

НЕЙРОПАТИЧЕСКАЯ БОЛЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ НЕРВОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ И ЛЕЧЕНИЮ

¹Кононова А. С., ORCID ID 0000-0001-7016-5319

¹Иваненко А. В., ORCID ID 0000-0002-9712-4661

^{1,2}Соколова М. Г., ORCID ID 0000-0002-3829-9971

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: anglkvs@mail.ru

Нейропатическая боль, возникающая после повреждения периферических нервов, остается одной из наиболее сложных для лечения форм хронической боли и требует комплексного диагностического и терапевтического подхода. Цель исследования - проанализировать существующие подходы к диагностике, консервативному и хирургическому лечению нейропатической боли при повреждении периферических нервов и сравнить их клиническую эффективность. Поиск научных работ проводили среди обзорных и оригинальных статей, монографий, рекомендаций профильных сообществ и экспериментальных работ, посвященных механизмам боли и методам восстановления невралной проводимости, за период с 2010 по 2025 год. Установлено, что диагностика нейропатической боли основывается на сочетании клинической оценки, стандартизированных опросников, электрофизиологических методов и методов визуализации. Показано, что выбор консервативной терапии основан на фенотипе боли, а выбор хирургической тактики зависит от типа и степени повреждения нерва. Сравнительный анализ хирургических технологий показал преимущества реконструктивных методов, направленных на создание функциональной мишени для регенерации нервных волокон, включая таргетированную мышечную реиннервацию и регенеративный интерфейс периферических нервов при нейропатической боли в ампутированных конечностях. Дополнительный интерес представляют методы физического воздействия, такие как низкоинтенсивная лазерная терапия, усиливающая контроль периферической ноцицепции. Таким образом, комплексный персонализированный подход, основанный на ранней диагностике, оптимизации хирургических вмешательств и внедрении инновационных технологий, является ключом к повышению эффективности лечения нейропатической боли и улучшению качества жизни пациентов.

Ключевые слова: нейропатическая боль, повреждение периферических нервов, неврома, фенотипирование боли, таргетированная мышечная реиннервация, регенеративный интерфейс периферических нервов, низкоинтенсивная лазерная терапия.

NEUROPATHIC PAIN IN PERIPHERAL NERVE INJURY: CURRENT APPROACHES TO DIAGNOSIS AND TREATMENT

¹Kononova A. S. ORCID ID 0000-0001-7016-5319

¹Ivanenko A. V. ORCID ID 0000-0002-9712-4661

^{1,2}Sokolova M. G. ORCID ID 0000-0002-3829-9971

¹Federal State Budgetary Institution "Almazov National Medical Research Centre" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "A. I. Herzen Russian State Pedagogical University", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: anglkvs@mail.ru

Neuropathic pain arising after peripheral nerve injury remains one of the most challenging forms of chronic pain to manage and requires a comprehensive diagnostic and therapeutic approach. The aim of this review was to analyze existing approaches to the diagnosis, conservative management, and surgical treatment of neuropathic pain associated with peripheral nerve injury and to compare their clinical effectiveness. The literature research included review and original articles, monographs, guidelines of professional societies, and experimental studies addressing pain mechanisms and methods for restoring neural conductivity published between 2010 and 2025. It was found that the diagnosis of neuropathic pain relies on a combination of clinical assessment,

standardized questionnaires, electrophysiological testing, and imaging techniques. The choice of conservative therapy is determined by the pain phenotype, whereas the selection of surgical tactics depends on the type and severity of nerve damage. Comparative analysis of surgical technologies demonstrated the advantages of reconstructive procedures aimed at creating a functional target for regenerating axons, including targeted muscle reinnervation and regenerative peripheral nerve interfaces for neuropathic pain in amputated limbs. Additional interest is directed toward physical modalities such as low-level laser therapy, which may enhance the modulation of peripheral nociception. Thus, a comprehensive and personalized approach-based on early diagnosis, optimization of surgical interventions, and the incorporation of innovative technologies-is essential for improving the effectiveness of neuropathic pain treatment and enhancing patients' quality of life.

Keywords: neuropathic pain, peripheral nerve injury, neuroma, pain phenotyping, targeted muscle reinnervation, regenerative peripheral nerve interface, low-level laser therapy.

Введение

Международная ассоциация по изучению боли определяет боль как невыносимое чувствительное или эмоциональное ощущение, связанное с реальным или потенциальным повреждением тканей [1]. Нейропатическая боль – это хроническое болевое расстройство, возникающее после повреждения как центральной нервной системы, так и периферической, которым могут страдать от 6–7 до 25% населения [2]. Нейропатическая боль, возникающая вследствие повреждения периферических нервов, относится к числу наиболее клинически значимых вариантов хронической боли и представляет собой сложный многоуровневый патологический процесс, включающий изменения на периферическом, спинальном и супраспинальном уровнях соматосенсорной системы. По данным Всемирной организации здравоохранения, нейропатический болевой синдром значительно ухудшает качество жизни пациентов, приводит к инвалидизации и требует комплексного подхода к диагностике и лечению [3].

Классическая этиология периферической нейропатической боли связана с повреждением периферического нерва в результате прямой травмы, хирургического вмешательства, компрессии, опухолевого процесса или ампутации конечности, вследствие чего запускается каскад нейробиологических процессов, приводящих к формированию типичного симптомокомплекса нейропатической боли.

Клиническая картина периферической нейропатической боли отличается вариабельностью. Ее проявления и выраженность во многом определяются остротой развития и этиологией основного заболевания, а также калибром пораженных нервных стволов, хотя строгой корреляции между этими факторами не наблюдается. Наиболее типичными симптомами выступают парестезии в виде ощущений покалывания и онемения. Помимо этого, у пациентов нередко фиксируются пароксизмы острых, простреливающих, пульсирующих или жгучих болей каузалгического характера [3; 4]. Для части больных характерно наличие позитивных феноменов, таких как аллодиния и гиперестезия [5]. Среди негативных симптомов может выявляться снижение болевой и температурной чувствительности (гипестезия) [6].

Сухожильные рефлексы в зоне иннервации пораженных структур чаще всего ослаблены. Мышечная слабость и атрофические процессы, как правило, ограничиваются группой мышц, получающих иннервацию от вовлеченных спинномозговых корешков или периферических нервов, и развиваются позже [7].

Данная статья посвящена описанию современных возможностей диагностики и лечения периферических нейропатических болевых синдромов.

Цель литературного обзора - анализ существующих подходов к консервативному и хирургическому лечению нейропатического болевого синдрома при повреждении периферических нервов, в зависимости от характера повреждения, и сравнение их эффективности.

Материалы и методы исследования

Для проведения систематического обзора современных методов диагностики и хирургического лечения нейропатического болевого синдрома при повреждении периферических нервов был выполнен поиск релевантных научных публикаций за период с января 2010 года по октябрь 2025 года. Поиск осуществлялся в электронных базах данных PubMed, Google Scholar и eLibrary, а также в специализированных журналах по нейрохирургии, неврологии, анестезиологии и реконструктивной хирургии. Дополнительно проводился ручной поиск по спискам литературы ключевых публикаций и актуальных клинических рекомендаций профильных профессиональных сообществ.

Для поиска использовались комбинации ключевых слов и терминов: «neuropathic pain», «peripheral nerve injury», «nerve trauma», «post-traumatic neuropathy», «peripheral neuropathic pain», «neuroma», «painful neuroma», «postamputation pain», «nerve repair», «direct nerve repair», «epineural repair», «nerve reconstruction», «nerve graft», «nerve transfer», «nerve transposition», «neurolysis», «external neurolysis», «internal neurolysis», «neuroma excision», «neuroma management», «neuroma prevention», «nerve capping», «burying in muscle», «muscle implantation of nerve stump», «targeted muscle reinnervation», «TMR», «regenerative peripheral nerve interface», «RPNI», «nerve conduit», «peripheral nerve stimulation», «low-level laser therapy», «нейропатическая боль», «повреждение периферических нервов», «фантомная боль», «боль после ампутации», «неврома», «хирургическое лечение», «невролиз», «невротомия», «пластика нерва», «нейромодуляция», «нейрохирургическое лечение», «операции при нейропатии».

Первичному отбору по заголовкам и аннотациям было подвергнуто 260 публикаций. Критериями включения являлись: оригинальные клинические исследования, посвященные лечению нейропатической боли вследствие повреждения периферических нервов;

метаанализы, систематические обзоры, клинические рекомендации профильных обществ; экспериментальные работы на животных, если они содержали фундаментальные данные о механизмах нейропатической боли, релевантных клиническому применению; исследования, рассматривающие хирургические методы лечения, методы нейромодуляции, публикации на английском или русском языках. Из дальнейшего рассмотрения исключались статьи, посвященные исключительно узконаправленной медикаментозной терапии, болевым синдромам центрального генеза, клинические случаи, а также тезисы конференций и недоступные полные тексты.

После применения критериев и анализа полных текстов статей в окончательный обзор было включено 48 источников литературы.

Результаты исследования и их обсуждение

Диагностика нейропатической боли (НБ) при повреждении периферических нервов основывается на сочетании клинических данных, данных опросников, нейрофизиологических и визуализационных методов [3; 5; 8].

Стандартизированные диагностические критерии, разработанные NeuPSIG IASP, предполагают последовательную оценку клиничко-anamнестических данных, сенсорных нарушений и результатов инструментальных методов, позволяя верифицировать диагноз вероятной или достоверной нейропатической боли [5; 9; 10]. Первичным этапом является клиническая оценка сенсорных симптомов: жгучей, стреляющей, электрической боли, парестезий, дизестезий, аллодинии и гипестезии, а также анализ позитивных и негативных сенсорных феноменов, о чем упоминалось ранее [3-5].

Неотъемлемой частью клинической диагностики является количественная оценка интенсивности боли, наиболее часто проводимая с использованием визуально-аналоговой шкалы (ВАШ, Visual Analog Scale), которая служит важным диагностическим и прогностическим инструментом [11-13]. При НБ характерно сохранение высоких значений ВАШ даже при регрессе воспалительных посттравматических изменений, что свидетельствует об автономности нейропатических механизмов генерации боли [3; 14; 15]. Стандартизированные опросники DN4 (Douleur Neuropathique 4) и painDETECT (Pain DETECT) остаются ключевыми скрининговыми инструментами. DN4 обладает высокой диагностической точностью, тогда как painDETECT особенно информативен для посттравматической и постампутационной боли, выявляя фенотипы, связанные с аллодинией и пароксизмальной активностью [3; 9; 16].

Объективное подтверждение поражения нервных волокон обеспечивается электронейромиографией (ЭНМГ), позволяющей оценить степень аксонального повреждения,

характер денервации и нарушение сенсорной проводимости. ЭНМГ-исследование является обязательным этапом диагностики травматических нейропатий [6; 8; 17]. Инструментальная визуализация - прежде всего ультразвуковое исследование (УЗИ), реже магнитно-резонансная томография - позволяет выявлять структурные изменения: отек нервной ткани, периневральный отек, рубцово-измененные участки, наличие невромы в толще нерва и концевые невромы [18-20]. Исследование Lin и соавт. [21] показывает, что размеры невромы, определенные по УЗИ, коррелируют с выраженностью боли, отраженной в том числе по ВАШ, и признает этот метод крайне значимым для диагностики постампутационной НБ.

Современные подходы к лечению нейропатической боли после повреждения периферических нервов базируются на принципах мультидисциплинарности и персонализации. Фармакотерапия остается первой линией лечения, при этом международные рекомендации сходятся в выборе альфа-2-дельта-лиганд (прегабалин, габапентин), трициклических антидепрессантов (амитриптилин, нортриптилин) и ингибиторов обратного захвата серотонина и норадреналина (дулоксетин, венлафаксин) как препаратов первой линии [6; 22; 23]. Их эффективность подтверждена многочисленными рандомизированными исследованиями, а выбор конкретного препарата определяется клиническим фенотипом боли, сопутствующими нарушениями сна, настроения и профилем переносимости [3; 5; 22]. С терапевтической точки зрения периферически индуцированная нейропатическая боль требует многоуровневого подхода, направленного как на периферическую, так и на центральную составляющую [14; 22; 23].

Так, для фенотипа жгучей боли наиболее обоснованными являются препараты, воздействующие на центральную сенситизацию и нисходящее торможение: ингибиторы обратного захвата серотонина и норадреналина, трициклические антидепрессанты, а также альфа-2-дельта лигандные препараты [6; 11; 22]. Дизестезии, ощущение «покалывания» и «иголок» отражают спонтанную активность частично денервированных или регенерирующих волокон, а также нарушение межклеточных взаимодействий. Эти фенотипы преимущественно отвечают на препараты, подавляющие периферическую эктопическую активность (лидокаин, капсаицин), а также на габапентиноиды [7; 10; 14]. При механической аллодинии лучший терапевтический ответ наиболее вероятен также при назначении габапентиноидов, трициклических антидепрессантов и ингибиторов обратного захвата серотонина и норадреналина. Применение топического лидокаина эффективно преимущественно при поверхностной периферической аллодинии, тогда как ботулинический токсин А демонстрирует способность уменьшать как периферические, так и центральные компоненты аллодинии [7; 10; 21].

Фенотип пароксизмальной, «электрической» боли лучше купируется препаратами, стабилизирующими инактивацию натриевых каналов - карбамазепин, окскарбазепин, а также лакосамид [3; 5; 6]. У части пациентов с пароксизмальным фенотипом выявляется сопоставимая эффективность ботулинического токсина типа А, вероятно, связанная с подавлением периферической аксональной активности [2; 3; 14]. Фенотип холодовой аллодинии и холодовой гиперчувствительности хорошо отвечает на препараты, усиливающие нисходящее торможение - ингибиторы обратного захвата серотонина и норадреналина и трициклические антидепрессанты [10; 21]. При выраженной холодовой гиперчувствительности продемонстрирована эффективность ламотриджина и карбамазепина, что отражает участие натриевых каналов в данном фенотипе боли [18; 23]. При сенсорной утрате (loss-of-function) препараты, усиливающие нисходящее торможение (ТЦА, СИОЗС), демонстрируют относительное преимущество [3; 10; 12].

Таким образом, фенотипически ориентированный выбор фармакотерапии позволяет учитывать преобладающие механизмы патологической ноцицепции - периферическую эктопическую активность, дисфункцию ионных каналов, центральную сенситизацию или деафферентационную перестройку. Такой подход обеспечивает более рациональное использование препаратов первой и второй линии, способствует повышению вероятности клинического ответа и служит принципиально важным компонентом персонализированной терапии нейропатической боли [10; 12]. При рефрактерности к консервативной терапии рекомендуется рассматривать хирургические виды лечения боли при повреждении периферических нервов [24-26].

Современные хирургические подходы к лечению нейропатии периферических нервов включают широкий спектр методик, направленных на устранение источника боли или снижение интенсивности болевого синдрома. Хирургическое лечение нейропатической боли, возникающей вследствие повреждения периферических нервов, определяется как характером травмы, так и патофизиологическим механизмом формирования боли.

Основная цель хирургического вмешательства - максимально возможное сохранение или восстановление анатомической целостности нерва, но при этом устранение источника патологической эктопической активности (чаще всего - невромы), что позволяет предотвратить хронизацию болевого синдрома или существенно снизить его выраженность [11; 17; 27]. Логика выбора метода основана на понимании того, какие повреждения имеют потенциал для самостоятельного восстановления, а какие требуют активного вмешательства для предотвращения необратимых изменений и развития нейропатической боли [17; 27; 28].

При острых резаных и колотых ранах выполнение первичного шва обеспечивает оптимальные условия для регенерации аксонов, минимизирует риск формирования невром и

Ключевым направлением стали биологически ориентированные методы активной реиннервации - таргетированная мышечная реиннервация (ТМР) и регенеративный интерфейс периферических нервов (РИПН) [11; 24; 27]. ТМР обеспечивает коаптацию культи нерва к моторной ветви, создавая функциональную мишень для регенерации, тогда как РИПН предполагает имплантацию нерва в денервированный мышечный трансплантат [37-39]. Эти методы демонстрируют снижение интенсивности фантомной и резидуальной боли и предотвращают образование невром, превосходя по эффективности традиционные подходы.

Оценка психоэмоциональных факторов – тревожности, депрессии, катастрофизации боли – становится обязательным элементом комплексной диагностики, поскольку эти факторы существенно усиливают восприятие боли и влияют на результаты лечения [6; 17; 40].

Наряду с развитием реконструктивных методик, направленных на восстановление физиологической иннервации и профилактику невромообразования, в последние годы усиливается интерес к технологиям, способным модулировать периферическую и центральную ноцицептивную передачу без прямого вмешательства в анатомическую структуру нерва. На этом фоне все более значимым становится направление использования физической энергии - прежде всего низкоинтенсивного лазерного излучения - для целенаправленного воздействия на поврежденные нервные структуры и периферические ткани [41-43]. Переход к применению лазерной терапии обусловлен накоплением экспериментальных и клинических данных о ее способности снижать локальное воспаление, улучшать микроциркуляцию, модулировать активность ионных каналов и митохондриальных механизмов, а также уменьшать периферическую сенситизацию, лежащую в основе нейропатической боли [44]. Включение лазерного воздействия в комплексное лечение представляет собой логичное развитие современных биомедицинских подходов, дополняя хирургические методы активной реиннервации и усиливая их потенциал по контролю боли, особенно на ранних этапах формирования патологической ноцицептивной трансмиссии [25; 45].

Лазерное воздействие в лечении нейропатической боли в последние годы рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений биомедицинских технологий благодаря сочетанию высокой эффективности, безопасности и уникального механизма действия, не имеющего аналогов среди существующих терапевтических подходов. В отличие от исторически применявшихся термических методик, показавших ограниченную воспроизводимость и высокий риск повреждения нервной ткани, современные технологии низкоинтенсивной лазерной терапии формируют качественно иной вектор развития лазерной медицины [41; 46; 47]. Экспериментальные и клинические данные демонстрируют, что низкоинтенсивная лазерная терапия способна снижать нейрональную возбудимость,

уменьшать воспалительную активность, улучшать трофику периферических нервов и восстанавливать сенсорную проводимость без термического или механического воздействия на ткани [42; 43; 48].

Недавние исследования, включая работу Amaroli et al. [46], раскрыли новый механизм действия лазера - прямое влияние на ионные каналы и мембранную стабильность сенсорных нейронов, что делает его функциональным аналогом фармакологических блокаторов натриевых и кальциевых каналов при сохранении полной структурной безопасности. Впервые было показано, что лазер в ближнем ИК-диапазоне может действовать аналогично фармакологическим блокаторам натриевых и кальциевых каналов, но при этом не нарушает структурную целостность нервной клетки. Совокупность этих данных позволяет рассматривать низкоинтенсивное лазерное излучение как инновационный, научно обоснованный и клинически перспективный метод купирования нейропатической боли, особенно в условиях, когда фармакотерапия и хирургическая коррекция оказываются недостаточными или сопровождаются значимыми ограничениями.

Заключение

Нейропатическая боль, обусловленная повреждением периферических нервов, остается сложной и многомерной клинической проблемой. Современные данные подчеркивают важность ранней диагностики, использования стандартизированных опросников и инструментальных методов, применения доказательной фармакотерапии и активного внедрения инновационных хирургических, нейромодуляционных технологий. Комплексный и персонализированный подход обеспечивает наиболее высокую вероятность достижения устойчивого контроля боли и восстановления качества жизни пациентов.

Даже при расширении терапевтического арсенала у значительной части пациентов сохраняется клинически значимая боль, что подчеркивает необходимость дальнейшей разработки персонализированных стратегий лечения. Среди перспективных направлений – фенотип-ориентированный выбор терапии, применение биомаркеров для стратификации пациентов, совершенствование методов регенеративной нейрохирургии, разработка новых фармакологических препаратов, воздействующих на ключевые патофизиологические механизмы. Важным становится интегративный подход, объединяющий фармакотерапию, хирургическое вмешательство, нейромодуляцию, реабилитацию и психотерапию, активное участие пациента в процессе лечения, а также инновационные методы воздействия на невральные структуры во время операции и в послеоперационном периоде.

Несмотря на убедительные экспериментальные данные и положительные клинические наблюдения, терапевтический потенциал низкоинтенсивного лазерного излучения при

нейропатической боли требует подтверждения в рандомизированных клинических исследованиях. Дальнейшее изучение дозозависимых эффектов, оптимальных длин волн и протоколов воздействия является ключевым условием для интеграции этой технологии в стандартизированные схемы лечения.

Таким образом, высокая распространенность, выраженное влияние на функциональные исходы и ограниченность эффективности консервативного лечения определяют нейропатическую боль как одну из ключевых проблем современной нейрохирургии и хирургии периферических нервов. Понимание масштабов проблемы служит основанием для разработки новых методов профилактики и лечения, направленных на структурно-функциональное восстановление нервной ткани и предотвращение патологической регенерации.

Список литературы

1. Raja S. N., Carr D. B., Cohen M., Finnerup N. B., Flor H., Gibson S., Keefe F. J., Mogil J. S., Ringkamp M., Sluka K. A., Song X. J., Stevens B., Sullivan M. D., Tutelman P. R., Ushida T., Vader K. The revised International Association for the Study of Pain definition of pain: concepts, challenges, and compromises // *Pain*. 2020;161(9):1976–1982. DOI: 10.1097/j.pain.0000000000001939.
2. Скрипникова А. А. Современные подходы к диагностике, лечению и профилактике невралгий у военнослужащих: клинический опыт и перспективы совершенствования медицинской помощи в Вооруженных Силах // *Неврологический журнал имени Л.О. Бадаляна*. 2025. Т. 6. № 2. С. 98–104. DOI: 10.46563/2686-8997-2025-6-2-98-104.
3. Давыдов О. С., Яхно Н. Н., Кукушкин М. Л., Чурюканов М. В., Абузарова Г. Р., Амелин А. В., Бализин В. А., Баранцевич Е. Р., Баринов А. Н., Барулин А. Е., Бельская Г. Н., Быков Ю. Н., Данилов А. Б., Доронина О. Б., Древаль О. Н., Загорюлько О. И., Исагузин О. Д., Калинин П. П., Каракулон О. 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. Л. Невропатическая боль: клинические рекомендации по диагностике и лечению Российского общества по изучению боли // *Российский журнал боли*. 2018. № 4. С. 5–41. URL: <https://painrussia.ru>. DOI: 10.25731/RASP.2018.04.025.
4. Szok D., Tajti J., Nyári A., Vécsei L. Therapeutic Approaches for Peripheral and Central Neuropathic Pain // *Behavioural Neurology*. 2019;8685954. DOI: 10.1155/2019/8685954.
5. Attal N., Bouhassira D., Colvin L. Advances and challenges in neuropathic pain: a narrative review and future directions // *British Journal of Anaesthesia*. 2023;131(1):79–92. DOI: 10.1016/j.bja.2023.04.021.

6. Raihan Lutfia L., Ananda Audia Arsiazi B., Hanan Fariyah I., Mahfuzzahroni M. Traumatic Neuropathic Pain // *KESANS: International Journal of Health and Science* // 2022;1(4):396–400. DOI: 10.54543/kesans.v1i4.41.
7. Murphy D., Lester D., Clay Smither F., Balakhanlou E. Peripheral neuropathic pain // *NeuroRehabilitation*. 2020;47(3):265–283. DOI: 10.3233/nre-208002.
8. Древаль О. Н., Кузнецов А. В., Джинджихадзе Р. С., Пучков В. Л., Берснев В. П. Клинические рекомендации по диагностике и хирургическому лечению повреждений и заболеваний периферической нервной системы // Ассоциация нейрохирургов России. Москва; 2015. 34 с. URL: https://ruans.org/Text/Guidelines/peripheral_nerves.pdf
9. de Lange J. W. D., Duraku L. S., Power D. M., Rajaratnam V., van der Oest M. J. W., Selles R. W., et al. Prevalence of post-traumatic neuropathic pain after digital nerve repair and finger amputation // *J. Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2022;75(9):3242–3249. DOI: 10.1016/j.bjps.2022.06.033.
10. Finnerup N. B., Kuner R., Jensen T. S. Neuropathic pain: From mechanisms to treatment // *Physiol Rev*. 2021;101(1):259–301. DOI: 10.1152/physrev.00045.2019.
11. Power D., Curtin C., Bellemère P., Nyman E., Pajardi G., Isaacs J., et al. Surgical treatment of symptomatic end-neuroma with a new bioresorbable copolyester nerve capping device: a multicenter prospective cohort study // *Ann Plast Surg*. 2023;91(1):109–116. DOI: 10.1097/SAP.0000000000003596.
12. Hamdan A., Galvez R., Katati M. Shedding light on neuropathic pain: Current and emerging tools for diagnosis, screening, and quantification // *SAGE Open Med*. 2024;12:20503121231218985. DOI: 10.1177/20503121231218985.
13. Stokvis A., van der Avoort D. J. C., van Neck J. W., Hovius S. E. R., Coert J. H. Surgical management of neuroma pain: a prospective follow-up study // *Pain*. 2010;151(3):862–869. DOI: 10.1016/j.pain.2010.09.032.
14. Kaye A. D., Armistead G., Amedio L. S., Manthei M. E., Ahmadzadeh S., Bernhardt B., et al. Evolving treatment strategies for neuropathic pain: a narrative review // *Medicina (Kaunas)*. 2025;61(6):1063. DOI: 10.3390/medicina61061063.
15. Richner M., Pallesen L. T., Ulrichsen M., et al. Sortilin gates neurotensin and BDNF signaling to control peripheral neuropathic pain // *Sci Adv*. 2019;5(6):eaav9946. DOI: 10.1126/sciadv.aav9946.
16. de Lange J. W. D., Hundepool C. A., Power D. M., Rajaratnam V., Duraku L. S., Zuidam J. M. Prevention is better than cure: Surgical methods for neuropathic pain prevention following amputation – a systematic review // *J. Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2022;75(3):948–959. DOI: 10.1016/j.bjps.2021.11.076.

17. Remy K., Raasveld F. V., Saqr H., Khouri K. S., Hwang C. D., Austen W. G., et al. The neuroma map: A systematic review of the anatomic distribution, etiologies, and surgical treatment of painful traumatic neuromas // *Surgery*. 2024;176(5):1239–1246. DOI: 10.1016/j.surg.2024.05.037.
18. Yang H., Dong Y., Wang Z., et al. Traumatic neuromas of peripheral nerves: Diagnosis, management and future perspectives // *Front Neurol*. 2023;13:1039529. DOI: 10.3389/fneur.2022.1039529.
19. Яриков А. В., Лобанов И. А., Казакова Л. В., Корнакова О. С., Фраерман А. П., Перльмуттер О. А., Цыбусов С. Н., Павлова Е. А., Комкова Е. Ф., Зайцева Н. Е. Современные инструментальные методы диагностики травматических поражений периферических нервов // *Бюллетень науки и практики*. 2024. Т. 10. № 2. С. 273-296. DOI: 10.33619/2414-2948/99/28.
20. Lin Z., Yu P., Chen Z., Li G. Regenerative peripheral nerve interface reduces the incidence of neuroma in the lower limbs after amputation: a retrospective study based on ultrasound // *J. Orthop Surg Res*. 2023;18(1):619. DOI: 10.1186/s13018-023-04116-6.
21. Осипова Н. А., Тепляков В. В., Собченко Л. А., Петрова В. В. Теоретическое обоснование и практическая реализация технологии предотвращения фантомного болевого синдрома при плановой ампутации конечностей // *Регионарная анестезия и лечение острой боли*. 2013. Т. 7. № 1. С. 25–32. DOI: 10.17816/RA36175.
22. Рачин С. А., Лыткина К. А., Мелконян Г. Г., Карпова О. Ю., Тополянская С. В., Дроздова Е. А. Актуальные подходы к терапии и реабилитации пациентов с постампутационным болевым синдромом: обзор // *Вестник восстановительной медицины*. 2025. Т. 24. № 5. С. 113–130. DOI: 10.38025/2078-1962-2025-24-5-113-130.
23. Kosharskyu B., Almonte W., Shaparin N., Pappagallo M., Smith H. Intravenous infusions in chronic pain management // *Pain Physician*. 2013;16(3):231–249.
24. Hespe G. E., Brown D. L. Management of neuropathic pain with neurectomy combined with dermal sensory regenerative peripheral nerve interface (DS-RPNI) // *Semin Plast Surg*. 2024;38(1):48–52. DOI: 10.1055/s-0043-1778041.
25. 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) // *Современные технологии в медицине*. 2025. Т. 17. № 2. С. 86-97. DOI: 10.17691/stm2025.17.2.08.
26. Исагулян Э. Д., Томский А. А., Коновалов Н. А., Дорохов Е. В., Зайцев А. М. Нейромодуляция в лечении хронической неонкологической боли (из клинических рекомендаций «Хирургическое лечение хронического нейропатического болевого синдрома») // *Клиническая и экспериментальная хирургия. Клиническая и экспериментальная*

хирургия. Журнал имени академика Б.В. Петровского. 2016. Т. 4. № 3 (13). С. 74–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neuromodulyatsiya-v-lechenii-hronicheskoy-neonkologicheskoy-boli-iz-klinicheskikh-rekomendatsii-hirurgicheskoe-lechenie/viewer>.

27. Scott B. B., Winograd J. M., Redmond R. W. Surgical approaches for prevention of neuroma at time of peripheral nerve injury // *Front Surg*. 2022;9:819608. DOI: 10.3389/fsurg.2022.819608.

28. Nijran A., Challoner T. J., Jordaan P., Power D. M. The role of processed nerve allograft in peripheral nerve surgery // *J. Musculoskelet Surg Res*. 2019;3(1):110–115. DOI: 10.4103/jmsr.jmsr_86_18.

29. Seddighi A, Nikouei A, Seddighi AS, Zali AR, Tabatabaei SM, Sheykhi AR, et al. Peripheral nerve injury: a review article // *Int Clin Neurosci J*. 2016;3(1):1–6. DOI: 10.22037/icnj.v3i1.12016.

30. Филяева А. С., Яриков А. В., Фраерман А. П., Перльмуттер О. А., Цыбусов С. Н., Хохлов М. Ю., Камнев И. Ю., Прокопьев В. В., Коваленко Н. Н., Клементьев Е. Н., Алидин С. А., Корочкин Д. А., Костогриз Е. В., Гарсия А., Байтингер А. В. Аспекты хирургического лечения повреждений периферических нервов – современное состояние проблемы // *Здравоохранение Югры: опыт и инновации*. 2024. № 1 (38). С. 15–29. EDN: TLIZYK

31. Крайнюков П. Е., Кокорин В. В., Глотко В. Л., Гриднев Е. С., Крайнюков И. П., Суворов А. В. Выбор хирургической тактики при травме периферических нервов // *Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова*. 2025. Т. 20. № 1. С. 134–138. DOI: 10.25881/20728255_2025_20_1_134.

32. Яриков А. В., Байтингер А. В., Тутуров А. О., Евграфов Д. П., Байтингер В. Ф., Селянинов К. В., Фраерман А. П., Перльмуттер О. А., Волков И. В., Паркаев М. В., Цыбусов С. Н., Гарсия А., Туткин А. В., Соснин А. Г., Ежов И. Ю. Повреждения периферических нервов, история развития лечения, консервативное, интервенционное и хирургическое лечение // *Бюллетень науки и практики*. 2025. Т. 11. № 1. С. 146–184. DOI: 10.33619/2414-2948/110/18.

33. Зоркова А. В., Григорьева В. Н. Невролиз, субэпинеуральная стимуляция и искусственный эпинеурий в хирургическом лечении внутриствольных травм лучевого нерва // *Практическая медицина*. 2019. Т. 17. № 7. С. 121–126. DOI: 10.32000/2072-1757-2019-7-121-126.

34. Mauch J. T., Kao D. S., Friedly J. L., Liu Y. Targeted muscle reinnervation and regenerative peripheral nerve interfaces for pain prophylaxis and treatment: a systematic review // *PM R*. 2023;15(11):1457–1465. DOI: 10.1002/pmrj.12972.

35. Rebowe R., Rogers A., Yang X., Kundu S. C., Smith T. L., Li Z. Nerve repair with nerve conduits: problems, solutions, and future directions // *J. Hand Microsurg.* 2018;10(2):61–65. DOI: 10.1055/s-0038-1626687.
36. Frostadottir D., Chemnitz A., Johansson Ot L. J., Holst J., Dahlin L. B. Evaluation of processed nerve allograft in peripheral nerve surgery: a systematic review and critical appraisal // *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2023;11(6):e5088. DOI: 10.1097/GOX.0000000000005088.
37. Pettersen E., Sassu P., Reinholdt C., Dahm P., Rolfson O., Björkman A., et al. Surgical treatments for postamputation pain: study protocol for an international, double-blind, randomised controlled trial // *Trials.* 2023;24(1):735. DOI: 10.1186/s13063-023-07286-0.
38. Souza J. M., Cheesborough J. E., Ko J. H., Cho M. S., Kuiken T. A., Dumanian G. A. Targeted muscle reinnervation: a novel approach to postamputation neuroma pain // *Clin Orthop Relat Res.* 2014;472(10):2984–2990. DOI: 10.1007/s11999-014-3528-7.
39. Lee E. Y., Sammarco M. C., Spinner R. J., Shin A. Y. Current concepts of the management of painful traumatic peripheral nerve neuromas // *J. Am Acad Orthop Surg.* 2025;33(4):178–186. DOI: 10.5435/JAAOS-D-24-00581.
40. Bedder M., Parker L. Magnetic peripheral nerve stimulation (mPNS) for chronic pain // *J. Pain Res.* 2023;16:2365–2373. DOI: 10.2147/JPR.S409331.
41. Zupin L., Gianoncelli A., Celsi F., Bonanni V., Kourousias G., Parris P., et al. The effect of near-infrared photobiomodulation therapy on the ion content of 50B11 sensory neurons measured through XRF analysis // *J. Photochem Photobiol B.* 2024;259:113019. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2024.113019.
42. Lopes B., Sousa P., Alvites R., Branquinho M., Sousa A. C., Mendonça C., et al. Peripheral nerve injury treatments and advances: one health perspective // *Int J Mol Sci.* 2022;23(2):918. DOI: 10.3390/ijms23020918.
43. Rashad U. M., Badawy M. S., Fahmy A. A., El Fakharany M. S., Elsherif A. A. The effect of low-level laser therapy on peripheral nerve lesions: a systematic review // *Physiotherapy Quarterly.* 2025;33(3):26–33. DOI: 10.5114/pq/192990.
44. Rochkind S., Leider-Trejo L., Nissan M., Shamir M. H., Kharenko O., Alon M. Efficacy of 780-nm laser phototherapy on peripheral nerve regeneration after neurotube reconstruction procedure // *Photomedicine and Laser Surgery.* 2007;25(3):137–143. DOI: 10.1089/pho.2007.2076.
45. Рожкинд С. Фототерапия при повреждении периферической нервной системы: от фундаментальных исследований к клиническим испытаниям // *Лазерная медицина.* 2010. Т. 14. № 4. С. 40–44. EDN: NBLRBL.

46. Amaroli A., Clemente Vargas M. R., Pasquale C., Raffetto M., Ravera S. Photobiomodulation on isolated mitochondria at 810 nm: first results on the efficiency of the energy conversion process // *Scientific Reports*. 2024;14(1):11060. DOI: 10.1038/s41598-024-61740-w.
47. Yang Y., Gu W., Xu S., Wang S., Shi H., Zhang L., et al. Treatment for peripheral nerve injury: a protocol for a systematic review and Bayesian network meta-analysis // *BMJ Open*. 2024;14(12):e090497. DOI: 10.1136/bmjopen-2024-090497.
48. Rosso M. P. O., Buchaim D. V., Kawano N., Furlanette G., Pomini K. T., Buchaim R. L. Photobiomodulation Therapy (PBMT) in Peripheral Nerve Regeneration: A Systematic Review // *Bioengineering*. 2018;5(2):44. DOI: 10.3390/bioengineering5020044.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.