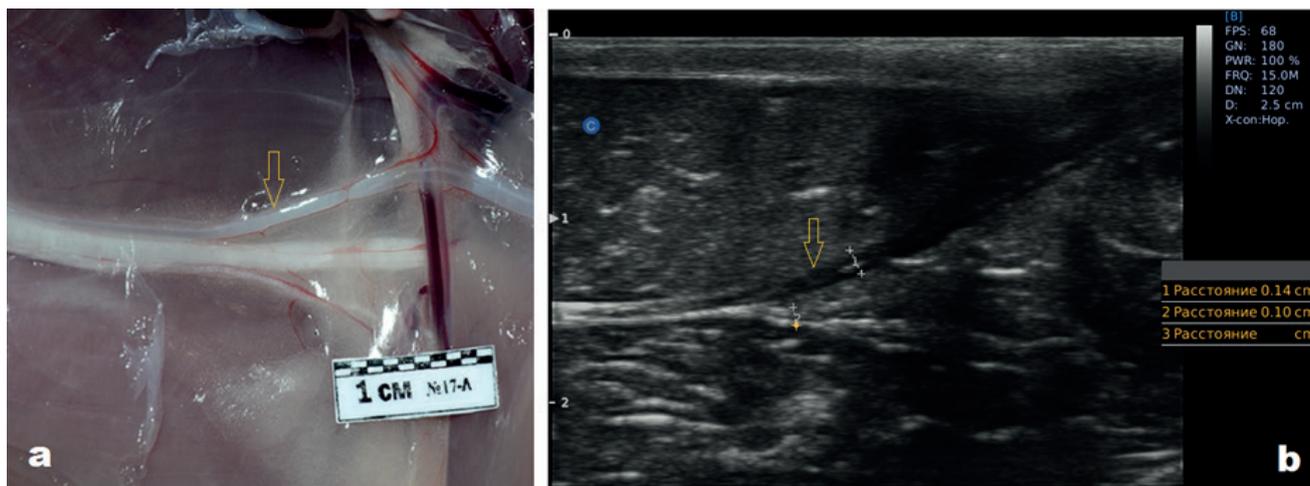


Рис. 6. Уровень разделения седалищного нерва кролика на большеберцовый и общий малоберцовый (обозначен стрелкой): а - при макроскопическом исследовании; б - при ультразвуковом сканировании на продольном срезе.

Fig. 6. The level of separation of the sciatic nerve into the tibial nerve and common peroneal nerve (indicated by an arrow): a - macroscopic examination; b - ultrasound scanning on the longitudinal section.

нервах определялось наличие соединительнотканых тяжей, охватывающих зону оперативного вмешательства на нервном стволе с вовлечением в рубец фасциальных футляров расположенных рядом мышц (рис. 5-с). Дистальные зоны экспериментального шва нерва все ветви седалищного нерва макроскопически выглядели неизменными. Диаметр восстановленного общего малоберцового нерва по сравнению с контралатеральной конечностью существенно не отличался и составлял около 0,7–0,8 мм.

У животных контрольной группы зона дефекта общего малоберцового нерва определялась также по разрастанию рубцовой ткани. Травматическая неврома была вовлечена в рубец, из-за чего ее структура визуализировалась только путем прецизионной препаровки с использованием операционного микроскопа при заборе материала для дальнейших морфологических исследований. Проксимальнее травматической невromы общий малоберцовый нерв визуально не отличался от интактного. Дистальнее области анатомического дефекта и до вхождения в мышечно-малоберцовый

канал общий малоберцовый нерв в результате вторичной дегенерации был уменьшен в диаметре незначительно, однако, будучи лишенным нервных волокон, имел белесоватую почти прозрачную окраску (рис. 6-а). Видимое при макроскопическом исследовании разделение периневральных футляров общего малоберцового нерва на конечные ветви после высокого невротомезиса методом ультразвукового сканирования не визуализировалось. У животных контрольной группы дистальный участок пересеченного общего малоберцового нерва отличался резким уменьшением экзогенных свойств и отсутствием характерной для здорового нерва внутривольной продольно ориентированной исчерченности (рис. 6-б).

Денервированные мышцы переднего и латерального футляров голени у животных контрольной группы характеризовались дистрофическими изменениями, проявлявшимися при ультразвуковом сканировании уменьшением их толщины и диффузным увеличением экзогенных свойств, что соответствовало рубцовому перерождению денервированных мышц

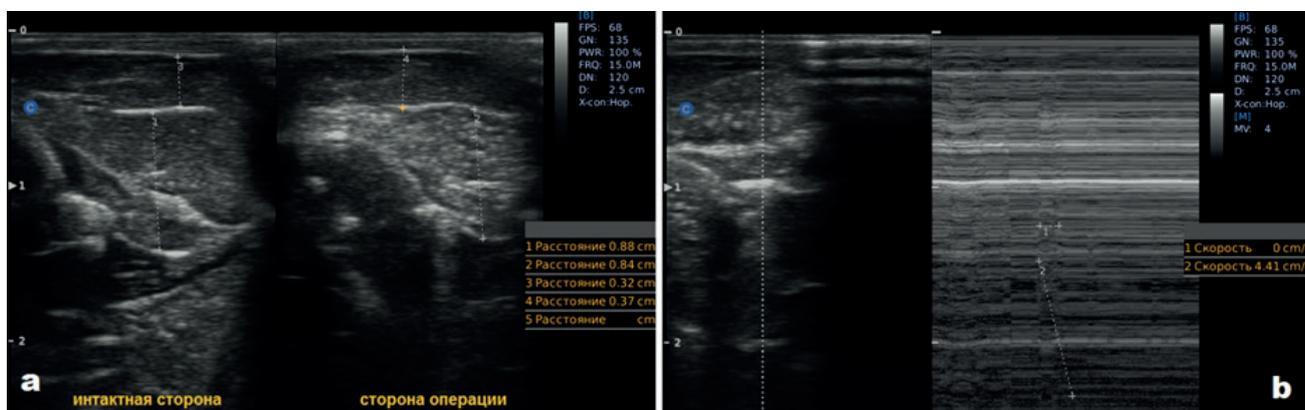


Рис. 7. Мышцы переднего и латерального футляров голени: а - при сравнении интактной и оперированной конечностей; б - регистрация фасцикуляций денервированных мышц.

Fig. 7. Muscles of the anterior and lateral compartments of the leg: a - when comparing intact and operated limbs; b - registration of fasciculations of denervated muscles.

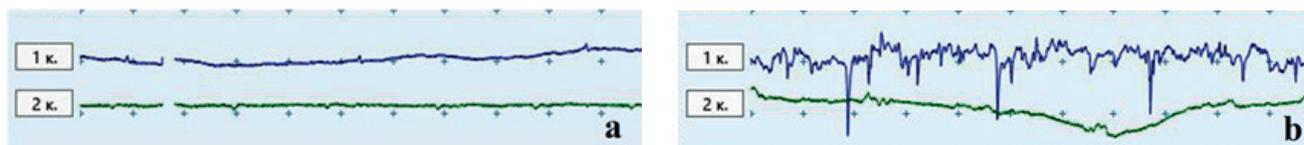


Рис. 8. Регистрация спонтанных сокращений мышц переднего и заднего костно-фасциальных футляров после введения игольчатых электродов (фото с экрана компьютерной программы, цена деления по горизонтали 25 мс, по вертикали – 200 мкВ): а – интактная конечность, б – оперированная конечность (протокол №49, основная группа, 60-е сутки п/о).

Fig. 8. Registration of spontaneous fasciculations of the anterior and posterior compartments muscles after the introduction of needle electrodes (photo from the screen of the computer program, the price of division horizontally 25 mS, vertical – 200 mV): a – intact limb, b – operated limb (Protocol № 49, experimental group, 60 days after surgery).



Рис. 9. Стимуляционная электронейромиография мышц переднего и заднего костно-фасциальных футляров (фото с экрана компьютерной программы, цена деления по горизонтали 4 мс, по вертикали – 4 мВ):

а – интактная конечность, б – оперированная конечность (протокол №61, основная группа, 95-е сутки п/о), с – оперированная конечность (протокол №49, основная группа, 60-е сутки п/о).

Fig. 9. Stimulation electroneuromyography of muscles of anterior and posterior compartments of the leg (photo from the screen of the computer program, the price of division horizontally 4 mS, vertically – 4 mV): a – intact limb, b – the operated limb (Protocol № 61, experimental group, 95 days after surgery), c – the operated limb (Protocol № 49, experimental group, 60 days after surgery).

(рис. 7-а). При обнаружении мышечных фасцикуляций переключали аппарат в М-режим сканирования для дифференцировки от произвольных сокращений мышц целиком (рис. 7-б).

При макроскопическом исследовании денервированные мышцы отличались более светлым цветом, а также более плотной консистенцией по сравнению с мышцами контралатерального футляра. В основной группе дегенеративные изменения мышц, иннервируемых общим малоберцовым нервом, также имели место, но выраженность их была существенно ниже. Это обстоятельство подтверждает благоприятные исходы экспериментальных реконструктивных вмешательств на нервном стволе.

При выполнении электронейромиографии стимулирующий электрод располагали в верхней трети бедра по проекционной линии седалищного нерва выше уровня послеоперационного рубца. Регистрирующие игольчатые электроды вводили в передний и задний костно-фасциальные футляры голени на уровне верхней трети. В обеих группах на ранних сроках послеоперационного периода при мониторинге мышц переднего футляра голени при подготовке к выполнению исследования регистрировали спонтанные мышечные фасцикуляции, свойственные денервированным скелетным мышцам (рис. 8).

После 90–100 суток наблюдения на электронейромиограммах животных экспериментальной группы в ответ на стимуляцию фиксировали комплексы сигналов по двум каналам электронейромиографа, что характеризовало проведение импульса как по нерву-донору (большеберцовому нерву), так и по подшитому к нему дистальному участку общего малоберцового нерва (рис. 9).

Первоначально форма и амплитуда импульсов с разных групп мышц сильно отличались, но совпадало время начала и окончания сокращений в ответ на стимуляцию. При увеличении сроков наблюдения форма и амплитуда импульсов становилась сопоставимой с воспринимаемыми сигналами с мышц заднего футляра голени, что подтверждало продолжающиеся процессы реиннервации мышц переднего футляра голени.

У животных контрольной группы в течение всего периода наблюдения сокращений мышц переднего и латерального футляров в ответ на стимуляцию электрическим током седалищного нерва выше уровня резекции участка общего малоберцового нерва не отмечали. Это обстоятельство подтверждает разобщенность периневральных футляров общего малоберцового и большеберцового нервов у кроликов на уровне бедра, а также наглядно демонстрирует адекватность используемой модели травмы нервного ствола.

Оценку относительной плотности костей голени производили на рентгенограммах с помощью цифровой зеркальной фотокамеры при точечном замере экспозиции на симметричных участках контралатеральных конечностей. На обзорных рентгенограммах тазовых конечностей животных в обеих исследуемых группах отмечали некоторое уменьшение относительной плотности малоберцовой кости на стороне оперативного вмешательства. Степень снижения относительной плотности костной ткани в обеих группах была примерно одинаковой. По всей вероятности, для восстановления химического состава костной ткани требуется более продолжительный период реабилитации после подтвержденной клинко-инструментальными методами реиннервации тканей.

## Выводы

Выполнение односторонней резекции общего малоберцового нерва лабораторных животных (кроликов) на уровне средней трети бедра в качестве модели травмы периферического нерва позволяет отрабатывать технику восстановления дистального участка пересеченного нерва путем его соединения с расположенным рядом интактным нервом-донором по типу «конец-в-бок» и создает удовлетворительные условия для наблюдения лабораторных животных в условиях длительного эксперимента.

Простым и наглядным способом качественной оценки функционального состояния общего малоберцового нерва у лабораторных животных является определение амплитуды разведения пальцев стопы при инициации безусловного рефлекса подготовки к приземлению.

Включение лучевых методов исследования в программу комплексной оценки состояния периферических нервов позволяет выполнить их прижизненную визуализацию с определением основных морфологических характеристик восстановленных при экспериментальных реконструктивно-пластических вмешательствах нервных стволов.

## Заключение

Таким образом, выполнение односторонних резекций общего малоберцового нерва у лабораторных животных (кроликов) с последующим восстановлени-

ем дистального участка пересеченного нерва путем его соединения по типу «конец-в-бок» с расположенным рядом интактным нервом-донором позволяет получать воспроизводимые в эксперименте результаты восстановления иннервации тканей. Косвенная оценка функционального состояния восстановленных нервов возможна с использованием простых и доступных экспериментально-клинических тестов. Например, амплитуда разведения пальцев стопы экспериментальных животных при исследовании безусловного рефлекса подготовки к приземлению характеризует проводимость общего малоберцового нерва. Включение лучевых методов в комплекс диагностических мероприятий при выполнении экспериментальных исследований с многоэтапными реконструктивно-пластическими вмешательствами на периферических нервах лабораторных животных позволяет выполнять прижизненную визуализацию структуры периферических нервов в области оперативного вмешательства, оценивать состояние восстановленного нервного ствола, а также иннервируемых его ветвями тканей. Такой подход дает возможность корректировки плана последующих целенаправленных морфологических исследований.

## Дополнительная информация

### Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## Список литературы

1. Губочкин Н.Г. Реконструктивно-восстановительное лечение раненых и пострадавших с сочетанными повреждениями сухожилий и нервов верхней конечности. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2011; 7: 45–50.
2. Алексеев, Е.Д. Дифференцированное лечение современных боевых огнестрельных повреждений периферических нервов: автореф. дис. канд. мед. наук. СПб.: ВМедА. 1998; 16.
3. Говенько Ф.С. *Хирургия повреждений периферических нервов*. СПб.: Феникс. 2010; 384.
4. Григорович К.А. *Хирургия нервов*. Л.: Медицина. 1969; 447.
5. Байтингер В.Ф., Байтингер А.В. Шов нерва конец-в-бок: стратегия «получения» аксонов из интактного нерва (часть II). *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии*. 2013; 2(45): 13–19.
6. Millesi H, Schmidhammer R. End-to-side coaptation – controversial research issue or important tool in human patients. *Acta Neurochirurgica*. 2007; 100: 103–106.
7. Одинак М.М., Живолупов С.А. *Заболевания и травмы периферической нервной системы*. СПб.: СпецЛит. 2009; 367.
8. Кузнецов Б.А. *Определитель позвоночных животных фауны СССР. Ч. 3. Млекопитающие*. М.: Просвещение. 1975; 208.
9. Максименков А.Н. *Общие данные о строении периферической (спинальной) нервной системы*. В кн.: Шевкуненко В.Н., ред. *Атлас периферической нервной и венозной систем*. М.: Медгиз. 1949; 9–12.
10. Ништ А.Ю. Простой способ определения функционального состояния периферических нервов после их восстановления в эксперименте. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2018; 3 (63): 141–143.
11. Айтемиров Ш.М., Нинель В.Г., Коршунова Г.А. Высокора разрешающая ультрасонография в диагностике и хирургии периферических нервов конечностей (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России*. 2015; 3 (77): 116–125.
12. Alaqeel A, Alshomer F. High resolution ultrasound in the evaluation and management of traumatic peripheral nerve injuries: review of the literature. *Oman Medical Journal*. 2014; 29(5): 314–319.

## References

1. Gubochkin NG. Reconstructive and restorative treatment of the wounded and injured with combined injuries of tendons and nerves of the upper limb. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennye i medicinskie nauki*. 2011; 7: 45–50. (in Russ.)
2. Alekseev ED. Differentirovannoe lechenie sovremennykh boevykh ognestrel'nykh povrezhdenii perifericheskikh nervov: avtoref. dis. kand. med. nauk. SPb.: VMedA. 1998; 16. (in Russ.)
3. Goven'ko FS. *Khirurgiya povrezhdenii perifericheskikh nervov*. SPb.: Feniks. 2010. 384. (in Russ.)
4. Grigorovich KA. *Khirurgiya nervov*. L.: Medicina. 1969; 447. (in Russ.)
5. Bajtinger VF, Bajtinger AV. The end-to-side nerve suture: strategy of receiving axons from the intact nerve (part II). *Voprosy rekonstruktivnoj i plasticheskoy hirurgii*. 2013; 2(45): 13–19. (in Russ.)
6. Millesi H, Schmidhammer R. End-to-side coaptation – controversial research issue or important tool in human patients. *Acta Neurochirurgica*. 2007; 100: 103–106.
7. Odinak MM, Zhivolupov SA. *Zabolevaniya i travmy perifericheskoi nervnoi sistemy*. SPb.: SpecLit. 2009. 367. (in Russ.)
8. Kuznecov BA. *Opredelitel' pozvonochnykh zhivotnykh fauny SSSR. Ch. 3. Mlekopitayushchie*. M.: Prosveshchenie. 1975; 208. (in Russ.)
9. Maksimenkov A.N. *Obshchie dannye o stroenii perifericheskoi (spinal'noi) nervnoi sistemy*. V kn.: Shevkunenko V.N., red. *Atlas perifericheskoi nervnoi i venoznoi sistem*. M.: Medgiz. 1949; 9–12. (in Russ.)
10. Nisht AYU. A Simple method to determine the functional state of peripheral nerves after they recover in the experiment. *Vestnik Rossijskoj Voенno-medicinskoj akademii*. 2018; 3 (63): 141–143. (in Russ.)
11. Ajtemirov ShM, Ninel' VG, Korshunova GA. High-resolution ultrasonography in the diagnosis and surgery of peripheral nerves of limbs (literature review). *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. 2015; 3 (77): 116–125. (in Russ.)
12. Alaqeel A, Alshomer F. High resolution ultrasound in the evaluation and management of traumatic peripheral nerve injuries: review of the literature. *Oman Medical Journal*. 2014; 29(5): 314–319.

**Информация об авторах**

1. Ништ Алексей Юрьевич - к.м.н., докторант кафедры оперативной хирургии (с топографической анатомией) Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, e-mail: nachmed82@mail.ru
2. Фомин Николай Федорович - д.м.н., профессор, заведующий кафедрой оперативной хирургии (с топографической анатомией) Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, e-mail: fominmed@mail.ru
3. Имельбаев Артур Ильгизович - заведующий отделением лучевой диагностики № 2 клиники Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, ассистент кафедры лучевой диагностики и биомедицинской визуализации Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, e-mail: imelbaev@gmail.com
4. Микулич Анастасия Артуровна - преподаватель кафедры оперативной хирургии (с топографической анатомией) Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова, e-mail: anastasimikulitz@gmail.com

**Information about the Authors**

1. Aleksey Yur'evich. Nisht - Ph.D., doctoral candidate of the department of operative surgery, S.M. Kirov Military Medical Academy, e-mail: nachmed82@mail.ru
2. Nikolay Fedorovich Fomin - M.D., head of the department of operative surgery, S.M. Kirov Military Medical Academy, e-mail: fominmed@mail.ru
3. Artur Ilgizovich Imelbaev - head of the Department of radiology № 2 of the clinic of St. Petersburg state pediatric medical University, assistant of the department of radiology and biomedical imaging of St. Petersburg state pediatric medical University, e-mail: imelbaev@gmail.com
4. Anastasia Arturovna Mikulich - assistant of the department of operative surgery, S.M. Kirov Military Medical Academy, e-mail: anastasimikulitz@gmail.com

**Цитировать:**

*Ништ А.Ю., Фомин Н.Ф., Имельбаев А.И., Микулич А.А. Восстановление двигательной иннервации соединением периферических нервов по типу «конец-в-бок»: экспериментальное моделирование и клинико-инструментальный контроль реиннервации. Вестник экспериментальной и клинической хирургии 2020; 13: 1: 24-33. DOI: 10.18499/2070-478X-2020-13-1-24-33.*

**To cite this article:**

*Nisht A. Yu., Fomin N.F., Imelbaev A.I., Mikulich A.A. Restoration of Motor Innervation by the «End-to-Side» Neurorrhaphia: Experimental Modeling and Clinical and Instrumental Control of Reinnervation. Journal of experimental and clinical surgery 2020; 13: 1: 24-33. DOI: 10.18499/2070-478X-2020-13-1-24-33.*