

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МЕДИЦИНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С ТРАВМАМИ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ НЕРВОВ И ПЛЕЧЕВОГО СПЛЕТЕНИЯ (ОБЗОР)

DOI: 10.17691/stm2025.17.2.08

УДК 616.833.34–001.1–039.76

Поступила 21.02.2024 г.

**А.Н. Белова**, д.м.н., профессор, зав. кафедрой медицинской реабилитации¹;**Т.С. Калинина**, ассистент кафедры медицинской реабилитации¹;**Т.В. Буйлова**, д.м.н., профессор кафедры медицинской реабилитации¹;
зав. кафедрой медицинской реабилитации и неврологии²;**С.В. Фомин**, невролог³;**А.Г. Полякова**, д.м.н., доцент кафедры медицинской реабилитации¹¹Приволжский исследовательский медицинский университет, пл. Минина и Пожарского, 10/1,
Н. Новгород, 603005;²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, проспект Гагарина, 23, Н. Новгород, 603022;³Нижегородская областная клиническая больница им. Н.А. Семашко, ул. Родионова, 190,
Н. Новгород, 603093

Травмы периферических нервов и плечевого сплетения представляют собой одну из наиболее серьезных медицинских проблем ввиду высокой частоты инвалидизирующих последствий. Медицинская реабилитация при таких травмах имеет критически важное значение, поскольку обеспечивает наиболее полное функциональное восстановление пациентов.

Цель настоящего обзора — обобщение и интерпретация литературных данных о методах медицинской реабилитации, а также оценка эффективности реабилитационных стратегий и методов восстановления функций верхних конечностей после травмы периферических нервов и плечевого сплетения.

Представлены сведения о теоретических основах восстановления функций после травмы периферических нервов и нервных сплетений, а также о факторах, которые могут затруднять полноценное функциональное восстановление пациента. Рассмотрены реабилитационные стратегии и методы, направленные на ускорение регенерации нервных волокон, предупреждение осложнений, коррекцию кортикальной пластичности, восстановление функциональных возможностей пациента и качества его жизни. Особое внимание уделено вопросам терапии боли, электростимуляции, коррекции сенсорного дефицита и физической терапии в послеоперационном периоде. Реабилитационные модальности и продолжительность медицинской реабилитации весьма индивидуальны и зависят от множества факторов, определяющих направленность реабилитационных воздействий. При этом значительное число методик реабилитации имеют низкую доказательную базу: многие научные исследования основаны на небольших выборках, не учитывают разнородный характер травм и не оценивают отдаленные результаты. Требуется дальнейшее изучение эффективности как отдельных реабилитационных методик, так и комплексных реабилитационных программ, способствующих восстановлению двигательной активности пациентов с травмами периферических нервов и плечевого сплетения.

Ключевые слова: травматическое повреждение периферического нерва; травма плечевого сплетения; медицинская реабилитация; физическая терапия.

Как цитировать: Belova A.N., Kalinina T.S., Buylova T.V., Fomin S.V., Polyakova A.G. Modern medical rehabilitation methods for patients with peripheral nerve and brachial plexus injuries (review). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2025; 17(2): 86, <https://doi.org/10.17691/stm2025.17.2.08>

English

Modern Medical Rehabilitation Methods for Patients with Peripheral Nerve and Brachial Plexus Injuries (Review)

A.N. Belova, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Medical Rehabilitation¹;**T.S. Kalinina**, Assistant Professor, Department of Medical Rehabilitation¹;

Для контактов: Полякова Алла Георгиевна, e-mail: ag.polyakova@yandex.ru

T.V. Buylova, MD, DSc, Professor, Department of Medical Rehabilitation¹;

Head of the Department of Medical Rehabilitation and Neurology²;

S.V. Fomin, Neurologist³;

A.G. Polyakova, MD, DSc, Associate Professor, Department of Medical Rehabilitation¹

¹Privolzhsky Research Medical University, 10/1 Minin and Pozharsky Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russia;

²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603022, Russia;

³Nizhny Novgorod Regional Clinical Hospital named after N.A. Semashko, 190 Rodionova St., Nizhny Novgorod, 603093, Russia

Peripheral nerve and brachial plexus injuries represent one of the most serious medical challenges due to the high frequency of disabling consequences. Medical rehabilitation for such injuries is critically important as it ensures the most complete functional recovery for patients.

The aim of this review is to summarize and interpret the data on medical rehabilitation methods, as well as to assess the effectiveness of rehabilitation strategies and techniques for restoring upper limb functions after peripheral nerve and brachial plexus injuries.

Information is provided on the theoretical foundations of functional recovery following peripheral nerve and nerve plexus injuries, as well as on factors that may hinder the full functional recovery of patients. There are discussed rehabilitation strategies and methods aimed at accelerating nerve fiber regeneration, preventing complications, correcting cortical plasticity, restoring patients' functional capabilities, and improving their quality of life. Special attention is given to pain management, electrical stimulation, sensory deficit correction, and physical therapy in the postoperative period. Rehabilitation modalities and the medical rehabilitation duration are highly individualized and depend on numerous factors that determine the rehabilitation interventions direction. However, a significant number of rehabilitation methods have a low evidence base: many scientific studies are based on small samples, do not consider the heterogeneous nature of injuries, and do not evaluate long-term outcomes. Further research is needed to assess the effectiveness of both individual rehabilitation techniques and comprehensive rehabilitation programs that facilitate the recovery of motor activity in patients with peripheral nerve and brachial plexus injuries.

Key words: peripheral nerve injury; brachial plexus injury; medical rehabilitation; physical therapy.

Введение

Травмы периферических нервов (ТПН) представляют собой значимую медицинскую проблему ввиду широкой распространенности и неблагоприятных последствий для здоровья пациентов [1–3]. По данным отечественных исследователей, в общей структуре травматизма мирного времени повреждения периферических нервов встречаются в 2–6% случаев, из них 70% касаются верхних конечностей (чаще всего срединного и локтевого нервов) [1, 4, 5]. Близкие показатели регистрируются и в США. Так, согласно результатам когортного исследования, среди 1230362 лиц с травмами верхних и нижних конечностей повреждения периферических нервов были диагностированы у 2,6 и 1,2% пациентов соответственно [3]. К наиболее тяжелым формам травматических повреждений периферической нервной системы относятся травмы плечевого сплетения (ТПС) [6, 7]. Основными причинами травматических нейропатий в мирное время являются дорожно-транспортные происшествия, бытовой и производственный травматизм, в военное время — боевые ранения [1, 3, 8–11]. В период боевых действий частота повреждений периферических нервов достигает 20% всех травм [11]. Для боевых травм характерны наиболее тяжелые повреждения нервов и сплетений. При этом боевые ранения в

большинстве случаев носят сочетанный характер с одновременным поражением костей, сосудов, сухожилий и мышц [4].

По данным работ [3, 8], ТПН/ТПС преобладают у лиц молодого трудоспособного возраста и могут иметь разрушительные последствия для физического и психологического состояния человека, его социально-экономического благополучия. Так, инвалидизация при ТПН достигает 60% [11], при ТПС — 75% [1]. Медицинская реабилитация при ТПН/ТПС имеет критически важное значение, поскольку способствует регенерации нервов (как спонтанной, так и после хирургического лечения) и обеспечивает наиболее полное функциональное восстановление [12, 13].

Публикаций, посвященных медицинской реабилитации при травматических нейропатиях, значительно меньше по сравнению с нетравматической патологией периферических нервов [14]. Тем не менее в последние годы появились новые научные разработки и системные обзоры, касающиеся аспектов реабилитации при ТПН/ТПС.

Цель настоящего обзора — обобщение и интерпретация литературных данных о методах медицинской реабилитации, а также оценка эффективности реабилитационных стратегий и методов восстановления функций верхних конечностей после травмы периферических нервов и плечевого сплетения.

Методология поиска источников

Поиск литературы выполняли по реферативным базам данных Scopus и Web of Science, в поисковой системе PubMed по базам MEDLINE и PubMed Central, на платформе Springer Link, в BioMed Central, Free Medical Journals; SSRN, Google Scholar по следующим ключевым словам: rehabilitation/реабилитация, peripheral nerve/периферический нерв, trauma/травма, traumatic peripheral nerve injury/травматическое повреждение периферического нерва, nerve regeneration/регенерация нерва, brachial plexus/плечевое сплетение, brachial plexus injury/травма плечевого сплетения, physical therapy/физическая терапия, electrical stimulation/электростимуляция, therapy modalities/терапевтические модальности, postoperative management/постоперационное ведение.

Теоретические основы восстановления функций после травм периферических нервов и плечевого сплетения

Реабилитационные интервенции и стратегии направлены на решение следующих задач [10, 15]:

- ускорение регенерации нервных волокон в процессе спонтанного восстановления или после оперативного вмешательства;

- предупреждение или уменьшение выраженности осложнений, возникающих вследствие длительной иммобилизации поврежденной конечности;

- коррекцию кортикальной пластичности, нарушение которой из-за снижения афферентации может влиять на результаты восстановления сенсорных и двигательных функций;

- восстановление функциональных возможностей пациента и качества его жизни.

Реабилитологам необходимо в каждом конкретном случае учитывать факторы, которые могут затруднять полноценное функциональное восстановление.

Современные представления о патофизиологических механизмах регенерации поврежденных нервных волокон детально изложены в ряде публикаций [4, 16, 17]. Напомним лишь, что регенерация аксонов начинается со стороны центрального отрезка нерва, а в периферическом отрезке происходят процессы дегенерации, при этом его сохранный периневральный футляр служит проводником для новых растущих к органам-мишеням аксональных волокон. Спонтанное восстановление двигательной функции обычно достигает плато к 18–24 мес после ТПН [18].

Выраженность осложнений после ТПН/ТПС (таких как контрактуры, мышечные атрофии, психологическая дезадаптация) напрямую связана с продолжительностью денервации. Значительное влияние на функциональные исходы после ТПН/ТПС могут оказывать также процессы, связанные с корковой пластичностью [15, 19]. Денервация определенной

зоны приводит к нарушению афферентации и утрате сенсорной обратной связи (что, в свою очередь, сопровождается реорганизацией корковых представительства денервированного органа), а также к уменьшению эфферентных моторных сигналов, изменению кортикальной модели двусторонней соматосенсорной и дополнительной моторной коры, а также к дисфункциональным движениям. Аксональный спраунтинг и неправильное направление прорастания аксонов также могут приводить к дезорганизации сенсорной карты коры головного мозга [15, 17].

К основным факторам, определяющим скорость и полноту регенерации периферических нервных волокон (и, следовательно, объем и направленность реабилитационных вмешательств), относят степень повреждения нервного проводника, уровень поражения, характер и давность повреждения, своевременность хирургического вмешательства [7, 17, 20, 21].

Степень локального повреждения нервного ствола, согласно основополагающей классификации Н.Д. Seddon [22], определяют в зависимости от сохранности аксона и соединительнотканых структур: нейропраксия — повреждение нерва, не приводящее к гибели аксона; аксонотмезис — повреждение нерва, приводящее к гибели аксона при сохранности эпинеурия, перинеурия, эндоневрия и шванновских клеток; нейротмезис — разрыв нерва с пересечением аксона и соединительнотканых оболочек нерва.

Последующая, более детализированная, классификация S. Sunderland [23], выделяющая пять степеней повреждений, легла в основу прогнозирования исходов спонтанной регенерации [10]. 1-я степень повреждения соответствует нейропраксии и предполагает демиелинизацию без утраты аксона; механизм восстановления функции нерва — ремиелинизация; прогноз — полное спонтанное восстановление функции нерва на протяжении <3 мес. 2-я и 3-я степени соответствуют аксонотмезису, при этом наблюдается повреждение аксона без нарушения либо с дезорганизацией архитектоники эндоневрия и развитие валлеровской дегенерации; механизмы восстановления включают аксональный спраунтинг, рост аксона (1 мм в сутки) и гипертрофию мышечных волокон. Спонтанное восстановление функции нерва — частичное или полное: прогноз считается благоприятным, если электронейромиография демонстрирует сохранность проведения импульса по двигательным/чувствительным волокнам, а игольчатая электромиография (ЭМГ) — лишь незначительное снижение рекрутмента. 4-я степень соответствует аксонотмезису и предполагает повреждение аксона, массивную дезорганизацию миелиновой оболочки, эндоневрия и перинеурия, а также развитие валлеровской дегенерации; механизмы восстановления включают рост аксона и гипертрофию мышечных волокон; прогноз в данном случае неблагоприятный и шанс на восстановление при отсутствии оперативного вмеша-

ства очень низкий. 5-я степень соответствует нейротмезису, что означает перерыв нерва и отсутствие восстановления в случае невыполнения хирургического вмешательства [10].

Все названные классификации основаны на микроскопических изменениях в нервном стволе. Макроскопически степень повреждения определить практически невозможно, поэтому диагностика основана на динамическом клиническом наблюдении и электрофизиологических исследованиях.

Уровень повреждения (проксимальный или дистальный) также имеет большое значение для прогноза спонтанного восстановления. Чем проксимальнее поражение нервного ствола или сплетения (т.е. чем больше расстояние от места повреждения до мышцы-мишени), тем хуже прогноз восстановления функции. Это связано с тем, что для прорастания нервного волокна требуется больше времени, а также увеличивается вероятность развития необратимых рубцовых изменений в эндоневральной трубке периферического отрезка нерва. Так, при повреждении аксона на расстоянии более чем 15–20 см от органа-мишени (например, при травме плечевого сплетения) вероятность спонтанного и полного восстановления в течение 12–18 мес практически отсутствует [10, 24]. В таких случаях может возникнуть необходимость в перемещении нервов. Наихудший прогноз наблюдается при повреждениях на преганглионарном уровне, поскольку спонтанная регенерация корешков спинальных нервов невозможна, а уникальные операции по имплантации поврежденных нервных корешков в спинной мозг, проводимые в отдельных клиниках, пока не нашли широкого практического применения [25].

Характер повреждения играет не менее важную роль в прогнозировании восстановления функции нерва. Например, при острых проникающих резаных ранениях имеется высокая вероятность полного пересечения (анатомического перерыва) нервного ствола. В таких ситуациях возможность самопроизвольного восстановления исключена. При закрытых травматических поражениях нервных стволов нередко наблюдается сохранность оболочек нерва (аксонотмезис), что предопределяет возможность его самопроизвольного восстановления. В то же время при тракционных травмах часто повреждается центральный отрезок нерва, что существенно затрудняет процесс регенерации. При огнестрельных ранениях дисфункция нервных стволов может быть обусловлена их сотрясением (нейропраксия), в связи с чем целесообразно мониторирование спонтанного улучшения на протяжении нескольких недель после травмы с последующим уточнением степени и обширности повреждения [1, 10].

Давность травмы имеет обратно пропорциональную зависимость с исходом реиннервации: чем больше времени прошло после травмы, тем хуже состояние таргентных зон, увеличиваются диастаз

между центральным и периферическим участком, а также размеры невротомы и фиброшванномы [4]. Денервированные мышцы подвергаются атрофии, и через определенный период времени нервно-мышечный синапс претерпевает необратимые изменения, реиннервация становится невозможной [26, 27].

Своевременность и качество хирургического вмешательства определяют функциональный исход в тех случаях, когда не предполагается возможность спонтанной регенерации нерва [1, 4, 28]. При чистой колотой или резаной ране, при установлении диагноза перерыва нерва хирургическое вмешательство по его восстановлению должно проводиться как можно раньше [1, 29]. При огнестрельных повреждениях, в случаях отсутствия очевидных признаков анатомического перерыва, показания к оперативному лечению становятся очевидными не ранее чем через 2–3 нед после травмы, когда явления сотрясения нервного ствола значительно регрессируют [1]. При закрытых травматических поражениях нервных стволов вопрос о хирургическом вмешательстве принимается обычно не ранее чем через 3–4 мес после травмы при условии проведения за это время интенсивного курса консервативного лечения и динамического нейрофизиологического контроля [1, 13]. В то же время необоснованно откладывать хирургические вмешательства на длительный срок, поскольку существует конечное временное «окно», в пределах которого денервированная мышца может быть подвергнута реиннервации. Так, операция перемещения нерва, при которой дистальный участок пересеченного нерва присоединяют к интактному нерву-донору, должна обеспечить реиннервацию мышцы-мишени в течение 12–18 мес после травмы [10], при этом наилучшие исходы хирургии достигаются в течение первых 3–6 мес [18, 29].

Для выяснения всех факторов, определяющих возможность и степень спонтанного восстановления при ТПН/ТПС, необходимо провести сбор анамнеза, неврологический осмотр, нейрофизиологические (электронейромиография, игольчатая ЭМГ) и нейровизуализационные (магнитно-резонансная нейрография, УЗИ) исследования [18, 30]. Тщательное обследование пациента и диагностическое мониторирование позволяют оценить траекторию функционального восстановления.

Реабилитационные модальности

Задачами реабилитации при ТПН/ТПС являются стимулирование регенерации нерва на протяжении всего того времени, которое требуется для его прорастания к органу-мишени; поддержание функции мышц и суставов; уменьшение или коррекция сенсорного дефицита; терапия боли и психологическая поддержка; восстановление способности пациентов к повседневной и профессиональной деятельности [12, 31]. Для решения этих задач необходимы

усилия мультидисциплинарной команды врачей, установление реабилитационного диагноза в рамках «Международной классификации функционирования, ограничений жизнедеятельности и здоровья (МКФ)» и применение широкого спектра реабилитационных вмешательств [13, 32].

Терапия боли. Боль может проявляться на всех стадиях ТПН/ТПС (при острой нервно-мышечной травме; послеоперационная боль в области хирургического вмешательства; хроническая нейропатическая боль). Значительно препятствуя активной реабилитации, боль резко ухудшает психическое здоровье и качество жизни пациента. Терапия боли должна начинаться сразу, как только пациент заявил о ее наличии [13]. Лечение болевого синдрома проводится согласно современным рекомендациям по терапии нейропатической боли [33, 34]. Используют лекарственные препараты (антидепрессанты, антиконвульсанты, опиоидные анальгетики), регионарную анестезию (межлестничная блокада плечевого сплетения при ТПС, продленная межлестничная блокада плечевого сплетения с перинеуральной установкой катетера с местным анестетиком), нейростимуляцию с помощью имплантированных электродов, психотерапию, комбинации медикаментозных и немедикаментозных методов лечения [33, 34].

Сообщается об использовании чрескожной электростимуляции (ЧЭС) при ТПН [35], однако анальгезирующий эффект ЧЭС при травматических нейропатиях, в отличие от туннельных синдромов, пока недостаточно изучен [36, 37]. Механизм анальгезирующего эффекта ЧЭС, основанный на теории «воротного контроля боли», предполагает сохранность афферентной импульсации от пораженной конечности, поэтому при полном перерыве нервных стволов, при преганглионарных поражениях плечевого сплетения применение ЧЭС не имеет обоснования [38].

Адьювантными методами терапии хронической нейропатической боли при ТПС являются транскраниальная стимуляция постоянным током и ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция, однако особенности применения этих методов при ТПН/ТПС требуют дальнейшего изучения [39]. Опубликованы данные об эффективной терапии хронической нейропатической боли, обусловленной ТПС, с помощью инвазивной процедуры глубокой стимуляции головного мозга [40], однако недостаточное число наблюдений пока не позволяет сделать достоверных выводов о целесообразности применения данного метода при ТПН/ТПС [13].

Для уменьшения боли, рассасывания отека и предотвращения спячного процесса некоторые авторы рекомендуют низкоинтенсивное инфракрасное лазерное облучение (НИЛИ) [41, 42]. Теоретической основой использования НИЛИ является его потенциальная способность уменьшать продолжительность фаз воспалительного процесса и интерстициаль-

ный отек тканей, улучшать поглощение кислорода тканями и кровоток [43–45]. Однако эффективность НИЛИ при лечении ТПН верхних и нижних конечностей была продемонстрирована лишь в нерандомизированном исследовании на неоднородной выборке пациентов [46]. В одном из исследований сообщается об эффективности гипнотерапии и точечного массажа (акупрессы) при лечении хронической боли вследствие ТПС [47].

В качестве средств дополнительной терапии нейропатической боли могут рассматриваться витамины группы В, применяемые в высоких дозах в виде комплексов, а также альфа-липоевая (тиоктовая) кислота [33]. Выбор конкретных способов лечения определяется выраженностью и локализацией болевого синдрома.

Нейропротективная лекарственная терапия. Активно изучается возможность местного или системного применения веществ, способных улучшать исходы регенерации путем воздействия на такие факторы, как посттравматическая гибель нейронов и глиальных клеток, пролиферация, миграция и дифференцировка шванновских клеток, подвижность конуса роста, ориентация роста аксонов [25, 48]. В экспериментах на животных [48] и в лабораторных опытах [49] была продемонстрирована способность некоторых фармакологических агентов (например, дексаметазона, метилпреднизолона, L-карнитина, цитиколина, мемантина, рилузола, аторвастатина, мезенхимных стволовых клеток, локального применения глиального нейтрофического фактора — GDNF) оказывать влияние на валлеровскую дегенерацию, развитие фиброза и другие процессы, связанные с регенерацией нервных волокон. Несмотря на отсутствие убедительных доказательств эффективности названных препаратов в реальной клинической практике, витамины группы В и цитиколлин используют в качестве нейропротекторов, учитывая их потенциальную эффективность, высокую безопасность и минимальное количество побочных эффектов [13].

Ортезирование применяется с целью защиты поврежденных тканей (для предупреждения неконтролируемых движений, которые могут приводить к расхождению концов нерва либо к повреждению швов/трансплантатов), предупреждения или минимизации контрактур и растяжений сухожильно-связочного аппарата, а также для физических тренировок (динамические ортезы) [12, 38, 50–53].

С иммобилизационной целью через 2–3 дня после снятия первичной операционной повязки используют гипсовые лонгеты и статические ортезы. Преимущества различных видов внешней фиксации не изучены, поэтому выбор основывается на медицинских показаниях и толерантности пациента [13]. Средство фиксации должно быть легким, не стеснять сохранившиеся движения, не сдавливать подлежащие ткани, в особенности на местах с нарушенной чувствительностью, не нарушать кровообращение в

конечностях. Ортезированию должны предшествовать мероприятия, направленные на устранение реактивной отека конечности (ретроградный массаж, возвышенное положение конечности) [10]. Для профилактики контрактур сегмент конечности обычно удерживается с помощью ортеза в функционально выгодном положении: при повреждении лучевого нерва это разгибательное положение кисти и пальцев; при повреждении малоберцового нерва — удержание стопы в среднем положении. При ТПС физиологическому положению соответствуют отведение и ротация кнаружи плеча, супинация предплечья и разгибание кисти. При ТПС с развитием паралича Дюшена–Эрба (дисфункция плечевого и локтевого суставов) для предупреждения неконтролируемых движений могут использоваться фиксирующие наплечные ремни (shoulder straps) и бандажи в форме «восьмерок»; при параличе типа Дежерин–Клюмпке (дисфункция кистевого сустава) — шина или ортез для удержания запястья в положении разгибания на 10–20°, что является профилактикой контрактур и уменьшения боли [13]. После хирургических вмешательств иммобилизация должна учитывать положение, наиболее выгодное для соприкосновения концов прерванного нерва.

Продолжительность иммобилизации может значительно варьироваться в зависимости от характера травмы и хирургических вмешательств [12, 52]. Иммобилизация после шва нерва, как правило, длится дольше (до 3 нед), чем при вмешательствах (трансплантации либо перемещении нервов), которые не предполагают значительного натяжения нервных стволов [50]. В некоторых случаях, таких как восстановление нервов пальцев кистей рук, ограничиваются только первоначальной операционной повязкой без последующего ортезирования [50]. В тех ситуациях, когда и другие мягкие ткани были восстановлены хирургическим путем (например, восстановление сухожилия), продолжительность иммобилизации может быть продлена для обеспечения достаточного заживления этих тканей. Так, при операции на плечевом сплетении и большой грудной мышце иммобилизация в положении приведения и внутренней ротации плеча продолжается 4 нед [50].

По мере восстановления способности к выполнению активных движений осуществляется переход от статических ортезов к динамическим, которые используют не только в процессе физических тренировок, но и для облегчения выполнения бытовых действий [53].

Физическая терапия является важнейшей реабилитационной стратегией, позволяя поддерживать сократительные свойства мышцы в период денервации и содействовать функциональному восстановлению в период реиннервации [12, 54]. Доказано, что целенаправленная двигательная активность способствует усилению внутриклеточных регенераторных механизмов и индуцирует поток афферентной им-

пульсации, обеспечивая соответствующее корковое представительство пораженной конечности [15, 55]. Типичный подход, основанный на теории проприоцептивного нервно-мышечного содействия, включает последовательный (по мере увеличения мышечной силы) переход от пассивных физических упражнений к пассивным с активной помощью, затем к активным в облегченных условиях и, наконец, к активным упражнениям с преодолением силы гравитации и сопротивления [13, 14]. При ТПС физические упражнения направлены не только на восстановление амплитуды движений и мышечной силы в пораженной конечности, но и на тренировку равновесия, нарушенного вследствие мышечного дисбаланса [12, 56].

Перед началом физической терапии необходима надежная внешняя фиксация соответствующих сегментов поврежденной конечности, а также оценка сохранившихся двигательных функций. Продолжительность и интенсивность занятий весьма индивидуальны, поскольку изменения структуры и функции мышц, определяющие выносливость к физическим нагрузкам, при ТПН могут значительно различаться. Сообщается об эффективности физической терапии, основанной на индивидуальном подходе, даже при тяжелых ТПС [12, 57].

Электростимуляция нерва назначается при подлежащих хирургическому лечению ТПН/ТПС с целью ускорения регенерации поврежденных нервных волокон [27, 58–60]. Молекулярные механизмы регенерации периферических нервов под воздействием их прямой электростимуляции на протяжении нескольких десятилетий изучались на животных моделях. В настоящее время доказано, что электростимуляция способна воздействовать на нейроны и активизировать внутриклеточные механизмы регенерации, стимулируя синтез белков, которые необходимы для роста и спраутинга аксонов [27, 61, 62]. Полагают, что эффект электростимуляции опосредован вторичными мессенджерами, высвобождаемыми в ответ на стимуляцию и вызывающими активизацию АТФ-опосредованных молекулярных путей регенерации [27]. Многочисленные исследования на грызунах подтвердили высокий потенциал электростимуляции при различных видах ТПН — компрессии, рассечении, обширных дефектах [29, 63, 64]. Продemonстрировано также, что воздействие электростимуляции на здоровый нерв в эксперименте перед нанесением повреждения («пре-кондиционирование» нерва) способствует его ускоренной регенерации после травмы [65, 66].

Результаты экспериментов на животных позволили начать применение прямой электростимуляции нерва в клинической практике, интраоперационно либо путем имплантации электродов [67–71]. Прямая электрическая стимуляция нерва может осуществляться как непосредственно во время оперативного вмешательства, так и в послеоперационном периоде. В рандомизированных клинических

исследованиях получено подтверждение того, что прямая интраоперационная электрическая стимуляция нерва по стандартному протоколу (частота 20 Гц, продолжительность стимуляции 1 ч) ускоряла восстановление и улучшала исходы лечения пациентов с повреждениями периферических нервов [67–69, 71]. Детальное описание параметров интраоперационной электростимуляции представлено в обзоре L. Juckett с соавт. [27]. В исследовании отечественных авторов [72] продемонстрирована эффективность прямой электростимуляции нервных стволов низкоинтенсивным переменным электрическим током (частота 8 Гц, амплитуда 20–40 мА). Процедура проводилась в послеоперационном периоде ежедневно в течение 14 дней 2 раза в день по 15 мин через электроды, имплантированные при выполнении костного остеосинтеза.

В систематическом обзоре M.C. Costello с соавт. [59] проанализированы результаты эффективности электрической стимуляции у 229 пациентов с повреждениями плечевого сплетения и нервов верхних конечностей. Протоколы проанализированных исследований различались между собой: однократная интраоперационная электростимуляция, имплантация электродов с началом стимуляции сразу после шва нерва, ЧЭНС при неоперированном компрессионном повреждении нерва. Продолжительность сеансов варьировала от 20 мин до 1 ч, частота стимуляции составляла 20 Гц, интенсивность варьировала от 3 до 30 В, длительность импульсов — от 0,1 до 1,0 мс. Пациентов наблюдали в среднем на протяжении 13,5 мес. Несмотря на существенные различия протоколов исследований, функциональные результаты тех пациентов, которые получали электрическую стимуляцию, были достоверно лучше, чем в группах сравнения. Следует отметить, что из 6 рандомизированных исследований, результаты которых проанализированы в обзоре, лишь два касались травматического повреждения нервных стволов (перерыв и ятрогенная тракция), в остальных стимуляция проводилась по поводу хронических компрессионных повреждений с болевым синдромом.

Прямую электрическую стимуляцию нерва следует обязательно сочетать с физической терапией, поскольку эти два метода реабилитации дополняют друг друга и могут иметь синергетический эффект в отношении регенерации [26, 54, 73–75].

Вопрос целесообразности клинического использования электростимуляции для сохранения денервированных мышц остается спорным [50, 76, 77]. Известно, что этот метод успешно применяется для увеличения силы и улучшения функционирования слабых мышц в случаях их сохранной иннервации [78]. В то же время имеется очень мало научных исследований, посвященных применению электростимуляции для сохранения функции денервированной вследствие ТПН мышцы либо мышцы, ожидающей реиннервации, и результаты этих исследований про-

тиворечивы [50, 76]. Необходимо различать состояние денервации мышцы в результате поражения верхнего (центрального) и нижнего (периферического) мотонейронов. При интактном нижнем мотонейроне электростимуляция вызывает мышечное сокращение за счет деполяризации периферического нерва, поскольку порог возбуждения нейролеммы ниже, чем порог возбуждения сарколеммы. При повреждении нижнего мотонейрона электрическая стимуляция может вызвать мышечное сокращение только за счет прямой стимуляции мышечных волокон и деполяризации сарколеммы. Продолжительность стимула, необходимая для мышечного сокращения при повреждении нижних мотонейронов, чаще всего превышает 1 мс, а интенсивность тока, требуемая для деполяризации сарколеммы, значительно выше, чем для нейролеммы. Электростимуляция с такими параметрами часто бывает болезненной, что ограничивает возможности метода [78]. Помимо этого, остается неясным, каким образом электрическая стимуляция при денервации мышцы влияет на регенерацию нерва и не подавляет ли она этот процесс.

В экспериментах на крысах продемонстрировано, что прямая электрическая стимуляция денервированных скелетных мышц усиливала их атрофию и нарушала восстановление нервно-мышечных функций [79]. В другом эксперименте [80] сравнивали влияние высокочастотной (100 импульсов в секунду, длительность импульса — 80 мкс) и низкочастотной (4 импульса в секунду, длительность импульса — 240 мкс) ЧЭНС на регенерацию волокон седалищного нерва мышей после его размождения. Показано, что ЧЭНС приводила к отеку аксонов и нарушению цитоархитектоники нервных волокон, причем изменения были более выражены в группе мышей, подвергшихся воздействию высокочастотной стимуляции.

Систематический обзор публикаций [76], посвященный результативности электрической стимуляции у пациентов с неврологическими заболеваниями, не позволил сделать однозначных выводов ни «за», ни «против» использования метода для увеличения мышечной силы после ТПН. В целом для расширения клинического использования электростимуляции при ТПН требуются более масштабные клинические исследования с привлечением однородных групп пациентов, а также разработка коммерчески доступных устройств для проведения стимуляции [10].

Коррекция сенсорного дефицита. Сенсорные нарушения оказывают пагубное влияние на жизнедеятельность человека, в особенности в случае поражения кистей рук. В первую очередь при сенсорном дефиците пациента обучают защитным и компенсаторным стратегиям: предупреждают о рисках ожогов и отморожений тех участков, на которых нарушена чувствительность, информируют о необходимости использовать перчатки или варежки при пребывании на холоде, предупреждают о недопустимости контакта руки с нагретыми предметами и горячей водой и

т.д. [10]. При наличии гиперчувствительности и аллодинии следует рассмотреть возможность применения признанных нефармакологических и фармакологических стратегий [15, 81].

В результате дезорганизации сенсорной карты мозга пациенты с ТПН/ТПС, перенесшие операции по перемещению нерва, могут испытывать отраженные ощущения в непораженных частях тела и иметь искаженное восприятие ощущений в пораженной конечности [15, 82, 83]. Для коррекции сенсорного дефицита рекомендуют применять техники сенсорного переобучения, основанные на теории коркового ремоделирования [15, 83, 84]. К классическому методу сенсорного переобучения относится переобучение тактильному гнозису путем взаимодействия с предметами различных текстур, температур, форм и объемов [84]. Метод традиционного «сенсорного перевоспитания» продемонстрировал эффективность в качестве компонента комплексной медицинской реабилитации, однако клинических исследований его эффективности с достаточным количеством выборок не проводилось [13].

К классическим техникам также относится сенсорное перевоспитание, основанное на осмысленной и полезной деятельности (activity-based sensory reeducation) [15], реализуемое в процессе эрготерапии. Кроме того, пациентов поощряют использовать функцию руки в повседневной профессиональной деятельности (если нет противопоказаний) [84].

С целью коррекции сенсорного дефицита в области кисти используют методику «зеркальной» терапии. Она основана на визуальной обратной связи: зеркало устанавливают перед пациентом в положении, позволяющем ему видеть отражение здоровой руки, движения которой воспринимаются как движения больной руки. Полагают, что «зеркальная терапия» позволяет стимулировать корковые зоны, не получающие афферентных сигналов от пораженной руки, и восстанавливать функциональные связи между конечностью и корой головного мозга [15, 31]. По некоторым данным, такая терапия превосходит традиционную методику сенсорного перевоспитания [31]. Эффективность зеркальной терапии, возможно, повышается при ее комбинации с транскраниальной стимуляцией постоянным током [85].

К современной стратегии сенсорного переобучения относится технология кроссмодальной сенсорной замены, при которой с помощью высокотехнологичных устройств (сенсорные перчатки) тактильная информация преобразуется в другие сенсорные модальности, например в зрительные или слуховые сигналы. В результате тренировки нейронных связей между сенсорными зонами коры аудио- или оптические сигналы начинают восприниматься как тактильные, создавая иллюзию афферентации из пораженной конечности [13, 15].

Эрготерапия. Доказано, что подражательные бессмысленные упражнения менее эффективны,

чем целенаправленная деятельность. Это касается в первую очередь верхней конечности [86, 87], поэтому обязательным компонентом реабилитации при ТПН/ТПС является выполнение целевых упражнений, направленных на повышение способности пациента адаптироваться к повседневной жизни. Так, в проспективном исследовании [87] продемонстрировано, что такие регулярно тренируемые действия, как складывание полотенца, подъем сумки, использование для разрезания ножа, питье воды из стакана, использование столовых приборов, ускоряли функциональное восстановление пациентов, прооперированных по поводу ТПС.

Рефлексотерапия применяется при ТПН/ТПС не только в традиционной китайской медицине, но и в других странах благодаря феномену нейропластичности [88], способности стимулировать восстановление и регенерацию поврежденных нервов, усиливать локальный кровоток в зоне воздействия, уменьшать послеоперационную боль [89]. Имеются отдельные публикации, посвященные теоретическому обоснованию этого метода при ТПН: так, исследование на животных показало, что электроакупунктура может защитить от повреждения плечевого сплетения за счет замедления дегенерации поврежденных нейронов [90]. В плацебо-контролируемом исследовании на животных, находящихся в острой фазе экспериментального болевого синдрома, вызванного двукратным лигированием седалищного нерва, показано положительное влияние лазеропунктуры на стимуляцию основных системных защитных реакций организма, включая антиоксидантную защиту, вегетативные и микроциркуляторные показатели [91].

Продemonстрировано, что иглоукалывание эффективно при неврологическом дефиците, вызванном ТПН, и потенциальные механизмы, ответственные за его воздействие, включают ремоделирование нервной системы в процессе восстановления нерва [92]. Y. Yang с соавт. [93] полагают, что акупунктура способствует регенерации нервов и прорастанию аксонов за счет активации ретроградного транспорта родственных нейротрофинов, таких как фактор роста нервов (NGF), нейротрофический фактор головного мозга (BDNF), нейротрофический фактор глиальных клеток (GDNF), N-кадгерин и микроРНК. Обращается внимание на целесообразность комбинации рефлексотерапии и других методов лечения.

Психосоциальная поддержка. Эмоциональные и социальные факторы могут в значительной степени влиять на реабилитацию после ТПН и ТПС, особенно среди мужчин молодого трудоспособного возраста [13]. Пациентам нередко сложно смириться с длительным периодом восстановления и возможностью инвалидизации, что приводит к депрессии и неадаптивному поведению, в особенности спустя несколько месяцев после травмы. В связи с этим психологическая помощь, включая психотерапию, назначение лекарственных препаратов и работу с семьей пациента,

является неотъемлемой частью медицинской реабилитации. Психологу важно помочь пациенту освоить адаптивные психологические стратегии, которые позволят достичь уровня активной позитивной осознанности и снизить уровень дистресса [94].

Перспективы реабилитационной помощи пациентам с ТПН/ТПС связывают с совершенствованием оперативных вмешательств при обширных и проксимальных ТПН, с использованием терапии наночастицами и нейротрофическими факторами, с развитием искусственного интеллекта, робототехники и виртуальной реальности, с совершенствованием динамических ортезов [25, 53, 95–98]. Наилучшие результаты достигаются при комплексном использовании индивидуально подобранных реабилитационных методик [56, 99].

Особенности физической терапии в послеоперационном периоде

Основными задачами медицинской реабилитации в послеоперационном периоде являются устранение или уменьшение послеоперационного отека и болевого синдрома; ускорение регенерации нервных структур и предотвращение грубого рубцеобразования на месте шва/анастомоза или невролиза нервных стволов; профилактика контрактур в суставах и атрофии мышц; компенсирование утраченных движений за счет мышц-синергистов, сохранивших иннервацию; психотерапевтическое воздействие на больного; способствование функциональному восстановлению. В целом рандомизированные контролируемые исследования рекомендуют использование реабилитационных методик и технологий, которые существенно не отличаются от применяемых при спонтанном выздоровлении; однако физическая терапия может иметь свои особенности, связанные с характером оперативного вмешательства [100, 101].

Существует общее мнение о необходимости раннего начала пассивных упражнений, направленных на сохранение подвижности проксимальных и дистальных суставов и локальной иммобилизации места шва/анастомоза нерва в остром послеоперационном периоде [13]. При этом, однако, необходимо защитить место хирургического вмешательства. Крайне важно избегать «растягивания» места шва/анастомоза, особенно после восстановления нерва со значительным локальным натяжением. Продолжительность послеоперационной фиксации достаточно индивидуальна, не существует общепризнанных сроков иммобилизации. При решении вопросов, связанных с иммобилизацией и расширением двигательной активности, представляется целесообразным ориентироваться на пять фаз двигательной реабилитации, которые были предложены для пациентов, перенесших операцию по перемещению нервов [51, 102]. Эти фазы основаны на стадиях

восстановления нервной проводимости и вполне могут быть положены в основу реабилитационной тактики после шва либо аутопластики нерва.

1-я фаза продолжается с 0 по 3 нед после операции. Задача медицинской реабилитации — защита сближенных концов нервов и контролирование отека. Крайне важно в процессе выполняемых пациентом движений не допускать чрезмерного натяжения сближенных участков нерва. Для обеспечения минимального натяжения в области швов используют ортезирование [50]. Для сохранения мобильности осторожно применяют упражнения на поддержание амплитуды движений в несмежных суставах. Для уменьшения отеков, связанных с длительной иммобилизацией, назначают ретроградный массаж, компрессионные чулки, позиционирование.

2-я фаза — это период между 3-й неделей после операции и ранней реиннервацией, который называют «немой» (silent) фазой из-за отсутствия активных движений [102]. Признаками ранней реиннервации служат полифазные потенциалы вновь формирующихся двигательных единиц, выявляемые на игольчатой ЭМГ, а также мышечное сокращение, пальпируемое при попытке активного движения [10]. Мышечная сила, оцененная по общепринятой шкале MRC (Medical Research Council, шкала Комитета медицинских исследований [103]), равна 0–1 баллу. Задача реабилитации — мягкая коррекция двигательных нарушений. Поддерживается пассивная амплитуда движений, проводится ортезирование для предотвращения контрактур, выполняются стимулирование функции сохранных мышц и идеомоторные упражнения (мысленное представление движений без их реального выполнения) для поддержания процессов корковой пластичности [31].

3-я фаза продолжается с момента появления пальпируемых сокращений мышечных волокон (MRC — 1 балл) до того момента, когда пациент начинает демонстрировать активные движения в положениях, исключающих воздействие гравитации (MRC — 2 балла). Тренируют активные движения при исключении силы тяжести (при помощи подвесных систем или динамических ортезов), стимулируют выполнение функционально значимых движений.

У пациентов, которым выполнялась операция перемещения нервов, эффективными считаются технологии «моторного переобучения» (DAFRA — Donor activation focused rehabilitation approach, реабилитационный подход, основанный на активизации мышцы-донора) [101]. Этот подход базируется на анатомических аспектах выполненной операции и направлен на то, чтобы помочь пациенту самостоятельно воспроизводить новые целевые движения [101]. При «донорской активации» пациент активирует исходную целевую мышцу донорского нерва, чтобы вызвать движение в мышце-реципиенте. Например, при реиннервации плечевой мышцы с помощью донорского пучка срединного нерва, ин-

нервирующего m. flexor digitorum superficialis, сгибание в локтевом суставе может быть инициировано сгибанием пальцев [104]. Моторному переобучению способствует использование технологий биологической обратной связи по сигналу ЭМГ и «зеркальной» терапии [31, 104].

4-я фаза начинается, когда пациенты уже способны выполнять активные движения с преодолением силы гравитации или легкого сопротивления (MRC — 2–3 балла). Мероприятия направлены на увеличение мышечной силы: упражнения с постепенным увеличением амплитуды активных движений (физические упражнения, электростимуляция). Расширяют также спектр функционально значимых движений. Эффективным методом реабилитации пациентов, перенесших операцию перемещения нерва, может явиться электростимуляция, запускаемая сигналом ЭМГ, которая облегчает ассоциацию между активизацией донорского нерва и мышцей-реципиентом [102, 105].

5-я фаза соответствует тому периоду, когда пациент способен выполнять движения с полной амплитудой и с преодолением силы гравитации (MRC >3 баллов). Назначают упражнения с преодолением сопротивления, электрическую стимуляцию, обучают выполнению привычных повседневных/профессиональных действий.

Заключение

Реабилитационные модальности и продолжительность медицинской реабилитации при травмах периферических нервов и травмах плечевого сплетения весьма индивидуальны и зависят от множества факторов, определяющих направленность реабилитационных воздействий. При этом значительное число методик имеют низкую доказательную базу: многие научные исследования основаны на небольших выборках, не учитывают разнородный характер травм и не оценивают отдаленные результаты. Требуется дальнейшее изучение эффективности как отдельных реабилитационных технологий, так и комплексных реабилитационных программ, способствующих восстановлению двигательной активности пациентов с травмами периферических нервов и травмами плечевого сплетения и их возвращению к привычной жизни. Перспективы реабилитационной помощи пациентам с такими травмами связывают с использованием терапии наночастицами и нейротрофическими факторами, с развитием искусственного интеллекта, робототехники и виртуальной реальности.

Вклад авторов. А.Н. Белова — общее руководство, ответственность за целостность всех частей статьи, написание текста статьи; Т.С. Калинина, С.В. Фомин — поиск литературы и систематизация материала; Т.В. Буйлова — сбор литературы и интерпретация результатов; А.Г. Полякова — концепция

исследования, ответственность за целостность всех частей, написание текста статьи.

Источники финансирования и конфликт интересов отсутствуют.

Литература/References

1. Ассоциация нейрохирургов России. *Клинические рекомендации по диагностике и хирургическому лечению повреждений и заболеваний периферической нервной системы*. М.; 2015. URL: https://ruans.org/Text/Guidelines/peripheral_nerves.pdf.
Association of Neurosurgeons of Russia. *Clinical recommendations for the diagnosis and surgical treatment of injuries and diseases of the peripheral nervous system*. Moscow; 2015. URL: https://ruans.org/Text/Guidelines/peripheral_nerves.pdf.
2. Huckhagel T., Nüchtern J., Regelsberger J., Lefering R; TraumaRegister DGU. Nerve injury in severe trauma with upper extremity involvement: evaluation of 49,382 patients from the TraumaRegister DGU® between 2002 and 2015. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med* 2018; 26(1): 76, <https://doi.org/10.1186/s13049-018-0546-6>.
3. Padovano W.M., Dengler J., Patterson M.M., Yee A., Snyder-Warwick A.K., Wood M.D., Moore A.M., Mackinnon S.E. Incidence of nerve injury after extremity trauma in the United States. *Hand (N Y)* 2022; 17(4): 615–623, <https://doi.org/10.1177/1558944720963895>.
4. Ништ А.Ю., Фомин Н.Ф., Чирский В.С. Соединение нервов по типу «конец-в-бок»: ожидание и действительность. *Вестник Российской военно-медицинской академии* 2018; 20(1): 203–208, <https://doi.org/10.17816/brmma12313>.
5. Nisht A.Y., Fomin N.F., Chirsky V.S. End-to-side neurorrhaphy: expectations and reality. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy* 2018; 20(1): 203–208, <https://doi.org/10.17816/brmma12313>.
6. Маликов М.Х., Гулов М.К., Карим-Заде Г.Д., Калмыков Е.Л., Махмадулова Н.А., Шодизода Х.Н., Неъматзода О. Хирургия травм сосудисто-нервных пучков верхних конечностей и их осложнений. *Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал)* 2020; 4(2): 41–48, <https://doi.org/10.17116/operhirurg2020402141>.
7. Malikov M.Kh., Gulov M.K., Karim-Zade G.D., Kalmykov E.L., Makhmadkulova N.A., Shodizoda Kh.N., Nematzoda O. Surgery for injuries of neurovascular bundles of upper extremities and their complications. *Operativnaya khirurgiya i klinicheskaya anatomiya (Pirogovskii nauchnyi zhurnal)* 2020; 4(2): 41–48, <https://doi.org/10.17116/operhirurg2020402141>.
8. Kaiser R., Waldauf P., Ullas G., Krajcova A. Epidemiology, etiology, and types of severe adult brachial plexus injuries requiring surgical repair: systematic review and meta-analysis. *Neurosurg Rev* 2020; 43(2): 443–452, <https://doi.org/10.1007/s10143-018-1009-2>.
9. Park H.R., Lee G.S., Kim I.S., Chang J.-C. Brachial plexus injury in adults. *Nerve* 2017; 3(1): 1–11, <https://doi.org/10.21129/nerve.2017.3.1.1>.
10. Tapp M., Wenzinger E., Tarabishy S., Ricci J., Herrera F.A. The epidemiology of upper extremity nerve

injuries and associated cost in the US emergency departments. *Ann Plast Surg* 2019; 83(6): 676–680, <https://doi.org/10.1097/SAP.0000000000002083>.

9. Wenzinger E., Rivera-Barrios A., Gonzalez G., Herrera F. Trends in upper extremity injuries presenting to US emergency departments. *Hand (N Y)* 2019; 14(3): 408–412, <https://doi.org/10.1177/1558944717735943>.

10. Bateman E.A., Larocerie-Salgado J., Ross D.C., Miller T.A., Pripotnev S. Assessment, patient selection, and rehabilitation of nerve transfers. *Front Rehabil Sci* 2023; 4: 1267433, <https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1267433>.

11. Маргасов А.В. Актуальные проблемы травмы периферических нервов. *Русский медицинский журнал* 2018; 26(12–1): 21–24.

Margasov A.V. Actual problems of peripheral nerve injury. *Russkij medicinskij zurnal* 2018; 26(12–1): 21–24.

12. de Santana Chagas A.C., Wanderley D., de Oliveira Ferro J.K., Alves de Moraes A., Morais de Souza F.H., da Silva Tenório A., Araújo de Oliveira D. Physical therapeutic treatment for traumatic brachial plexus injury in adults: a scoping review. *PM R* 2022; 14(1): 120–150, <https://doi.org/10.1002/pmrj.12566>.

13. Li H., Chen J., Wang J., Zhang T., Chen Z. Review of rehabilitation protocols for brachial plexus injury. *Front Neurol* 2023; 14: 1084223, <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1084223>.

14. Coraci D., Romano M., Ragazzo L., Restivo D.A., Cipriani M., Gottardello F., Pizzolato M., Maccarone M.C., Masiero S. Rehabilitation of peripheral neuropathies: from lexical analysis of the literature to identification of clinical protocols. *J Clin Med* 2023; 12(18): 5879, <https://doi.org/10.3390/jcm12185879>.

15. Zink P.J., Philip B.A. Cortical plasticity in rehabilitation for upper extremity peripheral nerve injury: a scoping review. *Am J Occup Ther* 2020; 74(1): 7401205030p1-7401205030p15, <https://doi.org/10.5014/ajot.2020.036665>.

16. Mahar M., Cavalli V. Intrinsic mechanisms of neuronal axon regeneration. *Nat Rev Neurosci* 2018; 19(6): 323–337, <https://doi.org/10.1038/s41583-018-0001-8>.

17. Gordon T. Peripheral nerve regeneration and muscle reinnervation. *Int J Mol Sci* 2020; 21(22): 8652, <https://doi.org/10.3390/ijms21228652>.

18. Robinson L.R. Traumatic injury to peripheral nerves. *Muscle Nerve* 2022; 66(6): 661–670, <https://doi.org/10.1002/mus.27706>.

19. Mohanty C.B., Bhat D., Devi B.I. Role of central plasticity in the outcome of peripheral nerve regeneration. *Neurosurgery* 2015; 77(3): 418–423, <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000851>.

20. Fenrich K., Gordon T. Canadian Association of Neuroscience review: axonal regeneration in the peripheral and central nervous systems — current issues and advances. *Can J Neurol Sci* 2004; 31(2): 142–156, <https://doi.org/10.1017/s0317167100053798>.

21. Ruijs A.C., Jaquet J.B., Kalmijn S., Giele H., Hovius S.E. Median and ulnar nerve injuries: a meta-analysis of predictors of motor and sensory recovery after modern microsurgical nerve repair. *Plast Reconstr Surg* 2005; 116(2): 484–496, <https://doi.org/10.1097/01.prs.00000172896.86594.07>.

22. Seddon H.J. Three types of nerve injury. *Brain* 1943; 66(4): 237–288, <https://doi.org/10.1093/brain/66.4.237>.

23. Sunderland S. A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function. *Brain* 1951; 74(4): 491–516, <https://doi.org/10.1093/brain/74.4.491>.

24. Simon N.G., Spinner R.J., Kline D.G., Kliot M. Advances in the neurological and neurosurgical management of peripheral nerve trauma. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2016; 87(2): 198–208, <https://doi.org/10.1136/jnnp-2014-310175>.

25. Carlstedt T. New treatments for spinal nerve root avulsion injury. *Front Neurol* 2016; 7: 135, <https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00135>.

26. Huang X., Jiang J., Xu J. Denervation-related neuromuscular junction changes: from degeneration to regeneration. *Front Mol Neurosci* 2022; 14: 810919, <https://doi.org/10.3389/fnmol.2021.810919>.

27. Juckett L., Saffari T.M., Ormseth B., Senger J.L., Moore A.M. The effect of electrical stimulation on nerve regeneration following peripheral nerve injury. *Biomolecules* 2022; 12(12): 1856, <https://doi.org/10.3390/biom12121856>.

28. Domeshek L.F., Novak C.B., Patterson J.M.M., Hasak J.M., Yee A., Kahn L.C., Mackinnon S.E. Nerve transfers — a paradigm shift in the reconstructive ladder. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2019; 7(6): e2290, <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000002290>.

29. Javeed S., Faraji A.H., Dy C., Ray W.Z., MacEwan M.R. Application of electrical stimulation for peripheral nerve regeneration: stimulation parameters and future horizons. *Interdisciplinary Neurosurgery* 2021, <https://doi.org/10.1016/j.inat.2021.101117>.

30. Barnes S.L., Miller T.A., Simon N.G. Traumatic peripheral nerve injuries: diagnosis and management. *Curr Opin Neurol* 2022; 35(6): 718–727, <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000001116>.

31. Chen Y.H., Siow T.Y., Wang J.Y., Lin S.Y., Chao Y.H. Greater cortical activation and motor recovery following mirror therapy immediately after peripheral nerve repair of the forearm. *Neuroscience* 2022; 481: 123–133, <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.11.048>.

32. Quick T.J., Brown H. Evaluation of functional outcomes after brachial plexus injury. *J Hand Surg Eur Vol* 2020; 45(1): 28–33, <https://doi.org/10.1177/1753193419879645>.

33. Давыдов О.С., Яхно Н.Н., Кукушкин М.Л., Чурюканов М.В., Абузарова Г.Р., Амелин А.В., Балязин В.А., Баранцевич Е.Р., Баринов А.Н., Барулин А.Е., Бельская Г.Н., Быков Ю.Н., Данилов А.Б., Доронина О.Б., Древалъ О.Н., Евсеев М.А., Загоруйко О.И., Исагулян Э.Д., Калинин П.П., Каракулова Ю.В., Каратеев А.Е., Копенкин С.С., Курушина О.В., Медведева Л.А., Парфенов В.А., Сергиенко Д.А., Строков И.А., Хабилов Ф.А., Широков В.А. Невропатическая боль: клинические рекомендации по диагностике и лечению Российского общества по изучению боли. *Российский журнал боли* 2018; 4(58): 5–41.

Davydov O.S., Yakhno N.N., Kukushkin M.L., Churukanov M.V., Abuzarova G.R., Amelin A.V., Balyazin V.A., Barantsevich E.R., Barinov A.N., Barulin A.E., Bel'skaya G.N., Bykov Yu.N., Danilov A.B., Doronina O.B., Dreval' O.N., Evseev M.A., Zagorul'ko O.I., Isagulyan E.D., Kalinskiy P.P., Karakulova Yu.V., Karateev A.E., Kopenkin S.S., Kurushina O.V., Medvedeva L.A., Parfenov V.A., Sergienko D.A., Stokov I.A., Khabirov F.A., Shirokov V.A.

Neuropathic pain: clinical guidelines on the diagnostics and treatment from the Russian Association for the Studying of Pain. *Russian Journal of Pain* 2018; 4(58): 5–41.

34. Davis G., Curtin C.M. Management of pain in complex nerve injuries. *Hand Clin* 2016; 32(2): 257–262, <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2015.12.011>.

35. Lovaglio A.C., Socolovsky M., Di Masi G., Bonilla G. Treatment of neuropathic pain after peripheral nerve and brachial plexus traumatic injury. *Neurol India* 2019; 67(Suppl): S32–S37, <https://doi.org/10.4103/0028-3886.250699>.

36. Koca I., Boyaci A., Tutoglu A., Ucar M., Kocaturk O. Assessment of the effectiveness of interferential current therapy and TENS in the management of carpal tunnel syndrome: a randomized controlled study. *Rheumatol Int* 2014; 34(12): 1639–1645, <https://doi.org/10.1007/s00296-014-3005-3>.

37. Naeser M.A., Hahn K.A., Lieberman B.E., Branco K.F. Carpal tunnel syndrome pain treated with low-level laser and microampere transcutaneous electric nerve stimulation: a controlled study. *Arch Phys Med Rehabil* 2002; 83(7): 978–988, <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.33096>.

38. Smania N., Berto G., La Marchina E., Melotti C., Midiri A., Roncari L., Zenorini A., Ianes P., Picelli A., Waldner A., Faccioli S., Gandolfi M. Rehabilitation of brachial plexus injuries in adults and children. *Eur J Phys Rehabil Med* 2012; 48(3): 483–506.

39. Bonifácio de Assis E.D., Martins W.K.N., de Carvalho C.D., Ferreira C.M., Gomes R., de Almeida Rodrigues E.T., Meira U.M., de Holanda L.J., Lindquist A.R., Morya E., Mendes C.K.T.T., de Assis T.C.G., de Oliveira E.A., Andrade S.M. Effects of rTMS and tDCS on neuropathic pain after brachial plexus injury: a randomized placebo-controlled pilot study. *Sci Rep* 2022; 12(1): 1440, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05254-3>.

40. Abdallat M., Saryyeva A., Blahak C., Wolf M.E., Weigel R., Loher T.J., Runge J., Heissler H.E., Kinfe T.M., Krauss J.K. Centromedian–parafascicular and somatosensory thalamic deep brain stimulation for treatment of chronic neuropathic pain: a contemporary series of 40 patients. *Biomedicine* 2021; 9(7): 731, <https://doi.org/10.3390/biomedicine9070731>.

41. Москвин С.В., Агасаров Л.Г. Лазерная акупунктура: основные принципы, методические подходы и параметры методик. *Вестник новых медицинских технологий* 2019; 1: 161–178.

Moskvin S.V., Agasarov L.G. Laser acupuncture: basic principles, methodological approaches and parameters of techniques. *Vestnik novykh medicinskih tehnologij* 2019; 1: 161–178.

42. Rochkind S., Drory V., Alon M., Nissan M., Ouaknine G.E. Laser phototherapy (780 nm), a new modality in treatment of long-term incomplete peripheral nerve injury: a randomized double-blind placebo-controlled study. *Photomed Laser Surg* 2007; 25(5): 436–442, <https://doi.org/10.1089/pho.2007.2093>.

43. Khamseh M.E., Kazemikho N., Aghili R., Forough B., Lajevardi M., Hashem Dabaghian F., Goushegir A., Malek M. Diabetic distal symmetric polyneuropathy: effect of low-intensity laser therapy. *Lasers Med Sci* 2011; 26(6): 831–835, <https://doi.org/10.1007/s10103-011-0977-z>.

44. Кочетова О.А. Результаты применения низкоинтенсивного лазерного излучения при лечении профессиональных полиневропатий верхних конечностей. *Медицина труда и промышленная экология* 2021; 61(4): 238–242, <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-4-238-242>.

Kochetova O.A. Results of the use of low-intensity laser radiation in the treatment of occupational polyneuropathies of the upper extremities. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology* 2021; 61(4): 238–242, <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-4-238-242>.

45. Никитин А.В., Есауленко И.Э., Васильева Л.В., Малуков Д.А., Горбрых М.Ф., Никитин В.А. Эффективность низкоинтенсивного лазерного излучения в клинической практике с позиции доказательной медицины. *Вестник новых медицинских технологий* 2012; 19(2): 371–373.

Nikitin A.V., Esaulenko I.E., Vasilyeva L.V., Malyukov D.A., Gorbrykh M.F., Nikitin V.A. Low intensive laser radiation effectiveness in internal diseases treatment from a position of evidence-based medicine. *Vestnik novykh medicinskih tehnologij* 2012; 19(2): 371–373.

46. Гильмутдинова Л.Т., Шарипова Э.Ш. Применение комплексного лечения при травмах конечностей, осложненных повреждением нервов. *Лазерная медицина* 2007; 11(2): 7–13.

Gilmutdinova L.T., Sharipova E.Sh. Complex treatment of extremities' traumas complicated by nerve damage. *Laser Medicine* 2007; 11(2): 7–13.

47. Razak I., Chung T.Y., Ahmad T.S. A comparative study of two modalities in pain management of patients presenting with chronic brachial neuralgia. *J Altern Complement Med* 2019; 25(8): 861–867, <https://doi.org/10.1089/acm.2019.0052>.

48. Bolandghamat S., Behnam-Rassouli M. Recent findings on the effects of pharmacological agents on the nerve regeneration after peripheral nerve injury. *Curr Neuroparmacol* 2020; 18(11): 1154–1163, <https://doi.org/10.2174/1570159X18666200507084024>.

49. Wood M.D., Gordon T., Kemp S.W., Liu E.H., Kim H., Shoichet M.S., Borschel G.H. Functional motor recovery is improved due to local placement of GDNF microspheres after delayed nerve repair. *Biotechnol Bioeng* 2013; 110(5): 1272–1281, <https://doi.org/10.1002/bit.24800>.

50. Novak C.B., von der Heyde R.L. Rehabilitation of the upper extremity following nerve and tendon reconstruction: when and how. *Semin Plast Surg* 2015; 29(1): 73–80, <https://doi.org/10.1055/s-0035-1544172>.

51. Hill J., Turner L., Jones R., Jimulia D., Miller C., Power D. The stages of rehabilitation following motor nerve transfer surgery. *J Musculoskelet Surg Res* 2019; 3(1): 60–68, https://doi.org/10.4103/jmsr.jmsr_79_18.

52. Verma C., Kini R., Yardi S., Puri V., Thosar J. Post nerve transfer neuroplastic motor retraining program in adults with traumatic brachial plexus injury: a physiotherapist's perspective. *J Soc Indian Physiother* 2019; 3(2): 53–57, <https://doi.org/10.18231/j.jsip.2019.008>.

53. Chinchalkar S.J., Larocerie-Salgado J., Cepek J., Grenier M.L. The use of dynamic assist orthosis for muscle reeducation following brachial plexus injury and reconstruction. *J Hand Microsurg* 2018; 10(3): 172–177, <https://doi.org/10.1055/s-0038-1642068>.

54. Javeed S., Faraji A.H., Dy C., Ray W.Z., MacEwan M.R. Application of electrical stimulation for peripheral nerve regeneration: stimulation parameters and future horizons. *Interdisciplinary Neurosurgery* 2021; 24: 101117, <https://doi.org/10.1016/j.inat.2021.101117>.
55. Boeltz T., Ireland M., Mathis K., Nicolini J., Poplavski K., Rose S.J., Wilson E., English A.W. Effects of treadmill training on functional recovery following peripheral nerve injury in rats. *J Neurophysiol* 2013; 109(11): 2645–2657, <https://doi.org/10.1152/jn.00946.2012>.
56. Rich J.A., Newell A., Williams T. Traumatic brachial plexus injury rehabilitation using neuromuscular electrical muscle stimulation in a polytrauma patient. *BMJ Case Rep* 2019; 12(12): e232107, <https://doi.org/10.1136/bcr-2019-232107>.
57. de Oliveira L.A.S., Pedron C.A., de Andrade F.G., Horschcaruk C.H.R., Martins J.V.P. Motor recovery after bilateral brachial plexus injury using motor irradiation: a case report. *Int J Ther Rehabil* 2019; 26(4): 1–12, <https://doi.org/10.12968/ijtr.2017.0170>.
58. Pion A.M., Roy A.A., Ma X., Beaumont E., Lin J.C. Transcutaneous and direct electrical stimulation of mouse sciatic nerve accelerates functional recovery after nerve transection and immediate repair. *Ann Plast Surg* 2023; 90(3): 237–241, <https://doi.org/10.1097/SAP.0000000000003463>.
59. Costello M.C., Errante E.L., Smartz T., Ray W.Z., Levi A.D., Burks S.S. Clinical applications of electrical stimulation for peripheral nerve injury: a systematic review. *Front Neurosci* 2023; 17: 1162851, <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1162851>.
60. Gordon T. Brief electrical stimulation promotes recovery after surgical repair of injured peripheral nerves. *Int J Mol Sci* 2024; 25(1): 665, <https://doi.org/10.3390/ijms25010665>.
61. Zuo K.J., Gordon T., Chan K.M., Borschel G.H. Electrical stimulation to enhance peripheral nerve regeneration: update in molecular investigations and clinical translation. *Exp Neurol* 2020; 332: 113397, <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2020.113397>.
62. Zuo K.J., Shafa G., Antonyshyn K., Chan K., Gordon T., Borschel G.H. A single session of brief electrical stimulation enhances axon regeneration through nerve autografts. *Exp Neurol* 2020; 323: 113074, <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2019.113074>.
63. Birenbaum N.K., Yan Y., Odabas A., Chandra N.S., Ray W.Z., MacEwan M.R. Multiple sessions of therapeutic electrical stimulation using implantable thin-film wireless nerve stimulators improve functional recovery after sciatic nerve isograft repair. *Muscle Nerve* 2023; 67(3): 244–251, <https://doi.org/10.1002/mus.27776>.
64. Roh J., Schellhardt L., Keane G.C., Hunter D.A., Moore A.M., Snyder-Warwick A.K., Mackinnon S.E., Wood M.D. Short-duration, pulsatile, electrical stimulation therapy accelerates axon regeneration and recovery following tibial nerve injury and repair in rats. *Plast Reconstr Surg* 2022; 149(4): 681e–690e, <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000008924>.
65. Senger J.B., Chan A.W.M., Chan K.M., Kwan-Wong T., Acton L., Olson J., Webber C.A. Conditioning electrical stimulation is superior to postoperative electrical stimulation in enhanced regeneration and functional recovery following nerve graft repair. *Neurorehabil Neural Repair* 2020; 34(4): 299–308, <https://doi.org/10.1177/1545968320905801>.
66. Senger J.B., Rabey K.N., Morhart M.J., Chan K.M., Webber C.A. Conditioning electrical stimulation accelerates regeneration in nerve transfers. *Ann Neurol* 2020; 88(2): 363–374, <https://doi.org/10.1002/ana.25796>.
67. Gordon T., Amirjani N., Edwards D.C., Chan K.M. Brief post-surgical electrical stimulation accelerates axon regeneration and muscle reinnervation without affecting the functional measures in carpal tunnel syndrome patients. *Exp Neurol* 2010; 223(1): 192–202, <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2009.09.020>.
68. Wong J.N., Olson J.L., Morhart M.J., Chan K.M. Electrical stimulation enhances sensory recovery: a randomized controlled trial. *Ann Neurol* 2015; 77(6): 996–1006, <https://doi.org/10.1002/ana.24397>.
69. Barber B., Seikaly H., Ming Chan K., Beaudry R., Rychlik S., Olson J., Curran M., Dziegielewski P., Biron V., Harris J., McNeely M., O'Connell D. Intraoperative brief electrical stimulation of the spinal accessory nerve (BEST SPIN) for prevention of shoulder dysfunction after oncologic neck dissection: a double-blinded, randomized controlled trial. *J Otolaryngol Head Neck Surg* 2018; 47(1): 7, <https://doi.org/10.1186/s40463-017-0244-9>.
70. Jain A., Dunlop R., Hems T., Tang J.B. Outcomes of surgical repair of a single digital nerve in adults. *J Hand Surg Eur Vol* 2019; 44(6): 560–565, <https://doi.org/10.1177/1753193419846761>.
71. Power H.A., Morhart M.J., Olson J.L., Chan K.M. postsurgical electrical stimulation enhances recovery following surgery for severe cubital tunnel syndrome: a double-blind randomized controlled trial. *Neurosurgery* 2020; 86(6): 769–777, <https://doi.org/10.1093/neuros/nyz322>.
72. Мещерягина И.А., Скрипников А.А. Применение комбинированной электростимуляции при изолированных и сочетанных повреждениях периферических нервов верхних и нижних конечностей. *Российский медицинский журнал* 2015; 21(3): 14–19.
- Мещерягина И.А., Скрипников А.А. The application of combined electrostimulation under isolated and comorbide injuries of peripheral nerves of upper and lower extremities. *Rossiiskij medicinskij zhurnal* 2015; 21(3): 14–19.
73. Gordon T., English A.W. Strategies to promote peripheral nerve regeneration: electrical stimulation and/or exercise. *Eur J Neurosci* 2016; 43(3): 336–350, <https://doi.org/10.1111/ejn.13005>.
74. Udina E., Cobiauchi S., Allodi I., Navarro X. Effects of activity-dependent strategies on regeneration and plasticity after peripheral nerve injuries. *Ann Anat* 2011; 193(4): 347–353, <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2011.02.012>.
75. Cobiauchi S., Casals-Diaz L., Jaramillo J., Navarro X. Differential effects of activity dependent treatments on axonal regeneration and neuropathic pain after peripheral nerve injury. *Exp Neurol* 2013; 240: 157–167, <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.11.023>.
76. Glinesky J., Harvey L., Van Es P. Efficacy of electrical stimulation to increase muscle strength in people with neurological conditions: a systematic review. *Physiother Res Int* 2007; 12(3): 175–194, <https://doi.org/10.1002/pri.375>.
77. Eberstein A., Eberstein S. Electrical stimulation of

denervated muscle: is it worthwhile? *Med Sci Sports Exerc* 1996; 28(12): 1463–1469, <https://doi.org/10.1097/00005768-199612000-00004>.

78. Bellew J.W., Allen M., Biefnes A., Grantham S., Miglin J., Swartzell D. Efficiency of neuromuscular electrical stimulation: a comparison of elicited force and subject tolerance using three electrical waveforms. *Physiother Theory Pract* 2018; 34(7): 551–558, <https://doi.org/10.1080/09593985.2017.1422820>.

79. Gigo-Benato D., Russo T.L., Geuna S., Domingues N.R., Salvini T.F., Parizotto N.A. Electrical stimulation impairs early functional recovery and accentuates skeletal muscle atrophy after sciatic nerve crush injury in rats. *Muscle Nerve* 2010; 41(5): 685–693, <https://doi.org/10.1002/mus.21549>.

80. Baptista A.F., Gomes J.R., Oliveira J.T., Santos S.M., Vannier-Santos M.A., Martinez A.M. High- and low-frequency transcutaneous electrical nerve stimulation delay sciatic nerve regeneration after crush lesion in the mouse. *J Peripher Nerv Syst* 2008; 13(1): 71–80, <https://doi.org/10.1111/j.1529-8027.2008.00160.x>.

81. Cavalli E., Mammana S., Nicoletti F., Bramanti P., Mazzon E. The neuropathic pain: an overview of the current treatment and future therapeutic approaches. *Int J Immunopathol Pharmacol* 2019; 33: 2058738419838383, <https://doi.org/10.1177/2058738419838383>.

82. Oud T., Beelen A., Eijffinger E., Nollet F. Sensory re-education after nerve injury of the upper limb: a systematic review. *Clin Rehabil* 2007; 21(6): 483–494, <https://doi.org/10.1177/0269215507074395>.

83. Xia W., Bai Z., Dai R., Zhang J., Lu J., Niu W. The effects of sensory re-education on hand function recovery after peripheral nerve repair: a systematic review. *NeuroRehabilitation* 2021; 48(3): 293–304, <https://doi.org/10.3233/NRE-201612>.

84. Jerosch-Herold C. Sensory relearning in peripheral nerve disorders of the hand: a web-based survey and delphi consensus method. *J Hand Ther* 2011; 24(4): 292–299, <https://doi.org/10.1016/j.jht.2011.05.002>.

85. Ferreira C.M., de Carvalho C.D., Gomes R., Bonifácio de Assis E.D., Andrade S.M. Transcranial direct current stimulation and mirror therapy for neuropathic pain after brachial plexus avulsion: a randomized, double-blind, controlled pilot study. *Front Neurol* 2020; 11: 568261, <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.568261>.

86. Collis J.M., Signal N., Mayland E., Wright-St Clair V.A. Influence of purposeful activities on upper extremity motor performance: a systematic review. *OTJR (Thorofare N J)* 2020; 40(4): 223–234, <https://doi.org/10.1177/1539449220912187>.

87. Cole T., Nicks R., Ferris S., Paul E., O'Brien L., Pritchard E. Outcomes after occupational therapy intervention for traumatic brachial plexus injury: a prospective longitudinal cohort study. *J Hand Ther* 2020; 33(4): 528–539, <https://doi.org/10.1016/j.jht.2019.08.002>.

88. Загорюлько О.И., Медведева Л.А., Цединова Ю.Б., Котенко К.В. Рефлексотерапия в реабилитации пациентов с послеоперационной болью (обзор литературы). *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры* 2023; 100(6): 103–106, <https://doi.org/10.17116/kurort2023100061103>.

Zagorulko O.I., Medvedeva L.A., Tsedinova Yu.B., Kotenko K.V. Reflexology in patient rehabilitation with postoperative pain (literature review). *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury* 2023; 100(6): 103–106, <https://doi.org/10.17116/kurort2023100061103>.

89. Каримова Г.М., Миндубаева Л.Ж., Абашев А.Р., Билалова А.Ш., Зиннатуллина А.А. Феномен нейропластичности в механизмах рефлексотерапии. *Архивъ внутренней медицины* 2019; 9(3): 172–181, <https://doi.org/10.20514/2226-6704-2019-9-3-172-181>.

Karimova G.M., Mindubaeva L.J., Abashev A.R., Bilalova A.Sh., Zinnatullina A.A. The phenomenon of neuroplasticity in the mechanisms of reflexology. *The Russian Archives of Internal Medicine* 2019; 9(3): 172–181, <https://doi.org/10.20514/2226-6704-2019-9-3-172-181>.

90. Luo H., Cheng X., Tang Y., Ling Z., Zhou L. Electroacupuncture treatment contributes to the downregulation of neuronal nitric oxide synthase and motoneuron death in injured spinal cords following root avulsion of the brachial plexus. *Biomed Rep* 2014; 2(2): 207–212, <https://doi.org/10.3892/br.2013.212>.

91. Polyakova A.G., Soloveva A.G., Peretyagin P.V., Belova A.N., Belyaeva K.L. Photobiomodulation for correction of systemic disorders of experimental pain syndromes. *Optics* 2023; 4: 500–509, <https://doi.org/10.3390/opt4030036>.

92. Андреева Г.О. *Иглоотерапия в лечении компрессионно-ишемических невропатий монография*. LAP Lambert Academic Publishing; 2011.

Andreeva G.O. *Igloterapiya v lechenii kompressionno-ischemicheskikh nevropatiy monografiya* [Acupuncture in the treatment of compression-ischemic neuropathies: monograph]. LAP Lambert Academic Publishing; 2011.

93. Yang Y., Rao C., Yin T., Wang S., Shi H., Yan X., Zhang L., Meng X., Gu W., Du Y., Hong F. Application and underlying mechanism of acupuncture for the nerve repair after peripheral nerve injury: remodeling of nerve system. *Front Cell Neurosci* 2023; 17: 1253438, <https://doi.org/10.3389/fncel.2023.1253438>.

94. Sachar R., Landau A.J., Ray W.Z., Brogan D.M., Dy C.J. Social support and coping strategies in patients with traumatic brachial plexus injury. *HSS J* 2020; 16(Suppl 2): 468–474, <https://doi.org/10.1007/s11420-020-09814-z>.

95. Zhang M., Li C., Liu S.Y., Zhang F.S., Zhang P.X. An electroencephalography-based human-machine interface combined with contralateral C7 transfer in the treatment of brachial plexus injury. *Neural Regen Res* 2022; 17(12): 2600–2605, <https://doi.org/10.4103/1673-5374.335838>.

96. Snow P.W., Dimante D., Sinisi M., Loureiro R.C.V. Virtual reality combined with robotic facilitated movements for pain management and sensory stimulation of the upper limb following a brachial plexus injury: a case study. *IEEE Int Conf Rehabil Robot* 2022; 2022: 1–6, <https://doi.org/10.1109/ICORR55369.2022.9896552>.

97. Shi S., Ou X., Cheng D. Nanoparticle-facilitated therapy: advancing tools in peripheral nerve regeneration. *Int J Nanomedicine* 2024; 19: 19–34, <https://doi.org/10.2147/IJN.S442775>.

98. Duret C., Goubier J.N., Renaudin A., Legrand C., Drouard P., Grosmaire A.G., Koepfel T. Intensive upper limb therapy including a robotic device after surgically repaired

brachial plexus injury: a case study. *Eur J Phys Rehabil Med* 2019; 55(4): 534–536, <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.19.05415-7>.

99. Milicin C., Sîrbu E. A comparative study of rehabilitation therapy in traumatic upper limb peripheral nerve injuries. *NeuroRehabilitation* 2018; 42(1): 113–119, <https://doi.org/10.3233/NRE-172220>.

100. Zhou J.M., Gu Y.D., Xu X.J., Zhang S.Y., Zhao X. Clinical research of comprehensive rehabilitation in treating brachial plexus injury patients. *Chin Med J (Engl)* 2012; 125(14): 2516–2520.

101. Kahn L.C., Moore A.M. Donor activation focused rehabilitation approach: maximizing outcomes after nerve transfers. *Hand Clin* 2016; 32(2): 263–277, <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2015.12.014>.

102. Sturma A., Hruby L.A., Farina D., Aszmann O.C. Structured motor rehabilitation after selective nerve transfers. *J Vis Exp* 2019; 150, <https://doi.org/10.3791/59840>.

103. van der Ploeg R.J., Oosterhuis H.J., Reuvekamp J. Measuring muscle strength. *J Neurol* 1984; 231(4): 200–203, <https://doi.org/10.1007/BF00313939>.

104. Larocerie-Salgado J., Chinchalkar S., Ross D.C., Gillis J., Doherty C.D., Miller T.A. Rehabilitation following nerve transfer surgery. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2022; 26(2): 71–77, <https://doi.org/10.1097/BTH.0000000000000359>.

105. Sardaru D.P., Matei D., Zaharia-Kezdi D., Pendefunda L. Effects of biofeedback versus switch-triggered functional electrical stimulation on sciatica-related foot drop. *J Back Musculoskelet Rehabil* 2018; 31(2): 239–245, <https://doi.org/10.3233/BMR-169578>.