

На правах рукописи



НИШТ

Алексей Юрьевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАТОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
СОЕДИНЕНИЯ НЕРВОВ ПО ТИПУ «КОНЕЦ В БОК»**

3.3.1. Анатомия человека

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора медицинских наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена на кафедре оперативной хирургии (с топографической анатомией) и кафедре патологической анатомии ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» МО РФ.

Научный консультант:

доктор медицинских наук, профессор **Фомин Николай Федорович**

Официальные оппоненты:

Дыдыкин Сергей Сергеевич – доктор медицинских наук, профессор, ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), кафедра оперативной хирургии и топографической анатомии, заведующий.

Орлов Андрей Юрьевич – доктор медицинских наук, Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт имени профессора А.Л. Поленова - филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Минздрава России, НИЛ нейрохирургии позвоночника и периферической нервной системы, заведующий; нейрохирургическое отделение № 1, научный руководитель.

Черных Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Минздрава России, кафедра оперативной хирургии с топографической анатомией, заведующий.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России.

Защита диссертации состоится «21» июня 2022 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 208.087.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО СПбГПМУ Минздрава России (194223, г. Санкт – Петербург, проспект Мориса Тореца, д. 39) и на сайте ФГБОУ ВО СПбГПМУ Минздрава России <http://gpmu.org>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

**Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор медицинских наук, профессор**

Кульбах Ольга Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Восстановление иннервации тканей, денервированных при травмах крупных нервных стволов конечностей, остается актуальной проблемой реконструктивной хирургии. Среди пострадавших мирного времени различные виды повреждений периферических нервов отмечаются у 3–6% пациентов. В структуре боевой хирургической патологии огнестрельные поражения нервных стволов выявляются у 9,6% раненых и сопровождаются переломами крупных костей и ранениями сосудистых магистралей (Е.Д. Алексеев, 1998; J. Noble, 1998; Г.А. Акимов, М.М. Одинак, 2000; Ф.С. Говенько, 2010; В.А. Вишневский, 2014; В.П. Берснев, Г.С. Кокин, Т.О. Извекова, 2017).

В большинстве случаев травмы нервов отмечаются у лиц молодого трудоспособного возраста. Многоэтапное хирургическое лечение и длительный период реабилитации не всегда позволяют добиться хороших результатов восстановления функций конечностей. Посттравматические невропатии и плексопатии часто вынуждают таких пациентов к смене вида профессиональной деятельности, а в 29,4% случаев становятся причиной инвалидности (М.М. Одинак, С.А. Живолупов, К.В. Федоров и др., 2008; В.А. Вишневский, 2014; С.А. Иванов, М.Ю. Иванова, А.С. Сорокин, А.П. Цепляева, 2019).

Возможности современной реконструктивной хирургии технически позволяют восстанавливать анатомическую целостность нервов при травмах почти любой локализации и протяженности дефектов (Н. Millesi, 2007; В.Ф. Байтингер, А.В. Байтингер, 2013; S. Bassilios Habre, G. Bond, X.L. Jing, et al., 2018). Вместе с тем, из-за специфичного механизма регенерации нервных волокон восстановление иннервации тканей при травмах проксимальных отделов нервных стволов затягивается на годы. Выполненные на уровне повреждения реконструктивные операции часто не могут гарантировать удовлетворительного функционального результата вследствие выраженных дегенеративных изменений тканей дистальных сегментов конечностей, вызванных длительным отсутствием иннервации (Г.М. Ходжамурадов, А.А. Давлатов, М.М. Исмоилов и др., 2012; И.В. Литвиненко, А.Р. Булатов, 2020). В таких случаях для восстановления функционально значимых двигательных функций отдельных сегментов конечностей часто требуются дополнительные хирургические операции, включая невротизацию отдельных ветвей поврежденного нерва и сухожильно-мышечные транспозиции (Л.А. Родоманова, А.Г. Полькин, 2006; А.Р. Халимов, Е.К. Дюсембеков, Р.Ю. Юнусов и др., 2020).

Приближение источника регенерирующих нервных волокон к денервированным тканям таргетных зон поврежденного нервного ствола за счет невротизации отдельных ветвей поврежденного нерва другими нервами, может существенно сократить продолжительность периода денервации тканей. Вместе с тем, такие операции всегда сопряжены с неврологическими расстройствами в донорской области (Ф.С. Говенько, Д.Н. Монашенко, Д.С. Лукин и др., 2012; С.А. Журавлев, И.О. Голубев, 2015; Z.W. Ray, J. Chang, A. Hawasli et al., 2016). Соединение дистального сегмента пересеченного при травме нерва с интактным нервом-донором по типу «конец в бок» является перспективным способом

восстановления утраченной иннервации тканей целевых зон поврежденного периферического нерва при сохранении иннервации донорской зоны (P.S. Cederna, L.K. Kallianen, M.G. Urbanek et al., 2001; H. Millesi, R. Schmidhammer, 2007; T.A. Cage, N.G. Simon, S. Bourque et al., 2013). Вместе с тем, на данный момент не существует единого понимания фундаментальных морфологических основ и механизма регенерации восстановленного данным способом нерва, а тем более, требований к технике оперативных приемов при выполнении данного вида вмешательств. Все это ограничивает широкое применение соединения нервов по типу «конец в бок» в качестве одного из способов хирургического лечения пациентов с травмами и протяженными дефектами нервов.

Остается неясным источник регенерации нервных волокон для восстановления нерва-реципиента, соединенного с нервом-донором по типу «конец в бок». С одной стороны, рассматривается возможность реиннервации нерва-реципиента за счет новообразованных боковых ответвлений волокон нерва-донора после соединения поврежденного и интактного нервов по типу «конец в бок» (A. Beris, M. Lykissas, A. Korompilias, G. Mitsionis, 2007; S. Geuna, I. Papalia, G. Ronchi et al., 2017). С другой стороны, не определено значение частичного повреждения волокон нерва-донора при выполнении внутриствольного микрохирургического вмешательства, что может создавать условия для терминального регенераторного спрутинга и реиннервации нерва-реципиента, то есть внутриствольной регенерации волокон нерва-донора в пучки нерва-реципиента (I. Papalia, S. Geuna, P.L. Tos et al., 2003; G.L. Nao, T.Y. Zhang, Q. Zhang et al., 2018).

Отсутствие четких фактических доказательств и представлений об источнике и механизме реиннервации нерва-реципиента не позволяют в полной мере прогнозировать объем восстановления иннервации, а также исключить вероятность развития неврологических расстройств в донорской зоне. Не случайно соединение нервов по типу «конец в бок» в настоящее время применяется эпизодически и только как крайняя мера при отсутствии иных возможностей выполнения реконструктивных операций на нервах (S.J. Kettle, N.E. Starritt, M.A. Glasby, T.E. Hems, 2013; C. Liao, W. Zhang, W. Zhong, P. Liu, 2016). Тем не менее, положительные тенденции их исходов удастся проследить даже в тех редких случаях, когда соединение дистального сегмента поврежденного нерва с боковой поверхностью интактного нерва было выполнено в виде операции «отчаяния» (H. Millesi, R. Schmidhammer, 2007; В.Ф. Байтингер, А.В. Байтингер, 2013; P. Konofaos, S. Bassilios Habre, R.D. Wallace, 2018).

На наш взгляд, соединение нервов по типу «конец в бок» может стать новым перспективным направлением в хирургии высоких проксимальных травм и протяженных дефектов нервов для сокращения путей регенерации нервных волокон и времени реиннервации тканей целевых зон поврежденного нерва. Однако нерешенные проблемные вопросы в отношении непосредственного источника и механизма восстановления нерва-реципиента, а также степени воздействия таких вмешательств на функциональное состояние нерва-донора, стоят на пути анатомо-физиологических обоснований хирургической технологии и оперативной техники восстановления периферических нервов швом «конец в бок».

Цель исследования: изучить с морфофункциональных позиций механизм регенерации нервов и особенности восстановления иннервации тканей после соединения дистального сегмента поврежденного нерва с интактным нервом-донором по типу «конец в бок» и дать топографо-анатомическое обоснование ранней селективной реиннервации функционально наиболее значимых мышечных групп при обширных дефектах и высоких проксимальных травмах нервов верхних конечностей.

Задачи исследования:

1. В экспериментах на лабораторных животных создать модель травмы периферического нерва с обширным дефектом и обосновать технику соединения отдельных периневральных футляров нерва-реципиента и нерва-донора по типу «конец в бок» для изучения процессов невротизации дистального сегмента нерва-реципиента.

2. Выяснить структурно-функциональную природу и механизм реиннервации нерва-реципиента после его соединения с нервом-донором по типу «конец в бок».

3. Экспериментально-клиническими, электрофизиологическими и морфологическими методами в экспериментах на животных изучить процесс восстановления функции нерва-реципиента после соединения его пучков с краями специально сформированного дефекта периневрия на боковой поверхности интактного нерва-донора.

4. Определить значение индивидуальной анатомической изменчивости нервов для планирования и выполнения оперативных вмешательств на нервных стволах верхних конечностей.

5. Дать топографо-анатомические обоснования наиболее перспективных зон на сегментах верхней конечности для селективной реиннервации функционально наиболее значимых мышц путем соединения отдельных ветвей поврежденного нерва с боковой поверхностью ближайшего нерва-донора.

Научная новизна. По результатам комплексных экспериментальных и топографо-анатомических исследований разработаны анатомо-физиологические основы применения шва нерва по типу «конец в бок» для ускоренной реиннервации функционально значимых мышечных групп конечностей при высоких проксимальных травмах или обширных дефектах периферических нервов (патент РФ № 2712294 от 28.01.2020).

Выяснен непосредственный источник регенерирующих нервных волокон в составе нерва-реципиента после его соединения с боковой поверхностью интактного нерва-донора, которым становятся волокна нерва-донора, неизбежно повреждаемые на этапах оперативного вмешательства.

Доказано, что поврежденные аксоны нерва-донора регенерируют в избыточном количестве, что приводит к реиннервации нерва-реципиента, а также к частичной компенсации неизбежных собственных анатомо-функциональных потерь.

Обоснована необходимость и техника прецизионного формирования микрохирургического анастомоза между периневральным футляром дистального сегмента поврежденного нерва и хирургически сформированным боковым дефектом периневрального футляра нерва-донора для создания условий, способствующих реиннервации нерва-реципиента.

Дополнены представления об индивидуальной анатомической изменчивости периферической нервной системы и выявлена связь между особенностями анатомических характеристик ветвей периферических нервов и формой внешнего строения конечностей.

Впервые представлены топографо-анатомические обоснования способов соединения нервов по типу «конец в бок» для ускоренного восстановления иннервации наиболее функционально значимых мышечных групп дистальных сегментов верхних конечностей, атрофия которых приводит к наибольшим функциональным потерям вследствие проксимальных травм крупных нервов.

Теоретическая и практическая значимость работы. В экспериментах на животных разработана модель и обоснованы микрохирургические приемы соединения нервов «конец в бок», определена степень реиннервации восстановленного данным способом нерва-реципиента, а также оценен характер воздействия такой операции на нерв-донор.

Разработан, обоснован с топографо-анатомических позиций и апробирован способ оценки функционального состояния восстановленного нерва (патент РФ № 2647619 от 18.03.2018), который может быть использован при экспериментальном обосновании новых способов хирургических вмешательств на нервах.

Выявлены особенности индивидуальной анатомической изменчивости мышечных ветвей нервов и разработан алгоритм применения шва нервов «конец в бок», которые могут быть использованы при планировании и обосновании тактики хирургического лечения пациентов с травмой нервов на высоком проксимальном уровне.

Представленные топографо-анатомические обоснования и техника способов ускоренной реиннервации мышц дистальных отделов верхней конечности (патент РФ № 2718740 от 14.04.2020, патент РФ № 2726590 от 14.07.2020) могут стать основой для дальнейшей апробации в клинических условиях хирургических приемов, направленных на селективную реиннервацию наиболее функционально значимых мышечных групп у пациентов с травмой нервов конечностей.

Методология и методы исследования. Структура и организация комплексных исследований определялись целью и задачами, направленными на изучение морфофункциональных проявлений процесса регенерации нервов после соединения дистального сегмента поврежденного нервного ствола с боковой поверхностью интактного нерва-донора. Методология научно-исследовательской работы в выбранном направлении основывалась на фундаментальных принципах многоуровневого научного познания патологических и восстановительных процессов в органах и тканях при травмах. Проведен критический анализ научной литературы, благодаря которому сформулированы цель, задачи и разработан дизайн исследования. Выполнен сбор, обработка и обобщение экспериментальных и морфологических данных.

Экспериментальный раздел посвящен исследованию на лабораторных животных непосредственного источника, механизма и условий регенерации нервных волокон в дистальном сегменте поврежденного нерва (нерва-реципиента) после его соединения с интактным нервом-донором по типу «конец в бок». Дана

структурно-функциональная характеристика процессов реиннервации тканей целевых зон восстановленного нерва по сравнению с контрольными опытами, в которых реконструктивная операция не производилась. В острых опытах обоснована и отработана техника соединения периневральных футляров дистального сегмента нерва-реципиента с хирургически сформированным боковым дефектом периневрального футляра нерва-донора и исследованы особенности хирургической анатомии операционной раны на разных этапах микрохирургических вмешательств. В хронических опытах экспериментально-клиническими методами подтверждено восстановление иннервации тканей целевых зон нерва-реципиента. Лучевыми методами исследованы особенности прижизненной структуры восстановленных нервов и иннервируемых ими тканей. Методом электронейромиографии охарактеризованы изменения функционального состояния нервно-мышечного аппарата в разные сроки после операции. По результатам многоуровневых морфологических исследований описана морфофункциональная картина изменений восстановленного экспериментальным способом нерва-реципиента, а также тканей, иннервируемых его ветвями.

Анатомический раздел исследования, посвященный изучению индивидуальных особенностей строения и топографии мышечных ветвей нервов и зависимости этих параметров от формы внешнего строения сегментов конечностей, выполнен на биологическом материале. Вторым направлением данного раздела являлось моделирование на анатомическом материале отдельных этапов соединения нервов по типу «конец в бок». Его целью явилось топографо-анатомическое обоснование и выбор наиболее перспективных пар нервов «донор-реципиент» и анатомических областей для соединения нервов по типу «конец в бок», как с точки зрения максимальных функциональных приобретений для реципиентной зоны, так и минимальных возможных расстройств иннервации со стороны органов-мишеней нерва-донора.

Личный вклад автора в проведенные исследования. Тема и план диссертации, а также основные направления работ по разделам исследования разработаны совместно с научным консультантом. Автор самостоятельно обосновал актуальность, сформулировал цель и задачи исследования. Личный вклад автора также состоит в подготовке и выполнении экспериментальных микрохирургических вмешательств с последующей комплексной оценкой их результатов, проведении прикладных анатомических исследований в интересах внедрения в практику результатов настоящей работы. Соискателем лично выполнен сбор, обработка и обобщение результатов исследования, сформулированы выводы и практические рекомендации. Доля личного участия автора в проведении исследований – 95%, в систематизации, анализе и обобщении материалов – 100%. Обсуждение полученных результатов, а также подготовка публикаций по материалам исследования осуществлялись совместно с научным консультантом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Соединение дистального сегмента поврежденного нерва (нерва-реципиента) по типу «конец в бок» с краями хирургически сформированного дефекта периневрия боковой поверхности интактного нерва (нерва-донора) на экспериментальной модели травмы периферического нерва приводит к стойкому восстановлению

двигательной иннервации в зоне посттравматического неврологического дефицита нерва-реципиента.

2. Реиннервация тканей-мишеней нерва-реципиента после соединения его дистальных пучков с боковым дефектом периневрального футляра интактного нерва происходит за счет прорастания части ветвей избыточно регенерирующих аксонов нерва-донора, неизбежно повреждаемых на этапах микрохирургического вмешательства, в периневральные футляры нерва-реципиента.

3. Наличие связи между индивидуальной анатомической изменчивостью нервов и формой внешнего строения конечностей создает морфологическую основу для разработки персонифицированного подхода при планировании и выполнении микрохирургических вмешательств на нервах.

4. Топографо-анатомические исследования с моделированием основных этапов соединения нервов по типу «конец в бок» на анатомическом материале позволяют обосновать доступы и оперативные приемы по созданию морфологических условий для ранней селективной реиннервации функционально значимых мышц дистальных сегментов верхних конечностей при проксимальных травмах и обширных дефектах нервов конечностей.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертационного исследования обеспечена комплексностью подхода к решению поставленных задач, репрезентативностью анатомического и экспериментального материала, использованием эффективных и высокоинформативных методов функциональных и морфологических исследований, соответствующих цели и задачам, корректным применением параметрических и непараметрических методов при обработке результатов морфофункциональных исследований в контрольных и опытных сериях экспериментов.

Основные результаты исследования внедрены и используются в учебной и научной работе кафедры оперативной хирургии (с топографической анатомией) и кафедры патологической анатомии Военно-медицинской академии.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на Всероссийской научной конференции, посвященной 150-летию со дня основания первой российской кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии «Анатомия и хирургия: 150 лет общего пути» (Санкт-Петербург, Военно-медицинская академия, 2015), конференции молодых ученых Северо-Западного федерального округа «Актуальные вопросы травматологии и ортопедии» (Санкт-Петербург, РНИИТО имени Р.Р. Вредена, 2017), научной конференции морфологических кафедр Санкт-Петербурга, посвященной 145-летию со дня рождения профессора В.Н. Шевкуненко «Методология научно-исследовательской работы кафедр морфологического профиля» (Санкт-Петербург, Военно-медицинская академия, 2017), Всероссийской научной конференции «Гистогенез, реактивность и регенерация тканей» (Санкт-Петербург, Военно-медицинская академия, 2018), VIII съезде анатомов гистологов и эмбриологов (Воронеж, Воронежский ГМУ имени Н.Н. Бурденко, 2019), Международном военно-техническом форуме «Армия-2019» (Москва, КВЦ «Патриот», 2019), на XXIII Международной выставке средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех-2019» (Санкт-Петербург, 2019), XXIII

Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД 2020» (Москва, 2020), Всероссийской научной конференции «Гистогенез, реактивность и регенерация тканей» (Санкт-Петербург, Военно-медицинская академия, 2021).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 37 работ, 16 из них – в научных рецензируемых журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, 11 из которых в журналах по специальности анатомия человека (медицинские науки).

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 283 страницах машинописного текста, иллюстрирована пятнадцатью таблицами и 69 рисунками. Работа состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов, трех глав результатов собственных исследований, обсуждения полученных результатов, заключения, выводов, практических рекомендаций и списка литературы, включающего 415 источников, из которых 154 отечественных и 261 иностранных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы. Весь цикл исследований на животных, включавший выполнение экспериментальных микрохирургических вмешательств и комплексную оценку изменений функционального состояния восстановленного нерва и иннервируемых его ветвями тканей, выполнен на базе экспериментального отделения кафедры оперативной хирургии (с топографической анатомией). Подготовка микропрепаратов, а также морфологические и морфометрические исследования проведены на базе кафедры патологической анатомии Военно-медицинской академии.

Материалом для суправитальных морфологических исследований послужили лабораторные животные (кролики) тотчас после выведения из опытов. На 20 нефиксированных трупах животных методом прецизионной препаровки изучены особенности строения и топографии нервов грудных и тазовых конечностей.

Экспериментальные хирургические вмешательства выполнены на кроликах породы «Шиншилла», зрелых, фенотипически здоровых особях обоего пола. Исследование одобрено независимым Этическим комитетом при Военно-медицинской академии. Все исследования, проводимые на лабораторных животных и условия их содержания соответствовали Международным рекомендациям по проведению медико-биологических исследований с использованием животных.

В острых опытах ($n = 22$) обоснована и отработана техника формирования дефекта периневрия интактного нерва и соединения швами периневральных футляров нерва-реципиента и нерва-донора по типу «конец в бок».

В основной группе животных ($n = 54$) после моделирования обширного дефекта путем резекции 1 см длины общего малоберцового нерва выполняли соединение его дистального сегмента (нерв-реципиент) с боковой поверхностью большеберцового нерва (нерв-донор). В контрольной группе животных ($n = 24$) реконструктивных вмешательств не выполняли.

В условиях экспериментальной операционной под внутривенной анестезией в сочетании с местной инфильтрационной анестезией выполняли латеральный доступ к седалищному нерву на уровне средней трети бедра.

Микрохирургический этап экспериментальных оперативных вмешательств выполняли при 9–15 кратном оптическом увеличении с использованием в разное время операционных микроскопов ЛОМО ОМ-2 (Россия) и Carl Zeiss OPMI Sensera (Германия). У животных опытной группы в периневральном футляре мобилизованного нерва-донора формировали дефект, соответствовавший диаметру нерва-реципиента. Далее к краям сформированного дефекта периневрия нерва-донора четырьмя швами (Ethilon 10/0) фиксировали края периневрального футляра нерва-реципиента (Рисунок 1).

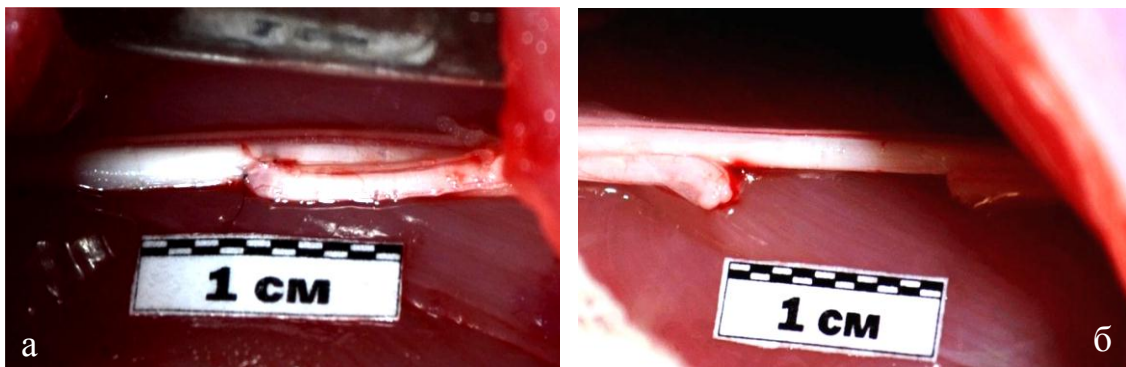


Рисунок 1 – Вид операционной раны на этапе завершеного микрохирургического вмешательства: а – выполнено соединение «конец в бок» дистального сегмента поврежденного нерва с интактным нервом-донором (опытная группа), б – вид сформированного обширного дефекта периферического нерва (контрольная группа)

Послеоперационную рану послойно ушивали и укрывали асептической повязкой на 5–6 суток. Иммобилизацию конечностей не производили. Для предотвращения прорезывания периневральных швов при перевязках и в процессе контроля экспериментально-клинических показателей ограничивали полное разгибание в коленном суставе прооперированной тазовой конечности первые 2 недели послеоперационного периода.

Для качественной оценки функционального состояния общего малоберцового нерва и иннервируемых его ветвями мышц был разработан простой и показательный экспериментально-клинический тест (патент РФ № 2647619 от 16.03.2018). Для оценки проводимости импульсов, выполняли электронейромиографию. Регистрация показателей производилась с использованием двухканального компьютерного цифрового электронейромиографа «Нейро-МВП Микро» (Россия) с прилагаемым программным обеспечением.

В послеоперационном периоде оценивали прижизненную структуру тканей посредством ультразвукового сканирования с использованием аппарата Philips CX 50 (Нидерланды) с широкополосным линейным датчиком (диапазон частот сканирования 12–18 МГц). Рентгенологическое исследование тазовых конечностей для определения относительной плотности костной ткани выполняли с помощью цифрового рентгенологического аппарата Philips MobileDiagnost Opta (Италия-Нидерланды).

После выведения животных из опыта исследования структуры нерва-донора и нерва-реципиента выполняли на микропрепаратах продольных и поперечных срезов седалищного нерва. Поперечные срезы седалищного нерва выполняли на уровнях выше и ниже зоны операции, а продольные – через область экспериментального шва нерва. Окраску микропрепаратов производили гематоксилином и эозином, по Маллори и по методу Шпильмейера. Для оценки изменений структуры тканей в таргетных зонах ветвей восстановленного нерва иссекали мышцы переднего костно-фасциального футляра голени. Окраску препаратов мышечной ткани осуществляли гематоксилином и эозином. Исследование микропрепаратов производили методом световой микроскопии с использованием микроскопа ZEISS Axio Scope.A1 (Германия) с цифровой системой захвата изображения Axio Cam HRC под управлением компьютерной программы Zen (blue edition). Морфометрические исследования нервов проводили путем подсчета нервных волокон на изображениях, полученных при сканировании микропрепаратов в автоматическом сканере 3DHISTECH Pannoramic MIDI (Венгрия).

Исследования особенностей хирургической анатомии и микротопографии периферических нервов, соединенных «конец в бок» в условиях острых опытов, выполняли методом сканирующей электронной микроскопии. Фиксацию препаратов, их обезжизивание и напыление токопроводящего слоя на поверхность исследуемых объектов проводили по стандартным методикам. Исследование поверхности периферических нервов в области экспериментальных вмешательств производили на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6390LA (Япония).

Анатомический раздел работы выполнен на кафедре оперативной хирургии (с топографической анатомией) Военно-медицинской академии. На первом этапе проведено комплексное топографо-анатомическое исследование нервов верхних конечностей биологических объектов (трупов людей) для изучения индивидуальной изменчивости в строении и топографии функционально значимых мышечных ветвей нервов, а также ее связи с формой внешнего строения сегментов конечностей. На втором этапе в условиях моделирования на анатомическом материале применительно к цели и задачам исследования отработаны основные этапы оперативных вмешательств с соединением по типу «конец в бок» отдельных мышечных ветвей нервов верхних конечностей.

Морфометрические и морфоскопические исследования выполнены на 37 фиксированных верхних конечностях трупов. Для оценки формы исследуемых конечностей вычисляли индекс формы внешнего строения отношением длины к ширине соответствующего сегмента, отдельно для плеча и предплечья. Ветви нервов к мышцам верхней конечности визуализировали методом прецизионной препаровки с использованием 2,5-кратного оптического увеличения с помощью бинокулярной линзы с наlobным осветителем Heine ML4-LED (Германия). Локализацию сосудисто-нервных ворот функционально значимых мышц определяли по расположению обозначавших их контрастных меток на рентгенограммах препаратов, выполненных с помощью цифрового рентгенологического аппарата Philips MobileDiagnost Opta (Италия-Нидерланды).

Для анатомического обоснования технической возможности соединения по типу «конец в бок» отдельных ветвей нервов на 15 слабофиксированных верхних

конечностях выполнено моделирование основных этапов микрохирургических оперативных вмешательств на нервах. После мобилизации мышечных ветвей нервов, составлявших потенциальные пары нервов «донор-реципиент», прецизионными микрохирургическими приемами формировали дефект периневральной оболочки нерва-донора и выполняли соединение швами (Prolen 8/0–10/0) периневрального футляра нерва-реципиента с краями периневрального «окна» потенциального нерва-донора.

Полученные в процессе исследования числовые данные были подвергнуты статистической обработке с использованием методов параметрического и непараметрического анализа. Накопление и систематизацию исходных данных проводили с использованием электронных таблиц «Microsoft Excel» прикладного программного продукта «Microsoft Office 2010» (Microsoft, США). Статистический анализ и визуализация полученных результатов проводились в программе «STATISTICA 12» (StatSoft Inc, США). Оценку полученных данных на предмет соответствия закону нормального распределения количественных величин проводили с использованием критерия Колмогорова-Смирнова, а при объеме выборки менее 50 элементов – с использованием критерия Шапиро-Уилка. Для описания количественных показателей, имевших нормальное распределение, производили расчет средних арифметических значений, стандартных отклонений и границ 95%-го доверительного интервала. Если распределение количественных данных отличалось от нормального, то для описания такой совокупности рассчитывали значение медианы, а также верхнего и нижнего квартилей. Для сравнения независимых малочисленных совокупностей, а также при отсутствии признаков нормального распределения величин в исследуемых совокупностях применяли критерий Манна-Уитни. Оценку значимости различий между фактическим количеством исходов в исследуемых группах определяли при помощи критерия χ^2 Пирсона. Различия считали достоверными при достижении уровня значимости $p < 0,05$.

Результаты исследований и их обсуждение

При длительном наблюдении лабораторных животных в условиях хронических опытов экспериментально-клиническими, электро-физиологическими и морфологическими методами исследованы особенности регенерации нервов после их соединения по типу «конец в бок», а также определены показатели реиннервации тканей таргетных зон восстановленного нервного ствола.

Наиболее простым и демонстративным тестом для качественной оценки функционального состояния общего малоберцового нерва и иннервируемых им тканей у лабораторных животных является сравнение амплитуды разведения пальцев стопы в комплексе двигательной ответной реакции безусловного статокинетического рефлекса подготовки к приземлению.

У животных опытной группы первые признаки отведения кнаружи двух латеральных пальцев стопы отмечались через 90–100 суток наблюдения. Амплитуда разведения пальцев стопы постепенно нарастала, но даже к концу наблюдений оставалась сниженной, по сравнению с контралатеральной интактной конечностью.

У животных контрольной группы на стороне экспериментальной травмы весь период наблюдений разведения пальцев стопы не отмечалось (Рисунок 2).

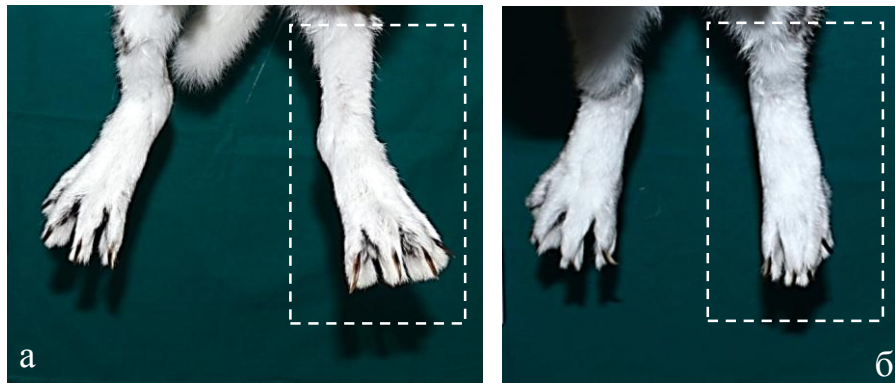


Рисунок 2 – Исследование статокINETического рефлекса подготовки к приземлению через 6 месяцев после операции: а – восстановление разведения пальцев стопы у животных опытной группы, б – стойкая утрата разведения пальцев у животных контрольной группы (пунктиром обозначена конечность после оперативных вмешательств)

При выполнении электрофизиологического исследования регистрация вызванных потенциалов по двум каналам одновременно позволяла судить о проведении импульса от нерва-донора к нерву-реципиенту через зону их соединения по типу «конец в бок» (Рисунок 3).

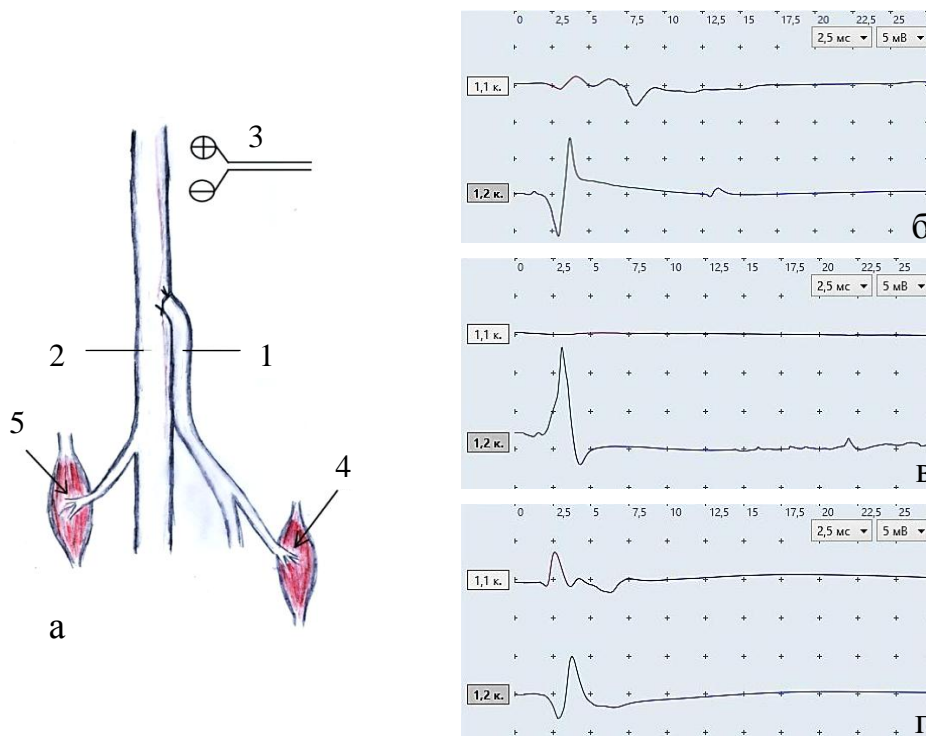


Рисунок 3 – Методика и результаты исследования моторного ответа мышц переднего и заднего костно-фасциальных футляров у лабораторных животных через 9 месяцев после экспериментальных оперативных вмешательств: а – схема элементной базы для выполнения электронейромиографии (1 – нерв-реципиент; 2 – нерв-донор; 3 – стимулирующий наконечный электрод; 4 – регистрирующий игольчатый электрод в мышцах целевой зоны нерва-реципиента; 5 – регистрирующий игольчатый электрод в мышцах целевой зоны нерва-донора), б – опытная группа; в – контрольная группа; г – интактная конечность (фотография с экрана компьютерной программы, цена деления по горизонтали 2,5 мс, по вертикали – 5 мВ)

У животных опытной группы к четвертому месяцу послеоперационного периода отмечалось увеличение амплитуды М-ответа реиннервированных мышц до $0,23 \pm 0,12$ мВ (95% ДИ = от 0,17 до 0,29 мВ). Латентность М-ответа мышц переднего костно-фасциального футляра была идентичной латентности моторного ответа мышц, иннервируемых нервом-донором. При этом форма М-ответа мышц в донорской зоне по сравнению с интактной контралатеральной отличалась наличием нескольких смен отрицательных и положительных фаз регистрируемого сигнала с различными значениями амплитуды отдельных пиков.

На поздних сроках наблюдения отмечалось продолжение постепенного увеличения амплитуды М-ответа мышц, иннервируемых восстановленным нервом, но значений соответствовавших исходному уровню не отмечалось. Через 9 месяцев после операции амплитуда М-ответа передней большеберцовой мышцы составляла $0,92 \pm 0,49$ мВ (95% ДИ = от 0,68 до 1,16 мВ), что достигало минимальных значений интактной конечности, для которой амплитуда вызванных сокращений составляла $2,85 \pm 1,34$ мВ (95% ДИ = от 2,28 до 3,42 мВ).

У животных контрольной группы сокращений мышц-мишеней таргетных зон пересеченного нерва, вызванных электростимуляцией, не отмечалось в течение всего периода наблюдения.

Таким образом, результаты электрофизиологического исследования у животных опытной группы в поздние сроки послеоперационного периода убедительно свидетельствовали о восстановлении иннервации и постепенном увеличении амплитуды моторного ответа реиннервированных мышц.

При исследовании прижизненной структуры тканей в опытной группе в зоне оперативного вмешательства визуализировалась боковая неврома большеберцового нерва (нерва-донора) с гипоехогенным центром и гиперэхогенным контуром. Дистальнее области экспериментального шва общий малоберцовый нерв (нерв-реципиент) сонографически не имел выраженных изменений структуры.

У животных контрольной группы при поперечном сканировании смещением датчика в дистальном направлении определялся дефект общего малоберцового нерва. Так, на уровне верхней трети бедра в составе седалищного нерва визуализировалось две ветви различного диаметра. При перемещении датчика в дистальном направлении удавалось выявить неврому общего малоберцового нерва, диаметр которой практически соответствовал диаметру большеберцового нерва. Дистальнее невромы на протяжении 0,9–1,2 см в составе седалищного нерва определялся только большеберцовый нерв, что соответствовало величине сформированного в эксперименте дефекта общего малоберцового нерва. Ниже уровня травмы в составе седалищного нерва визуализировался дистальный сегмент пересеченного общего малоберцового нерва, который отличался резким уменьшением эхогенных свойств.

При ультразвуковом сканировании мышц переднего и латерального костно-фасциальных футляров голени в опытной группе определялись умеренные очаговые изменения структуры мышечной ткани, в то время как у животных контрольной группы структура денервированной мышечной ткани характеризовалась выраженными диффузными изменениями гиперэхогенного характера и уменьшением толщины соответствующего слоя.

Макроскопически у животных экспериментальной группы в области выполненного микрохирургического вмешательства с соединением нервов по типу «конец в бок» отмечалось значительное разрастание рубцовой ткани. Седалищный нерв был фиксирован к окружающим тканям фиброзными тяжами. Непосредственно в зоне выполнения оперативного вмешательства отмечалось большое количество полнокровных сосудов малого диаметра. Дистальнее области рубца визуализировался внешне неизмененный периферический сегмент восстановленного общего малоберцового нерва. У животных контрольной группы отмечалось уменьшение диаметра общего малоберцового нерва на стороне экспериментальной травмы. Насыщенность цвета дистального сегмента пересеченного нерва была заметно ниже, чем на контралатеральной конечности. Поврежденный нерв был почти прозрачным и практически сливался с подлежащими тканями.

Цвет реиннервированных мышц переднего костно-фасциального футляра голени в экспериментальной группе практически не отличался от цвета мышц того же футляра на контралатеральной конечности. У животных контрольной группы на стороне экспериментальной травмы нерва цвет денервированных мышц был значительно светлее по сравнению с контралатеральной конечностью. При иссечении образцов мышечной ткани в опытной группе отмечалась более плотная консистенция мышц переднего и латерального костно-фасциальных футляров голени на стороне оперативного вмешательства, но менее выраженная по сравнению с состоянием тех же мышц контрольной группы.

При исследовании морфологической картины в зоне соединения нервов «конец в бок» методом сканирующей электронной микроскопии были выявлены признаки повреждений части волокон нерва-донора на разных этапах микрохирургического вмешательства. Повреждения отдельных волокон нерва-донора, прилежащих к области операции, были отмечены как на этапе формирования дефекта его периневрального футляра, так и при наложении микрохирургических швов (Рисунок 4).

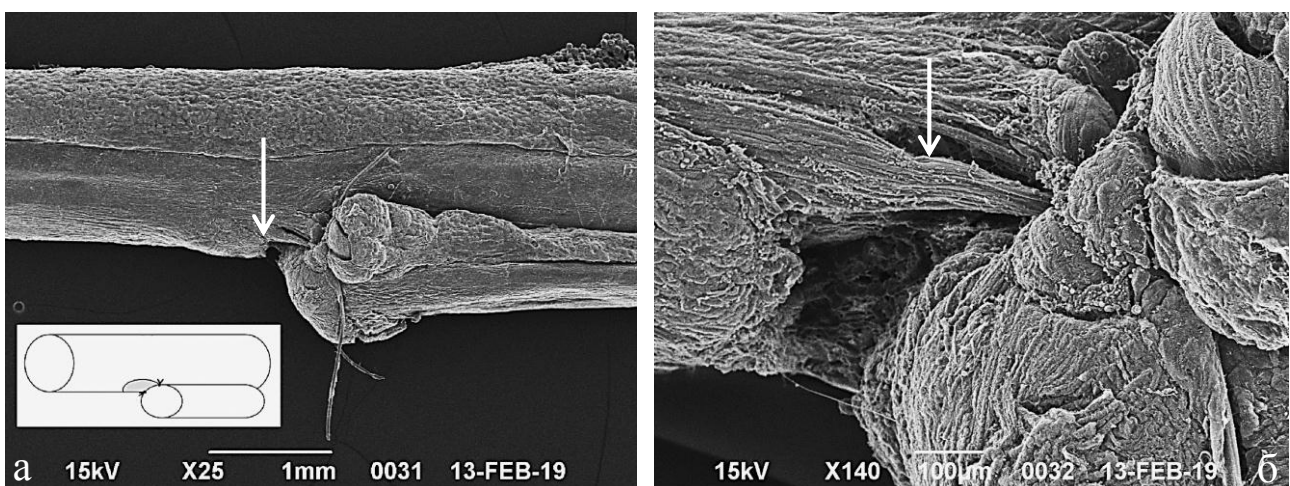


Рисунок 4 – Отдельные волокна нерва-донора захвачены в хирургический шов: а – общий вид препарата и схема выполненного этапа микрохирургического вмешательства, б – область оперативного вмешательства под бóльшим увеличением (микрофотография со сканирующего электронного микроскопа)

При исследовании структуры нервов методом световой микроскопии на препаратах продольных и поперечных срезов нервов после их соединения в эксперименте по типу «конец в бок» у животных опытной группы были выявлены морфологические признаки, характеризовавшие последовательную смену фаз дегенеративно-регенераторного процесса нервных волокон.

Для ранних сроков после выполнения экспериментальных микрохирургических вмешательств были характерны признаки вторичной дегенерации нервных волокон, которые определялись как в составе нерва-реципиента, так и в составе нерва-донора, что еще раз подтверждало интраоперационное повреждение последнего.

Внутри периневрального футляра нерва-реципиента валлеровскому перерождению подвергались все нервные волокна. Миелиновые оболочки были фрагментированы с образованием глыбок округлой и неправильной формы. Ядра шванновских клеток имели вытянутую форму и были смещены на периферию. В цитоплазме отдельных шванновских клеток прослеживались фрагменты разрушенного миелина. Собственные сосуды нерва, расположенные в эндоневральном пространстве, были дилатированы и полнокровны (Рисунок 5).

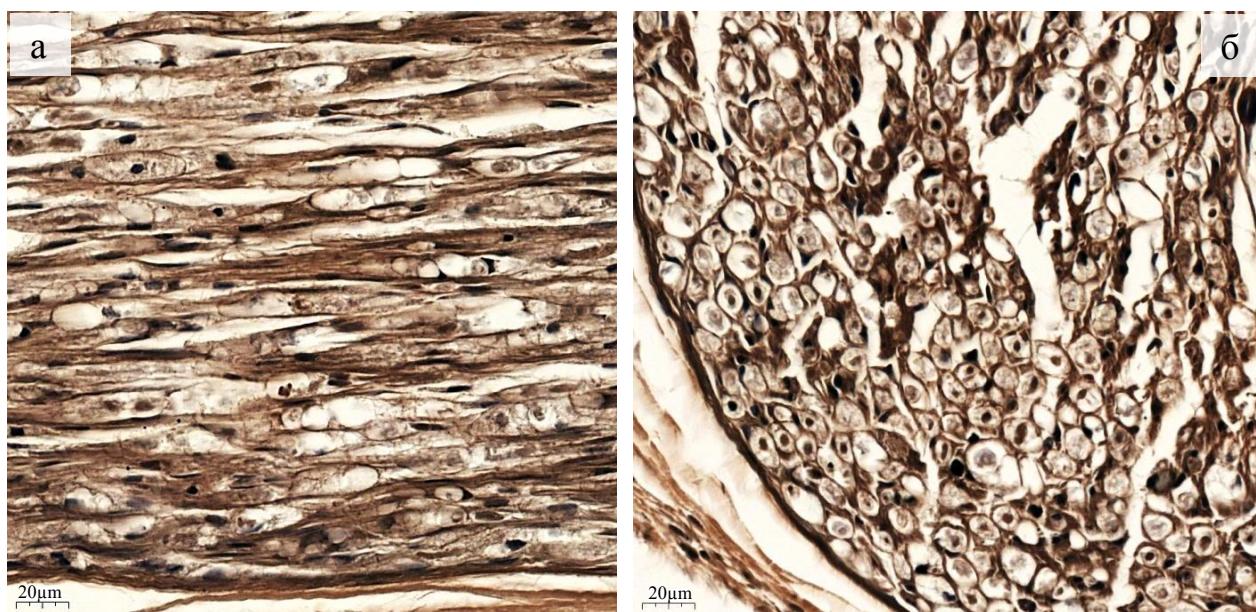


Рисунок 5 – Дегенеративные изменения всех миелинизированных нервных волокон в составе нерва-реципиента через 2 недели после его соединения в эксперименте с нервом-донором по типу «конец в бок»: а – продольный срез; б – поперечный срез (окраска по методу Шпильмейера, увеличение $\times 400$)

Признаки миелинопатии и аксонопатии волокон нерва-донора, в отличие от нерва-реципиента, захватывали не весь его периневральный футляр, а локализовались только в поверхностных отделах на стороне дефекта периневия, сформированного в ходе экспериментального микрохирургического вмешательства. Отдельные дегенерирующие нервные волокна нерва-донора отмечались в общей массе внешне неизмененных миелинизированных нервных волокон и определялись только дистальнее уровня операции на всем его протяжении (Рисунок 6).

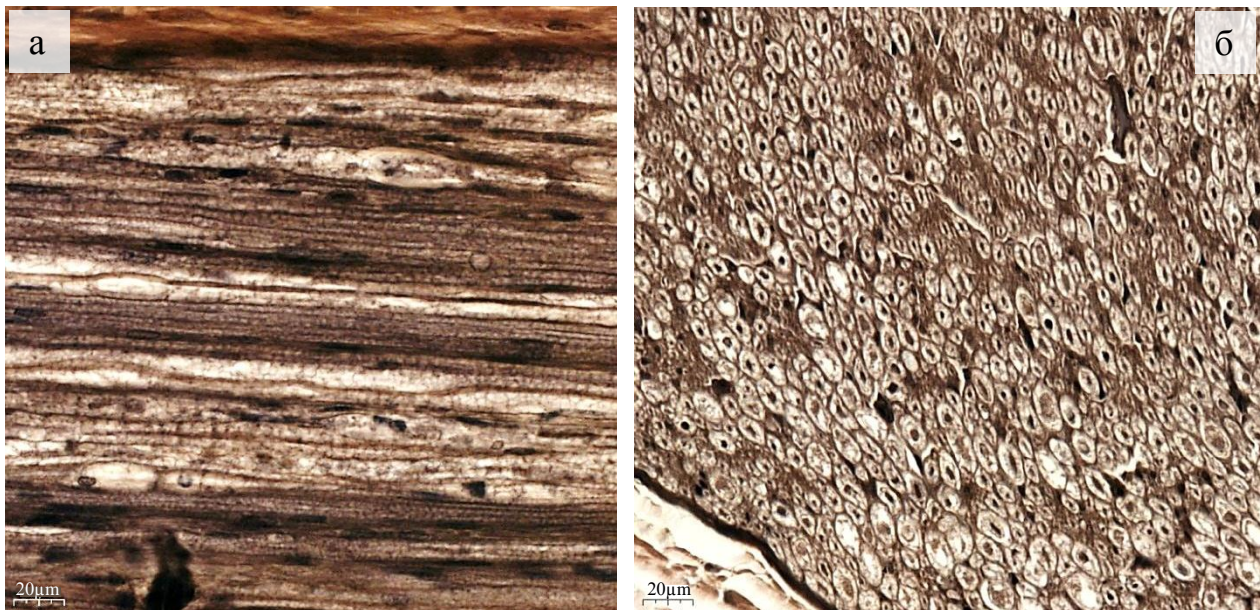


Рисунок 6 – Дегенеративные изменения отдельных волокон нерва-донора через 2 недели после подшивания к нему нерва-реципиента по типу «конец в бок»: а – продольный срез; б – поперечный срез (окраска по методу Шпильмейера, увеличение $\times 400$)

В ранние сроки послеоперационного периода (до 2-х недель) на продольных срезах, выполненных через зону оперативного вмешательства, отмечалось веерообразное расхождение дегенерирующих волокон нерва-донора и нерва-реципиента во встречном направлении выше и ниже уровня наложения лигатур с переплетением их по линии швов (Рисунок 7).

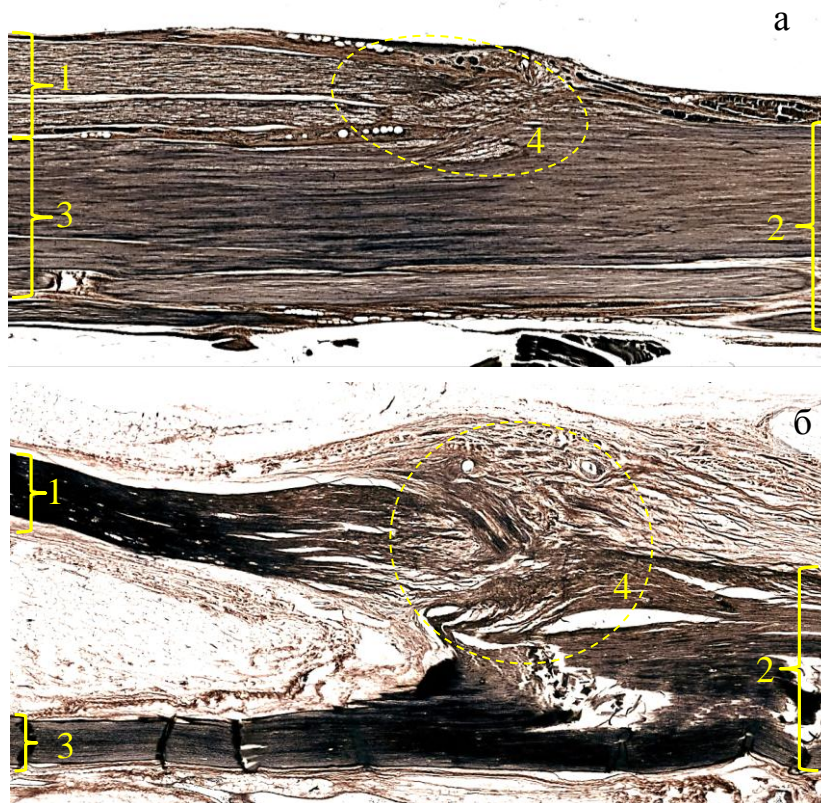


Рисунок 7 – Структура периферических нервов в области шва «конец в бок» в различные сроки после оперативных вмешательств: а – через 14 дней после вмешательства; б – через 218 дней (1 – нерв-реципиент, 2 – проксимальный сегмент нерва-донора, 3 – дистальный сегмент нерва-донора, 4 – область шва нервов, окраска по методу Шпильмейера, увеличение $\times 150$)

В поздние сроки наблюдений структура тканей в зоне операции напоминала неврому. Хаотично направленные нервные волокна переплетались с волокнами соединительной ткани. На продольных срезах, выполненных через линию швов, отмечались отдельные миелинизированные нервные волокна, попавшие в срез поперечно, что, по всей видимости, свидетельствует о сложной траектории продвижения аксонов в дистальном направлении в процессе регенерации. При этом часть нервных волокон при смещении в дистальном направлении располагались в футляре нерва-реципиента, а часть – в периневральном футляре нерва-донора.

Таким образом, морфологическая картина описанных гистотопографических изменений свидетельствовала о том, что ветви регенерирующих волокон нерва-донора, поврежденные на этапах оперативного вмешательства, явились источником реиннервации не только для дистального сегмента нерва-реципиента, но и для частичного восполнения собственных морфофункциональных потерь со стороны нерва-донора.

На поперечных срезах восстановленного нерва-реципиента выявлено резкое изменение соотношения удельной площади нервных волокон и соединительной ткани в составе нервного ствола. Основную площадь в поле зрения при микроскопии занимала соединительная ткань. Миелинизированные нервные волокна среднего и малого диаметра располагались внутри соединительнотканых тяжей по отдельности и небольшими группами.

Схожие изменения отмечались и в составе периневрального футляра нерва-донора, но имели ограниченный характер распространения. Увеличение относительного количества соединительной ткани отмечалось только в поверхностных отделах нервного ствола на стороне выполнения оперативного вмешательства. В той же локализации отмечалось также уменьшение числа волокон крупного диаметра (Рисунок 8).

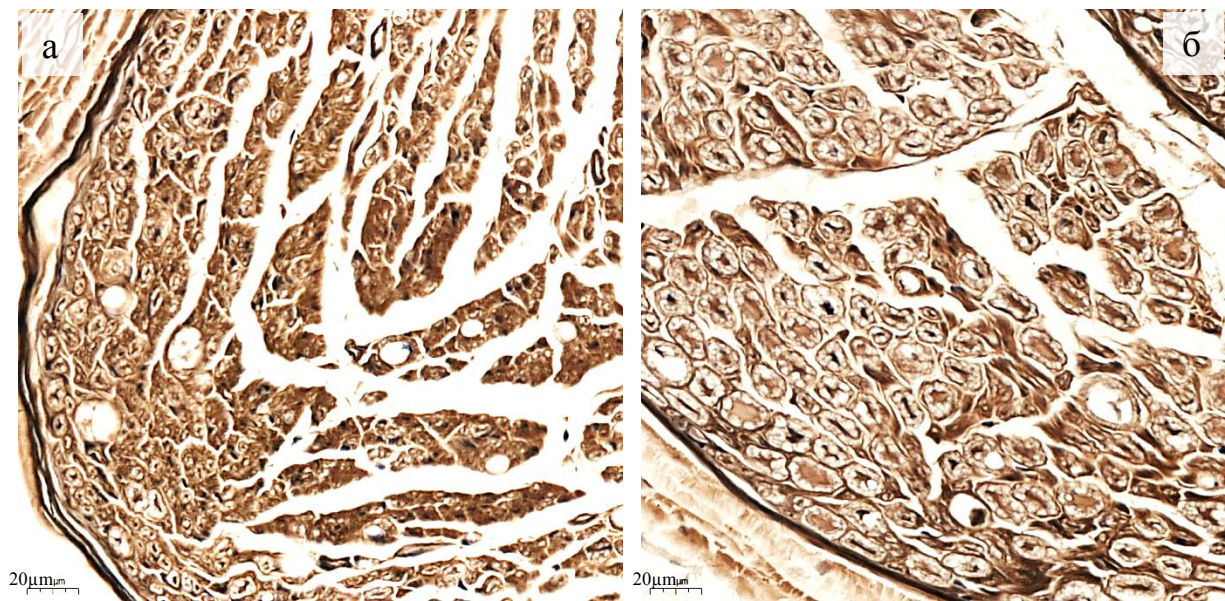


Рисунок 8 – Структура периферических нервов в отдаленном периоде (через 218 суток) после соединения нервов по типу «конец в бок»: а – нерв-реципиент, б – нерв-донор (окраска по методу Шпильмейера, увеличение $\times 400$)

В дистальном сегменте пересеченного нерва у животных контрольной группы определялась морфологическая картина полной дегенерации нервных волокон. Внутри периневрального футляра располагались шванновские клетки, разделенные соединительнотканными элементами. Миелинизированных нервных волокон ни в одном случае обнаружено не было (Рисунок 9).

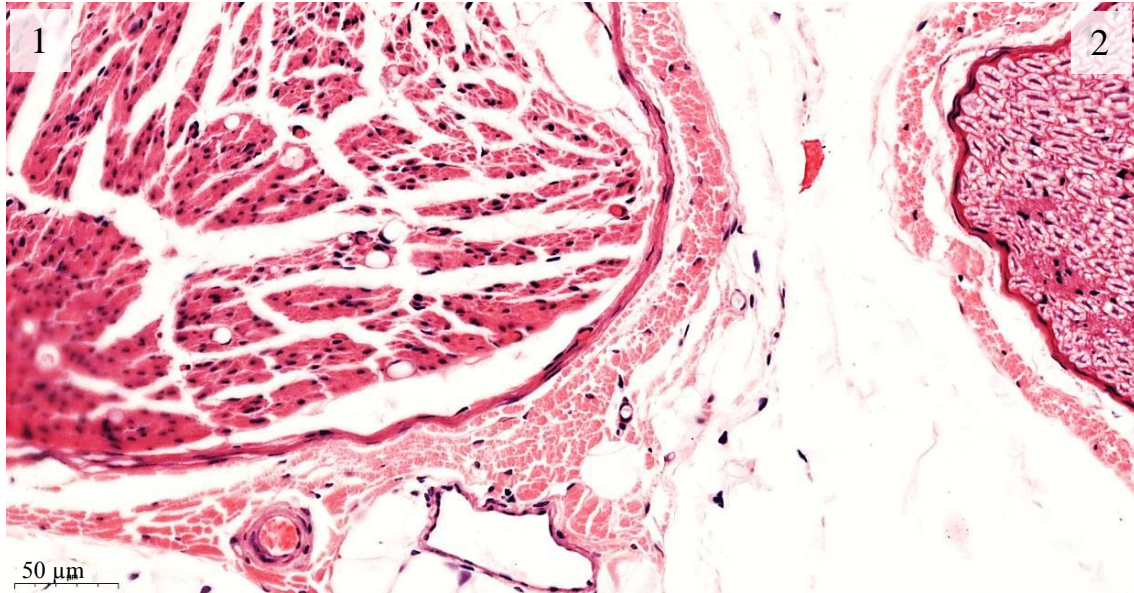


Рисунок 9 – Выраженные дегенеративные изменения дистального сегмента пересеченного периферического нерва у животных контрольной группы в отдаленном периоде (через 218 суток): 1 – общий малоберцовый нерв, 2 – большеберцовый нерв (окраска гематоксилином и эозином)

Общее число миелинизированных нервных волокон в составе восстановленного в эксперименте нерва-реципиента не достигало изначального количества и оставалось на достоверно более низком уровне ($p = 0,005$) по сравнению с количеством нервных волокон в составе проксимального сегмента общего малоберцового нерва (Таблица 1). Большинство миелинизированных нервных волокон нерва-реципиента имело относительно малый диаметр, что, по всей видимости, отражало продолжающийся процесс их регенерации.

Таблица 1 – Количество миелинизированных нервных волокон в составе восстановленного нерва-реципиента

Количество миелинизированных нервных волокон	Относительно крупного диаметра	Относительно малого диаметра	Всего
В проксимальном сегменте	1324 ± 455 (95% ДИ = от 847 до 1801)	470 ± 265 (95% ДИ = от 192 до 768)	1694 ± 608 (95% ДИ = от 1156 до 2432)
В восстановленном дистальном сегменте	272 ± 74 (95% ДИ = от 194 до 350)	387 ± 115 (95% ДИ = от 266 до 508)	658 ± 176 (95% ДИ = от 474 до 842)

При подсчете количества нервных волокон в составе нерва-донора было выявлено статистически не значимое ($p = 0,06$) уменьшение общего числа миелинизированных волокон внутри периневрального футляра дистальнее области

соединения его с нервом-реципиентом. Выявленное уменьшение количества относительно крупных нервных волокон и увеличение числа аксонов относительно малого диаметра также не имели статистически значимых различий ($p = 0,17$ и $p = 0,47$ соответственно).

Таким образом, после выполнения в опытной группе соединения микрохирургическими швами периферических нервов по типу «конец в бок» в составе нерва-реципиента было восстановлено $37,7 \pm 5,4\%$ исходного числа миелинизированных нервных волокон при малозначительных неизбежных потерях волокон нерва-донора.

В опытной группе животных в структуре реиннервированных мышц наряду с участками, сохранившими вид практически неизменной мышечной ткани, отмечались отдельные зоны атрофии мышечных волокон (Рисунок 10).

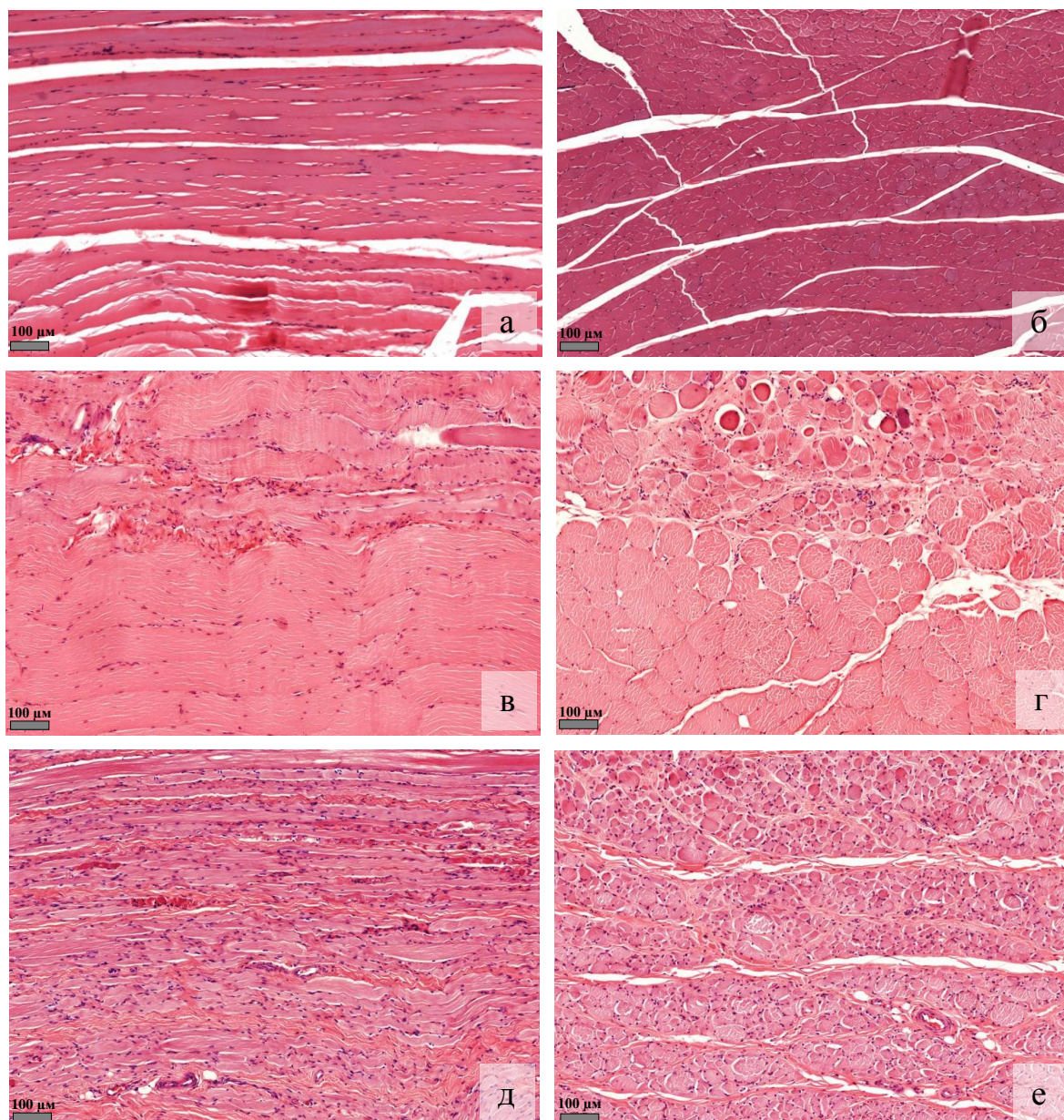


Рисунок 10 – Структура мышц переднего костно-фасциального футляра голени лабораторных животных в отдаленном послеоперационном периоде: а, б – интактная конечность; в, г – опытная группа; д, е – контрольная группа (окраска гематоксилином и эозином, увеличение $\times 100$)

В исследованных препаратах очаги умеренной атрофии мышечных волокон в среднем занимали $32,4 \pm 8,2\%$ общей площади мышечной ткани. Значимого уменьшения диаметра мышечных волокон вне очагов атрофии не выявлено. Однако удельная площадь соединительной ткани в структуре реиннервированных мышц по сравнению с интактной конечностью была увеличена почти вдвое (до $7,6 \pm 1,3\%$, $p = 0,002$).

В контрольной группе экспериментальная травма нерва без его восстановления приводила к выраженным изменениям структуры его мышц-мишеней. Пучки мышечных волокон были значительно уменьшены в размерах, утратили характерную исчерченность. Средний диаметр миофибрилл на стороне экспериментальной травмы по сравнению с интактной конечностью был уменьшен на $40,2\%$ ($p < 0,01$). Прослойки соединительной ткани, составляющие перимизий и эндомизий, были существенно утолщены. На всех исследованных препаратах отмечалось значительное достоверное ($p < 0,01$) увеличение удельной площади соединительной ткани по сравнению с интактной конечностью.

Таким образом, в опытной группе соединение по типу «конец в бок» дистального сегмента пересеченного нерва с краями хирургически сформированного дефекта периневрия на боковой поверхности нерва-донора приводило к неполной, но стойкой реиннервации нерва-реципиента и тканей его таргетных зон. Реиннервированные мышцы, несмотря на неполное восстановление численного состава нервных волокон в футляре нерва-реципиента и сохранявшиеся очаги умеренной атрофии мышечной ткани, принимали участие в составе ответной двигательной реакции безусловного рефлекса. Выявленные на этапах микрохирургического вмешательства случайные повреждения волокон нерва-донора в отдаленном периоде не проявлялись заметными функциональными расстройствами.

Сохранение полной утраты двигательной иннервации у животных контрольной группы и выраженная атрофия денервированных мышц-мишеней поврежденного нерва свидетельствовали об адекватности модели экспериментальной травмы нерва и, в то же время, об эффективности выполненных оперативных вмешательств у животных опытной группы.

Одним из наиболее неоднозначных вопросов, вызывающих активные дискуссии среди хирургов, является адекватность экстраполяции результатов экспериментальных исследований, выполненных с участием лабораторных животных, для обоснования возможности применения разработанных способов в клиническую практику. Это обусловлено не только значительно более сложным строением нервов у человека, но и более высокими функциональными требованиями, предъявляемыми к его опорно-двигательному аппарату. Итоги экспериментального раздела нашей работы свидетельствуют о стабильном достижении удовлетворительных морфофункциональных результатов реиннервации тканей за счет соединения дистального сегмента поврежденного нерва с боковой поверхностью интактного нерва-донора. На наш взгляд, в случаях с обширными проксимальными травматическими дефектами нервов, бесперспективных для реконструкции другими оперативными приемами, наиболее рациональным будет являться стремление реализовать в клинической практике те анатомо-

физиологические условия и технику соединения нервов швом по типу «конец-в-бок», которые позволят получать удовлетворительные функциональные результаты в эксперименте.

Применительно к обоснованию приемов двигательной реиннервации мышечных групп наиболее проблемных – дистальных сегментов верхней конечности в случае высоких проксимальных травм нервов нами изучены особенности топографии, степень выраженности связей между крупными нервами, уровни формирования и внешнее строение наиболее функционально значимых мышечных ветвей нервов, а также расположение сосудисто-нервных ворот мышц. Корреляционными исследованиями была выявлена зависимость морфоскопических характеристик периферических нервов от формы внешнего строения верхней конечности.

Для плеча диапазон вариабельности индекса формы внешнего строения составлял от 3,1 до 4,7, а для предплечья – от 3,7 до 5,0. Крайние формы сегментов верхней конечности с наименьшими значениями индекса считали относительно короткими и широкими, а с наибольшими значениями – относительно узкими и длинными.

Изменчивость в строении нервов верхней конечности характеризовалась разным количеством ветвей, уровнем их отхождения от основного ствола, а также степенью их обособленности за счет неодинакового количества связей между соседними ветвями.

Анализ результатов макро- и микропрепаровки нервов верхних конечностей и морфометрических характеристик их мышечных ветвей показал, что в общей выборке наименьшая однородность исследуемых параметров характеризовала мышечно-кожный нерв и его ветви. Наиболее постоянными внешними анатомическими характеристиками отличались мышечные ветви локтевого нерва.

Сравнением морфометрических показателей ветвей нервов плеча, области локтевого сустава и предплечья, относившихся к крайним формам внешнего строения, было выявлено преобладание их длины на препаратах с относительно узкими и длинными сегментами. В данной группе определялась наибольшая вариабельность длины двигательных ветвей для мышц области предплечья, что, по всей вероятности, было связано с более выраженной изменчивостью линейных размеров данного сегмента верхней конечности (Таблица 2). В противоположность этому, верхние конечности с относительно широкими и короткими сегментами характеризовались относительно менее протяженными и одновременно менее вариабельными ветвями нервов.

На относительно узких и длинных конечностях, для которых характерным являлось наличие относительно обособленных ветвей нервов, практически не отмечалось коллатеральных и внутривольных межпучковых связей. В таких случаях выделение из состава основного нервного ствола отдельных периневральных футляров, составлявших мобилизуемую двигательную ветвь, не сопровождалась особыми трудностями. После рассечения наружной эпиневральной оболочки в ходе диссекции внутреннего эпиневрия удавалось мобилизовать отдельные периневральные футляры на значительном протяжении практически без повреждения внутривольных межфутлярных связей.

Таблица 2 – Морфометрическая характеристика функционально наиболее значимых ветвей нервов предплечья и кисти, составляющих потенциальные пары нервов «донор-реципиент», при разных формах внешнего строения конечностей

Наименование мышц	Короткие и широкие конечности		Узкие и длинные конечности	
	Длина двигательных ветвей (см)	Коэффициент вариации (%)	Длина двигательных ветвей (см)	Коэффициент вариации (%)
ОБЛАСТЬ ПРЕДПЛЕЧЬЯ				
N. Medianus				
M. Pronator teres	3,70 ± 1,38	34,30	3,78 ± 1,81	47,78
M. Flexor carpi radialis	4,01 ± 1,01	31,08	4,50 ± 1,82	40,62
M. Flexor digitorum superficialis	3,52 ± 1,06	30,16	3,67 ± 1,35	36,83
M. Flexor pollicis longus	4,90 ± 1,85	34,55	2,37 ± 1,18	51,15
N. Ulnaris				
M. Flexor digitorum profundus	1,96 ± 0,72	36,97	3,49 ± 1,24	35,65
M. Flexor carpi ulnaris	2,78 ± 0,83	29,99	2,51 ± 1,00	39,74
N. Radialis (глубокая ветвь)				
Мышцы заднего костно-фасциального футляра	7,11 ± 1,38	19,39	8,68 ± 1,95	22,43
ОБЛАСТЬ КИСТИ				
N. Medianus (возвратная двигательная ветвь)				
Мышцы возвышения I пальца	1,35 ± 0,35	25,98	1,87 ± 0,45	23,84
N. Ulnaris (доступная длина глубокой ветви)				
Межкостные мышцы	1,79 ± 0,33	18,43	2,32 ± 0,41	17,24

Конечности с относительно широкими и короткими сегментами отличались сетевидной формой строения нервов с наличием соединительных связей между вторичными ветвями нервов. После рассечения наружного эпинеурия отмечалось большое количество внутривольных межфутлярных переходов, соединяющих соседние пучки. В таких условиях мобилизация двигательных ветвей была относительно затруднена и сопровождалась повреждением отдельных мостиков между соседними перинеуральными футлярами (Рисунок 11).



Рисунок 11 – Отличия морфоскопических характеристик ветвей срединного нерва в зависимости от формы внешнего строения конечностей: сетевидная форма ветвей нерва (а) с большим количеством внутриствольных межпучковых связей (в) на относительно широких и коротких конечностях; концентрированная форма ветвей нерва (б) с малым числом межпучковых связей (г) на относительно узких и длинных конечностях (сосудисто-нервные пучки визуализированы на ладонной поверхности кисти: 1 – срединный нерв, 2 – локтевой нерв, локтевая артерия отведена на держалках)

Вне зависимости от линейных размеров конечностей на препаратах с относительно короткими и широкими сегментами отмечалось каудальное смещение сосудисто-нервных ворот мышц, по сравнению с препаратами, отличающимися относительно длинными и узкими сегментами. Для последних характерным оказалось более краниальное расположение сосудисто-нервных ворот мышц (Рисунок 12).



Рисунок 12 – Особенности локализации сосудисто-нервных ворот мышц на предплечьях разной формы: 1 – сосудисто-нервные ворота локтевого сгибателя запястья, 2 – сосудисто-нервные ворота поверхностного сгибателя пальцев, 3 – метка расположена в дистальном отверстии супинаторного канала

Таким образом, характерные для узких и длинных конечностей особенности строения и топографии нервов, отличающиеся относительно более длинными ветвями нервов и малым количеством соединительных коллатералей и внутриствольных межпучковых связей, создают условия для менее травматичной селективной мобилизации двигательных ветвей и соединения их швом «конец в бок». В противоположность этому, на конечностях с относительно широкими и короткими сегментами мобилизация ветвей периферических нервов затруднена наличием большого количества коллатеральных и внутриствольных связей.

Исходя из существующей потребности в опережении времени дегенеративных изменений мышечной ткани при травме нервов был разработан алгоритм применения шва нервов «конец в бок» для ускоренной реиннервации наиболее значимых в функциональном плане мышечных групп (Рисунок 13).

Результаты выполненного исследования позволяют сформулировать необходимые условия для ускоренного восстановления двигательной иннервации тканей путем соединением нервов по типу «конец в бок»:

1. Наличие преимущественно двигательной ветви интактного нерва (нерва-донора) в непосредственной близости к нерву-реципиенту.
2. Ожидаемые функциональные результаты восстановления иннервации тканей таргетных зон нерва-реципиента по своей значимости должны превышать

возможные расстройства иннервации тканей-мишеней нерва-донора за счет интраоперационной травмы его нервных волокон.

3. Расчетное время реиннервации тканей реципиентной зоны, считая от момента первичной травмы, должно быть короче времени наступления необратимой атрофии денервированных мышц.



Рисунок 13 – Алгоритм применения шва нервов «конец в бок» для селективной реиннервации функционально значимых мышечных групп при проксимальных травмах и обширных дефектах нервов конечностей

Учитывая длительность регенерации нервных волокон, которая при проксимальных травмах нервов может затянуться до 1,5–2 лет, для предотвращения необратимой атрофии мышц дистальных отделов конечностей наибольшее значение имеют оперативные приемы, позволяющие создать морфологические условия для ранней селективной реиннервации наиболее функционально значимых мышечных ветвей поврежденного нерва (Рисунок 14).

С учетом особой значимости для функции кисти сохранения возможности противопоставления I пальца с топографо-анатомических позиций обоснован способ реиннервации мышц возвышения большого пальца. Мобилизация возвратной двигательной ветви поврежденного срединного нерва (нерва-реципиента) с внутриневральным выделением составляющих ее пучков до уровня запястья и соединение по типу «конец в бок» с краями хирургически сформированных

дефектов периневрия на латеральной поверхности глубокой ветви локтевого нерва (нерва-донора) позволяют создать морфологические условия для ранней селективной реиннервации мышц возвышения I пальца при изолированных травмах срединного нерва. При проксимальных травмах срединного нерва применение данного способа соответствует расчетному выигрышу во времени более 15–17 месяцев.

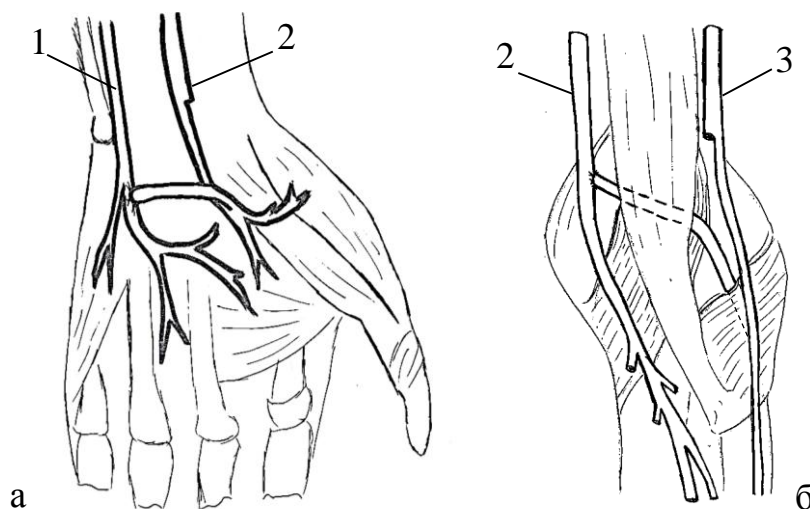


Рисунок 14 – Принципиальные схемы способов селективной реиннервации функционально значимых мышечных групп верхней конечности путем соединения по типу «конец в бок» отдельных ветвей поврежденного нерва с интактным нервом-донором: а – для реиннервации мышц возвышения I пальца при травмах срединного нерва; б – для реиннервации разгибательной мускулатуры предплечья при травмах лучевого нерва (1 – локтевой нерв, 2 – срединный нерв, 3 – лучевой нерв)

Соединение по типу «конец в бок» глубокой ветви лучевого нерва (нерв-реципиент) с преимущественно двигательными пучками срединного нерва (нерв-донор) на уровне локтевой ямки позволяет создать морфологические условия для ранней селективной реиннервации разгибательной мускулатуры предплечья при изолированных травмах лучевого нерва на высоком проксимальном уровне. Мобилизация нерва-реципиента в передней латеральной локтевой борозде, транспозиция на медиальную сторону через хирургически сформированный канал между плечевой мышцей и дистальным отделом двуглавой мышцы плеча и соединение с периневральными футлярами нерва-донора позволяют приблизить источник регенерирующих нервных волокон к целевым тканям-мишеням на расстояние, равное длине плеча. Исходя из протяженности плеча, расчетное время реиннервации реципиентной зоны предположительно может сократиться на 10–12 месяцев.

Таким образом, соединение нервов по типу «конец в бок» в эксперименте позволяет получать стабильные положительные морфофункциональные результаты реиннервации нерва-реципиента и тканей его таргетных зон, а неизбежные частичные потери нервных волокон нерва-донора не имеют выраженных функциональных последствий для иннервируемых им тканей. Учитывая существующие видовые различия во внешнем и внутривольном строении нервов конечностей у человека и лабораторных животных, данный вид оперативных

вмешательств на нервах представляется перспективным преимущественно в интересах невротизации отдельных дистальных ветвей поврежденных нервов. Соединение микрохирургическими швами периневральных футляров нервов по типу «конец в бок» позволяет создавать морфологические условия для ранней селективной реиннервации наиболее функционально значимых мышц-мишеней поврежденного нерва, что является важным дополнением к общепринятым способам реконструктивно-пластических вмешательств на нервах или альтернативой им в случаях, когда восстановление анатомической целостности поврежденного нерва невозможно.

Выводы

1. Соединение в эксперименте дистального сегмента поврежденного нерва по типу «конец в бок» с краями хирургически сформированного дефекта периневрия на боковой поверхности интактного периферического нерва позволяет восстановить утраченную иннервацию тканей-мишеней нерва-реципиента на фоне компенсированной транзиторной невропатии нерва-донора.

2. Восстановление периферических нервов по типу «конец в бок» должно выполняться как внутриствольная микрохирургическая операция, направленная на создание морфологических условий для перехода регенерирующих волокон нерва-донора через боковой хирургический дефект собственного периневрального влагалища во вскрытые периневральные футляры дистального сегмента нерва-реципиента.

3. Реиннервация тканей, денервированных при травме периферического нерва, происходит за счет перенаправления в футляры нерва-реципиента избыточно регенерирующих аксонов нерва-донора, неизбежно повреждаемых на этапах микрохирургического вмешательства. Иные механизмы восстановительных процессов (обратимая нейропраксия, коллатеральный спрутинг и контаминация собственными нервными волокнами) в изученные сроки (до 9 месяцев) не играют существенной роли.

4. Восстановление структуры нерва-реципиента характеризуется последовательной сменой фазы вторичной дегенерации собственных нервных волокон на фазу регенерации и прорастания аксонов нерва-донора, замещающих в составе нерва-реципиента около 1/3 от исходного количества нервных волокон ($37,7 \pm 5,4\%$, $p = 0,005$).

5. Структурно-функциональные изменения тканей в таргетных зонах восстановленного периферического нерва швом по типу «конец в бок» свидетельствуют о реиннервации мышечной ткани с сохранением отдельных очагов умеренной атрофии. Изменения среднего диаметра реиннервированных мышечных волокон незначительны, а количество соединительной ткани остается увеличенным почти вдвое (до $7,6 \pm 1,3\%$, $p = 0,002$). Амплитуда моторного ответа реиннервированных мышц не достигает исходного уровня и составляет 32,3% ($p < 0,01$) от первоначальных значений.

В те же сроки у животных контрольной группы (без реконструкции дефекта нерва) развивается стойкая утрата двигательной иннервации, которая приводит к уменьшению среднего диаметра миофибрилл на 40,2% ($p < 0,01$) и увеличению

количества волокнистой соединительной ткани в составе денервированных мышц в 7 раз (до $31,2 \pm 5,6\%$, $p < 0,01$). Электростимуляция дегенерировавшего дистального сегмента пересеченного нерва не вызывает ответных сокращений денервированных мышц.

6. Индивидуальная анатомическая изменчивость нервов верхних конечностей проявляется в различной степени обособленности их ветвей, которая коррелирует с формой внешнего строения соответствующих сегментов. Характерные для относительно узких и длинных конечностей нервные стволы с малым количеством соединительных и внутриствольных межпучковых связей создают условия для менее травматичной мобилизации и транспозиции отдельных ветвей нервов для селективной реиннервации тканей швом нервов по типу «конец в бок». Напротив, на конечностях с относительно широкими и короткими сегментами мобилизация ветвей нервов с выделением отдельных пучков из состава основного нервного ствола сопряжена с риском повреждения большого количества коллатеральных и внутриствольных межпучковых связей.

7. При проксимальных травмах и обширных дефектах нервных стволов соединение отдельных ветвей поврежденного нерва с боковой поверхностью интактного нерва-донора по типу «конец в бок» на уровне дистальных сегментов конечностей, в дополнение к общепринятым методам реконструкции нервов на уровне травмы, позволяет создать морфологические условия для ранней селективной реиннервации функционально наиболее значимых мышечных групп дистальных сегментов конечностей за счет существенного сокращения путей регенерации нервных волокон к целевым тканям-мишеням.

Практические рекомендации

1. Выполнение селективной реиннервации наиболее функционально значимых целевых зон поврежденного нервного ствола представляется обоснованным с топографо-анатомических позиций оперативным вмешательством при травмах периферических нервов на высоком проксимальном уровне. Если уровень травмы периферического нерва относительно сосудисто-нервных ворот функционально значимых мышц-мишеней расположен выше проксимальной трети смежного сегмента, то для предотвращения необратимых изменений в денервированной мышечной ткани целесообразно рассмотреть приемы невротизации отдельных двигательных ветвей поврежденного нервного ствола путем их соединения по типу «конец в бок» с интактными преимущественно двигательными ветвями нерва-донора.

2. При выборе нерва-донора для восстановления периферических нервов по типу «конец в бок» целесообразно отдавать предпочтение монофункциональным ветвям, превосходящим диаметр нерва-реципиента, что позволит, исходя из основного механизма реиннервации нерва-реципиента, создать наилучшие условия для его восстановления и минимизировать возможные расстройства иннервации тканей в донорской зоне.

3. Соединение по типу «конец в бок» мобилизованной возвратной двигательной ветви срединного нерва с краями специально сформированных дефектов периневрия на боковых поверхностях пучков глубокой ветви локтевого

нерва позволяет создать морфологические условия для реиннервации мышц возвышения большого пальца кисти при изолированных травмах срединного нерва на уровне проксимальных сегментов области плеча.

4. В качестве одного из перспективных способов реиннервации мышц заднего костно-фасциального футляра предплечья при высоких (проксимальных) травмах лучевого нерва может рассматриваться соединение его глубокой ветви с двигательными ветвями срединного нерва. С топографо-анатомических позиций наилучшие технические условия для выполнения подобных вмешательств отмечаются на относительно узких и длинных конечностях, для которых характерны относительно обособленные ветви периферических нервов.

5. Исходя из особенностей индивидуальной анатомической изменчивости периферических нервов, выполнение реконструктивных вмешательств на нервах у пациентов с относительно узкими и длинными конечностями целесообразно выполнять с наложением периневральных швов. Такой подход в данном случае является наиболее оправданным для сохранения относительной обособленности пучков восстановленного нерва.

6. При планировании экспериментальных исследовательских работ с моделированием хирургических операций на периферических нервах и необходимостью длительного наблюдения за лабораторными животными в послеоперационном периоде целесообразно проводить односторонние оперативные вмешательства на общем малоберцовом нерве. Минимальные двигательные нарушения на стороне оперативного вмешательства существенно не ухудшают общее состояние животных лабораторных животных (кроликов).

7. Простым и демонстративным способом экспериментально-клинического контроля функционального состояния общего малоберцового нерва у лабораторных животных (кроликов) является оценка амплитуды разведения пальцев стопы при инициации рефлекса подготовки к приземлению. При полном пересечении общего малоберцового нерва на стороне экспериментальной травмы разведение пальцев стопы отсутствует. Восстановление иннервации наружного разгибателя пальцев стопы (иннервируется ветвями общего малоберцового нерва) после реконструктивных вмешательств на нервном стволе сопровождается постепенным увеличением амплитуды отведения пальцев стопы при инициации безусловного статокинетического рефлекса подготовки к приземлению.

8. При исследовании внутриствольной топографии периферических нервов на нефиксированном анатомическом материале для селективного контрастирования отдельных периневральных футляров следует их инъецировать фотоконтрастной смесью на основе жидкого силикона. Во избежание разрывов периневрия, заполнение футляра контрастирующей смесью необходимо проводить через прокол периневральной оболочки по внутривенному катетеру, пульсирующими надавливаниями на поршень шприца.

9. Во избежание ретракции тканей при изготовлении микропрепаратов периферических нервов необходимо выполнять двойную иммобилизацию исследуемых тканей. Перед иссечением образцов тканей необходимо закрепить проксимальный и дистальный участки макропрепарата на шине из полимера. После фиксации препаратов в формалине перед проводкой в парафине интересующую

область необходимо дополнительно пришить микрохирургическими швами к фотобумаге. После изготовления парафиновых блоков просвечивающая через слой парафина фотобумага позволяет ориентировать препарат в объектодержателе микротомы в необходимой плоскости по отношению к ножу. Пропитанная парафином фотобумага при попадании в плоскость среза легко режется лезвием микротомы и не портит микропрепарат.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ништ, А.Ю. К вопросу о технике соединения нервов по типу конец-в-бок в эксперименте / А.Ю. Ништ, А.А. Микулич // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2015. – № 2 (прил.). – С. 110–111.

2. Некрасов, Р.А. К топографической анатомии ветвей n. radialis в области латерального надмыщелка плеча // Р.А. Некрасов, С.И. Шевченко, Н.Ф. Фомин, А.Ю. Ништ // Российский медико-биологический вестник. – 2016. – №2 (прил.). – С. 134–135.

3. Ништ, А.Ю. Способ фотоконтрастной визуализации периневральных влаглищ седалищного нерва / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, А.А. Микулич // Российский медико-биологический вестник. – №2 (прил.). – 2016. – С. 138–139.

4. Фомин, Н.Ф. О некоторых проблемах терминологии и морфологии шва нерва по типу «конец-в-бок» / Н.Ф. Фомин, А.Ю. Ништ // Российский медико-биологический вестник. – 2016. – №2 (прил.). – С. 221–222.

5. Ништ, А.Ю. Способ клинического контроля функционального состояния периферических нервов после выполнения экспериментальных микрохирургических вмешательств / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, А.А. Микулич // Усовершенствование способов и аппаратуры, применяемых в учебном процессе, медико-биологических исследованиях и клинической практике / Под общей ред. проф. Котива Б.Н. – Санкт-Петербург: ВМедА, 2017. – С. 197.

6. Ништ, А.Ю. Способ контрастирования периневральных влаглищ периферических нервов / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, А.А. Микулич // Усовершенствование способов и аппаратуры, применяемых в учебном процессе, медико-биологических исследованиях и клинической практике / Под общей ред. проф. Котива Б.Н. – Санкт-Петербург: ВМедА, 2017. – С. 198.

7. Ништ, А.Ю. К вопросу о реиннервации тканей после микрохирургического формирования анастомозов по типу «конец-в-бок» между периневральными футлярами поврежденного и интактного периферических нервов в эксперименте / А.Ю. Ништ // Актуальные вопросы травматологии и ортопедии: материалы конференции молодых ученых Северо-Западного федерального округа. – Санкт-Петербург: РНИИТО им. Р.Р. Вредена, 2017. – С. 77–79.

8. Микулич, А.А. Опыт изучения индивидуальной анатомической изменчивости периферической нервной системы в школе В.Н. Шевкуненко / А.А. Микулич, А.Ю. Ништ // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2017. – № 3 (прил. 2). – С. 99–100.

9. Ништ, А.Ю. Методические подходы к моделированию реконструктивно-пластических операций на периферических нервах лабораторных животных в

условиях длительных экспериментов / А.Ю. Ништ, А.А. Микулич // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2017. – № 3 (прил. 2). – С. 118–119.

10. Ништ, А.Ю. Некоторые эхографические характеристики периферических нервов лабораторных животных после их микрохирургического восстановления в эксперименте / А.Ю. Ништ, А.И. Имельбаев, Н.Ф. Фомин, А.А. Микулич // Вестник клинической нейрофизиологии. – 2017. – Специальный выпуск. – С. 135–136.

11. Ништ, А.Ю. Особенности топографии и футлярного строения седалищного нерва кроликов применительно к выполнению экспериментальных реконструктивно-пластических вмешательств на периферических нервах / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Вопросы морфологии XXI века. Выпуск 5. Сборник трудов: «Гистогенез, реактивность и регенерация тканей» / под ред. И.А. Одинцовой, С.В. Костюкевича. – Санкт-Петербург: «ДЕАН», 2018. – С. 180–182.

12. Ништ, А.Ю. Соединение нервов по типу «конец-в-бок»: ожидание и действительность / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, В.С. Чирский // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2018. – № 1. – С. 203–208.

13. Ништ, А.Ю. Роль лучевых методов исследования в оценке результатов реконструктивных микрохирургических вмешательств на периферических нервах экспериментальных животных / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, А.И. Имельбаев, А.А. Микулич // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – № 1 (9). – С. 52–53.

14. Ништ, А.Ю. Экспериментально-анатомические обоснования восстановления иннервации предплечья и кисти при дефектах срединного и локтевого нервов / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Материалы Всероссийской юбилейной научной конференции, посвященной 220-летию со дня основания кафедры нормальной анатомии Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова «Достижения морфологических наук на современном этапе» 9 июня 2018 года. – Санкт-Петербург: ВМедА. – С. 54–57.

15. Ништ, А.Ю. Способ определения функционального состояния периферических нервов после их восстановления в эксперименте / А.Ю. Ништ // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2018. – № 3. – С. 141–143.

16. Ништ, А.Ю. Комплексный морфофункциональный подход к обоснованию способа восстановления периферических нервов по типу «конец-в-бок» / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Морфология. – 2019. – Т. 155. – №2. – С. 216–217.

17. Ништ, А.Ю. Способ двойной иммобилизации периферических нервов при изготовлении микропрепаратов для морфологического исследования зоны экспериментального шва / А.Ю. Ништ // Усовершенствование способов и аппаратуры, применяемых в учебном процессе, медико-биологических исследованиях и клинической практике / Под общей ред. проф. Котива Б.Н. – Санкт-Петербург: ВМедА, 2019. – С. 83–85.

18. Ништ, А.Ю. Нерешенные проблемы реконструктивной хирургии периферических нервов / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Вестник экспериментальной и клинической хирургии. – 2019. – Т. 12. – №2. – С. 127–133.

19. Ништ, А.Ю. Возможности восстановления двигательной иннервации соединением периферических нервов по типу «конец-в-бок» в эксперименте на

лабораторных животных / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Оперативная хирургия и клиническая анатомия. – 2019. – Т 3. – № 2. – С. 81–82.

20. Бардаков, Р.А. Топографо-анатомические подходы к обоснованию восстановления двигательной иннервации при соединении нервов по типу «конец-в-бок» / Р.А. Бардаков, Л.А. Яковлев, А.Ю. Ништ // Известия Российской Военно-медицинской академии. – 2019. – Т.1, S.1. – С. 36–39.

21. Ништ, А.Ю. Особенности топографии возвратной двигательной ветви срединного нерва применительно к восстановлению активного противопоставления I пальца при проксимальных травмах срединного нерва / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2019. – № 4. – С. 105–108.

22. Ништ, А.Ю. К вопросу о технике формирования периневрального анастомоза при соединении периферических нервов лабораторных животных по типу «конец-в-бок» в условиях эксперимента / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. – 2019. – Т. 22, № 3 (70). – С. 77–78.

23. Ништ, А.Ю. Морфологические основы восстановления двигательной иннервации при травмах периферических нервов / А.Ю. Ништ, В.С. Чирский, Н.Ф. Фомин // Журнал анатомии и гистопатологии. – 2019. – №8 (4). – С. 66–73.

24. Ништ, А.Ю. К вопросу о морфофункциональных результатах восстановления периферических нервов по типу «конец-в-бок» (экспериментальное исследование) / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Forcipe. – 2019. – Т 2, Вып. 2. – С. 15.

25. Ништ, А.Ю. Морфологическая характеристика изменений периферических нервов и тканей таргетных зон при соединении периферических нервов по типу «конец-в-бок» в эксперименте / А.Ю. Ништ, В.С. Чирский, Н.Ф. Фомин // Клиническая и экспериментальная морфология. – 2020. – Т. 9, № 1. – С. 40–48.

26. Ништ, А.Ю. Восстановление двигательной иннервации соединением периферических нервов по типу «конец-в-бок»: экспериментальное моделирование и клинко-инструментальный контроль реиннервации / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, А.И. Имельбаев, А.А. Микулич // Вестник экспериментальной и клинической хирургии. – 2020. – Т 13, № 2(46). – С. 24–33.

27. Ништ, А.Ю. Ранения периферических нервов с обширными дефектами: экспериментальные и топографо-анатомические подходы к обоснованию ускоренной реиннервации тканей / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, В.С. Чирский // Военно-медицинский журнал. – 2020. – № 11. – С. 35–38.

28. Ништ, А.Ю. Результаты восстановления периферических нервов по типу «конец-в-бок» в эксперименте и перспективы применения данного метода для двигательной реиннервации при травмах периферических нервов / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, В.С. Чирский, В.П. Орлов // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=30459> (дата обращения: 15.01.2021).

29. Ништ, А.Ю. Некоторые особенности индивидуальной анатомической изменчивости в строении и топографии двигательных ветвей периферических нервов верхней конечности / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин // Оперативная хирургия и клиническая анатомия. – 2020. – № 4. – С. 22–27.

30. Ништ, А.Ю. Топографо-анатомические и нейрохирургические аспекты восстановления периферических нервов по типу «конец-в-бок» / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, В.П. Орлов // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2021. – № 1. – С. 121–128.

31. Ништ, А.Ю. Морфофункциональные данные о возможности восстановления иннервации и функции мышц соединением поврежденных периферических нервов «конец-в-бок» в эксперименте / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, В.С. Чирский // Вопросы морфологии XXI века. Выпуск 6. Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Гистогенез, реактивность и регенерация тканей» / под ред. И.А. Одинцовой, С.В. Костюкевича. – Санкт-Петербург: ДЕАН, 2021. – С. 124–127.

32. Ништ, А.Ю. Об оперативно-технических условиях, механизме и морфофункциональных признаках реиннервации тканей после вшивания дистального конца поврежденного нерва в бок интактного нерва-донора / А.Ю. Ништ, Н.Ф. Фомин, В.С. Чирский, В.П. Орлов // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Александра Кирилловича Косоурова. – Воронеж: Научная книга, 2021. – С. 243–247.

33. Ништ, А.Ю. В помощь экспериментаторам: модель изолированной травмы нерва и надежный способ контроля реиннервации мышц-мишеней восстановленного нервного ствола / А.Ю. Ништ // Оперативная хирургия и клиническая анатомия. – 2021. – № 4. – С. 22–25.

ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Патент № 2647649 Российская Федерация, МПК G09B 23/28 (2006.01). Способ определения функционального состояния периферических нервов после их микрохирургической реконструкции в эксперименте: № 2017105042 заявл. 15.02.2017: опубл. 16.03.2018 Бюл. №8 / Ништ А.Ю., Фомин Н.Ф., Микулич А.А. – 6 с.: ил.

2. Патент № 2712294 Российская Федерация, МПК А61В 17/11 (2006.01). Способ ускоренного восстановления иннервации мышц дистальных отделов конечностей при травмах периферических нервов в проксимальных отделах: № 2019107220 заявл. 13.03.2019: опубл. 28.01.2020 Бюл. №4 / Ништ А.Ю., Фомин Н.Ф. – 6 с.

3. Патент № 2718740 Российская Федерация, МПК А61В 17/00 (2006.01), А61В 17/11 (2006.01), А61В 17/56 (2006.01). Способ ускоренного восстановления иннервации мышц возвышения I пальца при ранениях срединного нерва в проксимальном отделе: № 2019108929 заявл. 27.03.2019: опубл. 14.04.2020 Бюл. №11 / Ништ А.Ю., Фомин Н.Ф. – 10 с.: ил.

4. Патент № 2726590 Российская Федерация, МПК А61В 17/56 (2006.01). Способ восстановления иннервации разгибательной мускулатуры предплечья при травмах лучевого нерва: № 2020101134 заявл. 10.01.2020: опубл. 14.07.2020 Бюл. №20 / Ништ А.Ю., Фомин Н.Ф. – 8 с.: ил.