

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный медицинский
университет имени В. И. Разумовского» Министерства здравоохранения
Российской Федерации

На правах рукописи

АЙТЕМИРОВ ШАМИЛЬ МАЛАЧИЛЯЕВИЧ

**ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА
И ТАКТИКА ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ХИРУРГИЧЕСКОГО
ЛЕЧЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ НЕРВОВ
КОНЕЧНОСТЕЙ**

3.1.10. Нейрохирургия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Научный руководитель

доктор медицинских наук

Островский Владимир Владимирович

Саратов - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	13
1.1 Эпидемиология, классификация и хирургическое лечение травм периферических нервов.....	13
1.2 Методы диагностики повреждений периферических нервов.....	18
1.3 УЗИ при травме периферических нервов	23
Глава 2 Материалы и методы исследования	33
2.1 Дизайн проведённого исследования.....	33
2.2 Методы обследования пациентов	35
2.3 Ультразвуковое исследование периферических нервов.....	42
2.4 Характеристика пациентов, включенных в исследование	48
2.5 Анестезиологическое пособие и методы хирургического лечения	53
2.6 Методы статистического анализа	56
Глава 3 Результат диагностики и лечения пациентов с травмой периферических нервов.....	58
3.1 Результаты анализа предоперационной и интраоперационной диагностики	58
3.2 Результаты хирургического лечения.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
ВЫВОДЫ.....	93
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	94
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное).....	105

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Повреждение периферических нервов конечностей составляют 3-5% среди всех травм опорно-двигательного аппарата и нередко сочетаются с травмой сосудов, сухожилий, суставов и костей конечности [56, 57]. Такие пациенты долгое время не в состоянии вернуться к работе и нуждаются в проведении реабилитационного лечения, а в 60-63% случаев становятся инвалидами 2-3 группы и вынуждены оставить, либо сменить вид прежней трудовой деятельности [2].

Большинство пациентов с повреждением стволов периферических нервов конечностей нуждаются в хирургическом пособии, но выполнение его по разным причинам нередко откладывают на неопределённые сроки из-за тяжести состояния пострадавшего в результате политравмы, когда необходимо проведение реанимационных мероприятий и хирургических вмешательств по жизненным показаниям. При открытых травмах нервных стволов (особенно при огнестрельных ранениях конечностей), сочетающихся с повреждением магистральных сосудов, мышц, сухожилий и переломами костей, пациенты нуждаются в первичной хирургической обработке раны, остановке кровотечения, которые выполняют хирурги общего профиля либо травматологи, а к нейрохирургам этот пациент в лучшем случае попадает после заживления раны [101].

У пациентов с закрытой травмой стволов периферических нервов судить о степени поражения нерва по клиническим и электрофизиологическим данным зачастую чрезвычайно сложно, поэтому ряд авторов предлагает осуществлять консервативную терапию, которая нередко даёт положительные результаты, особенно у детей. По мнению авторов, к хирургическому лечению необходимо приступать при отсутствии признаков проводимости по показателям электронейромиографического (ЭНМГ) обследования через 3-4 мес., что

указывает на невозможность адекватной регенерации нерва [78, 101].

Сторонники активной хирургической тактики отстаивают целесообразность ранних вмешательств с использованием операционного микроскопа и микрохирургической техники. По их мнению, в анатомически сохранном стволе нерва большая часть аксонов может быть повреждена, что приводит к рубцовому перерождению этого участка нерва и серьёзным тактическим проблемам. Отсутствие двигательной активности, а часто и симпатической иннервации в течение длительного времени приводит к быстро развивающимся процессам рубцового перерождения в мышцах и атрофии [68].

Существующие современные методы хирургического лечения травматических поражений периферических нервов с применением микрохирургической техники не позволяют полностью решить эту проблему. Так, по данным разных авторов, эффективность оперативных вмешательств на периферических нервах составляет от 36 до 98% в зависимости от типа повреждения и характера оперативного пособия [4, 28, 77, 98].

Повышение эффективности хирургического лечения поражений периферических нервов напрямую зависит от качества и средств пред – и интраоперационной диагностики. Известно, что неполноценное обследование пострадавших на начальном этапе отрицательным образом сказывается на лечебной тактике, характере оперативных вмешательств и дальнейшей реабилитации. Поэтому повышение качества диагностики представляется чрезвычайно актуальной проблемой [3].

Степень разработанности темы исследования

Помимо клинико-неврологического обследования, которое позволяет выявить механизмы повреждения и степень тяжести поражения нервов, применяют большой арсенал дополнительных современных инструментальных методов исследования: электронейромиография

(ЭНМГ) с регистрацией соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП), лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), ультразвуковое исследование (УЗИ), магнитно-резонансная томография (МРТ), рентгеновская контрастная нейрография (РКН) и компьютерная томография (КТ). Однако в настоящее время, наряду с ЭНМГ и ЛДФ, особое значение для визуализации нервных структур имеют МРТ, КТ, РКН и УЗИ [3, 17, 74].

Перед планированием хирургического вмешательства необходимо точно определить уровень, характер и степень тяжести травматического поражения нервных стволов. В этом плане конкурируют между собой такие методы обследования, как ЭНМГ, МРТ и УЗИ. ЭНМГ исследование позволяет определить только степень нарушения проведения по нервному стволу и уровень его повреждения. Данное исследование не позволяет судить о характере и протяжённости ствольных изменений. Кроме того, некоторые авторы отмечают отсутствие корреляции между результатами ЭНМГ исследования и клиническими данными. Нередко при незначительном восстановлении проводимости могут регистрировать практически нормальные показатели электронейромиографии. Помимо этого, ЭНМГ исследование не способно диагностировать неврому, оценить состояние окружающих тканей и наличие инородных тел [2]. В этой связи, предоперационное обследование необходимо дополнять методами нейровизуализации, например, МРТ или УЗИ.

Большинство рентгенологов и клиницистов предпочитают использовать МРТ для визуализации повреждённых стволов периферических нервов. Однако МРТ имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является незначительное различие при визуализации между стволом нерва и окружающими тканями. Кроме того, при данном методе практически невозможно исследование внутриствольной структуры нерва и небольших изменений ствола нерва (частичный перерыв, повреждение контура). При МРТ затруднительно

детализировать небольшие структурные изменения, что не позволяет исследовать процессы восстановления нерва [25, 93]. При МРТ нервы малого диаметра практически не дифференцируют от окружающих тканей, но достаточно хорошо визуализируют нервы большого диаметра, окружённые жировой прослойкой [45]. Несмотря на высокую контрастность мягких тканей и возможность оценки объекта в разных плоскостях, МРТ в диагностике периферических нервов остаётся менее предпочтительным методом обследования по сравнению с УЗИ [78].

В настоящее время развитие электронно-цифровых технологий позволило создать высокоразрешающие ультразвуковые аппараты, которые обладают рядом существенных преимуществ перед другими диагностическими устройствами. Во-первых, они обеспечивают качественное динамическое изображение в пространстве. Во-вторых, УЗИ является неинвазивным интерактивным обследованием, позволяющим проводить исследования в зоне локализации боли и повышенной чувствительности, а также в области предполагаемого повреждения. В-третьих, при УЗИ возможно выполнение функциональных проб и изучение структурных изменений в динамике. Наконец, во время ультразвукового исследования отсутствуют негативные моменты, связанные с необходимостью находиться в замкнутом пространстве, как при МРТ и КТ обследовании, а также испытывать болезненные ощущения, присущие инвазивным методам диагностики [38].

Предоперационное планирование оперативных вмешательств при травме и различной патологии периферической нервной системы является важным и чрезвычайно ответственным этапом хирургического лечения таких пострадавших. Определение изменений в структуре нерва и локализации перерыва помогает в выборе наиболее подходящей тактики лечения и, тем самым, приводит к улучшению результатов [38].

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что ряд авторов в 6-10% случаев отмечает расхождение данных дооперационного

УЗИ с находками на операционном столе [1, 23, 51]. Эти данные обусловлены различными причинами, а именно тем, что: 1) высокочастотный ультразвук сильно рассеивается по мере проникновения в ткани (для 20 МГц глубина проникновения составляет 1,2 см), что ограничивает исследование глубоко расположенных нервов (например, седалищный нерв); и 2) рассеяние или поглощение ультразвука из-за посттравматических изменений мягких тканей (периневральный отек, рубцовое изменение тканей или инородные тела) может препятствовать предоперационной оценке и не позволяет получить полноценную информацию [23].

Вышеописанные недостатки полностью устраняют при использовании УЗИ интраоперационно [54, 100]. В хирургической практике нередко возникает ситуация, особенно при закрытых повреждениях, когда во время ревизии поражённых нервных стволов они оказываются анатомически сохранными, при этом возникают серьёзные диагностические и тактические проблемы, которые сложно разрешить с помощью ЭНМГ тестирования, предоперационного УЗИ и контрастной нейрографии [6].

Таким образом, лечение повреждений периферических нервов является актуальной проблемой, до конца не ясна роль различных методов предоперационной диагностики, и остаются малоизученными такие методы интраоперационной диагностики, как ультрасонография. Выделенная проблемная ситуация выражает актуальность темы диссертации.

Цель исследования:

Улучшить результаты лечения пациентов с повреждением периферических нервов конечностей путем оптимизации тактики хирургического лечения на основании разработанного комплекса интраоперационной диагностики, включающего электронейромиографию,

рентгеновскую контрастную нейрографию и интраоперационное ультразвуковое исследование нервов.

Для достижения поставленной цели в диссертации определены следующие научные задачи:

1. Выявить частоту диагностических ошибок и определить результаты лечения пациентов с травмами периферических нервов после проведения стандартных диагностических подходов.

2. Оценить и сравнить результаты дооперационного и интраоперационного клинико-неврологического обследования, электронейромиографии и ультразвукового исследования нервов для выявления чувствительности и специфичности методов диагностики на основе данных гистологического исследования удаленного сегмента нерва и данных клинико-инструментального обследования после операции.

3. Провести сравнительный анализ диагностической точности дооперационного и интраоперационного ультразвукового исследования нервов, по нескольким параметрам: визуализация и идентификация нерва, локализация повреждения, выявление типа повреждения, выявление инородных тел, выявление полного перерыва нерва, выявление внутриствольных изменений, выявление изменений вокруг нерва.

4. Разработать алгоритм дифференцированного подхода хирургического лечения при травме периферических нервов конечностей, основанный на методах комплексной интраоперационной диагностики, включающей электронейромиографию, контрастную нейрографию и УЗИ.

5. Определить эффективность алгоритма хирургического лечения с применением стандартного подхода (электронейромиография и нейрография) и с применением методов расширенной интраоперационной диагностики (электронейромиография, нейрография и УЗИ).

Научная новизна исследования:

1. Выявлено превосходство интраоперационного УЗИ нервов

перед другими методами с чувствительностью 97% и специфичностью 95% в диагностике повреждения периферических нервов.

2. Впервые в мире разработан алгоритм диагностики повреждений периферических нервов, основанный на комплексной интраоперационной диагностике (электронейромиографии, УЗИ, контрастная нейрография), который позволяет улучшить исходы лечения по результатам клинико-неврологического обследования на 14% и по данным ЭНМГ на 21%.

3. Обоснована целесообразность нейрорафии и эндоневролиза при сохранной внешней оболочке нервного ствола, но измененной внутривольной структуре по данным УЗИ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость научной работы заключается в том, что результаты данного исследования могут быть использованы в дальнейшем изучении методов интраоперационной диагностики повреждения периферических нервов. В частности, УЗИ нервов является актуальной и востребованной темой для научных исследований в последние 10 лет, как в России, так и за рубежом. Полученные в ходе работы данные обогащают пока небольшой общемировой опыт интраоперационного применения УЗИ нервов.

Результаты полученных исследований и основные положения диссертационной работы внедрены в клиническую практику отдела инновационных проектов в нейрохирургии и вертебологии ФГБУ «СарНИИТО» Минздрава России, отделения травматологии ГБУ Республиканский ортопедотравматологический центр г. Махачкала, отделения травматологии ГБУ Ингушская республиканская клиническая больница г. Назрань, отделения нейрохирургии ГБУ Республиканская больница скорой медицинской помощи г. Грозный.

Разработаны и запатентованы 4 новые технологии: «Способ

иссечения поврежденного периферического нерва» (патент РФ на изобретение № 2492829), позволяющий обеспечить полноценное удаление повреждённого участка периферического нерва с грубыми внутривольными изменениями для повышения эффективности проводимого в последующем лечения. «Способ выбора хирургической тактики лечения повреждения периферического нерва с нарушением проводимости» (патент РФ на полезную модель № 2492813) позволяющий обеспечить рациональный выбор адекватного хирургического лечения с учетом характера внутривольных изменений периферического нерва во время хирургического вмешательства. «Устройство для интраоперационной фиксации периферического нерва» (патент РФ на полезную модель № 145447) позволяющее надёжно фиксировать нерв и облегчить выполнение реконструктивных операций на его стволе. «Устройство для проведения реконструктивно-восстановительных вмешательств на поврежденном стволе периферического нерва" (патент РФ на полезную модель RU 171517 U1).

Методология и методы исследования

Методология исследования соответствовала поставленным в работе задачам. Применили общенаучные методы исследования, выбор которых был основан на трудах отечественных и зарубежных исследователей, посвященных диагностике и лечению травм и заболеваний периферической нервной системы. Для исследования были использованы следующие методы научного исследования: анализ литературы, изучение и обобщение опыта предыдущих исследований, сбор и анализ данных клинического и инструментальных методов обследований пациентов с поражением периферических нервов, качественная и количественная обработка полученных данных, статистическая обработка данных с последующей интерпретацией.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие на всех этапах подготовки и проведения научной работы, включая определение цели, задач, и методов выполнения исследования. Автором проведён обзор литературы, отражающий состояние проблемной ситуации в области исследования, создана база данных пациентов ретроспективной группы по архивным данным, лично проведено клинико-неврологическое обследование пациентов в проспективной группе, а также хирургическое лечение этих пациентов. Самостоятельно проведен анализ полученных клинических и инструментальных данных, а также их статистическая обработка.

Положения, выносимые на защиту

1. Высокоразрешающая ультрасонография является высокочувствительным и специфичным методом до- и интраоперационной диагностики повреждений периферических нервов, позволяющим уточнить тип и степень повреждения нерва и при необходимости скорректировать хирургическую тактику.

2. Разработанный алгоритм, основанный на комплексной интраоперационной диагностике (электронейромиография, ультразвуковое исследование, контрастная нейрография), позволяет оптимизировать хирургическую тактику и улучшить результаты лечения пациентов с повреждением периферических нервов конечностей за счет более детального исследования зоны повреждения нерва.

Достоверность и обоснованность результатов исследования

Достоверность подтверждается корректным использованием методов статистического анализа, практической полезностью и апробированностью работы на 109 пациентах с травмой периферических нервов.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на

следующих конференциях:

- Международная научно-практической конференция по нейрореабилитации в нейрохирургии (Казань, 2012);
- Всероссийские научно-практические конференции «Поленовские чтения» (Санкт-Петербург, 2012, 2013, 2014);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии оптимизации процесса репаративной регенерации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии» (г. Саратов, 2013);
- XIV научно-практическая конференция «Поленовские чтения» (г. Санкт-Петербург, 2015);
- Научно-практическая конференция молодых учёных «Вклад молодых учёных в развитие травматологии, ортопедии и нейрохирургии» (г. Саратов, 2014);
- VII Всероссийская конференция «Функциональная диагностика 2015» (Москва, 2015);
- Международный образовательный форум «Нейросфера» (Саратов 2022);
- Конференция нейрохирургов Северо-Кавказского федерального округа (Черкесск 2022).

Публикации по теме диссертации

По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ: 6 статей (1 статья опубликована в журнале включенном в международные базы Web of Science), 8 тезисов в материалах Всероссийских и международных конференций. За последние 5 лет опубликовано 4 статьи, отражающие основные результаты диссертации, в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и входящих в РИНЦ. Получено 2 патента на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, двух глав основного текста, заключения, выводов, практических рекомендаций и

списка литературы. Текст диссертации изложен на 106 страницах, содержит 34 рисунка, 11 таблиц. Список литературы включает в себя 110 источников, в том числе 28 отечественных и 82 иностранных статей.

Глава 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы мы коротко описали эпидемиологию и этиологию, существующие методы диагностики и методы хирургического лечения при травме периферических нервов. Отдельно провели систематический обзор опубликованных на сегодняшний день исследований применения УЗИ при травме периферических нервов, описали историю развития УЗИ нервов, провели анализ, а также описали перспективы развития этого метода.

1.1 Эпидемиология, классификация и хирургическое лечение травм периферических нервов

Травма периферических нервов конечностей не является частой причиной обращения в стационар. Общая заболеваемость составляет около 13-23 случаев на 100 000 человек в год [65]. Однако последующие нарушения функции конечностей и прогрессирующая атрофия денервированных мышц приводят к ухудшению качества жизни таких пациентов. Травма периферических нервов не позволяет пациентам вернуться к работе в течение всего реабилитационного периода, а в некоторых случаях приводит к утрате трудоспособности.

Причинами повреждения периферической нервной системы являются прежде всего травмы, хирургические вмешательства или сдавление (туннельные синдромы). Повреждения периферических нервов возникают в 3-5% всех травм в мирное время [45, 82, 87]. В то время как в

вооруженных конфликтах частота значительно выше и составляет от 13% до 30% от всех травм [13].

В ретроспективных исследованиях показано, что повреждение нерва после хирургического вмешательства и анестезии встречаются в 0,03% - 1,4% случаев [72, 80, 86]. Нервы верхних конечностей повреждают в 81% случаев, нервы нижних конечностей - в 11%, повреждения нервов другой локализации встречаются в 8% случаев

Тщательная диагностика и классификация повреждений нервов необходима для принятия правильной тактики лечения. Одинаковые по внешнему виду травмы периферических нервов на самом деле могут значительно отличаться по степени внутринеурального поражения [52, 104]. Так миелиновая оболочка, состоящая из шванновских клеток, направляет регенерирующие аксоны после травмы нерва. Прогноз восстановления при травме периферического нерва выше, если повреждение шванновских клеток минимально (рис.1).

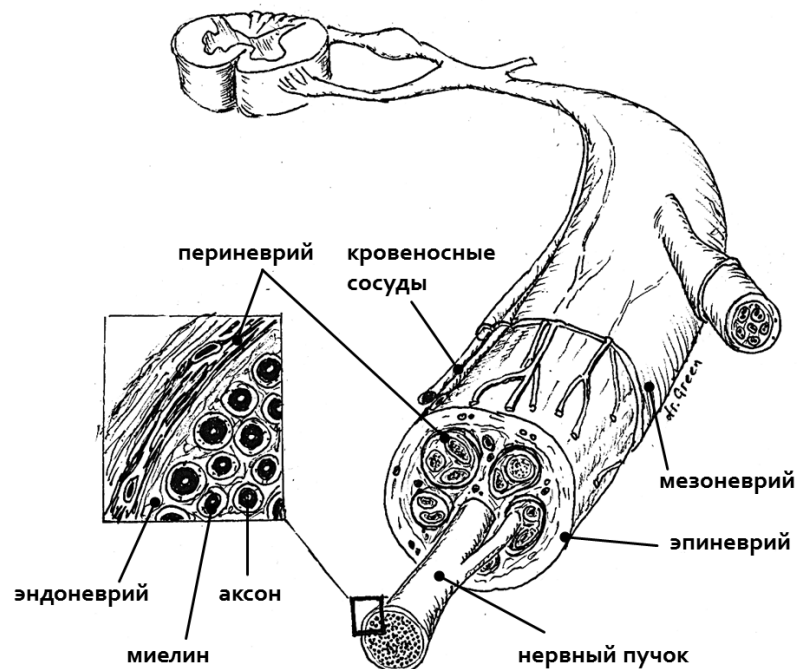


Рисунок 1 - Анатомия периферического нерва

Частичное повреждение нерва встречаются примерно в 60% всех случаев травмы нерва [82]. Исходы таких травм сильно варьируют. В некоторых случаях, при одинаковом анатомическом поражении, нерв

полностью восстанавливается, в других - нет. Зачастую причиной нарушения восстановления нерва являются внутривольные изменения (внутриствольная неврома и рубцовое перерождение нерва), и тогда перед хирургом стоит задача определить, есть ли необходимость проведения нейрорафии или же достаточно выполнить невролиз.

Предложено несколько классификаций повреждения периферического нерва по морфологическому признаку (таблица 1).

Таблица 1 – Классификации повреждений периферических нервов

Seddon 1943	Sunderland 1978	Mackinnon 1988	Патология	Хирургическое лечение	Прогноз
Невропраксия	I степень	I степень	Аксон не поврежден. Возможна локальная демиелинизация	Не требуется	Полное восстановление в течение нескольких суток - 3 мес.
Аксонотмезис	II степень	II степень	Аксон поврежден. Эндоневрий, периневрий и эпинеурий интактны	Не требуется	Полное восстановление. Медленная регенерация 2-3 см в мес.
	III степень	III степень	Аксон и эндоневрий повреждены. Периневрий и эпинеурий интактны	Не требуется. Требуется операция, если нет восстановления через 2-3 мес.	Неполное восстановление. Медленная регенерация 2-3 см в мес.
	IV степень	IV степень	Аксон, эндоневрий и периневрий повреждены. Эпинеурий интактен	Требуется операция для удаления рубцовой ткани	Восстановление только после операции
Невротмезис	V степень	V степень	Полное пересечение нерва	Требуется операция для восстановления целостности нерва	Восстановление только после операции
		VI степень	Повреждение волокон различной степени от I до V	Требуется операция	Восстановление только после операции

В классификации Григорович 1981 г. [5] выделяют четыре формы повреждения нерва: 1) полный или анатомический перерыв нервного

ствола с образованием невромы центрального конца; 2) частичный перерыв (надрыв) нервного ствола, образование краевой невромы; 3) грубый частичный анатомический перерыв нерва с образованием внутриствольной невромы; 4) субэпинеуральные внутриствольные повреждения нерва, сопровождающиеся разделением аксонов, волокон, пучков, гематомой или инородными телами, рубцовые изменения нерва на месте повреждения без образования невромы.

Исследование Seddon в 1943 г. привело к появлению классификации травм нервов, в которой выделяют на три степени: нейропраксия, аксонотмезис, нейротмезис [84]. Позже классификация была адаптирована Sunderland [95], и было выделено 5 степеней. В дальнейшем было решено включить в классификацию шестую степень, предложенную Maskinon в 1988 г. [66], при которой можно встретить сочетание любых из пяти степеней повреждения нерва [87]. Данная классификация в настоящее время является наиболее полной и рекомендуемой для использования в клинической практике.

Степень повреждения нерва определяет показания к хирургическому вмешательству. Однако только по данным клинико-неврологического обследования очень трудно отличить I, II, III, и тем более VI степень, при которой разные пучки имеют разную степень поражения; это возможно только после восстановления функции. Таким образом, затрудняется выбор тактики лечения, что, соответственно, отрицательно влияет на исходы.

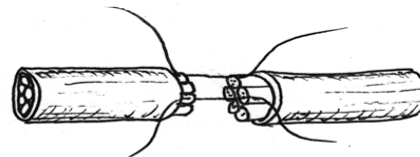
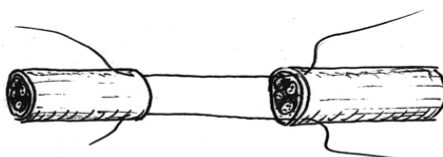
При хирургическом вмешательстве цель операции состоит в том, чтобы направить регенерацию чувствительных, двигательных и вегетативных аксонов к дистальному сегменту нерва для максимального восстановления его проводимости [66]. Павел Эгинский (625-690 гг.) был первым, кто описал соединение нервных окончаний при закрытии ран [40]. Hueter (1871 г., 1873 г.) ввел понятие первичного эпинеурального шва нерва [40]. Nelaton в 1864 году описал вторичный шов нерва [40]. В 1876

году Albert впервые в клинике выполнил трансплантацию нерва [40]. В 1876 году Despres впервые применил технику шва нерва «конец в бок» [40]. Большой объем информации о диагностике и лечении травматических повреждений нервов был получен после первой и второй мировых войн [9]. Таким образом, большинство операций на нервах было разработано в XIX веке. В настоящее время при повреждениях периферических нервов применяют: невролиз (внутренний/наружный), шов нерва «конец-в-конец» (эпинеуральный, перинеуральный, эпи – перинеуральный), аутонейропластика, селективная невротизация, шов нерва «конец – в бок», транспозиция сухожилий и мышц [10, 66–68, 85, 102, 103] (рис.2). Определение подходящего метода лечения зависит от особенностей пациента (возраст, состояние здоровья, значимость функционального дефицита), травмы (число поврежденных нервов, тип травмы) и, главным образом, от времени, прошедшего после повреждения.



НАРУЖНЫЙ НЕВРОЛИЗ

ВНУТРЕННИЙ НЕВРОЛИЗ



ЭПИНЕВРАЛЬНЫЙ ШОВ

ЭПИ-ПЕРИНЕВРАЛЬНЫЙ ШОВ



АУТОНЕЙРОПЛАСТИКА

ТРАНСПОЗИЦИЯ НЕРВА

Рисунок 2 – Типы операций при повреждении периферического нерва

При травме нерва более чем в 50% случаев требуется хирургическое вмешательство на нервах [82]. Однако существующие микрохирургические техники лечения травматических поражений периферических нервов данную проблему полностью не решают. Несмотря на все современные хирургические методы лечения, применение электростимуляции [39, 58]. и медикаментозной терапии, функциональное восстановление достигают лишь в 50% случаев [29, 82].

Степень максимального восстановления проводимости нерва и функции всего нервно-мышечного аппарата зависит не только от степени тяжести, характера, уровня повреждения стволов периферических нервов и сроков оперативного вмешательства [64]. Особый интерес представляют пациенты с закрытыми повреждениями невралных стволов, поскольку нередко в ходе оперативного вмешательства хирург сталкивается с ситуацией, когда ствол нерва оказывается анатомически сохранным, но имеется полное нарушение проводимости при его ЭНМГ-тестировании на операционном столе, тогда закономерно возникают серьёзные проблемы, связанные с объёмом и целесообразностью хирургического пособия [11, 64]. Для выбора адекватного хирургического пособия, его оптимального вида, оценки объёма оперативного вмешательства, а также для уменьшения ошибок и сокращения сроков пребывания пациентов в стационаре, необходима исчерпывающая и объективная до- и интраоперационная диагностика характера, степени и уровня поражения периферических нервов, которая нередко представляет собой сложную задачу [69].

1.2 Методы диагностики повреждений периферических нервов

Клиническое обследование пациентов позволяет выявить механизмы повреждения и степень тяжести поражения нервов. Однако в настоящее

время проведения одного клинико-неврологического обследования недостаточно. Для определения тактики лечения и определения показаний к операции необходимо применять дополнительные современные инструментальные методы исследования [3, 6, 17]. Для визуализации нервных структур применяют МРТ, КТ, рентгеновская контрастная нейрография и УЗИ. Функциональная оценка толстых миелинизированных двигательных и чувствительных нервных волокон проводят электрофизиологическими методами (ЭНМГ, ССВП, ДВП), тонких немиелинизированных вегетативных волокон – компьютерной термографией и лазерной флоуметрией. Ряд методов позволяет оценить кровоснабжение нерва (УЗИ нервов с контрастированием сосудов, лазерная доплеровская флоуметрия, компьютерная инфракрасная термография, полярографический метод).

В настоящее время при исследовании повреждений периферических нервов наибольшее значение имеют электронейромиография (ЭНМГ) и электромиография (ЭМГ). ЭНМГ позволяет определить уровень поражения (корешки спинного мозга, стволы плечевого сплетения, сегмент периферического нерва), а также степень нарушения проводимости по нервному волокну (частичное или полное нарушение). ЭНМГ позволяет решить не только ряд диагностических и прогностических вопросов, но и оценить эффективность проводимого лечения [59]. Информативность ЭНМГ при определении уровня и степени поражения периферических нервов составляет 50-84% [59, 94].

Обычная ЭНМГ не имеют информативного значения при оценке повреждения на пре- или постганглионарном уровне. Регистрация соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП) со спинного и головного мозга позволяет не только оценить степень тяжести поражения нервных стволов, но и уточнить, какая часть волокон состоит в анатомической целостности со спинным мозгом [27]. Нейрофизиологический мониторинг с регистрацией ССВП применяют для

оценки эффективности микрохирургической декомпрессии у больных с компрессионно-ишемическими нейропатиями плечевого сплетения [27].

Предоперационное электрофизиологическое обследование не всегда позволяет получить полную информацию об уровне, характере и степени тяжести повреждения периферических нервов. Интраоперационный нейромониторинг применяют во время хирургического доступа в случае выраженного рубцового перерождения тканей, когда не удастся точно идентифицировать нервный ствол [94]. Это позволяет избежать травмы нерва во время его выделения, удаления опухолей или фиксации костных отломков. Картирование нерва можно использовать при операциях по поводу травмы нерва в острой фазе для определения чувствительных и двигательных волокон [94].

Какой бы метод не применяли, интраоперационная электродиагностика в значительной степени зависит от взаимодействия между хирургом, нейрофизиологом и анестезиологом. Глубокая анестезия не позволяет записывать мышечную электрическую активность в ответ на стимуляцию периферических нервов. Уровень анестезии должен быть таким, чтобы позволить хирургу беспрепятственно работать, и, при этом, позволять вызывать и записывать потенциалы. Выбор анестетика имеет решающее значение. Галогенсодержащие анестетики и закись азота отрицательно влияют на регистрацию вызванных потенциалов [107]. Несмотря на широкое применение ЭНМГ при патологии ПНС, существует ряд технических нюансов, которые могут затруднить интерпретацию интраоперационных данных, такие как: расстояние между стимулирующим и записывающим электродами, степень контакта электрода с нервом, артериальная гипотензия, сроки травмы, температура потенциалов [107]. Для интерпретации данных ЭНМГ требуются опытные электрофизиологи, и лишь немногие нейрохирурги являются экспертами в применении интраоперационной ЭНМГ в своей практике.

Клинические и электрофизиологические методы исследования позволяют определить только степень нарушения проведения по нервному стволу, но не вид и размеры его повреждения, и степень поражения нерва (невропраксия, аксонотмезис или невротмезис). В большинстве случаев даже после выделения, визуальной оценки и пальпации нерва во время операции нельзя с полной уверенностью определить степень его повреждения [60]. Кроме того, некоторые авторы отмечают отсутствие корреляции между полученными результатами ЭНМГ и клиническими данными [59]. Даже при незначительном восстановлении проводимости можно регистрировать нормальные показатели ЭНМГ, и, наоборот, на фоне клинического функционального восстановления могут отсутствовать или быть резко сниженными электрофизиологические признаки [59]. Таким образом, предоперационное обследование необходимо дополнять визуализирующими методами исследования [6, 17, 78, 99].

Среди визуализирующих методов наибольшее распространение получила магнитно-резонансная томография (МРТ) [42, 92, 106]. Один из первых систематических обзоров литературы по использованию МРТ для оценки повреждения периферических нервов проведенный Silva с соавт. в 2022 г. подчеркивает необходимость внедрения новых методов визуализации в этой области медицинской практики [88]. В послеоперационном периоде, после восстановления нерва, МРТ все чаще используют благодаря ее преимуществам: неинвазивный метод, объективная визуализация нервных и периневральных тканей, объективная визуализация фасцикул внутри нервного ствола благодаря высокому разрешению. МРТ, возможно, является наиболее универсальным методом клинической визуализации мягких тканей, хотя и самым дорогим. Он чувствителен к протонному составу различных тканей и к изменениям межтканевой жидкости, что может быть полезно при оценке отека нерва на фоне острого повреждения. Магнитно-резонансная нейрография 7Т становится клинически доступной и может улучшить визуализацию

периферических нервов. В ранних исследованиях было показано, что МРТ 7Т лучше отображает фасцикулярную структуру, чем сопоставимые 3Т изображения [108]. Методы МРТ, такие как микронейрография, DTI и DWI, являются многообещающими методиками в визуализации повреждений нервов [79].

Преимуществом МРТ является неинвазивность исследования и отсутствие лучевой нагрузки, а недостатком - невозможность ее выполнения при наличии у больных внутренних и наружных металлоконструкций. МРТ продемонстрировала несомненные преимущества перед КТ-исследованием. МРТ позволяет дифференцировать полный разрыв нерва от контузионного повреждения, обнаружить место расположения внутривольных повреждений и образований, дегенеративных изменений, визуализировать передние и задние корешки спинного мозга, локализовать их по сегментам, выявить частичный и полный отрыв [88]. Исследование корешков спинного мозга и стволов плечевого сплетения возможно при мощности МР - томографа не менее 1,5Т. Для диагностики повреждений периферических нервов в дистальных отделах рекомендованы томографы мощностью 3Т [88, 106].

Несмотря на высокую контрастность мягких тканей и возможность оценки в разных плоскостях, МРТ имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является незначительное различие при визуализации между стволом нерва и окружающими тканями. Кроме того, из-за более низкого пространственного разрешения при данном методе практически невозможно исследование дистальных ветвей нервов малого диаметра, внутривольной структуры нерва и небольших изменений ствола нерва (частичный перерыв, повреждение контура). При МРТ затруднительно детализировать небольшие структурные изменения, что не позволяет исследовать процессы восстановления нерва (Zaidman et al., 2013; Чуловская, 2012).

При тракционном повреждении плечевого сплетения до сих пор не потеряла своей диагностической значимости миелография. Ряд авторов исследовали применение искусственного контрастирования нервного ствола на протяжении неионными водорастворимыми рентгеноконтрастными препаратами при патологии периферической нервной системы [6]. Однако необходимость введения контрастного вещества в эпинеуральное пространство и лучевая нагрузка на больного сдерживает широкое применение данной технологии. Нашли свое применение и методы КТ-миелографии [76]. При повреждении стволов плечевого сплетения данные компьютерной миелографии совпадают с находками во время операции в 85% случаев [43]. Главными недостатками КТ – миелографии являются: инвазивность исследования из-за пункции субарахноидального пространства и введения контрастного вещества; нечеткость визуализации сегмента С8-Т1 из-за помех, вызванных «фоном» плечевых суставов; лучевая нагрузка. КТ-миелография не позволяет определить протяженность внутривольных изменений нервных стволов при анатомически целом нерве, что часто наблюдают при закрытых травмах периферических нервов.

1.3 УЗИ при травме периферических нервов

В последние годы технологический прогресс в программном и аппаратном обеспечении ультразвукового оборудования для клинического использования был чрезвычайно высоким. Проведенные исследования показали высокую чувствительность УЗИ и даже определенные преимущества перед ЭНМГ и МРТ в диагностике патологии периферических нервов [54, 83]. Нами был проведен поиск статей в базах Web of Science, Google Scholar, PubMed и Elibrary за все года до 2022 г. включительно. В обзор включены все статьи вне зависимости от страны публикации и языка. Следующие ключевые слова использовали при

поиске: ((ultrasound or sonography) and (neuropathy or injuries) and (peripheral nerve)), ((ультрасонография или УЗИ) и (нейропатия или повреждение) и (периферический нерв)). Из более чем 7500 абстрактов на английском языке и 3900 на русском, нам удалось найти 115 работ, посвященных УЗИ при посттравматической нейропатии. Из них только 40 статей с описанием серии случаев или ретроспективных/проспективных исследований применения УЗИ при травме периферических нервов вошли в дальнейший анализ. Стоит обратить внимание, что 70% исследований (28/40) опубликовано после 2010 г. Это, вероятно, связано со стремительным развитием и внедрением ультрасонографии нервов в последние годы.

Применение УЗИ в медицине началось с 1940-х годов, однако, из-за недостаточного разрешения изображения и трудности разграничения нервов и окружающих тканей, УЗИ не применяли для оценки периферических нервов до 1980-х годов. Первым упоминанием УЗИ периферических нервов считается статья Solbiati с соавт. 1985 г., в которой они применили УЗИ для оценки возвратного гортанного нерва при опухолях щитовидной и паращитовидной желез [93]. Исследование, проведенное Fornage с соавт. впервые систематизировало ЭХО-признаки периферических нервов в норме и при патологии. Показано, что в норме нервы имеют эхогенную фибриллярную структуру, тогда как при различных патологических состояниях отмечают усиление гипоэхогенного компонента и утолщение нерва [50]. Silvestri с соавт. при сравнении УЗИ и данных гистологического исследования доказали, что гипоэхогенные участки соответствуют пучкам нейронов, и именно чередование гиперэхогенных и гипоэхогенных участков является необходимым паттерном для дифференциации нервов от окружающих сухожилий [89]. Первый отчет о применении УЗИ периферических нервов для диагностики синдрома запястного канала был опубликован в 1991 г. [36]. С тех пор разные исследователи подтвердили высокий потенциал УЗИ для

визуализации в нейротравматологии, онкологии, травматической и компрессионной нейропатии, при этом УЗИ оказалось надёжным, практичным и легко доступным предоперационным методом диагностики. Бум применения УЗИ для оценки нервов начался 10-15 лет назад на фоне появления высокочастотных датчиков, позволяющих получать изображение высокого разрешения. История применения УЗИ при травматическом повреждении периферических нервов отражена в таблице 11 (ПРИЛОЖЕНИЕ А), где мы представили найденные нами основные исследования посвященные этой теме.

В настоящее время достаточно подробно описана эхогенная структура периферических нервов конечностей в норме (рис.3) и при различной патологии [12, 23, 26, 81]. Оценивают утолщение эпинеурия в хронической фазе патологии периферических нервов вследствие фиброзной инволюции. Одним из наиболее ценных измерений при ультрасононейрографии является оценка площади поперечного сечения нерва (CSA - cross-sectional area). В настоящее время референтные значения CSA доступны для большинства нервов [48, 49, 90, 91]. Оценивают очаговую и диффузную эхогенность нерва.

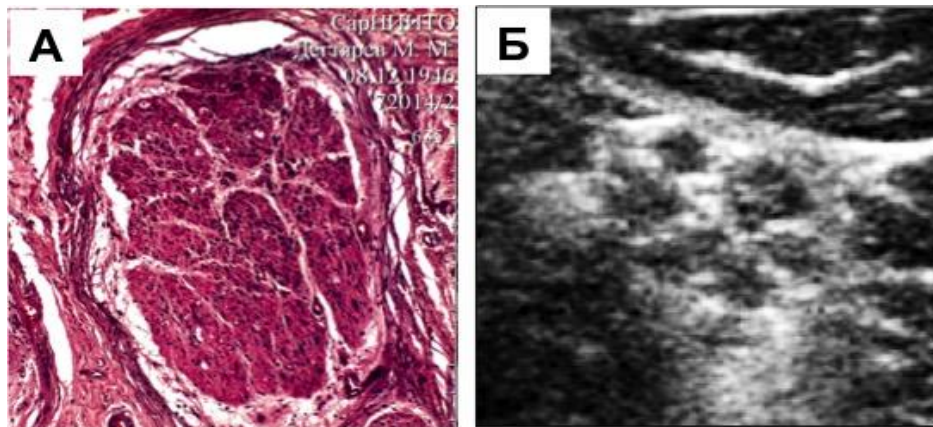


Рисунок 3 - Гистологический препарат нерва в норме – А (окраска по Mallory-Cason); поперечный срез нерва при ультрасонографии в норме – Б (собственные данные)

В острой фазе патологии периферических нервов отмечают гипозэхогенность вследствие эндоневрального отека нерв, и, наоборот, гиперэхогенность в хронической фазе вследствие эндоневрального

фиброза. Возможно определение количества и плотности пучков в нерве, что позволяет перевести визуализацию с чисто описательного уровня на количественный [55]. Определение так называемого фасцикулярного соотношения (FR- fascicular ratio) позволяет отличить воспалительные, опухолевые или компрессионные невропатии. Уменьшение количества пучков наблюдают в хронической фазе патологии периферических нервов за счет частичного замещения соединительной тканью. В острой фазе патологии выявляют увеличение размера пучков вследствие эндоневрального отека. УЗИ высокого разрешения позволяет оценить микроциркуляцию нерва. В острую фазу повреждения отмечают снижение интраневральной васкуляризации из-за сдавления капилляров на фоне отека нерва и компенсаторная дилатация эпиневральных сосудов. В хронической фазе отмечают усиление интра и экстраневральной васкуляризации из-за эндотелиальной гиперплазии и дилатации сосудов.

При предоперационном планировании УЗИ позволяет выявлять и маркировать (гибкая проволочная игла) локализацию дистальных ветвей, и проксимальной культы нерва, и минимизировать диссекцию тканей при доступе [41]. После повреждения периферических нервов у 10% пациентов развивается инвалидизирующая болезненная неврома [65]. УЗИ помогает обнаружить посттравматические и послеоперационные невромы [18], в том числе очень маленькие (например, невромы дистальных пальцевых чувствительных нервов с площадью поперечного сечения 2 мм²). УЗИ позволяет выявить повреждения стволов плечевого сплетения [17, 63], седалищного и бедренного нервов, в том числе и ретроперитонеально [34]. УЗИ даёт возможность определить характер травмы нервов при переломах трубчатых костей и повреждении суставов, перерыв либо сдавление их костными отломками, дислокация нерва и вовлечение нерва в костную мозоль [35, 47]. Во время предоперационного обследования можно одновременно оценить нерв, который может быть использован для потенциального трансплантата, и проверить его на наличие возможных

бессимптомных патологий, таких как доброкачественные пролиферативные поражения или анатомические варианты.

УЗИ помогает в оценке тандемных и многоуровневых поражений нервов, а также в случаях невозможности по каким-либо причинам проведения электрофизиологических методов исследования [26, 74, 99]. По данным исследования Тоia с соавт. 2016 УЗИ показало вспомогательную роль в диагностике и определении хирургической тактики в 53,8% случаев поражения периферической нервной системы. Этот показатель был выше при опухолях (100%) и посттравматических или послеоперационных невропатиях (72,2%). В 16% случаев УЗИ не только способствовало, но и имело ключевую диагностическую роль при наличии сомнительных данных ЭНМГ [99].

В настоящее время технические возможности УЗИ позволяют установить характер повреждения нерва: полный (невротмезис) и/или неполный перерыв нерва (нейропраксия или аксонотмезис), наличие и расположение проксимальной и дистальной культы нерва, отёк аксонов, наличие рубцового процесса (фиброза), гематомы и инородного тела, наличие невромы [3, 44, 74, 97]. Предоперационное УЗИ помогает в определении изменений в структуре нерва и локализации перерыва, в выборе наиболее подходящей тактики лечения и, тем самым, приводит к улучшению результатов операций. Чувствительность предоперационного УЗИ при травме периферического нерва по данным разных авторов составляет 76 - 96,7%, а специфичность – 50-99,5% [8, 23, 26, 44] (таблица 2).

Таблица 2 – Чувствительность, специфичность и точность УЗИ при повреждении периферических нервов

Автор, год	Чувствительность	Специфичность	Точность
Миронов, 2004 [17]	нд	нд	100%
Салтыкова, 2011 [23]	96,7%	99,5	99,3%
Чуловская, 2012 [26]	89,8-96,7%	95,2-99,3	нд
Tang, 2012 [97]	нд	нд	92,3%

Zaidman, 2013 [109]	93%	нд	нд
Меркулов, 2014 [16]	93,6%	100	95,7%
Tagliafico, 2014 (МРТ и УЗИ) [96]	76%	96%:	нд
Малецкий, 2015 [15]	97%	80%	89%
Aggarwal, 2017 [30]	81,2%	нд	нд
Журбин, 2019 [8]	93,6%	68,2%	86,4%
Мажорова, 2020 [14]	100%	99%	нд
Endo, 2021 [44]	96,4%	50%	88,2%
Наше исследование, 2023	90%	95%	96%

Чувствительность УЗИ при выявлении инородных тел и диагностики невром составила 100% и 77,8%, соответственно [32]. Салтыкова В. Г. в ретроспективном исследовании 885 пациентов показала, что УЗИ при травматических повреждениях, компрессионных невропатиях и опухолях является высокоинформативным методом для диагностики поражения сплетений и периферических нервов. При этом чувствительность метода составила 96,7%, специфичность – 99,5% [23]. Меркулов М. В. в ретроспективном исследовании с участием 62 пациентов с травматическим поражением периферических нервов также выявил высокую чувствительность и специфичность УЗИ, 93,6% и 100%, соответственно [16]. По данным Чуловской И. Г. чувствительность и специфичность предоперационного УЗИ при повреждениях и заболеваниях периферических нервов верхних конечностей составила 89,8-96,7% и 95,2-99,3%, соответственно [26].

Общая информативность ультразвукового метода в выявлении повреждений периферических нервов конечностей составляет более 80%, что позволяет рассматривать его как ведущий метод в диагностике данной патологии [8]. Однако ряд авторов отмечает расхождение данных дооперационного УЗИ с находками на операционном столе в 6-10% случаев [1, 51]. Это обусловлено различными причинами, а именно тем, что: 1) высокочастотный ультразвук сильно рассеивается по мере проникновения в ткани (для 20 МГц глубина проникновения составляет 1,2 см), что ограничивает исследование глубоко расположенных нервов

(например, седалищный нерв); и 2) рассеяние или поглощение ультразвука из-за посттравматических изменений мягких тканей (периневральный отек, рубцовое изменение тканей или инородные тела) может препятствовать предоперационной оценке и не позволяет получить полноценную информацию [105].

Вышеописанные недостатки можно устранить применяя УЗИ интраоперационно [100]. Интраоперационное применение УЗИ при травме периферических нервов описано лишь в нескольких работах [20, 32, 33, 37, 60–62]. Проведенные исследования показали, что на открытом нерве можно с большей степенью точности оценить степень внутривольного поражения нерва, более чётко дифференцировать интактные пучки от невромы и судить о регенеративном потенциале [60, 62]. Koenig R.W. с соавторами и Lee F.C. с соавторами, одновременно в 2011 г. опубликовали результаты интраоперационного ультразвукового сканирования и независимо друг от друга убедительно доказали, что на открытом нерве с большей точностью можно определить степень внутривольного поражения нерва, более чётко дифференцировать интактные пучки от невромы и судить о регенеративном потенциале. Интраоперационное УЗИ коррелирует с гистологической картиной нерва. Применение УЗИ во время операции может значительно помочь в определении протяженности невролиза, резекции и трансплантации и является важным дополнением для принятия интраоперационных решений [20, 37]. Использование интраоперационной ультразвуковой навигации позволят точно планировать доступ к новообразованию и контролировать радикальность удаления опухоли [22]. Кроме того, УЗИ позволяет контролировать процесс регенерации нерва в послеоперационном периоде [12, 21] и выявлять ранние осложнения хирургического лечения [46].

Проведено несколько исследований сравнивающих результаты МРТ и УЗИ при патологии периферических нервов. Выявлена высокая чувствительность УЗИ, сопоставимая с МРТ 3Т, 81% и 95%,

соответственно [15, 30]. И даже большая чувствительность УЗИ при сравнении с МРТ 1,5 Т, 93% и 67%, соответственно [109]. По сравнению с МРТ УЗИ дает изображения более высокого пространственного разрешения. Аксиальное разрешение при применении датчика 10 МГц составляет примерно 150 мкм, а для 20 МГц – до 75 мкм [70]. Для сравнения, приблизительное разрешение МРТ 1,5 Т составляет 450 мкм. Как правило, при УЗИ нервов следует использовать датчики с самой высокой доступной частотой. Однако, чем выше частота, тем меньшую глубину проникновения в мягкие ткани можно достичь. Для исследования поверхностных нервов (например, поверхностного лучевого и срединного нерва) рекомендуют частоты до 18 МГц, тогда как для глубоко расположенных нервов, таких как седалищный нерв, требуются датчики с частотой 10–12 МГц. УЗИ обеспечивает качественное динамическое изображение в пространстве, является неинвазивным интерактивным обследованием, позволяющим проводить исследования в зоне локализации боли и повышенной чувствительности, а также области предполагаемого повреждения. При УЗИ возможно выполнение функциональных проб и изучение структурных изменений в динамике. Наконец, во время ультразвукового исследования отсутствуют отрицательные моменты, связанные с необходимостью находиться в замкнутом пространстве, как при МРТ обследовании, а также испытывать болезненные ощущения, присущие инвазивным методам диагностики [30].

Одним из недостатков методов УЗИ является необходимость в квалифицированном операторе, что может существенно повлиять на качество и точность изображения [73]. Другие недостатки включают сниженную глубину поля зрения и артефакты от окружающих структур. Ряд авторов отмечает расхождение данных дооперационного УЗИ с находками на операционном столе в 6-10% случаев [1, 23, 51]. Это обусловлено различными причинами: 1) высокочастотный ультразвук сильно рассеивается по мере проникновения в ткани (для 20 МГц глубина

проникновения составляет 1,2 см), что ограничивает исследование глубоко расположенных нервов (например, седалищный нерв); 2) рассеяние или поглощение ультразвука из-за посттравматических изменений мягких тканей (периневральный отек, рубцовое изменение тканей или инородные тела) может препятствовать предоперационной оценке и не позволяет получить полноценную информацию [105]. Вышеописанные недостатки полностью устраняют при использовании УЗИ интраоперационно [60, 100]. Еще одним важным преимуществом УЗИ является высокая скорость, низкая цена и легкая воспроизводимость исследования, особенно при оценке нерва по всей длине конечности. Для пациентов с противопоказаниями к МРТ (наличие кардиостимулятора) УЗИ идеально подходит, поскольку противопоказаний к его применению практически нет. УЗИ также подходит для пациентов, страдающих клаустрофобией, которые могут не переносить МРТ (таблица 3).

Таблица 3 – Преимущества и ограничения МРТ и УЗИ периферических нервов

	МРТ	УЗИ
ПРЕИМУЩЕСТВА	<ul style="list-style-type: none"> • Объективная оценка, меньшая зависимость от оператора • Простая интерпретация результатов • Более высокое контрастное разрешение • Оценка глубоко расположенных нервов • Возможность обработки изображений (объемная 3D визуализация, трактография) • Дополнительная информация об анатомии конечности и повреждении костей • Чувствителен к изменениям межтканевой жидкости • Оценка косвенных признаков денервации мышц (отек или жировая атрофия) 	<ul style="list-style-type: none"> • Недорогой и доступный метод • Быстрое исследование по всей длине нерва • Сравнение с контралатеральной стороной • Оценка мелких ветвей нервов • Оценка кровотока при доплерографии • Контроль манипуляций рядом с нервом • Более высокое пространственное разрешение • Интраоперационное применение • Нет противопоказаний • Визуализация и при наличии металлических, костных или хирургических обломков • Динамическая оценка.

НЕДОСТАТКИ	<ul style="list-style-type: none"> • Противопоказано при наличии металла в ране • Более низкое пространственное разрешение • Ограничение при клаустрофобии и кардиостимуляторе • Артефакт «магического угла» • Дорогой, менее доступный и более длительный метод • Статическое изображение • Артефакты от металлических имплантатов 	<ul style="list-style-type: none"> • Операторзависимый метод и требует времени для обучения • Анизотропия при исследовании по длинной оси может привести к ошибкам интерпретации • Меньшая чувствительность к изменениям межтканевой жидкости • Плохое контрастное разрешение • Меньшая глубина поля зрения, затруднена оценка глубоко расположенных нервов при ожирении
-------------------	--	---

Таким образом, лечение травмы периферических нервов сохраняет свою актуальность, и результаты хирургии не всегда дают положительные результаты. Одним из основных факторов в определении оптимальной тактики лечения является точная диагностика. УЗИ нервов является важным инструментом в диагностике и определении тактики лечения при повреждениях периферических нервов, с высокой чувствительностью и специфичностью. УЗИ обладает рядом преимуществ перед другими методами (ЭНМГ, МРТ). Применение УЗИ позволяет определить локализацию невринома, оценить степень поражения нерва, ограничить объем диссекции, найти проксимальный отдел поврежденного нерва, и, соответственно, выполнить операцию более быстро и менее инвазивно. Интраоперационное УЗИ высокого разрешения, учитывая дальнейший технический прогресс, обладает большим клиническим потенциалом. Недостаточный клинический опыт применения интраоперационного УЗИ нервов в России и за рубежом требует дальнейших исследований в этой области.

Глава 2

Материалы и методы исследования

2.1 Дизайн проведённого исследования

В отделении нейрохирургии ФГБУ «СарНИИТО» Минздрава РФ с 2010 по 2020 г. обследовано и пролечено более 200 пациентов с повреждением периферических нервов конечностей. В настоящее исследование вошло 109 пациентов. До 2016 г. хирургическую тактику основывали на разработанном в отделении алгоритме диагностики и лечения, включающим в себя стандартные методы диагностики (клиническое обследование, дооперационное и интраоперационное электрофизиологическое исследование (ЭМГ и ЭНМГ) и интраоперационная рентгеновская нейрография) [7]. Начиная с 2017 г. в алгоритм обследования у ряда пациентов (65 пациентов) было добавлено дооперационное и интраоперационное ультразвуковое исследование нервов (проспективная группа).

Для оценки эффективности тактики хирургического лечения пациентов с повреждением периферических нервов, основанной на новом алгоритме комплексной диагностики, проведено одноцентровое ретроспективное нерандомизированное открытое контролируемое клиническое исследование. Проведен анализ результатов лечения пациентов со стандартным алгоритмом, включающим ЭНМГ и нейрографию (**1 группа**), и пациентов с новым алгоритмом диагностики, включающим, помимо ЭНМГ и нейрографии, дооперационное и интраоперационное УЗИ (**2 группа**). Дизайн исследования с критериями включения, невключения и исключения представлен на рис.4.



Рисунок 4 - Дизайн проведенного исследования

В ходе подготовки к проведению данной научно-исследовательской работы проведён ретроспективный анализ 100 историй болезни больных с травматическими повреждениями периферических нервов, у которых применяли электронейромиографию до и во время операции, а также интраоперационную контрастную нейрографию. В результате были отобраны истории болезни 58 (1 группа) пациентов с травмой периферических нервов, которые по возрастному составу и полу, а также локализации и тяжести повреждения нервных стволов, были идентичны проспективной группе (2 группа). Критериями включения в исследование были: наличие травмы периферического нерва верхней или нижней конечности, вне зависимости от степени повреждения нерва; срок травмы более 1 мес.; наличие до- и интраоперационных данных ЭНМГ, рентгенконтрастной нейрографии и данных УЗИ (для 2 группы). Критериями не включения были: возраст менее 14 лет; пациенты после

ампутации конечности; пациенты с множественными поражениями нервов; пациенты без операции. Из исследования исключены ранее включенные пациенты при отсутствии хотя бы одного осмотра и контрольной ЭНМГ в послеоперационном периоде (в течение 3-24 мес. после операции) и пациенты выбывшие из исследования по различным причинам (неявка на контрольный осмотр, смерть и т.д.). В группу 2 в течение 2017-2019 г. из 65 пациентов были отобраны 51 пациент по соответствующим критериям включения и исключения из исследования.

Для оценки информативности и точности интраоперационного ультразвукового исследования нерва проведен расчет чувствительности и специфичности метода в сравнении с ЭНМГ и нейрографией в группе 2 (51 пациент).

2.2 Методы обследования пациентов

Обследование пациентов включало сбор анамнеза, физикальное обследование. Из инструментальных методов диагностики использовали: электрофизиологические (электромиография и электронейромиография). Для уточнения характера и степени поражения периферических нервов применяли дополнительные методы обследования: рентгенологическое обследование (обзорная рентгенография, интраоперационная нейрография), КТ, МРТ, УЗИ, гистоморфологическое исследование.

Клинико-неврологическое обследование

Для оценки характера расстройств чувствительности, степени и глубины двигательных и трофических нарушений применяли широко распространённую балльную систему, принятую Британским Медицинским Советом (MRC - Britain's Medical Research Council), модифицированную и усовершенствованную в Российском нейрохирургическом институте им. А. Л. Поленова [5]. Она представляет собой балльную градацию движений от 0 баллов - отсутствия сокращений (паралич) до наличия нормальной силы мышц (5 баллов). Нарушения

чувствительности градируют от анестезии (0 баллов) до нормальной чувствительности (5 баллов) (таблица 4). Данная система оценки позволила унифицировать данные для изучения непосредственных и отдаленных результатов лечения. Клинико-неврологический осмотр проводился до операции и после через 3-12 мес. после операции.

Таблица 4 – Модифицированная классификация двигательных и чувствительных нарушений [5]

Степень нарушения		Клинико-неврологические критерии
двигательные нарушения	M0	отсутствие мышечных сокращений
	M1	появление едва заметных мышечных сокращений (при повреждении нервов в проксимальных отделах конечности - восстановление способности сокращений в проксимальной мышечной группе)
	M2	отчетливое сокращение мышц без движений в суставах (появление активных мышечных сокращений как в проксимальной, так и в дистальной мышечной группе, в случае травмы нерва в проксимальных отделах конечности)
	M3	слабые движения с преодолением тяжести конечности
	M4	движения с преодолением легкого сопротивления (состояние тоже, что и M3, но с восстановлением изолированных и синергичных движений)
	M5	полное восстановление силы и движений
чувствительные нарушения	Ч0	полное отсутствие чувствительности
	Ч1	наличие только глубокой болевой чувствительности в автономной зоне
	Ч2	наличие тактильной и поверхностной болевой чувствительности до степени гиперпатии в автономной зоне
	Ч3	наличие болевой и тактильной чувствительности во всей автономной зоне до степени Ч2 с лёгкой гиперпатией
	Ч4	наличие почти полной болевой и тактильной чувствительности во всей автономной зоне с отсутствием гиперпатии, элементы восстановления дискриминационной чувствительности
	Ч5	нормальная тактильная и дискриминационная чувствительность

Также исследовали тактильную, болевую и температурную чувствительность. Трофические нарушения оценивали по наличию язв, изменению цвета и влажности кожных покровов. Определяли наличие или отсутствие атрофии мышц (рис.5).



Рисунок 5 – Трофические нарушения (мацерация кожи пальцев) пораженной конечности

Электрофизиологическое исследование

Электронейромиографические и электромиографические исследования были выполнены на электромиографе «Keypoint» рег. удостоверение МЗ РФ № ФЗС 2009/04288 от 13.05.2009 у всех (n=109) пациентов в дооперационном, интраоперационном периодах и в разные сроки после операции: 3-6 мес., 6-12 мес., 1-2 года. При ЭНМГ и ЭМГ изучали показатели амплитуды М-ответа, скорости проведения импульса по эфферентным (СПИэфф.) и афферентным (СПИафф.) волокнам ствола нерва, параметров потенциала действия двигательных единиц (ПДДЕ), а также наличие либо отсутствие потенциала фибрилляций (ПФ), позитивно острых волн (ПОВ). В отдельных случаях производили регистрацию Н-рефлекса и F-волны. Динамика выраженности и формы спонтанной активности, параметров ПДДЕ позволяла проследить за стадиями денервационно-реиннервационных процессов в мышце. Результаты ЭНМГ были унифицированы по степени снижения амплитуды М-ответа: 1 степень – снижение на 25-50%, 2 степень – 50-75%, 3 степень – более 75% [19].

При интраоперационном исследовании ЭНМГ стимулирующие электроды накладывали непосредственно на выделенный нерв, а

отводящие - на двигательной точке соответствующей мышцы или в зоне проекции нервов. С срединного нерва электрическую активность регистрировали от *m. abductor pollicis brevis*, с локтевого нерва – первой *m. dorsal interosseous*, с лучевого – *m. extensor pollicis brevis* и *m. abductor pollicis longus*. Нейрофизиолог контролировал нервную проводимость и активность мышц во время выделения нерва, что особенно важно при выраженном рубцовом изменении тканей. Используя усиление от 10 до 100 мкВ, через стимулирующие электроды подавали электрические импульсы длительностью 0,2-0,5 мс с частотой 1 Гц. Амплитуду стимулирующего тока плавно увеличивали до появления вызванного ответа мышцы или нерва. Полное нарушение проводимости по нерву регистрировали в том случае, если при амплитуде стимулирующего тока 50 мА и выше отмечали отсутствии М-ответа с мышцы иннервируемой этим нервом.

Рентгенологическое обследование

Рентгенологическое обследование применяли в случаях сочетания повреждения периферических нервов конечностей с переломами костей конечностей (7%, 8/109) и при интраоперационном контрастировании нервного ствола (100%, 109 пациентов) во время операции. В исследуемой группе пациентов повреждение лучевого нерва возникало при переломах плечевой кости в дистальной трети, локтевого нерва при переломах локтевой кости в проксимальной трети или вывихах костей предплечья, малоберцового нерва при переломах головки и шейки малоберцовой кости. Всем больным, у которых причиной повреждений нервов был перелом или вывих, проводили рентгенографию соответствующего сегмента конечности.

Контрастную рентгеновскую нейрографию выполняли по ранее описанной методике [7]. Применяли цифровой рентгеновский аппарат фирмы «Arelem» DX90; мобильную цифровую рентгенохирургическую установку ОЕС 9800 Plus; рентгеновскую пленку фирмы «Kodak» (рис.6)



Рисунок 6 – Интраоперационная рентгеноконтрастная нейрография.
 а) фото интраоперационного введения контрастного препарата под эпиневррий, б) рентгеновский снимок контрастированного нерва, в) фото интраоперационного использования мобильной рентгеновской установки

Контрастирование повреждённых нервных стволов производили путём введения под эпиневррий нерва неионного водорастворимого контраста «Омнипак-300», который предварительно разводили физиологическим раствором до 50% концентрации. Контраст вводили под эпиневррий порциями (по 0,3-0,5 мл в зависимости от толщины нерва) до стойкого увеличения диаметра ствола нервного проводника в 1,5-2 раза по сравнению с исходным его размером. Порционное введение контраста позволяло избежать разрыва эпиневрия, а увеличение диаметра нерва в 1,5-2 раза обеспечивало тугое заполнение эпиневральной трубки, что создавало условия для лучшей визуализации нерва на рентгенограмме. Рентгенографию производили через 4-6 мин после введения последней дозы контраста. Такая экспозиция была необходима для более равномерного распределения контраста под эпиневрием. Контрастная нейрография позволяла уточнить характер и протяжённость повреждения ствола нерва. На рентгенограмме неповреждённый ствол нерва

контуривали в виде светлой полосы или тяжа с ровными очертаниями. При свежем повреждении нерва на рентгенограмме определяли обрыв так называемого тяжа на уровне травмы, отмечали затекание контрастного вещества в подлежащие мягкие ткани. При застарелых повреждениях нервных стволов с течением времени концы прерванного нерва «замуровываются» в подлежащих рубцовых тканях. В клинической практике рентгенологическая картина характеризовалась остановкой контрастного вещества при его введении под эпинеурей вследствие рубцового сдавления нервного ствола извне или рубцовым перерождением нервной трубки дистальнее места травмы и точно указывало место травмы. В ходе исследования, полученные рентгенографические данные, были описаны как перерыв столба контрастного вещества (обрыв столба контраста, обрыв столба контраста с «булавовидным» утолщением), дефект столба контрастного вещества (краевой дефект, внутривольный дефект, перерыв столба контраста), сужение столба контрастного вещества (локальное сужение, конусообразное сужение, истончение столба контраста).

Компьютерная и магнитно-резонансная томография

Компьютерная и магнитно-резонансная томография (КТ и МРТ) в определенных случаях может существенно расширить диагностические возможности при травме периферических нервов. В нашем исследовании КТ и/или МРТ выполнены всего у 4% (5/109) больных с повреждением проксимальной части срединного нерва. Компьютерно-томографическое обследование проводили на томографе MX 8000E XP Dual «Philips» у ряда пациентов после остеосинтеза плечевой кости. Магнитно-резонансная томографию (МРТ) осуществляли на аппарате «Siemens Magnetom Expert» 1,5 Т. Исследования выполняли в T1 и T2 режимах. Срезы делали шагом в 2 мм. Нейровизуализацию нервных стволов осуществляли в аксиальной и фронтальной плоскостях.

Гистоморфологическое исследование

Гистоморфологическое исследование проводили в случае резекции участка нерва в отделении лабораторной диагностики. Гистоморфологическими признаками невромы было: наличие участков гиперплазированных и гипертрофированных нервных волокон, переплетающихся между собой; дистрофические изменения вплоть до некроза единичных нервных волокон; отек окружающих мягких тканей между волокнами и отек эпинеурия; склерозированные сосуды (рис.7).

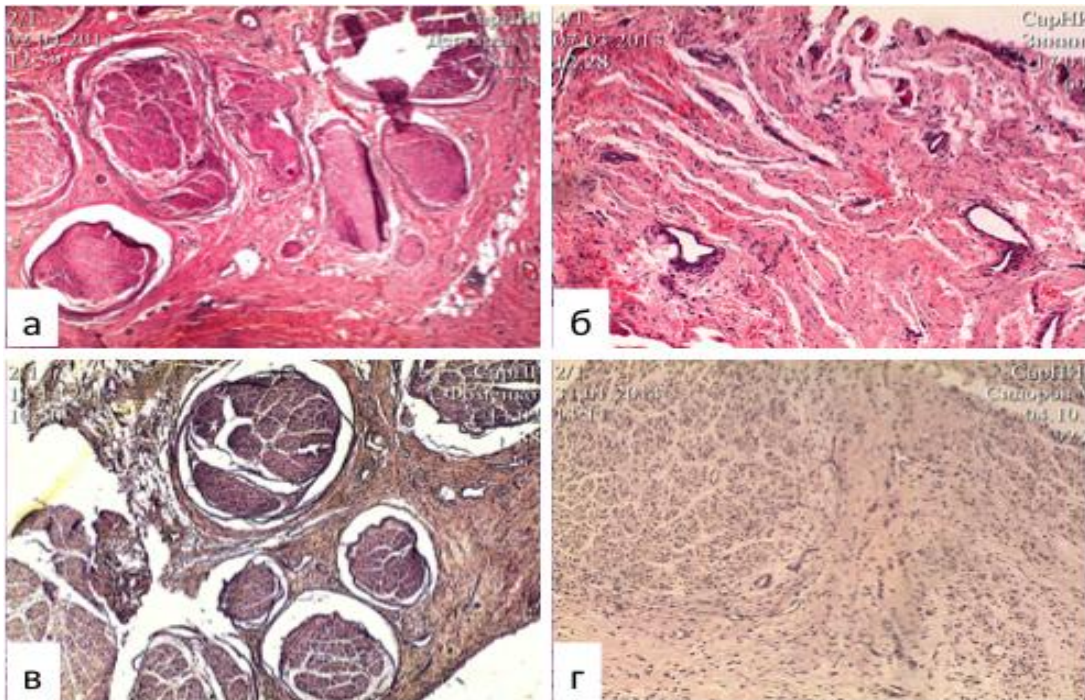


Рисунок 7 – Гистоморфологическое исследование удаленного участка нерва. Признаки гиперрегенерации нерва (неврома). **а)** Участки гиперплазированных и гипертрофированных нервных волоконцев, переплетающихся между собой. Окружающие мягкие ткани с умеренным отеком и склерозированными сосудами (окраска: гематоксилин-эозин). **б)** Мелкие нервные волокна и единичные инкапсулированные тактильные тельца, располагающиеся среди фиброзной ткани с очагами кровоизлияний (окраска: гематоксилин-эозин). **в)** Среди полнокровной фиброзной и жировой тканей имеются множественные различного диаметра нервные волокна с выраженным отеком между волокнами и отеком эпинеурия (окраска: осмирование). **г)** Гиперплазированные и гипертрофированные нервные волокна с наличием единичных лимфоцитарных инфильтратов (окраска: азотнокислое серебро)

2.3 Ультразвуковое исследование периферических нервов

УЗИ повреждённых периферических нервов конечностей было выполнено у 100% (51) пациентов 2 группы в дооперационном и интраоперационном периоде. Исследование проводили на аппарате «Sonoace R3» фирмы «Medison». Использовали широкополосый линейный датчик с частотой сканирования 5–15 МГц и конвексный датчик с частотой 2,0–5,0 МГц. Проводили визуализацию в В-режиме, цветное и энергетическое доплеровское картирование, доплерография, панорамное сканирование. Использование датчиков определенной частоты меняли в зависимости от конституции пациента и глубины расположения исследуемого нерва. Поверхностно расположенные нервы исследовали датчиком более высокой частоты сканирования. Расположение датчиков при УЗИ периферических нервов представлено на рисунках 8 и 9.

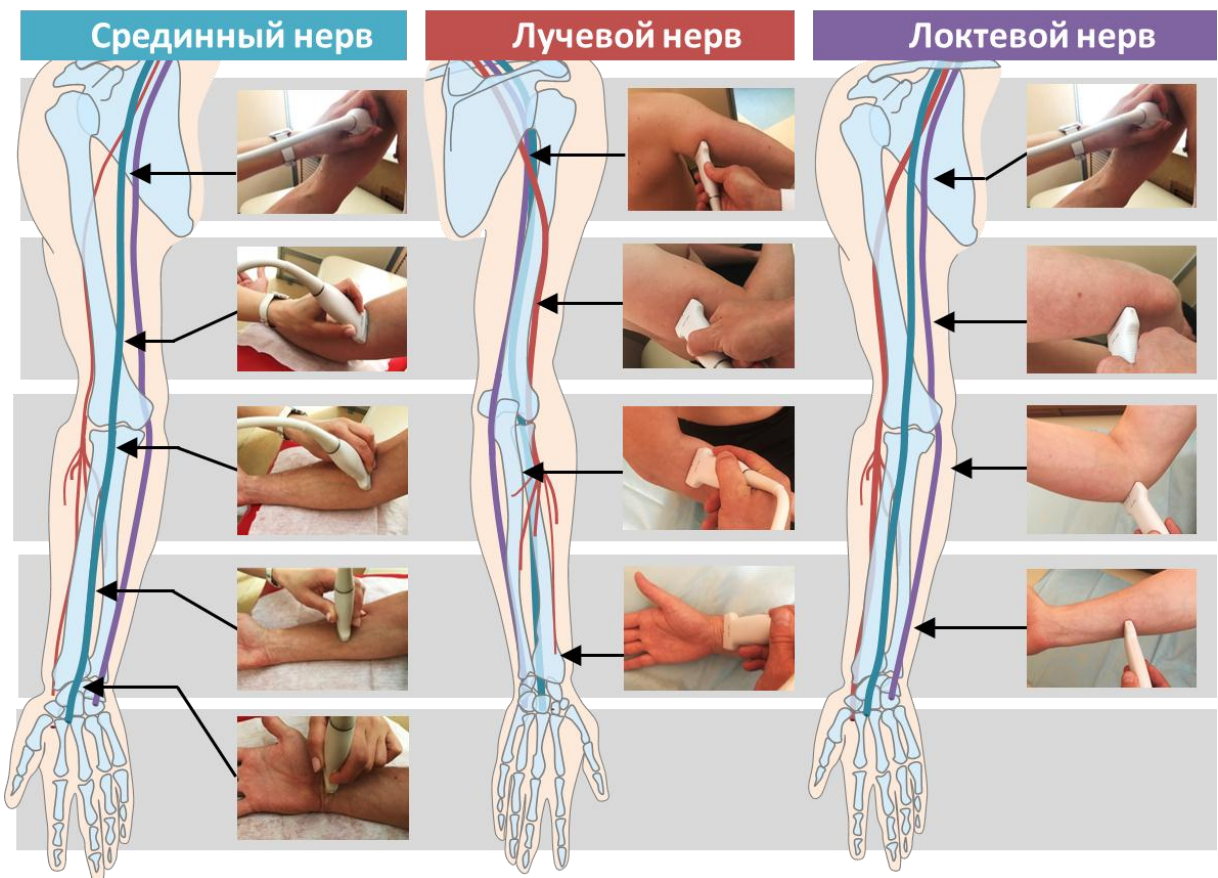


Рисунок 8 – Схема топографии периферических нервов верхней конечности и фото расположения датчика УЗИ

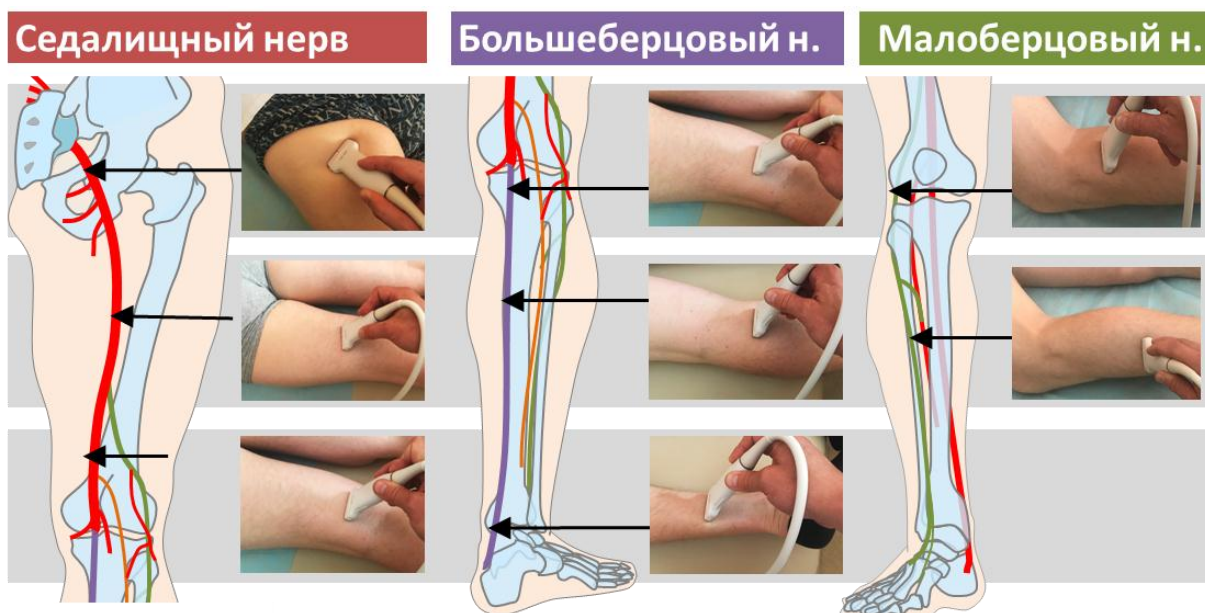


Рисунок 9 – Схема топографии периферических нервов нижней конечности и фото расположения датчика УЗИ

Ультразвуковое исследование включало поперечное и продольное сканирование. В В-режиме проводили оценку нерва: контуры, размеры, форма, эхоструктура. Эхогенность нерва оценивали путем его сопоставления с тканью сухожилий и неизмененных отделов исследуемого нерва или нервов на здоровой конечности. В режиме цветового и энергетического доплеровского картирования определяли наличие сосудов. Оценивали площадь поперечного сечения (CSA-cross-sectional area) при визуализации нерва перпендикулярно его оси и прослеживанием нерва в пределах его гиперэхогенного эпинеурального края с помощью автоматических инструментов для оценки площади. Использовали общепринятые референтные значения CSA для периферических нервов [48, 49, 91]. Ниже представлены УЗИ критерии периферического нерва в норме и при различных повреждениях (таблица 5).

Таблица 5 – УЗИ критерии повреждения периферического нерва

	НОРМА Типичная картина в виде пчелиных сот. Нет изменений диаметра нерва. Каждый пучок (черный) окружен периневрием и проходит внутри межпучковой ткани (белый), весь нерв окружен эпиневрием (серый). Сложная гипозоногенная сеть за счет межпучковых связей.
	ПОЛНЫЙ РАЗРЫВ НЕРВА Диастаз между культями нерва. Дистрофические изменения дистального фрагмента нерва, в виде нечёткости контура и уменьшения диаметра. Наличие утолщения (неврома) на проксимальном конце культи повреждённого нерва.
	ЧАСТИЧНЫЙ РАЗРЫВ НЕРВА Локальное уменьшение диаметра нерва с нарушением его наружной оболочки, неровностью и нечёткостью контура. Снижение эхогенности ткани нерва и нарушение внутренней дифференцировки. Изменение формы нервного ствола по типу «песочных часов».
	НЕВРОМА Локальное увеличение диаметра, гипозоногенное, исходящее из проксимальной культи нервного ствола с отсутствием внутренней дифференцировки на пучки (краевая неврома); гипозоногенное веретенообразное внутриствольное утолщение нерва (интраневральная неврома)
	ТРАКЦИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ Резкое снижение эхогенности нервного ствола, утолщение ствола нерва на протяжённом участке. Неровные наружные контуры, диффузно неоднородная внутренняя структура нерва без чёткой внутренней дифференцировки на пучки, с сохранённой наружной оболочкой нерва.
	ДЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ Увеличение диаметра нерва с одновременным повышением эхогенности ствола и уменьшением количества гипозоногенных интраневральных пучков.
	КОМПРЕССИОННАЯ НЕЙРОПАТИЯ Уменьшение диаметра нерва в месте компрессии. Снижение эхогенности нерва с потерей многопучкового строения перед и на уровне компрессии. Наружный контур нерва неровный, утолщённый. Умеренное усиление интраневральной васкуляризации проксимальнее места компрессии (красный).
	ЭПИНЕВРАЛЬНЫЙ ФИБРОЗ Типичная картина в виде пчелиных сот. Повышение эхогенности окружающих нерв тканей, без существенных изменений диаметра нерва (бежевый)
	ИНТРАНЕВРАЛЬНЫЙ ФИБРОЗ Заметное увеличение гиперэхогенных участков внутри нерва (бежевый), окружающих гипозоногенные нервные пучки. Нет существенных изменений диаметра нерва.

Ультрасонографическая картина интактного нерва при продольном сканировании представляет собой умеренно эхогенное образование линейной формы с четкими высокоэхогенными границами. Окружающая подкожная жировая клетчатка имеет среднюю или пониженную эхогенность. Мышцы образуют область еще более низкой эхогенности с мелкими линейными вкраплениями. При поперечном сканировании нерв определяют в виде пчелиных сот - овала, имеющего зернистую структуру

и четкие высокоэхогенные границы в окружении гипоэхогенной подкожной - жировой клетчатки или мышц [26] (рис.10).

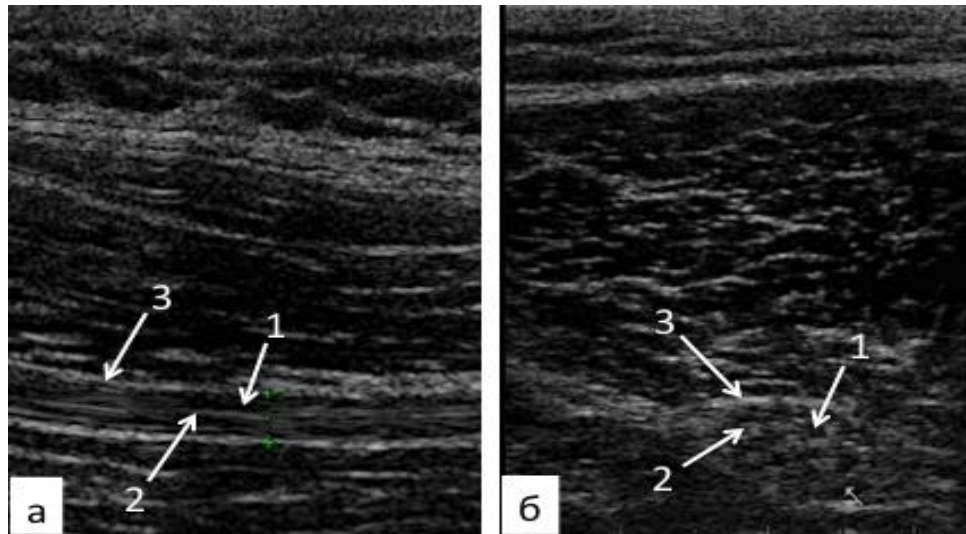


Рисунок 10 – Ультразвуковая картина неизмененного нерва. Продольное (а) и поперечное (б) сканирование. 1 – нервные волокна, 2 – периневрий, 3 – эпиневррий

Интраоперационное ультразвуковое исследование нерва проводили у всех пациентов 2 группы (n=51). Предложен «Способ выбора хирургической тактики лечения повреждения периферического нерва с нарушением проводимости» (патент РФ на полезную модель № 2492813), основанный на проведении интраоперационной нейрографии и УЗИ. Во время хирургического вмешательства проводят электронейромиографию и выявляют локализацию места нарушения проводимости. Укладывают под периферический нерв в зоне нарушения его проводимости ультразвуковой негативный материал. Проводят ультразвуковое исследование (УЗ) нерва, сканируя его продольно и поперечно совместно с окружающими тканями и изолированно от них. При обнаружении сдавления периферического нерва окружающими тканями за счет восстановления проводимости нерва после его изолирования от окружающих тканей и при отсутствии изменений его внутренней ультраструктуры производят выделение нерва и наложение на него электродов с выполнением в последующем его электростимуляции. При отсутствии сдавления периферического нерва окружающими тканями и

обнаружении изменений его внутренней ультраструктуры проводят иссечение участка нерва с измененной ультраструктурой.

Кроме того, для полноценного удаления повреждённого участка периферического нерва с грубыми внутривольными изменениями предложен «Способ иссечения поврежденного периферического нерва» (патент РФ на изобретение № 2492829). Во время хирургического вмешательства под эпиневрий периферического нерва вводят рентгеноконтрастное вещество выше зоны его повреждения и ниже зоны повреждения - в направлении к ней. Затем выполняют рентгенологическое исследование с определением протяженности зоны повреждения за счет отсутствия контрастирования поврежденного участка периферического нерва. Осуществляют резекцию данного участка. Проводят контроль морфологической структуры поперечных срезов периферического нерва путем выполнения в поперечном направлении ультразвукового исследования созданных при резекции периферического нерва его торцевых поверхностей. Анализируют полученные данные и при визуализации по всей площади поперечных срезов периферического нерва зернистой структуры продолжают хирургическое вмешательство. При полном или частичном отсутствии визуализации зернистой структуры проводят последовательную резекцию участков периферического нерва поперечных срезов до визуализации зернистой структуры по всей их площади. Способ позволяет снизить послеоперационные осложнения, что достигается за счет полноценного удаления поврежденного участка.

Вовлеченный в патологический процесс сегмент нерва выделяли по обычной методике. Открытый нерв покрывали стерильном гидрогелем (Медиагель-С, Гельтек-Медика, Россия) или орошали физиологическим раствором, который служил в качестве прокладки и соединительной среды с ультразвуковым линейным датчиком с частотой 17–5 МГц (аппарат «Sonoace R3»). На датчик надевали стерильный презерватив для УЗИ или

стерильную перчатку. Результаты исследования фиксировали на внутреннюю память УЗИ-аппарата для дальнейшей обработки (рис. 11).

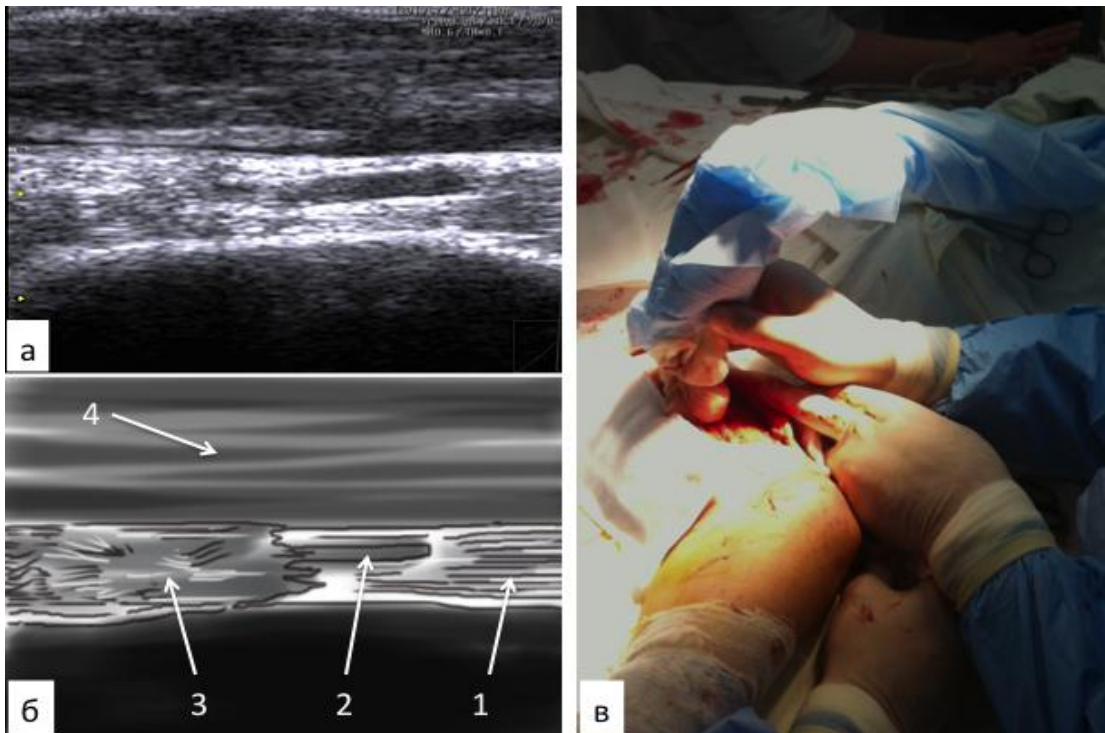


Рисунок 11 – Интраоперационное ультразвуковое сканирование нервов. **а)** продольное ультразвуковое сканирование нерва; **б)** схема повреждения нерва (1-интактный нерв, 2 – переходная зона внутривольных изменений без нарушения эпинеурия, 3 - перерыв контура нерва с отсутствием внутренней дифференцировки на пучки, 4 – гидрогель); **в)** Фото интраоперационного применения УЗИ

Для определения хирургической тактики данные интраоперационной ультрасонографии мы разделили на 3 группы: 1. Изменения вокруг нерва (эпинеуральный фиброз, компрессионная нейропатия); 2. Внутривольные изменения (интраневральный фиброз, внутривольная неврома, частичный разрыв нерва); 3. Полный анатомический перерыв (без и с концевой невромой).

Для изменений вокруг нерва характерно повышение эхогенности окружающих нерв тканей без существенных изменений диаметра и структуры нерва. Сохраняется типичная картина на поперечном срезе в виде пчелиных сот. Возможно локальное уменьшение толщины и диаметра нерва в месте компрессии. Для внутривольных изменений характерно

увеличение гиперэхогенных участков внутри нерва, окружающих гипоехогенные нервные пучки, нарушение внутренней дифференцировки, потеря сотовой структуры без изменения диаметра нерва, с веретенообразным утолщением нерва при внутривольной невrome, или локальным уменьшением диаметра нерва с нарушением его наружной оболочки, неровностью и нечеткостью контура при частичном разрыве нерва. Для полного анатомического перерыва характерна прерывистость нервного ствола и диастаз между культями нерва. Дистрофические изменения дистального фрагмента нерва в виде нечеткости контура и уменьшения диаметра. В большинстве случаев выявляли локальное гипоехогенное увеличение диаметра нерва, исходящее из проксимальной культи нервного ствола с отсутствием внутренней дифференцировки на пучки потеря сотовой структуры (краевая неврома).

2.4 Характеристика пациентов, включенных в исследование

Медиана возраста в группе 1 оставила 41 год (28;48). Во 2 группе – 37 лет (26;49). В группе 1 распределение по полу составило 45/13 (мужчины/женщины), в группе 2 – 36/15. Таким образом, подавляющее большинство пациентов были трудоспособного возраста, у которых травма периферических нервов нередко приводила к ограничению трудоспособности. Большинство пациентов 1 и 2 группы (90,0% и 94,5%, соответственно) поступило в нейрохирургический стационар до года после травмы (рис.12).

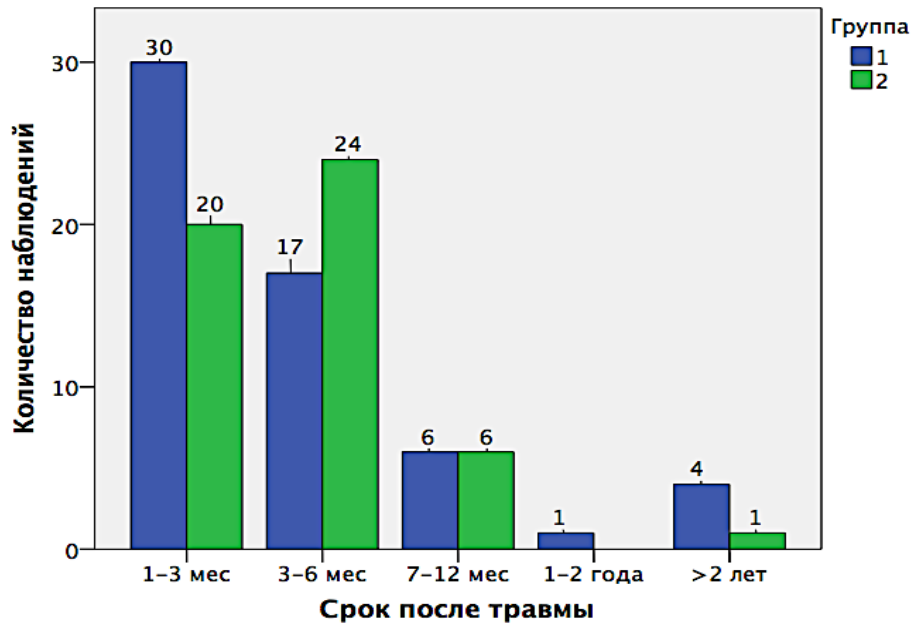


Рисунок 12 – Распределение пациентов в зависимости от сроков поступления в стационар после травмы в 1 и 2 группе

При поступлении по клинико-неврологическим данным среди всех пациентов (1 и 2 группа) у 31% (34/109) пострадавших были повреждены стволы срединного, у 28% (31/109) - выявлено повреждение локтевого, у 21% (23/109) – поражение лучевого, у 16% (17/109) малоберцовой и у 4% (4/109) – большеберцовой порции седалищного нерва (рис.13).

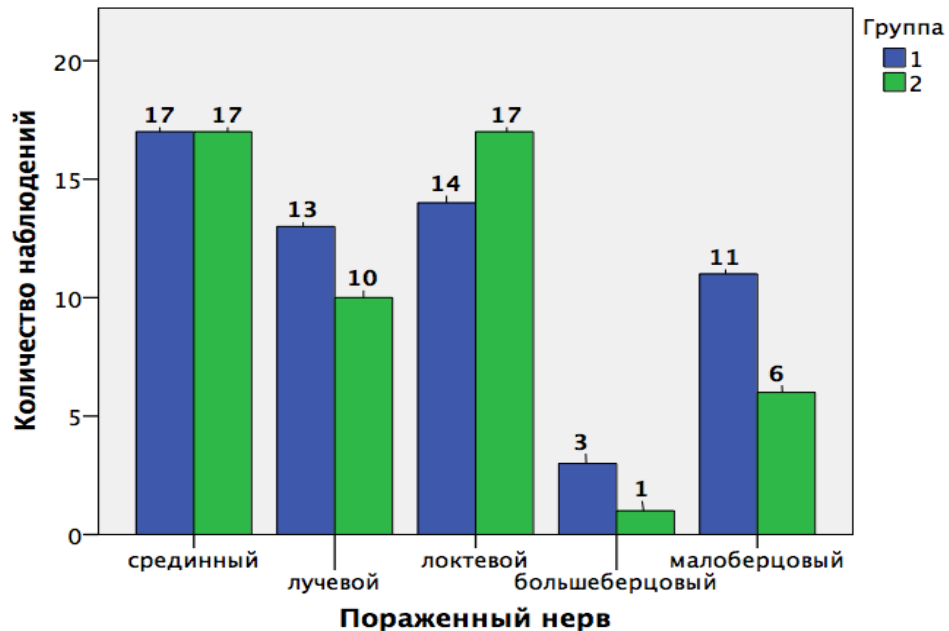


Рисунок 13 – Распределение пациентов в зависимости от пораженного нерва в 1 и 2 группе

Большинство пациентов получили травму в быту острым предметом (стекло, кафель, пила, металлическая пластина), при падении и переломах костей конечностей (68%, 74/109). Уличный травматизм включал в себя ножевые ранения (8,3%, 9/109). Повреждение нерва после огнестрельного ранения наблюдали у 6% (7/109). Повреждение нерва в результате ДТП и спортивной травмы выявлено у 3% (3/109) и 1% (1/109), соответственно. Ятрогенный вид травматизма был связан с выполнением хирургического вмешательства по поводу перелома костей (остеосинтез пластиной, удаление гиперостоза малоберцовой кости, проведение спиц при монтаже аппарата Илизарова по поводу перелома костей голени) у 10% (11/109), внутримышечной инъекцией лекарств у 2% (2/109), в результате туго наложенной гипсовой повязки после перелома лучевой кости в типичном месте со смещением у 1% (1/109) (рис.14).

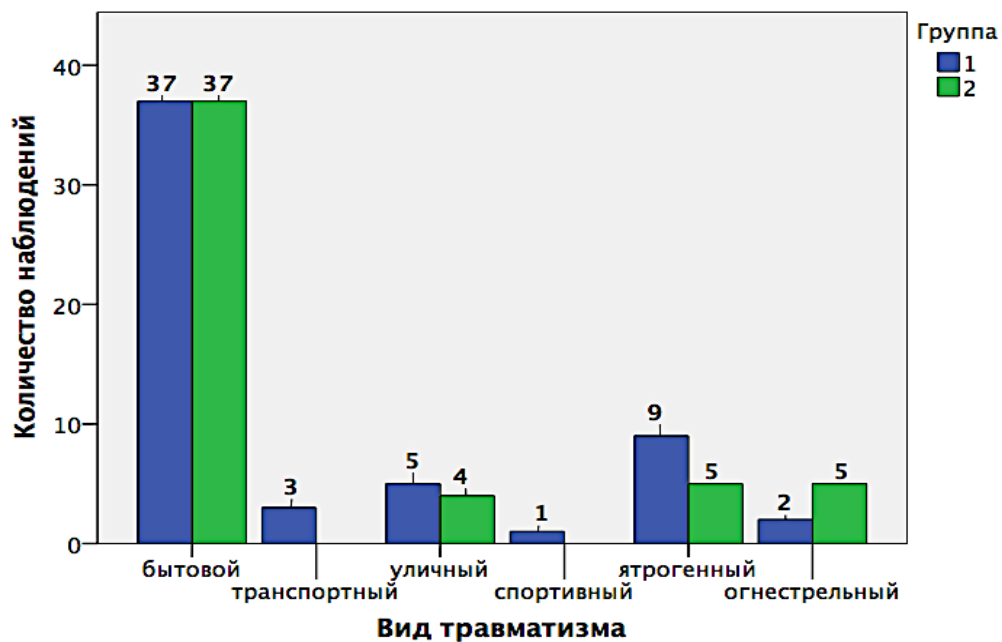


Рисунок 14 – Распределение больных по виду травматизма в 1 и 2 группе

Основным механизмом травмы было локальное повреждение нерва (72%, 79/109) (рис.15).

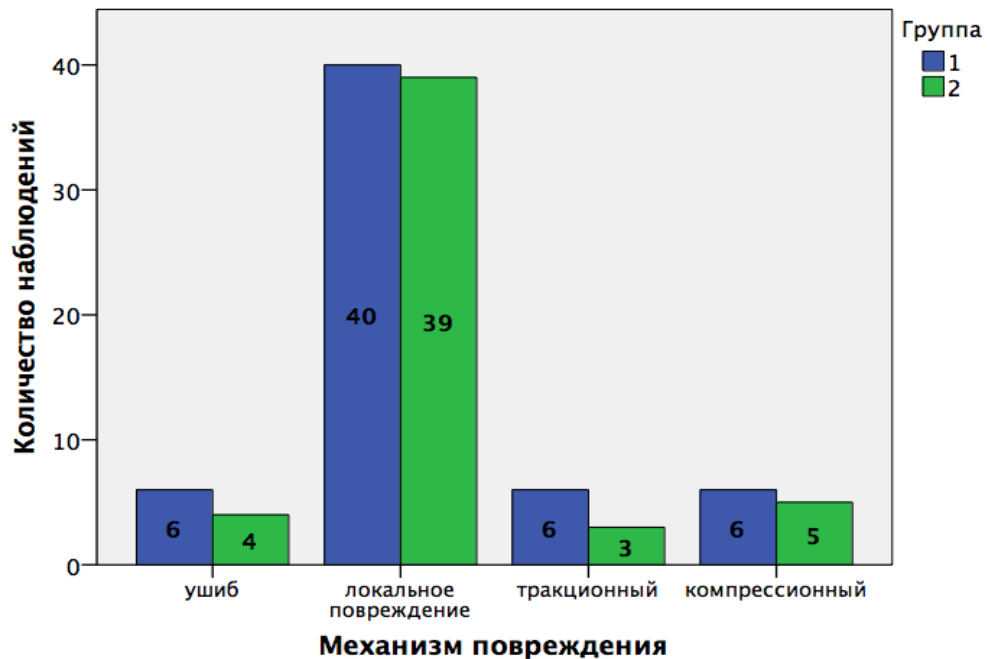


Рисунок 15 – Распределение больных по механизму травмы в 1 и 2 группе

У 10% (11/109) пациентов имел место компрессионный механизм поражения периферических нервов: фрагментами кости при её переломе у 7% (8/109), за счёт позиционного сдавления нерва у 3% (3/109). В 9% (10/109) повреждение ствола нерва возникло за счёт его ушиба при прямом воздействии тупого предмета.

В таблице 6 представлены основные физиологические параметры и диагноз пациентов, участвующих в исследовании. По основным параметрам группы статистически значимо не отличались.

Таблица 6 – Характеристика пациентов, включенных в исследование

Параметр	1 группа стандартный алгоритм (n - 58)	2 группа алгоритм с УЗИ (n - 51)	p*
Возраст (года)	41 (28;48)	37 (26;49)	0,706
Мужчины	45	36	0,511
Женщины	13	15	
Пораженный нерв:			
срединный	17	17	0,683
лучевой	13	10	0,816
локтевой	14	17	0,298
большеперцовый	3	1	0,621
малоперцовый	11	6	0,428
Вид травматизма:			
бытовой	37	37	0,412
транспортный	3	0	–
уличный	6	4	0,748
спортивный	1	0	–
огнестрельный	2	2	0,641
ятрогенный	9	8	0,593
Механизм повреждения:			
ушиб	7	4	0,537
локальное повреждение	39	39	0,395
тракционный	6	3	0,498
компрессионный	6	5	0,591
Срок поступления после травмы (мес.):	3 (2;6)	3 (2;5)	0,961
<i>Для количественных признаков определены: медиана, 25-й и 75-й перцентили</i>			
<i>* Анализ количественных признаков проводили с помощью U критерия Манна-Уитни, качественных - с помощью критерия χ^2 (точный критерий Фишера)</i>			

По степени чувствительных и двигательных нарушений до операции не было различий между группами (соответственно, $p=0,597$ и $p=0,2$). Трофические изменения (трофические язвы, изменение цвета и влажности кожных покровов) выявлены у 6% (7/109) пациентов. Гипотрофия мышц в

той или иной степени отмечена у 27% (30/109) пациентов (рис.16).

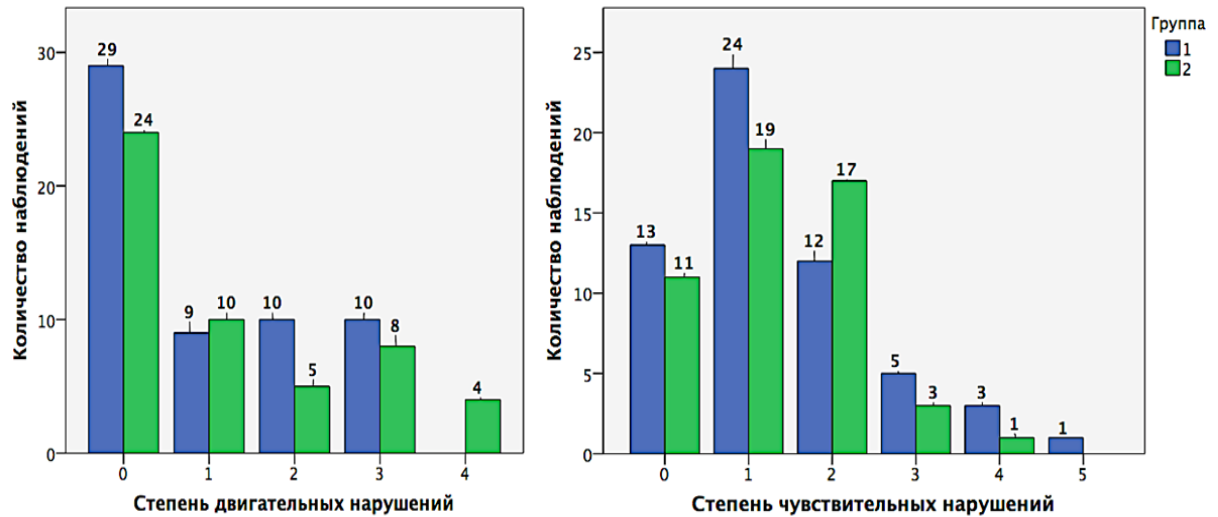


Рисунок 16 – Распределение пациентов по степени двигательных и чувствительных нарушений в 1 и 2 группах до операции

2.5 Анестезиологическое пособие и методы хирургического лечения

После комплексного до- и интраоперационного обследования, включающего электронейромиографию, ультрасонографию и контрастную нейрографию выполняли следующие оперативные вмешательства: 1) Нейрорафия с последующей его прямой электростимуляцией; 2) Иссечение внутривольной невromы либо рубцово-изменённого участка ствола нерва с последующей нейрорафией и прямой его электростимуляцией; 3) Невролиз анатомически сохранного ствола нерва с последующей его прямой электростимуляцией. Эндотрахеальный наркоз (по схеме пропофол+фентанил) применяли в 92 % (100/109) случаев. У 9 пациентов выполняли проводниковую анестезию. Выбор того или иного оперативного доступа к нервным стволам определяли по данным предварительного обследования (рис. 17).

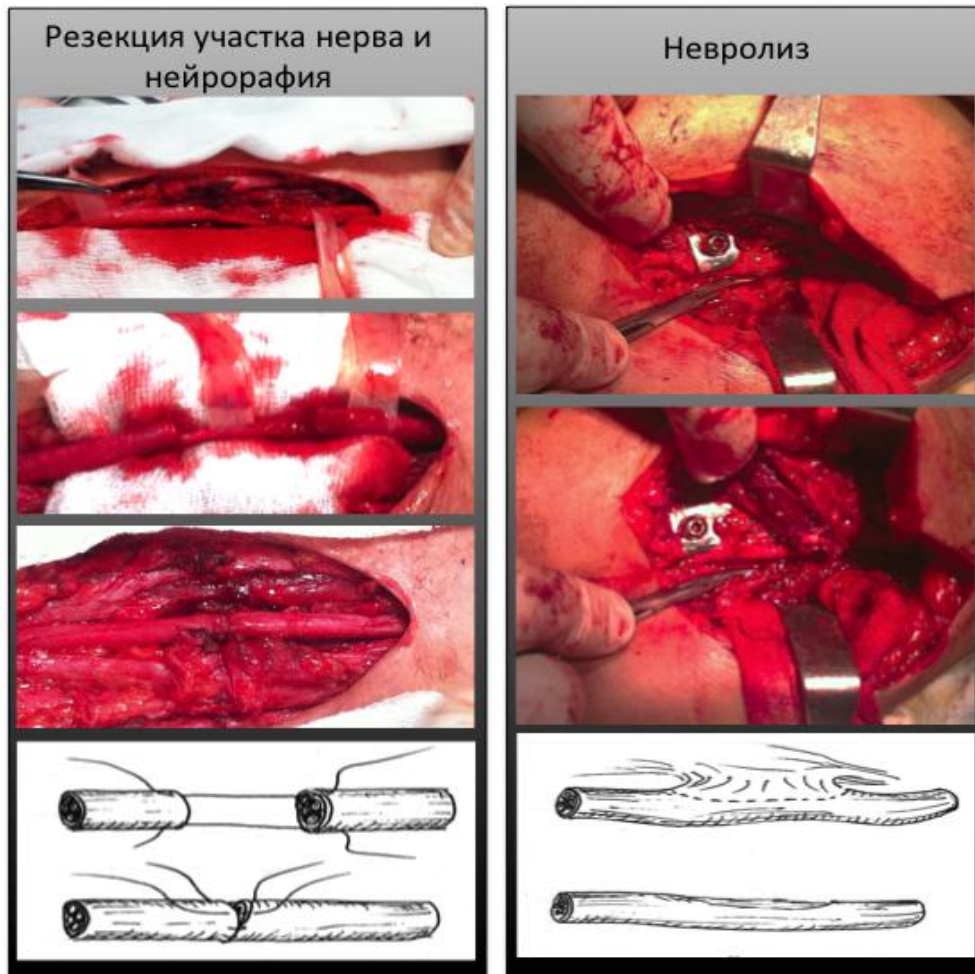


Рисунок 17 – Фото и схемы операций нейрорафии и невролиза

Чаще всего использовали классические проекционные доступы к нервным стволам, описанные в оперативных пособиях. Для надёжной фиксации нерва и облегчения выполнения реконструктивных операций на его стволе рекомендовано «Устройство для интраоперационной фиксации периферического нерва» (патент РФ на полезную модель № 145447) и его усовершенствованная версия «Устройство для проведения реконструктивно-восстановительных вмешательств на поврежденном стволе периферического нерва» (патент РФ на полезную модель RU 171517 U1) (рис.18). Устройство позволяет с высокой точностью и атравматично сопоставить концы пересеченного периферического нерва между собой или с трансплантатом при выполнении реконструктивно-восстановительного вмешательства на стволе нерва. Выполнение устройства в виде горизонтально вытянутой площадки, боковые стенки

которой расположены под углом друг к другу, позволяет atraumaticно уложить нерв на внутренней поверхности площадки, обеспечив необходимую для проведения хирургических и диагностических манипуляций зону видимости и удобный подход к поврежденному участку ствола нерва. Фиксация нерва через двух пар параллельных рядов сквозных отверстий, расположенных вдоль продольных сторон боковых стенок площадки позволяет исключить возможность перекручивания, травмирования и значительного расхождения концов нерва относительно друг друга при его пересечении. Нанесенная на внутреннюю поверхность одной из боковых стенок площадки миллиметровая разметка позволяет проводить оценку протяженности повреждения нерва при ЭНМГ и УЗИ, и учитывать количественное значение длины иссекаемого при необходимости поврежденного участка нерва с целью выбора адекватного метода проведения пластики нерва

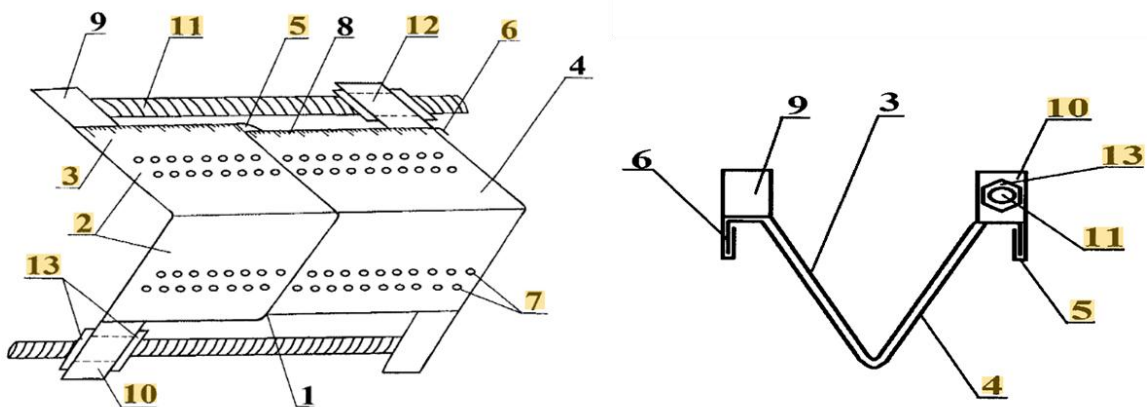


Рисунок 18 – Устройство для интраоперационной фиксации периферического нерва. 1 - углообразное тело; 2 - боковые стенки углообразного тела; 3 - верхняя пластина; 4 - нижняя пластина; 5 - паз верхней пластины; 6 - одинарный загиб у нижней пластины; 7 - сквозные отверстия в боковых стенках; 8 - миллиметровая разметка; 9 - выступы; 10 - выступы со сквозными отверстиями; 11 - резьбовые стержни; 12 - сквозные отверстия в выступах; 13 - гайки

Устройство представляет собой горизонтально вытянутое углообразное тело с двумя боковыми стенками, образованное двумя горизонтально протяженными согнутыми под одинаковым углом вдоль их

продольной стороны пластинами, соединенными между собой по типу «полосьев» с возможностью продольного дозированного перемещения путем скольжения одной пластины - верхней внутри другой пластины - нижней. В боковых стенках углообразного тела выполнено по два горизонтально расположенных параллельных ряда сквозных отверстий для фиксации положения нерва посредством лигатур. По периферии на внутреннюю поверхность одной из боковых стенок устройства вдоль ее продольной стороны нанесена миллиметровая разметка. В крайних свободных верхних углах устройства имеются четыре выступа, попарно соединенных между собой вдоль углообразного тела двумя резьбовыми стержнями. Последние закреплены с одной из вертикальных сторон устройства неподвижно, с другой стороны - с возможностью изменения расстояния между выступами в паре посредством сквозных отверстий, выполненных в выступах для прохождения через них свободных концов стержней. По обе стороны от каждого из выступов со сквозными отверстиями размещены гайки, имеющие внутреннюю резьбу, соответствующую резьбе стержней. Полезная модель позволяет с высокой точностью и атравматично сопоставить концы пересеченного периферического нерва между собой или с трансплантатом при выполнении реконструктивно-восстановительного вмешательства на его стволе.

Всем пациентам имплантировали электроды на открытый нервный ствол для последующей долгосрочной прямой электростимуляцией в стандартных режимах. Стимулировали низкоинтенсивным переменным электрическим током с частотой 8/с, амплитудой 20-40 мА 2 раза в день по 15 мин. в течение 14 дней. Электроды удаляли после окончания курса электростимуляции.

2.6 Методы статистического анализа

Статистическая обработка полученных данных осуществляли с использованием программ Microsoft Office Excel 13 с пакетом прикладных

программ и IBM SPSS 22. Для характеристики количественных признаков определяли медиану и ранги (25;75 процентиля). Качественные признаки были представлены в абсолютных значениях и процентах. Проверку на нормальность распределения проводили при помощи критерия Шапиро-Уилка. Учитывая тот факт, что распределение большинства параметров не соответствовало нормальному, при сравнении групп по количественным признакам применяли методы непараметрической статистики для независимых выборок – U критерий Манна-Уитни (двухсторонний тест), для связанных выборок – критерий МакНемара (для категориальных дихотомических признаков) и критерий Q Кокрена (для категориальных признаков, если задано более 2 полей). К количественным данным в случае связанных выборок применяли парный критерий знаковых рангов Уилкоксона (если были заданы два поля) и двухфакторный дисперсионный анализ Фридмана по рангам (если было задано более двух полей). Сравнение групп по качественным признакам проводили путём оценки таблиц сопряженности и расчета критерия χ^2 (При числе наблюдений в ячейках таблицы менее 5 использовали точный критерий Фишера, двухсторонний тест). Для выявления взаимосвязи количественных или порядковых признаков применяли непараметрические методы корреляционного анализа Спирмена, Кендала. Для всех используемых методов статистически значимым считали $p < 0,05$.

Чувствительность, специфичность, положительную прогностическую ценность и отрицательную прогностическую ценность определяли с помощью четырёхпольной таблицы (таблица 7).

При сравнении различных методов дооперационной и интраоперационной диагностики поражения нервов (клинико-неврологическое обследование, ЭНМГ, нейрография, УЗИ) оценивали чувствительность и специфичность метода в определении правильного диагноза и, соответственно, тактики хирургического лечения. Сравнивали данные исследований с данными гистоморфологического исследования и

определяли результаты операций в отдаленные сроки наблюдения (3-12 мес.) по данным клинического осмотра и ЭНМГ.

Таблица 7 - Определение чувствительности и специфичности теста

		Результат теста, определенный по "золотому стандарту"		
		положительный	отрицательный	
Результат изучаемого теста	положительный	истинно-положительный a	ложно-положительный b	положительная прогностическая ценность = $a/(a+b)$
	отрицательный	ложно-отрицательный c	истинно-отрицательный d	отрицательная прогностическая ценность = $d/(c+d)$
		чувствительность = $a/(a+c)$	специфичность = $d/(b+d)$	

Глава 3

Результат диагностики и лечения пациентов с травмой периферических нервов

3.1 Результаты анализа предоперационной и интраоперационной диагностики у пациентов с травмой периферических нервов

Для сравнения чувствительности и специфичности различных методов предоперационной и интраоперационной диагностики проведен анализ результатов исследований во 2 группе, проспективно прослеженных пациентов (51 пациент).

Результаты клинико-неврологического исследования показали, что из 51 пациента у 37 (72,5%) наблюдали клинику посттравматического полного аксонального повреждения нерва, а у 14 (27,5%) – клинику нейропатии с частичным нарушением функции повреждённого нерва.

Однако при первичной ЭНМГ у 51 пациентов с различной степенью тяжести повреждения периферических нервов верхней и нижней конечности только у 30 (58,8%) – обнаружено полное нарушение проводимости стволов периферических нервов, а у 21 (41,2%) – проводимость по стволам нервов была частично сохранена.

Примечательно, что, по данным ЭНМГ на 13,7% (7/51) уменьшилось количество пациентов с полным нарушением проводимости в результате грубого аксонального повреждения нервного ствола и на этот же процент увеличилось число наблюдений с частичным его поражением.

При интраоперационном исследовании проводимости нерва игольчатым стимулирующим электродом наносили раздражение на нерв и регистрировали вызванный потенциал (М-ответ) при помощи игольчатых сенсорных электродов. В результате интраоперационной ЭНМГ у 51 пациента, только у 31 (60,8%) – не удалось получить М-ответ нерва, что подтверждало полное нарушение проводимости. У 20 (39,2%) наличие низкоамплитудного М-ответ нерва (не более 3,4 мкВ) указывало на частичное нарушение проводимости стволов нервов верхней и нижней конечности. Интраоперационное тестирование позволило уточнить исходные ЭНМГ - данные о тяжести нарушения проводимости нервного ствола и у одного пациента выявить полный блок проведения импульса.

При интраоперационном контрастировании стволов повреждённых нервов среди 51 пациента у 29 (56,9%) – визуализировали перерыв столба контраста с диастазом 0,5 до 1 см, что указывало на тяжесть травматического поражения нерва (полное повреждение нерва) (рис.19), у 22 (43,1%) – обнаружено истончение либо сужение столба контраста (n=15) и локальный дефект, либо неравномерное заполнение контрастом ствола нерва (n=7), что было патогномично частичному повреждению периферического нерва.



Рисунок 19 – Интраоперационная рентгеноконтрастная нейрография. Перерыв столба контрастного вещества: обрыв столба контраста (а,б), обрыв столба контраста с «булавовидным» утолщением – невромой (в,г)

Несмотря на то, что контрастная нейрография даёт важную дополнительную информацию об анатомии и протяжённости поражения, нейрография является инвазивной методикой, и по её результатам нельзя судить о глубине перерождения и структуре травматических изменений в повреждённом стволе нерва. Для уточнения тяжести и характера поражения периферических нервов верхних и нижних конечностей всем пострадавшим до операции выполняли высокоразрешающую ультразвуграфию. Среди 51 пациента у 29 (56,9%) получены эхо-признаки анатомического перерыва и концевой невromы, что являлось

объективным подтверждением тяжести травматического поражения нервного ствола (рис.20).

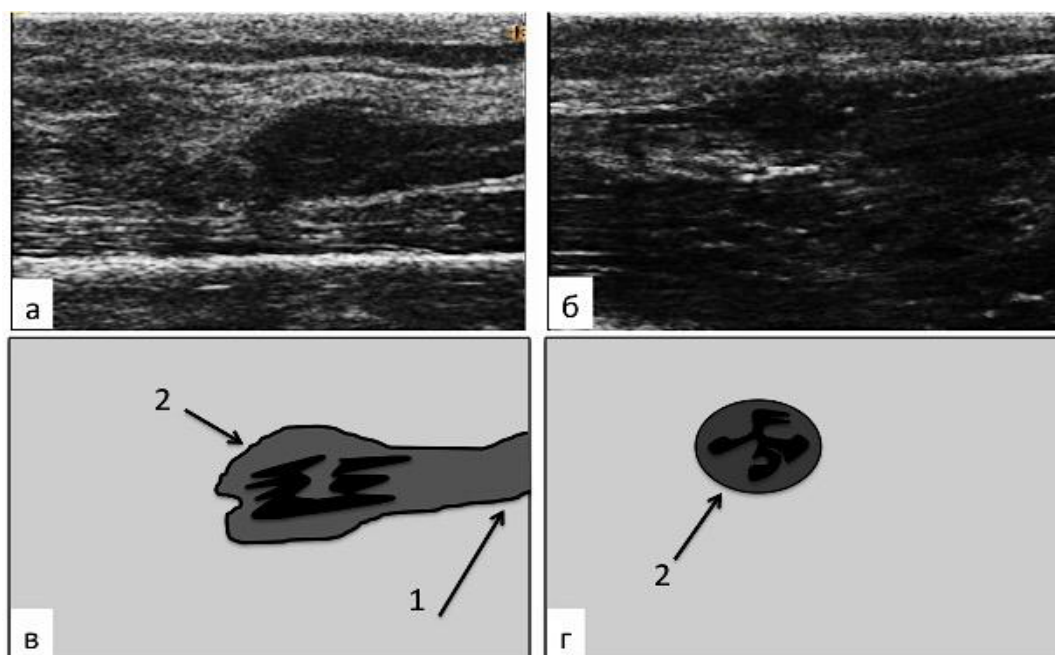


Рисунок 20 – УЗИ картина полного анатомический перерыва нерва. а) продольное сканирование, б) поперечное сканирование, в) и г) – схема.

Прерывистость нервного ствола и диастаз между культями нерва.

Выявляют локальное гипоэхогенное увеличение диаметра нерва, исходящее из проксимальной культя нервного ствола с отсутствием внутренней дифференцировки на пучки. 1 – нерв, 2 – краевая неврома

Изменения вокруг нерва (эпинеуральный фиброз, компрессионная нейропатия) были выявлены у 22 (43,1%) пациентов, что свидетельствовало о частичном повреждении периферического нерва. У 8 (15,7%) пациентов дооперационно обнаружены признаки внутривольных изменений в анатомически интактном нерве (интраневральный фиброз, внутривольная неврома, частичный разрыв нерва), выраженность которых не позволила отнести их к частичному повреждению нерва. Данные интраоперационного УЗИ о внутривольных изменениях УЗИ строго коррелировали с данными рентгеноконтрастной нейрографии о локальных дефектах нерва. У всех пациентов с локальными дефектами нерва по нейрографии были визуализированы внутривольные изменения при УЗИ.

Выявлен 1 пациент с выраженным интраневральным фиброзом, которого на дооперационном этапе обследования по данным УЗИ ошибочно отнесли к группе частичного поражения нерва. Кроме того, дополнительно выявлены внутривольные изменения еще у 2 пациентов. Таким образом по данным интраоперационного УЗИ выявлено полное повреждение или выраженные внутривольные изменения у 32 (62,7%) пациентов. Всем пациентам с внутривольными изменениями выполнена нейрорафия с резекцией участка изменённого нерва. Одному пациенту, в анамнезе перенесшему травму плечевой кости и остеосинтез металлической пластиной, на догоспитальном этапе не удалось по УЗИ оценить тип поражения нерва в связи с выраженным рубцовым процессом и ультрасонографическими артефактами. Полученные результаты наиболее наглядно представлены на рисунке 21.

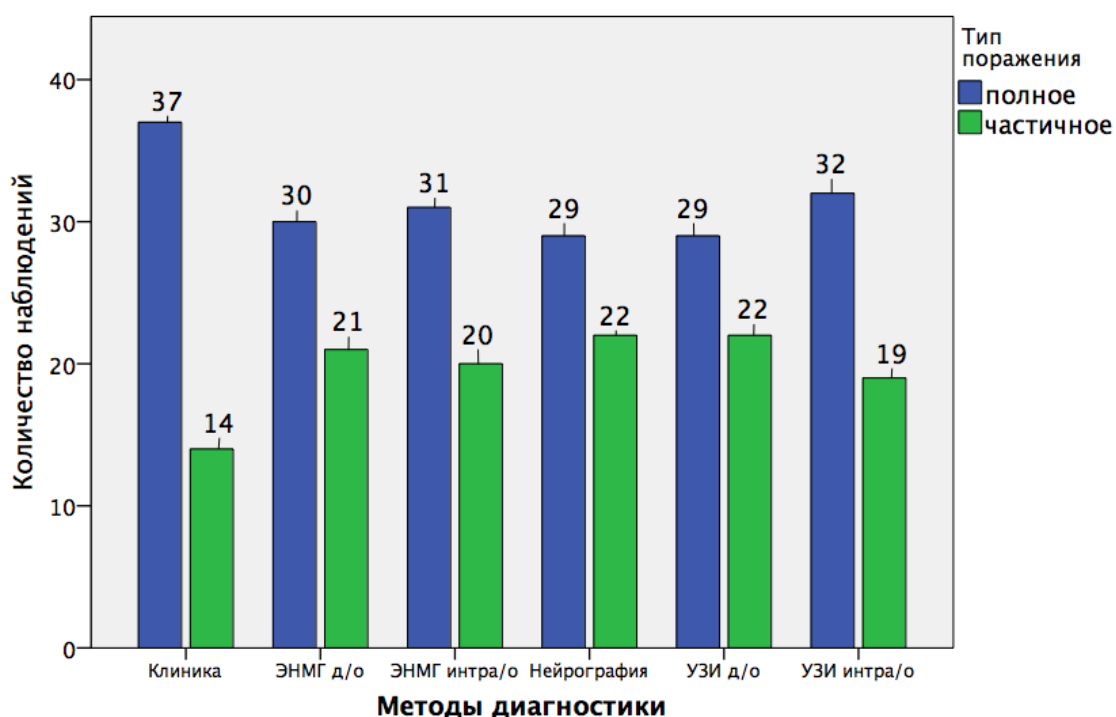


Рисунок 21 – Результаты комплексного до - и интраоперационного обследования пациентов

Гистоморфологическое исследование было проведено в 51% (26/51) случаев. Только в одном случае данные гистологического исследования не совпадали с данными УЗИ во время операции, когда УЗИ-признаки

интраневрального фиброза не подтвердились. Были выявлены гистоморфологические признаки невромы или внутривольных изменений в резецированном участке нерва: наличие участков гиперплазированных и гипертрофированных нервных волокон, переплетающихся между собой; дистрофические изменения вплоть до некроза единичных нервных волокон; отек окружающих мягких тканей между волокнами и отек эпинеурия; склерозированные сосуды.

УЗИ после операции выполняли через 3-6 мес. после операции 49/51 пациентам. В сроки 3-6 мес. в области шва нерва определяли гипоэхогенную зону. В сроки 6-24 мес. после операции прослежено по данным УЗИ 90% (46/51) пациентов. При положительной динамике (74%, 34/46) отмечали возникновение в зоне операции типичной картины пчелиных сот.

Для определения чувствительности и специфичности методов диагностики сравнивали результаты с данными гистологического исследования удаленного сегмента нерва, а также объединенных результатах клинико-неврологического, ЭНМГ и ультразвукового обследования после операции (3-12 мес.) (таблица 8).

Таблица 8 - Сравнение эффективности различных методов диагностики повреждения периферического нерва в определении правильной тактики хирургического лечения

Методы диагностики	Чувствительность %	Специфичность %	Положительная прогностическая ценность, %	Отрицательная прогностическая ценность, %
Клинико-неврологическое обследование	81	71	76	77
ЭНМГ до операции	81	79	87	71
ЭНМГ во время операции	85	83	90	75

Рентгеноконтрастная нейрография интраоперационная	93	95	97	90
УЗИ до операции	90	95	97	86
УЗИ интраоперационное	97	95	97	95

Сравнение УЗИ и других методов по чувствительности и специфичности выявило превосходство УЗИ перед другими методами. В частности, чувствительность и специфичность интраоперационного УЗИ составили 97% и 95%, соответственно.

Интраоперационное УЗИ несколько превосходило дооперационное УЗИ по чувствительности (97 и 90%, соответственно). Точность (диагностическая эффективность теста) исследования составила 96%. Нами был проведен сравнительный анализ методов дооперационного и интраоперационного УЗИ по возможностям визуализации при травме периферического нерва. В таблице 9 показано сравнение дооперационного и интраоперационного УЗИ по нескольким параметрам: визуализация и идентификация нерва, локализация повреждения, выявление типа повреждения, выявление инородных тел, выявление полного перерыва нерва, выявление внутривольных изменений, выявление изменений вокруг нерва. Способность визуализации тех или иных структур при УЗИ оценивали по 3-х бальной шкале: плохо, удовлетворительно, отлично.

Таблица 9 – Сравнение дооперационного и интраоперационного УЗИ

Сравниваемый параметр	УЗИ до операции						Интраоперационное УЗИ						p*
	Плохо		Удовл.		Отлично		Плохо		Удовл.		Отлично		
	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	
Визуализация и идентификация нерва (n-51)	4	2	41	21	59	27	0	0	6	3	94	48	0,005
Локализация повреждения (n-51)	10	5	49	25	41	21	0	0	2	1	98	50	0,006
Выявление типа повреждения (n-51)	12	6	24	12	65	33	4	2	18	15	29	34	0,157
Выявление инородных тел (n-1)	0	0	0	0	100	1	0	0	0	0	100	1	

Выявление полного перерыва нерва (n-24)	8	2	25	6	67	16	0	0	4	1	96	23	0,007
Выявление внутриствольных изменений (n-9)	33	3	44	4	23	2	11	1	33	3	56	5	0,025
Выявление изменений вокруг нерва (n-18)	17	3	33	6	50	9	0	0	0	0	100	18	0,006
Медиана (25 и 75 процентиль)	10%		33%		59%		0%		4%		96%		0,002
	(6;15)		(25;43)		(46;66)		(0;2)		(1;12)		(75;99)		**

* - Критерий знаковых рангов Уилкоксона для связанных выборок

** - Двухфакторный дисперсионный анализ Фридмана по рангам

При дооперационном УЗИ плохие результаты наблюдали по всем параметрам наблюдали с медианой 10% (6;15) случаев. Только в 3 случаях интраоперационного УЗИ были продемонстрированы плохие результаты при визуализации типа повреждения (4%) и внутриствольных изменений (11%), по остальным параметрам интраоперационное УЗИ показало удовлетворительный или отличный результат. Интраоперационное обследование позволило получить отличную картину типа повреждения нерва в 96% (75;99), что статистически значимо превышало результаты дооперационного обследования при дооперационном УЗИ “отлично” выставлено в 59% (46;66) случаев ($p=0,002$, двухфакторный дисперсионный анализ Фридмана по рангам). Статистически значимые различия были получены по визуализации нерва и определении локализации поражения, и выявлении внутриствольных изменений, полного перерыва и изменений вокруг нерва ($p<0,05$, критерий знаковых рангов Уилкоксона для связанных выборок). Это подтвердило преимущество УЗИ интраоперационного по сравнению с дооперационным исследованием.

Таким образом, оценка различных методов дооперационной и интраоперационной диагностики повреждения нервов (клинико-неврологический осмотр, ЭНМГ, нейрография, УЗИ) проведена у 51 пациента. Сопоставление показателей дооперационного обследования и интраоперационного тестирования показало, что при неврологическом обследовании в 72,5% наблюдений определяли клинику полного

аксонального повреждения периферических нервов. Однако по данным ЭНМГ тестирования на операционном столе полное нарушение проводимости по стволу периферического нерва имело место только у 60,8% пациентов, т.е. на 11,7% увеличилась группа с частичным повреждением нервных структур. Примечательно, что данные УЗИ до операции полностью совпадали с результатами интраоперационной контрастной нейрографии, на котором у 56,9% пациентов на эхограммах выявляли грубые структурные изменения (диастаз, неврома, локальные внутриствольные изменения). При УЗИ открытого ствола нерва вышеуказанные морфологические изменения были обнаружены уже у 32 (62,7%), что наиболее точно отражало полное повреждение (перерыв или выраженные внутриствольные изменения нерва). Протяжённость и глубину этих структурных изменений в повреждённом стволе нерва во многом позволяло уточнить именно интраоперационное УЗИ.

При сравнении различных методов диагностики поражения нервов выявлено превосходство УЗИ перед другими методами (чувствительность и специфичность интраоперационного УЗИ составили 97% и 95%, соответственно). Было выявлено, что чувствительность интраоперационного УЗИ выше по сравнению с дооперационными данными (97 и 90%, соответственно). При подробном анализе различий между дооперационными и интраоперационными данными УЗИ выявлено, что во время операции УЗИ нерва позволяет более четко определить локализацию поражения, внутриствольные изменения и изменения вокруг нерва. УЗИ позволило правильно оценить тип повреждения нерва в 59% до операции и в 96% во время операции. Различия оказались статистически значимыми, что подтвердило преимущество интраоперационного УЗИ по сравнению с дооперационным исследованием.

3.2 Результаты хирургического лечения пациентов с травмой периферических нервов

Результаты комплексной интраоперационной диагностики позволили усовершенствовать методы оперативных пособий и разработать дифференцированные подходы к хирургической тактике при повреждениях периферических нервов конечностей. Предложен способ иссечения повреждённого участка периферического нерва при его внутривольных изменениях: во время хирургического вмешательства под эпиневрией периферического нерва вводили рентгеноконтрастное вещество выше зоны его повреждения и ниже зоны повреждения – в направлении к ней. Затем выполняли рентгенологическое исследование с определением протяжённости зоны повреждения за счёт отсутствия контрастирования повреждённого участка периферического нерва. Осуществляли резекцию данного участка. Проводили контроль морфологической структуры поперечных срезов периферического нерва путём выполнения в поперечном направлении ультразвукового исследования созданных при резекции периферического нерва его торцевых поверхностей. Анализировали полученные данные и при визуализации по всей площади поперечных срезов периферического нерва зернистой структуры продолжали хирургическое вмешательство. При полном или частичном отсутствии визуализации зернистой структуры проводили последовательную резекцию участков периферического нерва поперечных срезов до визуализации зернистой структуры по всей их площади. Для выполнения реконструктивных оперативных вмешательств предложено устройство для интраоперационной фиксации периферического нерва (рис. 11 в главе «Материалы и методы исследования»).

Результаты комплексного интраоперационного тестирования стали основой для разработки диагностико-тактического алгоритма (рис.22).

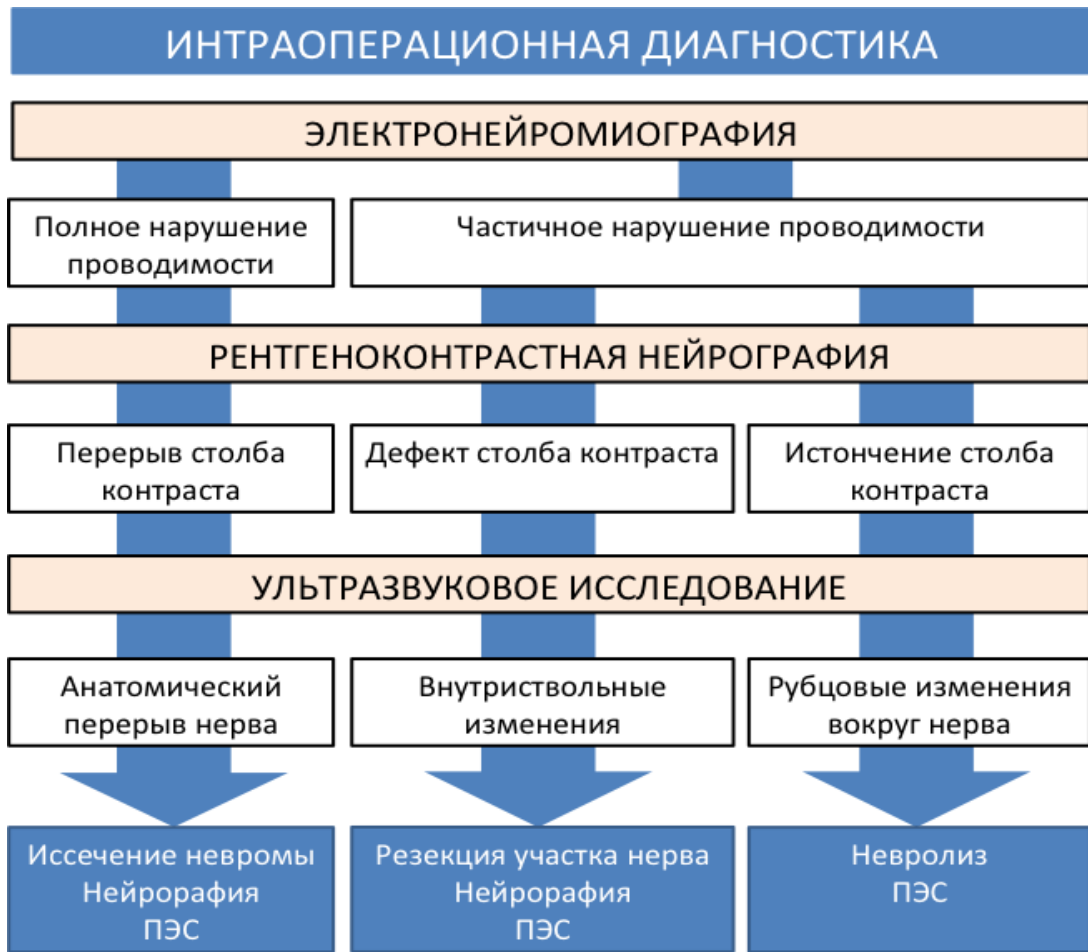


Рисунок 22 - Алгоритм интраоперационной диагностики и тактики хирургического лечения: ПЭС – прямая электростимуляция ствола нерва

При частичном нарушении проводимости (данные ЭНМГ), наличии эхо-признаков анатомической целостности ствола нерва и истончения столба контраста на нейрограммах возникают показания к выделению нерва из спаек (невролиз) с имплантацией на его ствол электродов для последующей прямой электростимуляции. Если вовремя интраоперационного электрофизиологического тестирования обнаружено полное нарушение проводимости нерва, при ультразвуковом сканировании найдены эхо-признаки анатомического перерыва его ствола с центральной невромой, а на нейрограмме выявляют перерыв столба контраста, то это являлось показанием к иссечению невromы, нейрорафии с установкой на ствол нерва электродов для последующей прямой электростимуляции. В

случаях обнаружения эхо-признаков грубых внутривольных изменений и дефекта столба контраста при контрастировании ствола нерва на фоне полного нарушения его проводимости, тактику хирургического лечения меняли в пользу резекции изменённого участка, нейрорафии с имплантацией электродов для последующей долгосрочной прямой электростимуляцией его ствола.

Для оценки эффективности тактики хирургического лечения пациентов с повреждением периферических нервов, основанной на новом алгоритме комплексной диагностики, включающим интраоперационное УЗИ, проведен анализ результатов лечения пациентов со стандартным алгоритмом (**1 группа, n=58, архивный материал**) и пациентов с новым алгоритмом диагностики, включающим дооперационное и интраоперационное УЗИ (**2 группа, n=51**). Как уже было сказано выше в главе материалы и методы исходно группы статистически значимо не различались по основным параметрам.

Результаты хирургического лечения в исследуемых группах больных оценивали на основе послеоперационных осложнений, данных клиничко-неврологического осмотра после операции в отдаленные сроки (6-12 мес.), и данных электрофизиологического исследования через 3-6 мес., 6-12 мес., и через 12-24 мес. У 7 пациентов, 6,4% (7/109) – выполнена нейрорафия, у 53,2% (58/109) - произведен невролиз, а у 40,4% (44/109) – резекция патологически изменённого участка нерва с последующей нейрорафией. Всем пациентам осуществляли имплантацию на ствол нерва электродов для прямой электростимуляции (рис.23).

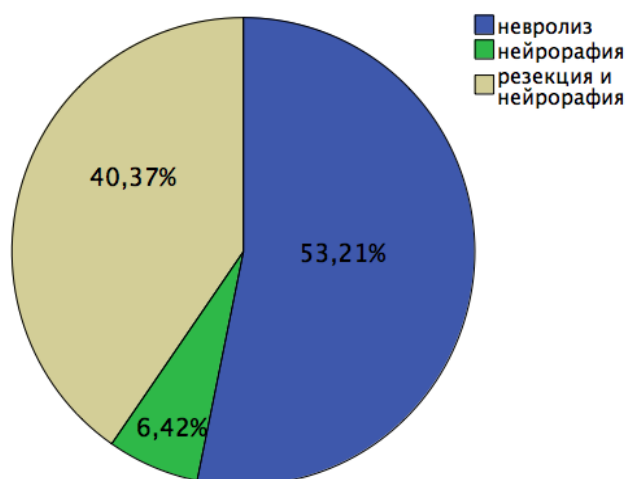


Рисунок 23 – Распределение больных по типам выполненных операций

Группы различались по типам выполненных операций (таблица 10). В 1 группе в основном выполнили невролиз (70%, 40/58), а во 2 группе – нейрорафию (65%, 33/51).

Таблица 10 – Распределение больных по типам выполненных операций в 1 и 2 группах

Тип операции	1 группа стандартный алгоритм (n - 58)	2 группа алгоритм с УЗИ (n - 51)	p*
Невролиз	70% (40)	35% (18)	0,01
Нейрорафия	3% (2)	14% (7)	
Нейрорафия с резекцией участка нерва	27% (16)	51% (26)	

* Анализ с помощью критерия χ^2 (точный критерий Фишера)

Среди послеоперационных осложнений встречали: гематома в области операции (3,6%, 4/109), инфицирование раны и несостоятельность швов (0,9%, 1/109). Группы не различались по частоте послеоперационных осложнений.

В сроки 3-12 мес. после операции изменение данных клинико-неврологического осмотра были прослежены у 89% (97/109) пациентов. По данным клинико-неврологического осмотра отметили статистически значимое улучшение неврологического статуса по модифицированной

шкале оценки [5] у большинства пациентов ($p < 0,05$ по критерию МакНемара для связанных выборок) (рис.24). Количество пациентов с выраженной степенью двигательных нарушений (M0 и M1) уменьшилось с 66% (72/109) до 30% (29/97). Пациентов с отсутствием клинических улучшений оказалось 28% (27/97).

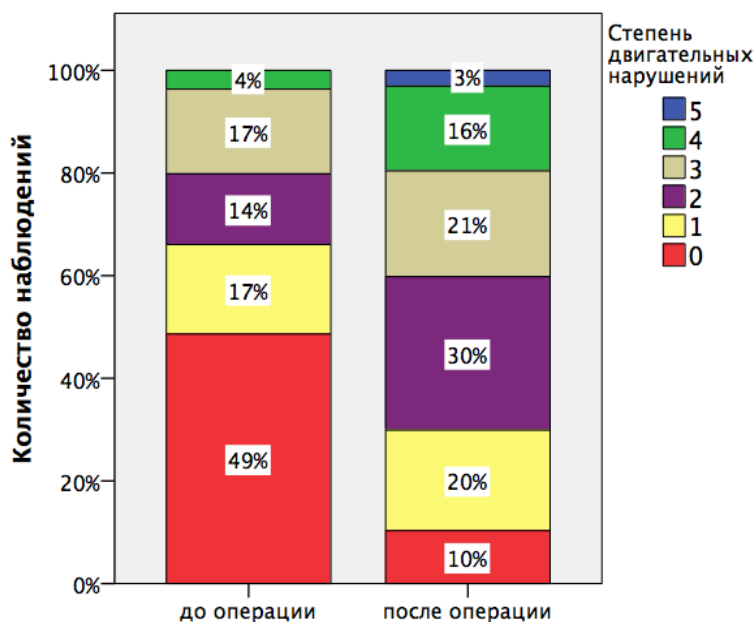


Рисунок 24 – Распределение всех больных по степени двигательных нарушений до операции (n-109) и через 3-6 мес. после операции (n-97) по модифицированной классификации двигательных и чувствительных нарушений [5]

По данным клинико-неврологического осмотра через 3-6 мес. после операции отмечали статистически значимое улучшение двигательной функции в каждой группе $p < 0,001$ (критерий знаковых рангов Уилкоксона) (рис.25).

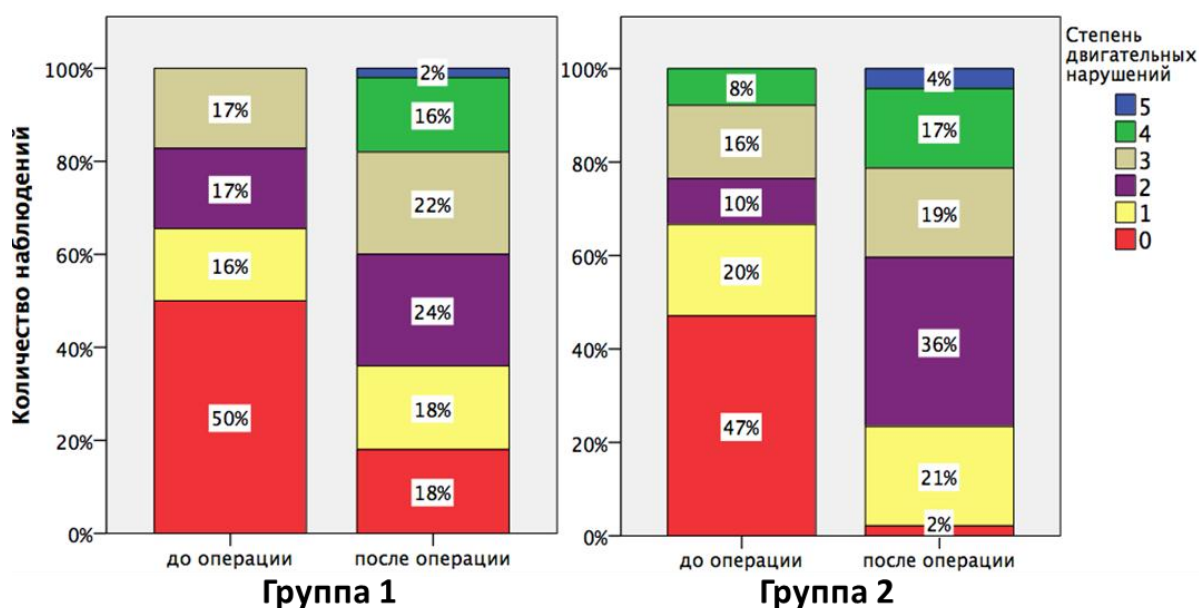


Рисунок 25 – Распределение больных по степени двигательных нарушений в группе 1 и 2 до и после операции по модифицированной классификации двигательных и чувствительных нарушений [5]

Однако во второй группе выявлен более выраженный регресс двигательных нарушений. Отмечали уменьшение группы больных с выраженной степенью двигательных нарушений (M0 и M1) с 66% (38/58) до 36% (18/50) в 1 группе и с 67% (34/51) до 23% (11/47) во 2 группе. Различия по динамике клинических проявлений между группами были статистически значимые: $p=0,025$ (двухсторонний точный критерий Фишера).

Также отмечали значимое улучшение чувствительности в каждой группе $p<0,001$ (критерий знаковых рангов Уилкоксона) (рис.26). Однако во второй группе выявлен более выраженный регресс чувствительных нарушений. Отмечали уменьшение группы больных с выраженной степенью двигательных нарушений (Ч0 и Ч1) с 63% (38/58) до 26% в 1 группе и с 59% до 21% во 2 группе, при этом у всех пациентов 2 группы восстановилась чувствительность в той или иной степени. Различия по динамике клинических проявлений между группами были статистически значимые: $p=0,034$ (двухсторонний точный критерий Фишера).

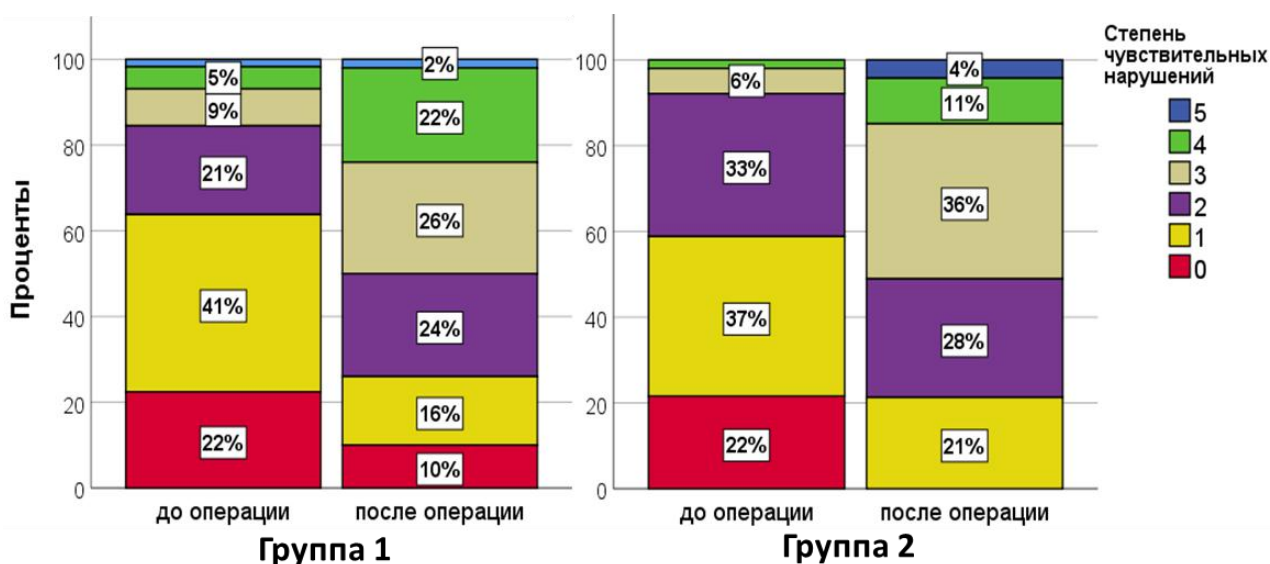
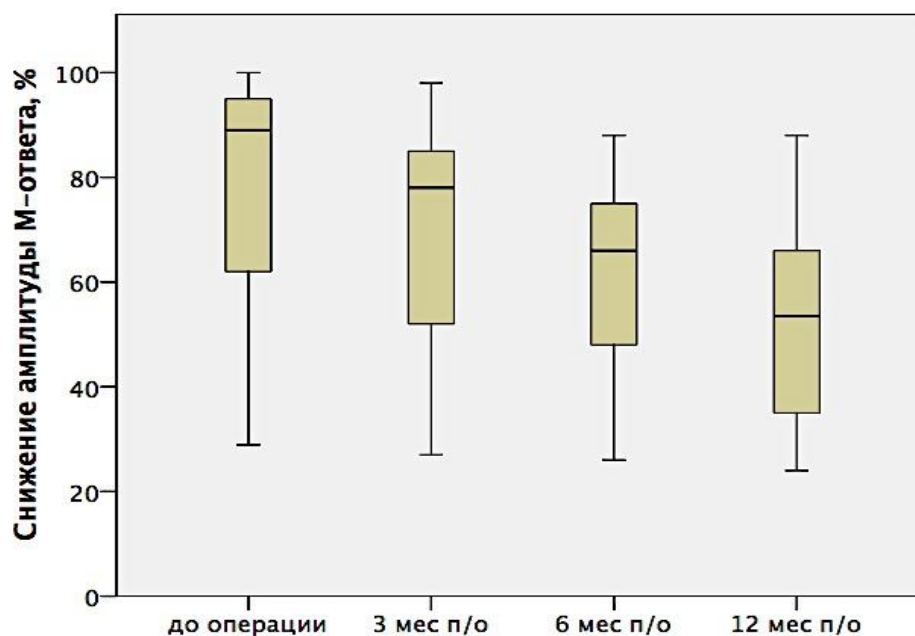


Рисунок 26 – Распределение больных по степени чувствительных нарушений в группе 1 и 2 до и после операции по модифицированной классификации двигательных и чувствительных нарушений [5]

Исследование ЭНМГ в послеоперационном периоде было проведено у 98% (107/109) пациентов через 3-6 мес., у 88% (96/109) пациентов - через 6-12 мес., и у 86% (94/109) пациентов – через 12-24 мес. По данным ЭНМГ положительную динамику у большинства пациентов наблюдали уже через 3 мес. после операции: отмечено статистически значимое повышение амплитуды М-ответа (рис. 27). Однако, существенное повышение амплитуды М-ответа было отмечено через 6-12 мес. после операции (значимым изменением ЭНМГ после операции считали переход на более низкую степень снижения М-ответа [19]. Это связано с большой долей пациентов с полным перерывом нерва и проведенной нейрорафией, так как реиннервационные процессы после шва нерва протекают относительно медленно. Не было отмечено существенной положительной динамики через год после операции у 23% (11/92) пациентов.



Число пациентов	109	107	96	94
Медиана (25;75 перцентиль)	89 (61;96)	78 (52;85)	66 (48;75)	53 (35;66)
p	критерий знаковых рангов Уилкоксона	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Улучшение, % (n)		18% (19)	54% (52)	77% (71)

Рисунок 27 – Показатель процентного снижения амплитуды М-ответа при ЭНМГ у всех пациентов до операции, через 3, 6, и 12 мес. после операции.

По данным ЭНМГ положительную динамику у большинства пациентов наблюдали уже через 3 мес. после операции: отмечено статистически значимое повышение амплитуды М-ответа. В 1 группе динамика повышения амплитуды М-ответа была более выраженная в общей массе пациентов через 3 и 6 мес. после операции (статистически не значимое различие). Это различие можно объяснить преобладанием невролиза в общем объеме операций в 1 группе. Однако через 12 мес. процент значимого улучшения показателей ЭНМГ выравнивался в обеих группах, что было связано с большой долей пациентов с полным перерывом нерва и проведенной нейрорафией во 2 группе и отсроченными реиннервационными процессами (рис.28).

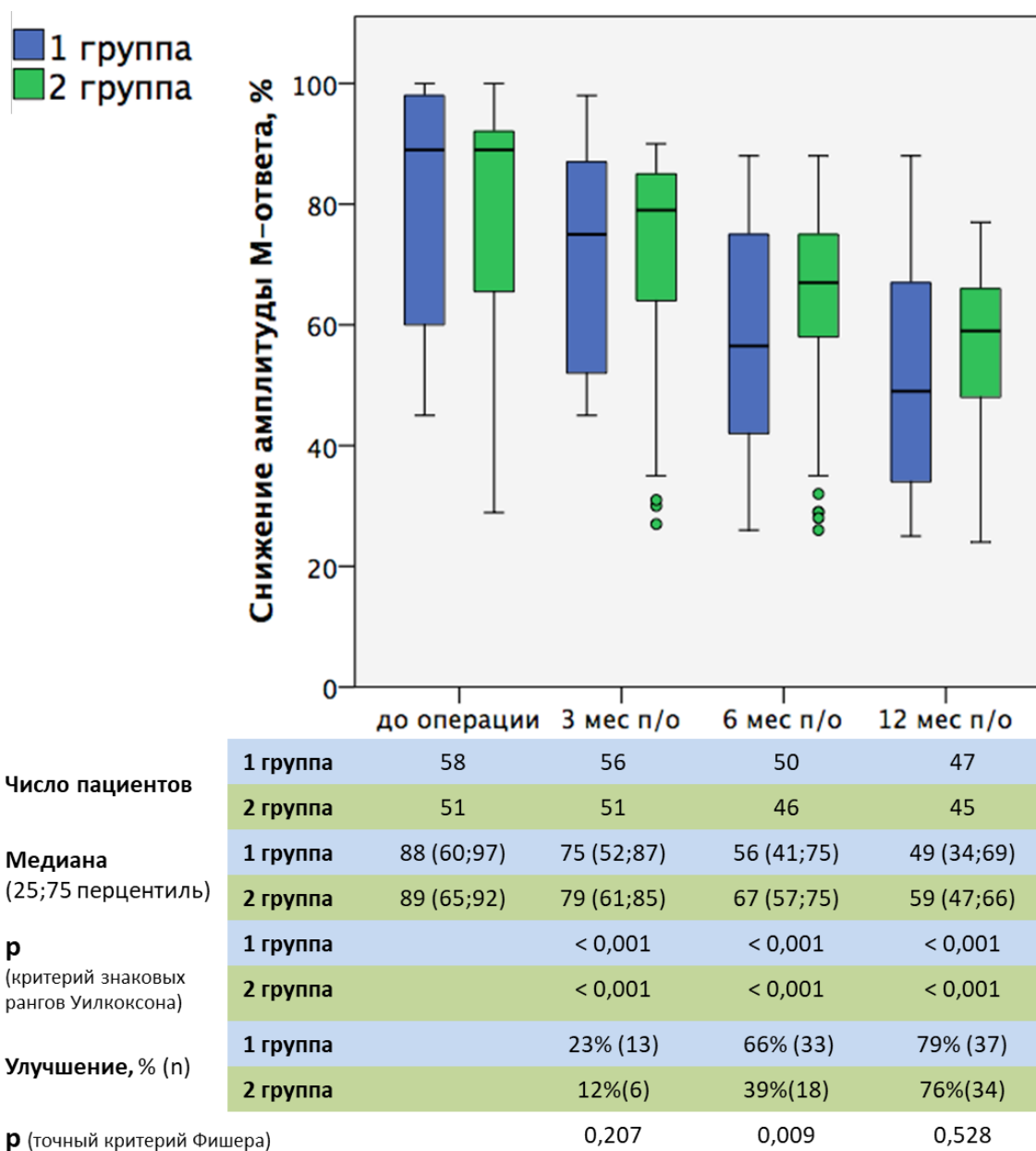
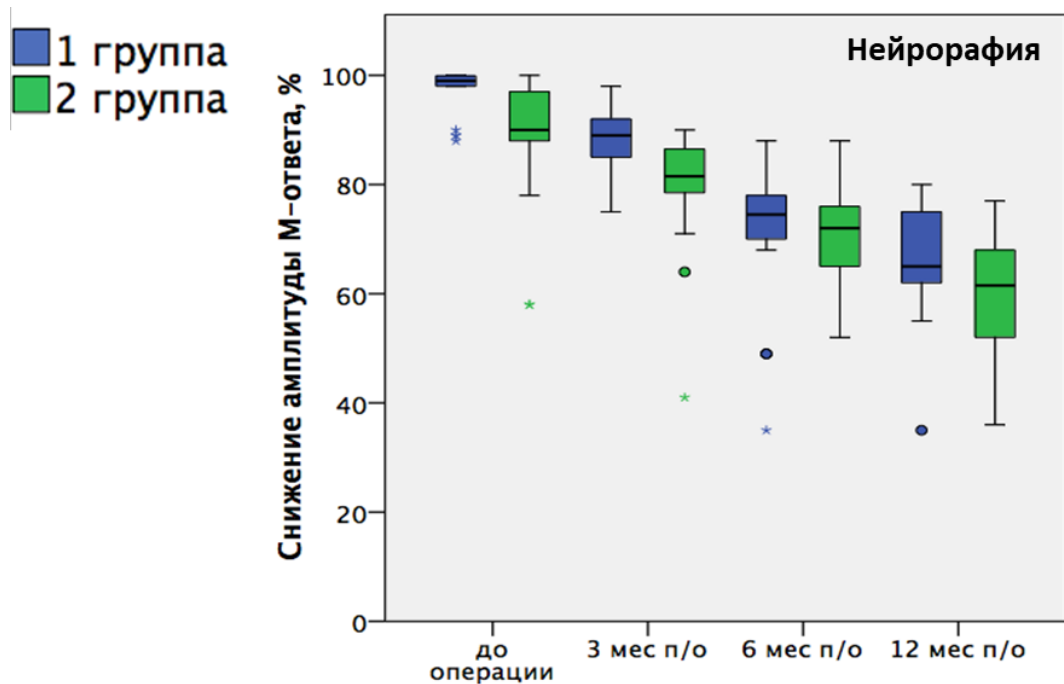


Рисунок 28 – Диаграмма сравнения снижения амплитуды М-ответа через 3, 6 и 12 мес. после операции в 1 и 2 группах

При сравнении значимых изменений ЭНМГ после операции (переход на более низкую степень снижения М-ответа) через 3 мес. отмечали положительную динамику в 1 группе (улучшение у 23% пациентов, по сравнению с 12% во 2 группе); через 6 мес. разница нивелировалась (56% и 57%, соответственно в 1 и 2 группе); а через 12 мес. отмечали больший процент пациентов со значимым улучшением во 2 группе (66% и 87%, соответственно в 1 и 2 группе). Таким образом, не было отмечено существенной положительной динамики через год после

операции у 34% (16/47) пациентов в 1 группе и 13% (6/47) во 2 группе. Однако при статистическом анализе различия не были значимыми ($p > 0,05$). Учитывая значимое различие групп по типу выполненных операций, нами был проведен отдельный анализ изменения амплитуды М-ответа при ЭНМГ в зависимости от типа операции: невролиз или нейрорафия. При сравнении результатов после нейрорафии не выявлено существенных различий (рис.29).



Число пациентов	1 группа	18	17	14	13
	2 группа	33	32	30	30
Медиана (25;75 перцентиль)	1 группа	99 (96;100)	89 (82;93)	74 (71;78)	65 (59;76)
	2 группа	90 (87;97)	81 (78;87)	72 (65;76)	61 (51;68)
р (критерий знаковых рангов Уилкоксона)	1 группа		0,001	0,001	0,002
	2 группа		< 0,001	< 0,001	< 0,001
Улучшение, % (n)	1 группа		0% (0)	50% (7)	100% (13)
	2 группа		10%(3)	57%(17)	90%(27)
р (точный критерий Фишера)			0,253	0,463	0,329

Рисунок 29 – Диаграмма сравнения снижения амплитуды М-ответа через 3, 6 и 12 мес. после нейрорафии в 1 и 2 группах

При проведении отдельного сравнения результатов невролиза выявлено существенное преимущество во 2 группе пациентов по данным

ЭНМГ через 12 мес. после операции (рис. 30). Удалось улучшить результаты лечения при повреждении периферических нервов конечностей по данным электронейромиографии на 23% ($p=0,048$).

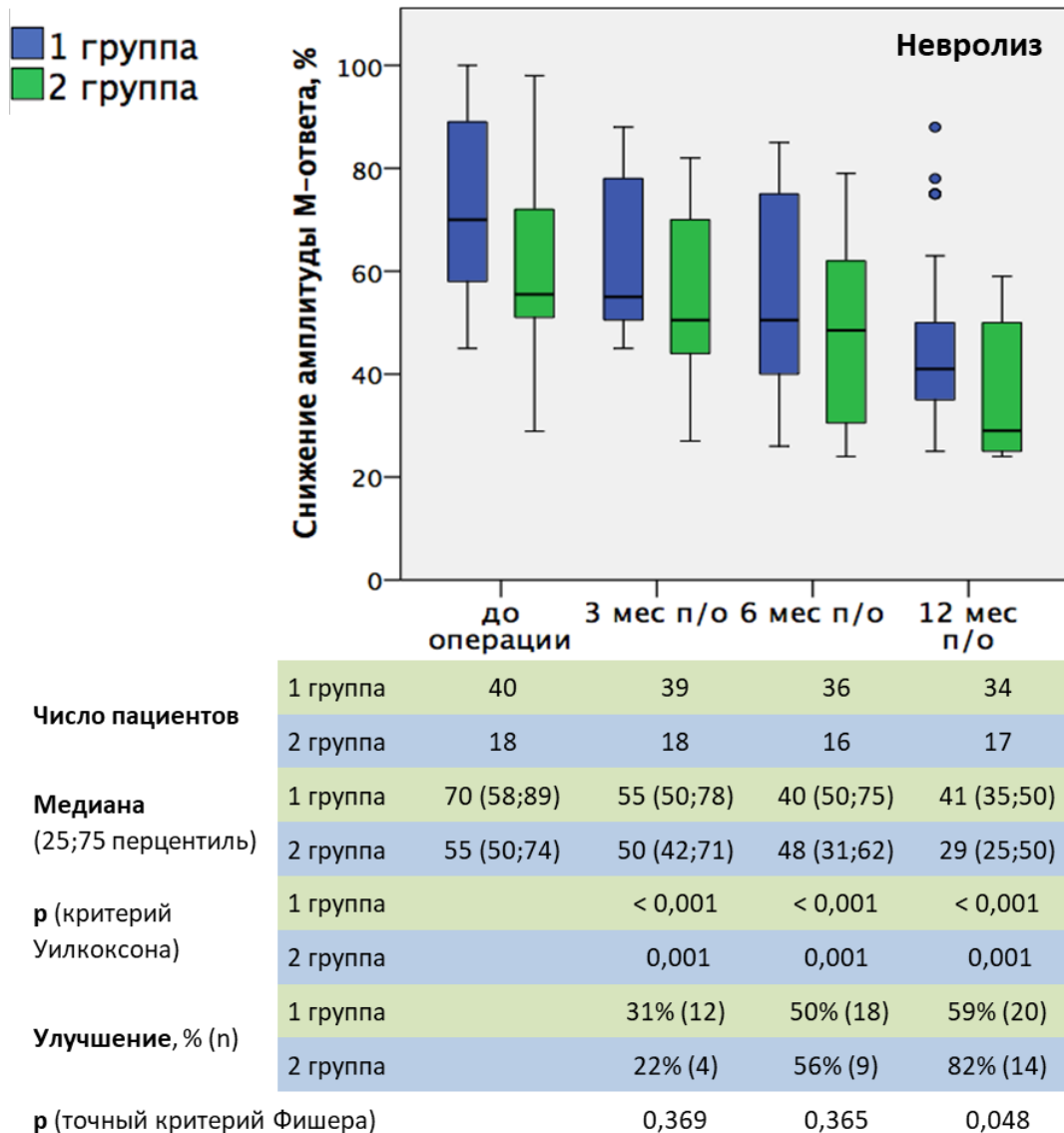


Рисунок 30 – Диаграмма сравнения снижения амплитуды М-ответа через 3, 6 и 12 мес. после невролиза в 1 и 2 группах

Во время оперативного вмешательства у 8,6% (5/58) пациентов 1 группы, с клиникой грубого нарушения функции, но частичного нарушения проводимости и локальным дефектом столба контраста при нейрографии (рис.31), ствол нерва анатомически оказался сохранным. Этим пациентам был выполнен невролиз нерва с установкой электродов для последующей электростимуляции.

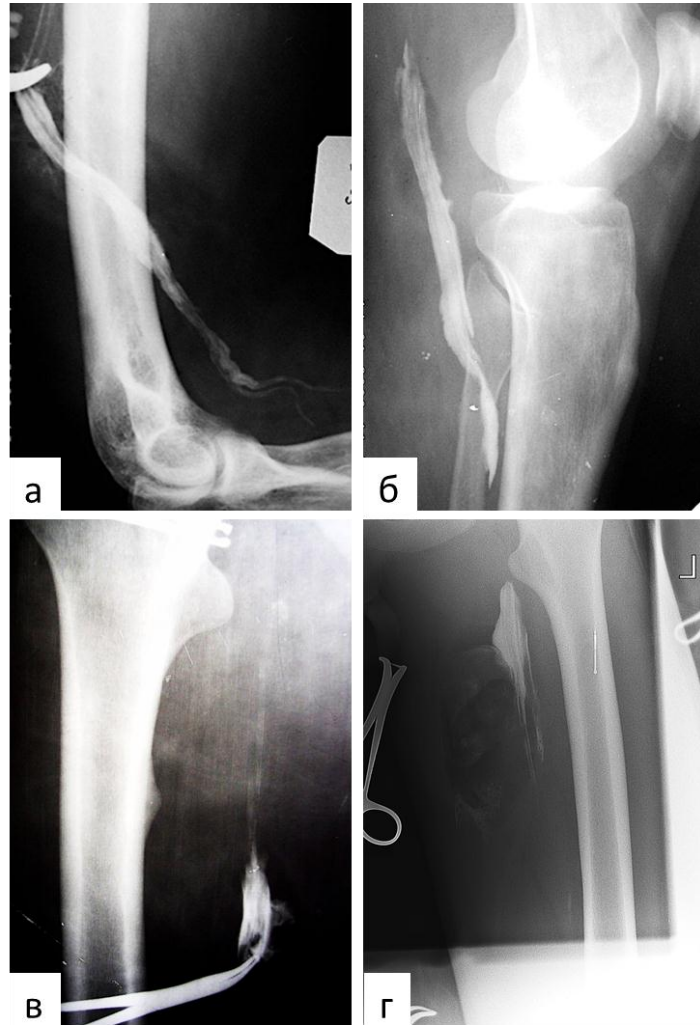


Рисунок 31 – Интраоперационная рентгеноконтрастная нейрография. Сужение столба контрастного вещества: локальное сужение (а,б), конусообразное сужение (в), истончение столба контраста (г).

Во 2 группе у 7 пациентов выявлен дефект столба контраста при нейрографии при частичном нарушении проводимости по интраоперационной ЭНМГ. Интраоперационное УЗИ позволило подтвердить выраженные внутривольные изменения нерва у этих пациентов и определить, кроме того, дополнительно у двух пациентов также внутривольные изменения (рис.32). Всем пациентам 2 группы с выявленными внутривольными изменениями (17,6%, 9/51) выполнена нейрография с резекцией участка измененного нерва и установка на ствол нерва электродов для последующей электростимуляции.

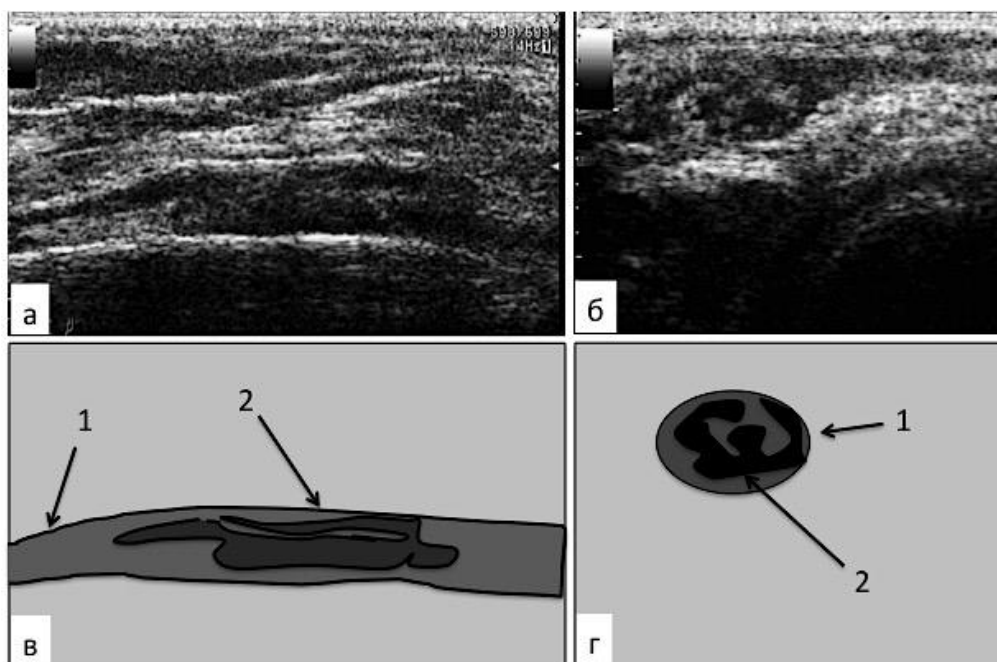


Рисунок 32 – Ультразвуковая картина внутривольных изменений. **а)** продольное сканирование, **б)** поперечное сканирование, **в)** и **г)** – схема ультразвукографической картины. Увеличение гиперэхогенных участков внутри нерва, окружающих гипоэхогенные нервные пучки, нарушение внутренней дифференцировки с потерей сотовой структуры без изменения диаметра нерва, с нарушением наружной оболочки и нечеткостью контура при частичном разрыве нерва. 1 – нерв, 2 – внутривольные изменения

При анализе результатов лечения группы пациентов с локальным внутривольным дефектом нерва по данным рентгеноконтрастной нейрографии (рис.33) и УЗИ (рис.34) у 5 пациентов в 1 группе и 9 пациентов во 2 группе выявлено, что значимые увеличение амплитуды М-ответа по данным ЭНМГ наблюдали через 12 мес. лишь у 1 из 5 пациентов первой группы и у 8 из 9 пациентов второй группы (различие было статистически значимым, $p=0,023$).



Рисунок 33 – Интраоперационная рентгеноконтрастная нейрография. Дефект столба контрастного вещества: краевой дефект (а,б), внутривольный дефект (в), частичный перерыв столба контраста (г)

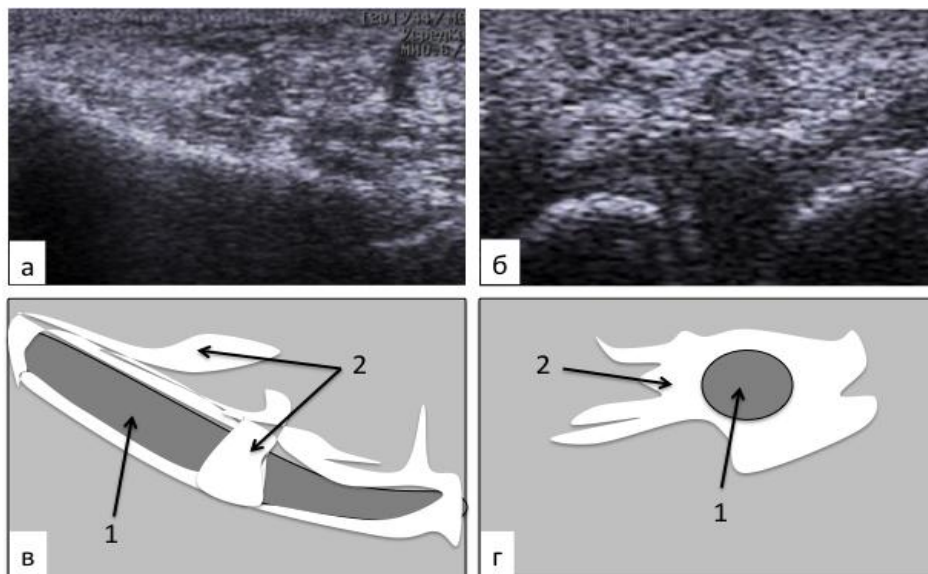


Рисунок 34 – УЗИ картина рубцовых изменений вокруг нерва. а) продольное сканирование, б) поперечное сканирование, в) и г) – схема. Сохраняется типичная картина нерва на поперечном срезе в виде пчелиных сот. 1 – нерв, 2 – рубцовый перипроцесс.

Улучшение результатов лечения во 2 группе было связано с правильной оценкой степени поражения нерва (значимые внутривольные изменения выявленные по данным интраоперационного УЗИ) и выборе правильной тактики хирургического лечения. Применение нового алгоритма диагностики, включающего УЗИ, позволило улучшить результаты лечения на 21% в общей группе пациентов.

Таким образом, при сравнении двух подходов к лечению выявлено преимущество интраоперационного использования ультразвукового исследования по результатам клинично-неврологического обследования и данным ЭНМГ после операции. Отмечали уменьшение группы больных с выраженной степенью двигательных нарушений (M0 и M1) на 30% и 44%, соответственно в 1 и 2 группе. Различия в группах были статистически значимые по данным клинично-неврологического обследования несмотря на небольшой объем выборки. Значимое улучшение по данным ЭНМГ через 12 мес. после операции также было отмечено у 87% (41/47) пациентов во 2 группе и лишь у 66% (31/47) пациентов в 1 группе. То есть, улучшение отмечено на 21% больше во 2 группе пациентов. Различие не было статистически значимым, что связано с небольшим количеством пациентов. Однако, при анализе группы больных, которым выполнен невролиз, выявлено статистически значимое преимущество во 2 группе пациентов ($p=0,048$), что указывало на правильно выбранную тактику хирургического лечения. В 8,6% случаев отсутствие положительной динамики было связано с неправильной пред- и интраоперационной оценкой состояния нервного волокна, и, соответственно, выбором хирургической тактики. Это позволило нам сделать вывод об улучшении результатов хирургического лечения при травме периферических нервов с применением разработанного нами нового алгоритма на основе комплексной интраоперационной диагностики, включающей УЗИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данного исследования было улучшение результатов лечения пациентов с повреждением периферических нервов конечностей путем оптимизации тактики хирургического лечения на основании разработанного комплекса интраоперационной диагностики, включающего электронейромиографию, рентгеновскую контрастную нейрографию и интраоперационное ультразвуковое исследование нервов. Для оценки результатов хирургического лечения пациентов с повреждением периферических нервов, основанном на новом алгоритме комплексной диагностики, проведено одноцентровое ретроспективное открытое контролируемое клиническое исследование. Исследование основано на анализе результатов диагностики и лечения 109 пациентов с повреждением периферических нервов конечностей. В 1 группу вошло 58 пациентов с повреждением периферических нервов верхних и нижних конечностей, отобранных в ходе анализа 100 историй болезни архивного материала, а во 2-ю - были включены 51 пациент, у которых в комплекс до- и интраоперационной диагностики помимо ЭНМГ-тестирования и контрастной нейрографии включена высокоразрешающая ультрасонография. Обследование пациентов включало инструментальные методы диагностики: электрофизиологические (электромиография и электронейромиография), обзорная рентгенография, интраоперационная нейрография, КТ, МРТ, ультразвуковое исследование.

В нашем исследовании впервые проведена оценка различных методов диагностики в выявлении полного или частичного анатомического и функционального перерыва нерва с определением чувствительности каждого метода в выборе правильной тактики хирургического лечения. ЭНМГ исследование позволяет определить только степень нарушения проведения по нервному стволу и уровень его повреждения. Данное исследование не позволяет судить о характере и протяженности ствольных изменений. Кроме того, некоторые авторы

отмечают отсутствие корреляции между результатами ЭНМГ исследования и клиническими данными. Нередко при незначительном восстановлении проводимости можно регистрировать практически нормальные показатели ЭНМГ. Помимо этого, ЭНМГ исследование не в состоянии диагностировать неврому, оценить состояние окружающих тканей и наличие инородных тел. В этой связи обследование дополняют методами нейровизуализации (МРТ, нейрография, УЗИ). Большинство рентгенологов и клиницистов предпочитают использовать МРТ для визуализации повреждённых стволов периферических нервов. Однако МРТ имеет ряд существенных недостатков, основным из которых является незначительное различие при визуализации между стволом нерва и окружающими тканями. Кроме того, при данном методе практически невозможно исследование внутривольной структуры нерва и небольших изменений ствола нерва (частичный перерыв, повреждение контура). При МРТ затруднительно детализировать небольшие структурные изменения, что не позволяет исследовать процессы восстановления нерва. При МРТ нервы малого диаметра практически не дифференцируют от других тканей, но достаточно хорошо визуализируют нервы большого диаметра, окружённые жировой прослойкой. Несмотря на высокую контрастность мягких тканей и возможность оценки объекта в разных плоскостях, МРТ в диагностике периферических нервов остаётся менее предпочтительным методом обследования по сравнению с УЗИ. Развитие УЗИ позволяет в настоящий момент точно диагностировать различную патологию нервной системы, включая травму, опухоль и компрессионную нейропатию. УЗИ является надёжным, дешёвым, практичным и легко доступным методом диагностики в клинической практике. При травме периферического нерва УЗИ также оказалось эффективным методом, что подтверждается увеличением количества неврологов и нейрохирургов, дополнительно применяющих УЗИ для определения тактики лечения. Во-первых, УЗИ обеспечивает качественное динамическое изображение в пространстве. Во-вторых, является интерактивным обследованием, позволяющим проводить исследования в зоне локализации боли и повышенной чувствительности, а

также области предполагаемого повреждения. В-третьих, при УЗИ возможно выполнение функциональных проб и изучение структурных изменений в динамике. Наконец, во время УЗИ отсутствуют отрицательные моменты, связанные с необходимостью находиться в замкнутом пространстве, как при МРТ обследовании.

Оценка различных методов дооперационной и интраоперационной диагностики повреждения нервов (клинико-неврологический осмотр, ЭНМГ, нейрография, УЗИ) проведена у 51 пациента. Сопоставление результатов ЭНМГ-исследования и УЗИ до операции, с данными интраоперационного обследования позволило нам во многом уточнить степень, протяжённость, глубину структурных изменений периферических нервов конечности. При неврологическом обследовании в 72,5% наблюдений выявлена клиника полного аксонального повреждения периферических нервов. Однако по данным ЭНМГ тестирования на операционном столе полное нарушение проводимости по стволу периферического нерва имело место только у 60,8% пациентов, т.е. на 11,7% увеличилась группа с частичным повреждением нервных структур. Примечательно, что данные УЗИ до операции полностью совпадают с результатами интраоперационной контрастной нейрографии, при которой у 56,9% пострадавших на эхограммах выявляли грубые структурные изменения (диастаз, неврома, локальные внутривольные изменения). При УЗИ открытого ствола нерва вышеуказанные морфологические изменения были обнаружены уже 32 (62,7%), что наиболее точно отражало полное повреждение (перерыв или выраженные внутривольные изменения нерва). Протяжённость и глубину этих структурных изменений в повреждённом стволе нерва во многом позволяла уточнить именно интраоперационное УЗИ.

К 14 пациентам (27,5%) с частичным повреждением нервных стволов по данным клинико-неврологического обследования при интраоперационном ЭНМГ добавили еще 7 пациентов (13,7%). А после

интраоперационного УЗИ количество пациентов с частичным повреждением наоборот уменьшилось на 3,9 % (2/51) по сравнению с дооперационными результатами. Если сравнить данные ЭНМГ тестирования и сканирование нерва на операционном столе с дооперационными результатами, то диагноз частичного повреждения эти две методики позволили уточнить в 9,8% (5/51) случаев, что говорит о более высокой их информативности. Точность интраоперационного ультразвукового исследования подтверждает и тот факт, что у пациентов (n=18) с анатомически сохранным стволом нерва обнаружены локальные изменения его эхогенности (n=9), характерные для рубцового процесса либо наличия внутривольных невром, которые коренным образом изменили тактику лечения.

При определении чувствительности и специфичности различных методов диагностики (сравнивали результаты с данными гистологического исследования удаленного сегмента нерва, а также объединенных результатах клинико-неврологического, ЭНМГ и УЗИ после операции через 3-12 мес.) выявлено превосходство УЗИ перед другими методами. Чувствительность клинико-неврологического обследования и ЭНМГ до операции и во время операции составляла 81-85%, специфичность 71-83%. Чувствительность и специфичность рентгеноконтрастной нейрографии составили 93% и 95%, соответственно. УЗИ до операции показало схожие результаты: 90% и 95%. Чувствительность интраоперационного УЗИ была выше по сравнению с дооперационным УЗИ (97 и 90%, соответственно). При подробном анализе различий между дооперационными и интраоперационными данными УЗИ выявлено, что во время операции УЗИ “открытого” нерва позволяет более четко определить локализацию поражения, внутривольные изменения и изменения вокруг нерва. УЗИ позволило получить “отличную” картину типа повреждения нерва в 59% до операции и в 96% во время операции. Различия оказались статистически

значимыми, что подтвердило преимущество УЗИ интраоперационного по сравнению с дооперационным исследованием.

В основу предложенного нами алгоритма диагностики и тактики хирургического лечения легли данные комплексного до - и интраоперационного тестирования периферических нервов, среди которых особое место занимает высокоинформативная ультрасонография. Сопоставляя показатели клинико-электрофизиологических и лучевых методов исследования, определены диагностические критерии, позволяющие строго персонализировано применять различные методы хирургического пособия у пациентов с повреждениями периферических нервов конечностей. В предложенном алгоритме определения хирургической тактики данные диагностики, в том числе интраоперационной ультрасонографии, мы разделили на 3 группы: 1 – изменения вокруг нерва (эпинеуральный фиброз, компрессионная нейропатия); 2 – внутриствольные изменения (интраневральный фиброз, внутриствольная неврома, частичный разрыв нерва); 3 – полный анатомический перерыв (без и с концевой невромой). При частичном нарушении проводимости (данные ЭНМГ), наличии эхо-признаков анатомической целостности ствола нерва и истончения столба контраста на нейрограммах возникают показания к выделению нерва из спаек (невролиз) с имплантацией на его ствол электродов для последующей прямой электростимуляции. Если вовремя интраоперационного электрофизиологического тестирования обнаружено полное нарушение проводимости нерва, при ультразвуковом сканировании найдены эхо-признаки анатомического перерыва его ствола с центральной невромой, а на нейрограмме выявляют перерыв столба контраста, то это являлось показанием к иссечению невромы, нейрорафии с установкой на ствол нерва электродов для последующей прямой электростимуляции. В случаях обнаружения эхо-признаков грубых внутриствольных изменений и дефекта столба контраста при контрастировании ствола нерва на фоне

полного нарушения его проводимости, тактику хирургического лечения меняли в пользу резекции изменённого участка, нейрорафии с имплантацией электродов для последующей долгосрочной прямой электростимуляцией его ствола.

Разработанный алгоритм был апробирован во 2 группе пациентов. Так, при частичном нарушении проводимости, наличия эхо-признаков анатомической целостности ствола нерва и истончения столба контраста на нейрограммах возникают показания к невролизу с имплантацией на его ствол электродов для последующей прямой электростимуляции. Если во время интраоперационного тестирования обнаружено полное нарушение проводимости нерва, при ультразвуковом сканировании найдены эхо-признаки анатомического перерыва его ствола с центральной невромой, а на нейрограмме выявляют дефект столба контраста, то возникают показания к иссечению невromы, нейрорафии с установкой на ствол нерва электродов для последующей прямой электростимуляции. В случаях обнаружения эхо-признаков грубых внутривольных изменений и дефекта столба контраста при контрастировании ствола нерва на фоне полного нарушения его проводимости, тактику хирургического лечения склоняли в пользу резекции изменённого участка, нейрорафии с имплантацией электродов для последующей долгосрочной прямой электростимуляцией его ствола.

Для оценки эффективности тактики хирургического лечения пациентов с повреждением периферических нервов, основанной на новом алгоритме комплексной диагностики, включающим интраоперационное УЗИ, проведено сравнение результатов лечения пациентов со стандартным алгоритмом (**1 группа, n=58**) и пациентов с новым алгоритмом диагностики, включающим дооперационное и интраоперационное УЗИ (**2 группа, n=51**). Среди всех пациентов включенных в исследование невролиз выполнен у 53,2% (58/109), нейрорафия у 46,7% (51/109). Согласно разработанному алгоритму, из 51

пациента основной группы у 65% (33/51) выполнена нейрорафия и резекция патологически изменённого участка нерва с последующей нейрорафией и имплантацией на ствол нерва электродов для прямой электростимуляции, у 35% (18) - осуществлён невролиз. Группы существенно различались по типам выполненных операций. В 1 группе выполнен в основном невролиз (70%, 40/58).

Послеоперационные осложнения наблюдали редко. У 4-х пациентов (3,6%) выявлена подкожная гематома, у 1 пациента (0,9%) – инфицирование раны и несостоятельность швов. У 89% (97/109) пациентов после операции проведен контрольный неврологический осмотр через 3-12 мес. после операции, у 86% (94/109) – исследование ЭНМГ через 12 мес. после операции.

Несмотря на небольшой объем выборки, различия в двух группах были статистически значимые по данным клинико-неврологического обследования. Количество пациентов с выраженной степенью двигательных нарушений (M0 и M1) уменьшилось на 36% (с 66% до 30%). У 28% (27/97) пациентов клинического улучшения не было выявлено.

Результаты нейрорафии с последующим проведением прямой электростимуляции через установленные на ствол нерва электродов у пострадавших с полным анатомическим перерывом ствола нерва были прогнозируемые и, как уже было сказано выше, зависели от тяжести, характера и уровня травматического повреждения нервного ствола, которые практически не отличались в 1 и 2 группе. У большинства пациентов после операции выявлена положительная динамика по данным клинико-неврологического осмотра и данным ЭНМГ. Количество пациентов с выраженной степенью двигательных нарушений (M0 и M1) уменьшилось на 36% (с 66% до 30%). У 28% (27/97) пациентов не было выявлено клинического улучшения и у 23% (11/92) пациентов не отмечено положительной динамики через год после операции по данным ЭНМГ. У большинства пациентов улучшение по данным ЭНМГ выявлено через 12-

24 мес. после операции, что можно объяснить большей долей пациентов с проведенной нейрорафией, так как реиннервационные процессы после шва нерва протекают относительно медленно.

Сравнительный анализ результатов хирургического лечения больных 1 и 2 группы с отсутствием анатомического повреждения невралических стволов, но с признаками внутривольных изменений на фоне полного и/или частичного нарушения проводимости во время ЭНМГ-тестирования оказался разным и зависел от типа оперативного вмешательства. Так, у 18% (9/51) пациентов 2 группы, которым выполняли резекцию рубцово-изменённого участка ствола нерва и нейрорафия с последующей ПЭС, положительный исход по клинико-электронейромиографическим данным оказался выше, чем в 1 группе (9%, 5/58). Значимое увеличение амплитуды М-ответа по данным ЭНМГ наблюдали через 12 мес. лишь у 1 из 5 пациентов первой группы и у 8 из 9 пациентов второй группы (различие было статистически значимым, $p=0,023$). Интересно, что эти результаты оказались выше даже по сравнению с пациентами, которым операцию выполняли по поводу анатомического перерыва нерва. Данный феномен можно объяснить с двух позиций: во-первых, применением в послеоперационном периоде прямой электростимуляции сшитого нерва, а во-вторых, нейрорафия в случаях анатомического перерыва, как правило, выполняли в отдалённые сроки после травмы, когда в дистальном отрезке нерва, лишённого связи с центральным стволом, более быстрыми темпами развивается так называемая «валлеровская дегенерация», поскольку нарушается ток аксоплазмы и единое кровообращение дистального и центрального участков нерва.

Результаты хирургического лечения пациентов с частичным нарушением проводимости за счёт сдавления ствола нерва рубцово-спаечным процессом, которым выполняли невролиз с последующей прямой электростимуляцией, оказались весьма обнадеживающими и у отдельных больных было достигнуто практически полное восстановление

функции нерва через 6-12 мес. после оперативного вмешательства. Значительно больший процент пациентов с улучшением по данным ЭНМГ выявлен через 12-24 мес. после операции, что можно объяснить большей долей пациентов с нейрорафией, так как реиннервационные процессы после шва нерва протекают относительно медленно.

ЭНМГ также позволила выявить повышение амплитуды М-ответа у большинства пациентов уже через 3 мес. после операции. Значимые изменения ЭНМГ выявлены у 18%, 54% и 77% пациентов, соответственно через 3, 6 и 12 мес. Не было отмечено существенной положительной динамики через год после операции у 23% (11/92) пациентов. Значительно больший процент пациентов с улучшением по данным ЭНМГ выявлен через 12-24 мес. после операции, что можно объяснить большой долей пациентов с проведенной нейрорафией, так как реиннервационные процессы после шва нерва протекают относительно медленно. При сравнении двух подходов к лечению выявлено преимущество интраоперационного использования УЗИ по результатам ЭНМГ после операции. Отметим уменьшение группы больных с выраженной степенью двигательных нарушений (M0 и M1) на 30% и 44%, соответственно в 1 и 2 группе. Различия в группах были статистически значимые по данным клинико-неврологического обследования несмотря на небольшой объем выборки. Значимое улучшение по данным ЭНМГ через 12 мес. после операции также было отмечено у 87% (41/47) пациентов во 2 группе и лишь у 66% (31/47) пациентов в 1 группе. То есть, улучшение отмечено на 21% больше во 2 группе пациентов. Различие не было статистически значимым, что связано, вероятно с небольшим количеством пациентов. Однако, при анализе группы больных, которым выполнен невролиз, выявлено статистически значимое преимущество во 2 группе пациентов ($p=0,048$), что указывало на правильно выбранную тактику хирургического лечения (рис.8). В 8,6% случаев отсутствие положительной динамики было связано с неправильной пред- и интраоперационной оценкой состояния

нервного волокна, и, соответственно, выбором хирургической тактики. Это позволило нам сделать вывод об эффективности применения разработанного нами нового алгоритма хирургического лечения на основе комплексной интраоперационной диагностики, включающей УЗИ.

Ближайшие результаты лечения 9 пациентов с полным нарушением проводимости и грубыми внутривольными изменениями, которым была выполнена резекция участка нерва, показали, что у 8 – при контрольном клинико-электрофизиологическом обследовании через 3 мес. после оперативного вмешательства обнаружены начальные признаки восстановления функции нервно-мышечного аппарата. Реиннервация проявлялась повышением амплитуды М-ответа на 27-37% по отношению к исходным данным. Напротив, у 5 больных группы сравнения, оперированных по традиционной методике (невролиз с установкой электродов для электростимуляции), только у 1 пациента обнаружены данные, свидетельствующие о восстановлении функции нерва. Таким образом, улучшение результатов лечения во 2 группе было связано с правильной оценкой степени поражения нерва (значимый внутривольные изменения выявленные по данным интраоперационного УЗИ) и выборе тактики хирургического лечения. В этой связи можно утверждать, что разработанная тактика диагностики имеет преимущества по сравнению с ранее предложенными алгоритмами.

Таким образом, решая поставленные перед нами задачи мы определили частоту диагностических ошибок и определили чувствительности и специфичность различных методов исследования периферических нервов. Мы провели сравнительный анализ диагностической точности дооперационного и интраоперационного УЗИ нервов. Учитывая полученные данные, результатом нашей работы стал алгоритм дифференцированного подхода хирургического лечения при травме периферических нервов конечностей, основанный на методах комплексной интраоперационной диагностики, включающей

электронейромиографию, контрастную нейрографию и УЗИ. В исследовании мы смогли показать, что применение разработанного алгоритма приводит к улучшению результатов лечения пациентов с травмой периферических нервов.

Каждое проведенное исследование создает дополнительные условия и задачи для решения новых вопросов. В нашей работе мы показали, что ультразвукография является чрезвычайно важным инструментом в диагностике и определении тактики лечения при повреждениях периферических нервов, продемонстрировали высокую чувствительность и специфичность метода. Применение интраоперационного УЗИ позволяет определить локализацию невринома, оценить степень поражения нерва, ограничить объем диссекции, найти проксимальный отдел поврежденного нерва, и, соответственно, выполнить операцию более быстро и менее инвазивно. Интраоперационное УЗИ высокого разрешения, учитывая дальнейший технический прогресс, обладает большим клиническим потенциалом. Развитие различных новых методов, например, контрастная сонография, может открыть ряд дополнительных направлений для научных исследований. УЗИ с контрастированием является новым многообещающим методом количественного анализа перфузии крови в поврежденных периферических нервах. Кроме того, в дальнейшем, развитие визуализирующих методов исследования периферических нервов должно привести к возможности оценки аксонального тока, потери шванновской оболочки нерва, дегенеративные и регенеративные изменения в нерве. Уже сейчас, учитывая оснащенность большинства клиник аппаратами УЗИ экспертного класса, возможность применения УЗИ при операциях на периферических нервах является реальностью, и мы надеемся, наша работа поможет улучшить результаты лечения в нейрохирургических и травматологических стационарах. А накопление опыта и разработка новых, более совершенных аппаратов и датчиков УЗИ позволят передвинуть этот метод на первые позиции в диагностике

повреждений периферических нервов. Этому будут способствовать и ряд преимуществ УЗИ – доступность, легкость в исполнении, воспроизводимость и малая стоимость.

ВЫВОДЫ

1. При оценке результатов лечения применение стандартного диагностического протокола оценки состояния нерва, включающего клиническое обследование, дооперационное и интраоперационную ЭНМГ и интраоперационную рентгеновскую нейрографию, в 34% случаев не отмечается улучшения после операции, в том числе за счет диагностических ошибок в 8,6% случаев.

2. В сравнении с другими методами диагностики (клинико-неврологическое обследование, ЭНМГ до операции и во время операции, рентгеноконтрастная нейрография) УЗИ является более точными методами определения частичного или полного анатомического и функционального перерыва нерва, и обладают чувствительностью и специфичностью 97 и 90% (дооперационное УЗИ), 97% и 95% (интраоперационное УЗИ), соответственно ($p < 0,05$).

3. Интраоперационное УЗИ нервов обладает большей диагностической точностью по сравнению с дооперационным УЗИ в отношении визуализации нерва, определения локализации поражения, выявления внутривольных изменений, полного перерыва и изменений вокруг нерва ($p < 0,05$).

4. Алгоритм диагностики травмы периферического нерва должен включать интраоперационное УЗИ, которое позволяет в 17,6% случаев уточнить тип и степень поражения, и, соответственно, принять правильную хирургическую тактику.

5. Разработанный алгоритм дифференцированного подхода к выполнению оперативных вмешательств, основанный на методах комплексной интраоперационной диагностики, включающий ЭНМГ, нейрографию и УЗИ, позволяет оптимизировать хирургическую тактику и

улучшить результаты лечения при повреждении периферических нервов конечностей по данным клинико-неврологического обследования и ЭНМГ на 21% ($p=0,048$), в первую очередь за счет выявления значимых внутриствольных изменений по данным интраоперационного УЗИ.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Всем пациентам с травмой периферических нервов конечностей для уточнения локализации и степени поражения необходимо проведение дооперационного УЗИ нервов.

2. При невозможности четко определить локализацию поражения, внутриствольные изменения или изменения вокруг нерва по данным дооперационного УЗИ нервов необходимо выполнять интраоперационное УЗИ.

3. Алгоритм интраоперационной диагностики и тактики хирургического лечения, включающий ЭНМГ и/или нейрографию и/или ультрасонографию нервов, должен входить в протокол операций при травме периферических нервов конечностей.

4. Основным условием получения положительных результатов лечения травмы нерва при анатомически сохранном стволе является исключение выраженных внутриствольных изменений и, при необходимости, проведение интраоперационной нейрографии или УЗИ нерва.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВП – вызванные потенциалы
ДЕ – двигательная единица
ДВП – двигательные вызванные потенциалы
ДРП – денервационно-реиннервационные процессы
КТ – компьютерная томография
ЛП – латентный период
ЛДФ – лазерная доплеровская флоуметрия
МРГ – миелорадикулография
М-ответ – вызванный мышечный ответ
МРТ – магнитно-резонансная томография
ЭНМГ – электронейромиография
НС – нервная система
Н-рефлекс – рефлекторная активность мотонейронов спинного мозга
ПДДЕ – потенциал действия двигательной единицы
ПМГ – пневмомиеелография
ПОВ – позитивно-острая волна
ПФ – потенциал фибрилляций
ПФЦ – потенциал фасцикуляций
ПЭС – прямая электростимуляция
РВГ – реовазография
РКН - рентгеновская контрастная нейрография
СМ – спинной мозг
СПИ – скорость проведения импульса
СПС – стволы плечевого сплетения
ССВП – соматосенсорные вызванные потенциалы
ТВ – тепловидение
УЗИ – ультразвуковое исследование
ЭМГ - электромиография
ЭС – электростимуляция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асилова С.У. [и др.]. Ультрасонографическая диагностика при повреждении лучевого нерва // Травма. 2010. № 3 (11). С. 313–316.
2. Берснев В.П., Кокин Г.С., Извекова Т.О. Практическое руководство по хирургии нервов // СПб. Умный доктор. 2017. С. 552 с.
3. Голубев В.Г., Еськин Н.А., Крупаткин А.И. Применение новых диагностических технологий при повреждениях периферических нервов // Вестник Российской академии медицинских наук. 2008. (8). С. 40–44.
4. Горшков Р.П. [и др.]. Экспериментальное обоснование прямой длительной электростимуляции при нейротрансплантации периферических нервов // Экспериментальная биология и медицина. 2007. (4). С. 470–473.
5. Григорович К.А. Хирургическое лечение повреждений нервов // Л.: Медицина. 1981. С. 304 с.
6. Джумагишиев Д.К. [и др.]. Способ и возможности интраоперационного контрастирования нервных стволов в эксперименте // Саратовский научно-медицинский журнал. 2007. (1). С. 80–83.
7. Джумагишиев Д.К. Контрастная нейрография в комплексной диагностике повреждений периферических нервов (клинико-экспериментальное исследование) // автореф. дис. ... канд. мед. наук. Саратов. 2007. С. 24 с.
8. Журбин Е.А., Гайворонский А.И., Декан В.С. Диагностическая эффективность ультразвукового исследования при повреждениях периферических нервов // Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова. 2019. № 1 (11). С. 23–29.
9. Золотов А.С., Пак О.И. К вопросу об истории хирургических операций при ранениях периферических нервов // Травматология и ортопедия России. 2013. № 69 (3). С. 162–166.
10. Кубицкий А.А. Хирургическое лечение повреждений периферических нервов верхней конечности методами тракционного удлинения и аутонервной пластики // автореф. дис. ... канд. мед. наук. Казань, 2002. С. 24 с.
11. Кхир Б.М. Комплексная диагностика и оптимальный подход к лечению травматических повреждений лучевого нерва // автореф. дис. ... канд. мед. наук / М., 2009. С. 23 с.
12. Лапицкая Е.В. [и др.]. Ультразвуковое исследование периферических нервов при травматическом повреждении кисти. Клинический пример //

Вестник Челябинской областной клинической больницы. 2021. № 52 (4). С. 39–44.

13. Литвиненко И.В. [и др.]. Клинико-инструментальные характеристики травматических поражений периферических нервов конечностей // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2018. № 63 (3). С. 50–56.

14. Мажорова И.И. [и др.]. Ультразвуковое исследование повреждений периферических нервов у больных с травмами конечностей в раннем посттравматическом или послеоперационном периодах // Лучевая диагностика и терапия. 2020. № 4 (11). С. 87–95.

15. Малецкий Э.Ю., Короткевич М.М., Бутова А.В. Измерение периферических нервов: сопоставление ультразвуковых, магнитно-резонансных и интраоперационных данных // Медицинская визуализация. 2015. (2). С. 78–86.

16. Меркулов М.В. Оптимизация восстановления иннервации тканей при повреждениях периферических нервов конечностей // дис. ... д-ра мед. наук. М., 2014. С. 364 с.

17. Миронов С.П., Еськин Н.А., Голубев В.Г. Ультразвуковая диагностика патологии сухожилий и нервов конечностей // Вестник травматологии и ортопедии им.Н.Н. Приорова. 2004. (3). С. 3–4.

18. Некрасова В.В. [и др.]. Ультразвуковая диагностика невротомы после нейрорафии // Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова. 2021. № 1 (13). С. 169–170.

19. Николаев С.Г. Электромиография: клинический практикум // Иваново: ПресСТО. 2013. С. 393 с.

20. Нинель В.Г., Айтемиров, Ш.М. Коршунова Г.А., Норкин И.А. Комплексная диагностика в тактике хирургического лечения повреждений периферических нервов конечностей // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2016. (1). С. 62–66.

21. Носов О.Б. Направленная васкуляризация в реконструктивно-восстановительном лечении последствий повреждений срединного и локтевого нервов // дис. ... канд. мед. наук. Н.Новгород., 2004. С. 117 с.

22. Орлов А.Ю. Хирургическое лечение опухолей нервных сплетений и их ветвей: . – // Дис. докт. мед. наук. – СПб. 2012. С. 330 с.

23. Салтыкова В.Г. Ультразвуковая диагностика состояния периферических нервов: (норма, повреждения, заболевания) // автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 2011. С. 48 с.
24. Федяков А.Г. Экспериментально-клиническое обоснование применения биополимерных материалов в хирургии периферических нервов // дис. ... канд. мед. наук. М., 2010. С. 97 с.
25. Чуловская И.Г. Ультрасонография периферических нервов предплечья и кисти в норме и при патологии // Российский медицинский журнал. 2010. (3). С. 45–47.
26. Чуловская И.Г. Комплексная диагностика заболеваний и повреждений мягких тканей кисти и предплечья // дис. ... д-ра мед. наук. М. 2012. С. 272 с.
27. Шевелев И.Н. Травматические поражения плечевого сплетения (клиника, диагностика, микрохирургия) // М.: Медицина. 2005. С. 383 с.
28. Шевелев И.Н. Микрохирургия периферических нервов // М. 2011. С. 304 с.
29. Abushukur Y., Knackstedt R. The Impact of Supplements on Recovery After Peripheral Nerve Injury: A Review of the Literature // Cureus. 2022. № 5 (14).
30. Aggarwal A. [и др.]. Comparison of Different Sequences of Magnetic Resonance Imaging and Ultrasonography with Nerve Conduction Studies in Peripheral Neuropathies // World Neurosurgery. 2017. (108). С. 185–200.
31. Arányi Z. [и др.]. Ultrasonographic demonstration of intraneural neovascularization after penetrating nerve injury // Muscle & Nerve. 2018. № 6 (57). С. 994–999.
32. Aydin K. [и др.]. Cengiz ÇOKLUK Ultrasound Examination in the Surgical Treatment for Upper Extremity Peripheral Nerve Injuries: Part I // Turkish Neurosurgery. 2007. № 4 (17). С. 277–282.
33. Aydin K. [и др.]. Cengiz ÇOKLUK Ultrasound Examination in the Surgical Treatment of Lower Extremity Peripheral Nerve Injuries: Part II // Turkish Neurosurgery. 2007. № 3 (17). С. 197–201.
34. Bilgici A., Çokluk C., Aydin K. Ultrasound Neurography in the Evaluation of Sciatic Nerve Injuries // Journal of Physical Therapy Science. 2013. № 10 (25). С. 1209.
35. Bodner G. [и др.]. Radial Nerve Palsy Associated with Humeral Shaft Fracture: Evaluation with US—Initial Experience1 //

<https://doi.org/10.1148/radiology.219.3.r01jn09811>. 2001. № 3 (219). С. 811–816.

36. Buchberger W. [и др.]. High-resolution ultrasonography of the carpal tunnel // *Journal of ultrasound in medicine : official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*. 1991. № 10 (10). С. 531–537.

37. Burks S.S. [и др.]. Intraoperative imaging in traumatic peripheral nerve lesions: Correlating histologic cross-sections with high-resolution ultrasound // *Operative Neurosurgery*. 2017. № 2 (13). С. 196–202.

38. Carroll A.S., Simon N.G. Current and future applications of ultrasound imaging in peripheral nerve disorders // <http://www.wjgnet.com/>. 2020. № 6 (12). С. 101–129.

39. Chu X.L. [и др.]. Basic mechanisms of peripheral nerve injury and treatment via electrical stimulation // *Neural Regeneration Research*. 2022. № 10 (17). С. 2185.

40. Desouches C. [и др.]. [Peripheral nerve repair: 30 centuries of scientific research] // *Revue neurologique*. 2005. № 11 (161). С. 1045–1059.

41. Diaz A. [и др.]. Ultrasound-guided needle localization wires in peripheral nerve injuries with long segmental defects: Technical case report // *Operative Neurosurgery*. 2021. № 1 (20). С. E60–E65.

42. Dong Y. [и др.]. Imaging diagnosis in peripheral nerve injury // *Frontiers in neurology*. 2023. (14).

43. Donnally C.J. [и др.]. Current Management of Cervical Spondylotic Myelopathy // *Clinical spine surgery*. 2022. № 1 (35). С. E68–E76.

44. Endo Y. [и др.]. Ultrasound features of traumatic digital nerve injuries of the hand with surgical confirmation // *Skeletal Radiology*. 2021. № 9 (50). С. 1791–1800.

45. Evans G.R.D. Peripheral nerve injury: a review and approach to tissue engineered constructs // *The Anatomical record*. 2001. № 4 (263). С. 396–404.

46. Fantoni C. [и др.]. Ultrasound Diagnosis of Postoperative Complications of Nerve Repair // *World Neurosurgery*. 2018. (115). С. 320–323.

47. Filippou G. [и др.]. Ulnar neuropathy at the elbow: How frequent is the idiopathic form? An ultrasonographic study in a cohort of patients // *Clinical and Experimental Rheumatology*. 2010. № 1 (28). С. 63–67.

48. Fisse A.L. [и др.]. Cross-sectional area reference values for peripheral nerve ultrasound in adults: a systematic review and meta-analysis-Part I: Upper

extremity nerves // *European journal of neurology*. 2021. № 5 (28). С. 1684–1691.

49. Fisse A.L. [и др.]. Cross-sectional area reference values for peripheral nerve ultrasound in adults: A systematic review and meta-analysis-Part II: Lower extremity nerves // *European journal of neurology*. 2021. № 7 (28). С. 2313–2318.

50. Fornage B.D. Peripheral nerves of the extremities: imaging with US // *Radiology*. 1988. № 1 (167). С. 179–182.

51. Gonzalez N.L., Hobson-Webb L.D. Neuromuscular ultrasound in clinical practice: A review // *Clinical Neurophysiology Practice*. 2019. (4). С. 148–163.

52. Gordon T. Peripheral Nerve Regeneration and Muscle Reinnervation // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. № 22 (21). С. 1–24.

53. Gruber H. [и др.]. Ultrasound imaging of the axillary nerve and its role in the diagnosis of traumatic impairment // *Ultraschall in der Medizin*. 2014. № 4 (35). С. 332–338.

54. Hannaford A. [и др.]. Review Article “Spotlight on Ultrasonography in the Diagnosis of Peripheral Nerve Disease: The Evidence to Date” // *International Journal of General Medicine*. 2021. (14). С. 4579.

55. Heinen C. [и др.]. Fascicular Ratio Pilot Study: High-Resolution Neurosonography-A Possible Tool for Quantitative Assessment of Traumatic Peripheral Nerve Lesions before and after Nerve Surgery // *Clinical Neurosurgery*. 2019. № 3 (85). С. 415–422.

56. Huckhagel T. [и др.]. Nerve trauma of the lower extremity: evaluation of 60,422 leg injured patients from the TraumaRegister DGU® between 2002 and 2015 // *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*. 2018. № 1 (26).

57. Huckhagel T. [и др.]. Nerve injury in severe trauma with upper extremity involvement: evaluation of 49,382 patients from the TraumaRegister DGU® between 2002 and 2015 // *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*. 2018. № 1 (26). С. 76.

58. Juckett L. [и др.]. The Effect of Electrical Stimulation on Nerve Regeneration Following Peripheral Nerve Injury // *Biomolecules*. 2022. № 12 (12).

59. Kamble N., Shukla D., Bhat D. Peripheral Nerve Injuries: Electrophysiology for the Neurosurgeon // *Neurology India*. 2019. № 6 (67). С. 1419.

60. Koenig R.W. [и др.]. Intraoperative high-resolution ultrasound: a new technique in the management of peripheral nerve disorders: Clinical article // *Journal of Neurosurgery*. 2011. № 2 (114). С. 514–521.
61. Lauretti L. [и др.]. Ultrasound evaluation in traumatic peripheral nerve lesions: from diagnosis to surgical planning and follow-up // *Acta Neurochirurgica* 2015 157:11. 2015. № 11 (157). С. 1947–1951.
62. Lee F.C. [и др.]. High-resolution ultrasonography in the diagnosis and intraoperative management of peripheral nerve lesions: Clinical article // *Journal of Neurosurgery*. 2011. № 1 (114). С. 206–211.
63. Lee J., Bidwell T., Metcalfe R. Ultrasound in pediatric peripheral nerve injuries: Can this affect our surgical decision making? A preliminary report // *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 2013. № 2 (33). С. 152–158.
64. Lopes B. [и др.]. Peripheral Nerve Injury Treatments and Advances: One Health Perspective // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. № 2 (23).
65. Lu C. [и др.]. Mechanisms and treatment of painful neuromas // *Reviews in the Neurosciences*. 2018. № 5 (29). С. 557–566.
66. Mackinnon S.E. New directions in peripheral nerve surgery // *Annals of plastic surgery*. 1989. № 3 (22). С. 257–273.
67. Matsuyama T., Mackay M., Midha R. Peripheral nerve repair and grafting techniques: a review // *Neurologia medico-chirurgica*. 2000. № 4 (40). С. 187–199.
68. Millesi H. Peripheral nerve injuries. Nerve sutures and nerve grafting. // *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl*. 1982. (19). С. 25–37.
69. Modrak M. [и др.]. Peripheral nerve injury and myelination: potential therapeutic strategies // *Journal of neuroscience research*. 2020. № 5 (98). С. 780.
70. Nazarian L.N. The Top 10 Reasons Musculoskeletal Sonography Is an Important Complementary or Alternative Technique to MRI // <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.07.3385>. 2012. № 6 (190). С. 1621–1626.
71. Ng E.S. [и др.]. High resolution ultrasonography in the diagnosis of ulnar nerve lesions with particular reference to post-traumatic lesions and sites outside the elbow // *Clinical Neurophysiology*. 2011. № 1 (122). С. 188–193.
72. O’Flaherty D., McCartney C.J.L., Ng S.C. Nerve injury after peripheral nerve blockade—current understanding and guidelines // *BJA Education*. 2018. № 12 (18). С. 384.

73. Ohana M. [и др.]. Current and future imaging of the peripheral nervous system // *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2014. № 1 (95). С. 17–26.
74. Omejec G., Podnar S. Contribution of ultrasonography in evaluating traumatic lesions of the peripheral nerves // *Neurophysiologie clinique = Clinical neurophysiology*. 2020. № 2 (50). С. 93–101.
75. Padua L. [и др.]. Ultrasound as a useful tool in the diagnosis and management of traumatic nerve lesions // *Clinical Neurophysiology*. 2013. № 6 (124). С. 1237–1243.
76. Patel D.M., Weinberg B.D., Hoch M.J. CT Myelography: Clinical Indications and Imaging Findings // *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc.* 2020. № 2 (40). С. 470–484.
77. Pathiyil R.K. [и др.]. Distal anterior interosseous nerve to ulnar nerve motor branch reverse end-to-side transfer in a case of severe ulnar neuropathy // *Neurosurgical focus: Video*. 2023. № 1 (8).
78. Peer S. [и др.]. High-resolution sonography of lower extremity peripheral nerves: anatomic correlation and spectrum of disease // *Journal of ultrasound in medicine : official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*. 2002. № 3 (21). С. 315–322.
79. Purger D.A. [и др.]. Imaging of Damaged Nerves // *Clinics in Plastic Surgery*. 2020. № 2 (47). С. 245–259.
80. Radkowski P. [и др.]. Neurological Complications of Regional Anesthesia: An Updated Review with Clinical Guidelines // *Medical Science Monitor : International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*. 2023. (29). С. e940399-1.
81. Ricci V. [и др.]. Histopathology and high-resolution ultrasound imaging for peripheral nerve (injuries) // *Journal of Neurology* 2022. 2022. С. 1–13.
82. Robinson L.R. Traumatic injury to peripheral nerves // *Muscle & nerve*. 2022. № 6 (66). С. 661–670.
83. Samet J.D. Ultrasound of peripheral nerve injury // *Pediatric Radiology*. 2023. № 8 (53). С. 1539–1552.
84. Seddon H.J. Three types of nerve injury // *Brain*. 1943. № 4 (66). С. 237–288.
85. Seddon H.J. Nerve grafting // *The Journal of bone and joint surgery. British volume*. 1963. (45). С. 447–461.

86. Sharp E. [и др.]. The most commonly injured nerves at surgery: A comprehensive review // *Clinical anatomy* (New York, N.Y.). 2021. № 2 (34). С. 244–262.
87. Siemionow M., Brzezicki G. Chapter 8: Current techniques and concepts in peripheral nerve repair // *International review of neurobiology*. 2009. № C (87). С. 141–172.
88. Silva B.J. [и др.]. Evaluation of peripheral nerve injury by magnetic resonance neurography: A systematic review // *Hand Surgery and Rehabilitation*. 2022. № 1 (41). С. 7–13.
89. Silvestri E. [и др.]. Echotexture of peripheral nerves: correlation between US and histologic findings and criteria to differentiate tendons. // <https://doi.org/10.1148/radiology.197.1.7568840>. 1995. № 1 (197). С. 291–296.
90. Singh K.P., Kaur S., Arora V. Reference Values for the Cross Sectional Area of Normal Tibial Nerve on High-resolution Ultrasonography // *Journal of ultrasonography*. 2022. № 90 (22). С. e144–e152.
91. Singh K.P., Singh P., Gupta K. Reference values for the cross-sectional area of the normal sciatic nerve using high-resolution ultrasonography // *Journal of ultrasonography*. 2021. № 85 (21). С. e95–e104.
92. Sneag D.B., Queler S. Technological Advancements in Magnetic Resonance Neurography // *Current neurology and neuroscience reports*. 2019. № 10 (19).
93. Solbiati L. [и др.]. High-resolution sonography of the recurrent laryngeal nerve: anatomic and pathologic considerations // *American journal of roentgenology*. 1985. № 5 (145). С. 989–993.
94. Strommen J.A., Skinner S., Crum B.A. Neurophysiology during peripheral nerve surgery // *Handbook of clinical neurology*. 2022. (186). С. 295–318.
95. Sunderland S. A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function // *Brain*. 1951. № 4 (74). С. 491–516.
96. Tagliafico A.S., Tagliafico G. Fascicular ratio: A new parameter to evaluate peripheral nerve pathology on magnetic resonance imaging: A feasibility study on a 3T MRI system // *Medicine (United States)*. 2014. № 14 (93).
97. Tang P. [и др.]. Sonographic evaluation of peripheral nerve injuries following the Wenchuan earthquake // *Journal of Clinical Ultrasound*. 2012. № 1 (40). С. 7–13.
98. Thakkar M. [и др.]. Anterior Interosseous Nerve to Ulnar Nerve Transfer: A Systematic Review // *JPRAS open*. 2022. (32). С. 195–210.

99. Toia F. [и др.]. Preoperative evaluation of peripheral nerve injuries: What is the place for ultrasound? // *Journal of Neurosurgery*. 2016. № 3 (125). С. 603–614.
100. Toros T. [и др.]. Evaluation of peripheral nerves of the upper limb with ultrasonography: A comparison of ultrasonographic examination and the intra-operative findings // *Journal of Bone and Joint Surgery - Series B*. 2009. № 6 (91). С. 762–765.
101. Tsai Y.J. [и др.]. Clinical Assessment of Functional Recovery Following Nerve Transfer for Traumatic Brachial Plexus Injuries // *International journal of environmental research and public health*. 2022. № 19 (19).
102. Tung T.H., Mackinnon S.E. Nerve transfers: indications, techniques, and outcomes // *The Journal of hand surgery*. 2010. № 2 (35). С. 332–341.
103. Vijayavenkataraman S. Nerve guide conduits for peripheral nerve injury repair: A review on design, materials and fabrication methods // *Acta Biomaterialia*. 2020. (106). С. 54–69.
104. Wang M.L. [и др.]. Peripheral nerve injury, scarring, and recovery // *Connective Tissue Research*. 2019. № 1 (60). С. 3–9.
105. Wijntjes J., Borchert A., Alfen N. van Nerve Ultrasound in Traumatic and Iatrogenic Peripheral Nerve Injury // *Diagnostics (Basel, Switzerland)*. 2020. № 1 (11).
106. Wu W. [и др.]. Visualization of the morphology and pathology of the peripheral branches of the cranial nerves using three-dimensional high-resolution high-contrast magnetic resonance neurography // *European journal of radiology*. 2020. (132).
107. Xiang B. [и др.]. Effects of desflurane and sevoflurane on somatosensory-evoked and motor-evoked potential monitoring during neurosurgery: a randomized controlled trial // *BMC anesthesiology*. 2021. № 1 (21).
108. Yoon D. [и др.]. Feasibility of 7T MRI for imaging fascicular structures of peripheral nerves // *Muscle & Nerve*. 2018. № 3 (57). С. 494–498.
109. Zaidman C.M. [и др.]. Detection of peripheral nerve pathology // *Neurology*. 2013. № 18 (80). С. 1634–1640.
110. Zhu J. [и др.]. Preliminary study of the types of traumatic peripheral nerve injuries by ultrasound // *European Radiology* 2010 21:5. 2010. № 5 (21). С. 1097–1101.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

Исследования применения УЗИ при травматической нейропатии периферических нервов

Автор год ссылка	Тип	Популяция	Результаты
Vodner 2001 [35]	П	11 пациентов локтевой нерв	УЗИ позволяет выявить ущемление нерва костными фрагментами, полный и неполный перерыв нерва, расположение нерва на краю костного отломка, вовлечение нерва в костную мозоль.
Peer 2002 [78]	П	18 пациентов в/к и н/к	УЗИ может выявлять отек аксона, рубцовые ткани и имплантаты, сдавливающие нерв, невриному, несостоятельность хирургического вмешательства. Данные УЗИ совпадают с интраоперационными результатами.
Миронов 2004 [17]	Р	103 пациента в/к и н/к	Результаты ультразвукового исследования практически в 100% случаев совпадали с интраоперационными данными.
Соклук 2007 [32]	П	36 пациентов в/к	Данные УЗИ сравнивали с интраоперационными данными. Использование УЗИ играет важную роль в диагностике травмы нерва
Соклук 2007 [33]	П	22 пациента н/к	Предоперационное и интраоперационное УЗИ позволяет оценить степень повреждения, определить полный или неполный перерыв нерва, наличие гематомы и инородного тела, непрерывность нерва и нервных стволов, рубцовую ткань, а также наличие невромы.
Toros 2009 [100]	П	26 пациентов в/к	УЗИ позволяет выявить: отек аксона, полный перерыв и надрыв нерва, неврому. Результаты УЗИ коррелировали с данными электрофизиологических методов и интраоперационными данными.
Асилова 2010 [1]	Р	22 пациента лучевой нерв	УЗИ является высокоинформативным вспомогательным методом диагностики у больных с повреждением лучевого нерва.
Федяков 2010 [24]	Р	14 пациентов в/к и н/к	УЗИ данные способствовали ранней диагностике и планированию тактики операции
Гіппру 2010 [47]	П	91 пациент локтевой нерв	При нейропатии локтевого нерва УЗИ позволяет выявить: дислокацию локтевого нерва, остеофиты, добавочные мышцы, посттравматическое повреждение, фрагменты кости.
Tang 2012 [97]	Р	38 пациентов в/к и н/к	УЗИ позволяет выявить: локализацию поражения, перерыв и сдавление нерва. Данные УЗИ коррелирует с хирургическими результатами. УЗИ позволило поставить правильный диагноз в 92,3% случаев.
Ng 2011 [71]	Р	42 пациента локтевой нерв	УЗИ позволяет выявить повреждение локтевого нерва на всем протяжении, определить анатомию нерва.
Салтыкова 2011 [23]	Р	450 пац. плечевое сплетение нервы в/к и н/к	УЗИ позволяет выявить полный и частичный перерыв нервов без дополнительных методов исследования. УЗИ при травматических повреждениях, компрессионных невропатиях и опухолях является высокоинформативным методом для диагностики состояния сплетений и периферических нервов: чувствительность – 96,7%, специфичность – 99,5%, точность – 99,3%
Lee 2011 [62]	Р	13 пациентов в/к и н/к	УЗИ позволяет определить локализацию невриноом, ограничить объем диссекции, найти проксимальный отдел лучевого нерва при переломе плечевой кости. Интраоперационное УЗИ позволило определить точный диагноз и локализацию поражения.
Koenig 2011 [60]	Р	18 пациентов в/к и н/к	УЗИ позволяет определить интраневральные структуры, более четко дифференцировать интактные пучки от невромы. Интраоперационное УЗИ позволяет оценить степень внутривольного поражения нерва и регенеративный потенциал.

Zhu 2011 [110]	П	202 пациента в/к и н/к	УЗИ позволяет определить тип травматического поражения и интраневральные изменения. УЗИ и электрофизиологические методы позволяют принять решение о необходимости операции
Чуловская 2010 [25]	Р	238 пациентов травмы и заболевания нервов в/к	УЗИ позволяет распознавать мельчайшие изменения внутренней структуры нервов, определить или исключить множественные и многоуровневые поражения нервов, определить тактику оперативного лечения, проводить динамическое наблюдение. Чувствительность 89,8-96,7 %, специфичность 95,2-99,3%.
Padua 2013 [75]	П	98 пациентов в/к и н/к	УЗИ позволяет определить тип поражение нервов, этиологию и локализацию поражения; установить диагноз в случае невозможности проведения электрофизиологических методов и изменить тактику лечения в 60% случаев.
Bilgici 2013 [34]	Р	10 пациентов седалищный нерв	УЗИ седалищного нерва может быть использовано для описания степени повреждения, определения полного или неполного перерыва нерва, наличия гематомы и инородного тела, определения культей нерва, образования рубцовой ткани, и наличие невромы.
Lee 2013 [63]	Р	24 детей в/к	УЗИ предоставляет патоморфологическую информацию. Результаты УЗИ коррелировали с интраоперационными данными.
Меркулов 2014 [16]	Р	62 пациента в/к и н/к	Чувствительность УЗИ – 93,6%, специфичность – 100%, точность теста – 95,7%.
Gruber 2014 [53]	Р	10 пациентов подмышечны й нерв	УЗИ эффективно для оценки предполагаемого повреждения нерва при острой, подострой и хронической травме подмышечного нерва. Отек и гематома ухудшают визуализацию в острую стадию. УЗИ позволяет сортировать пациентов на операцию или консервативное лечение.
Tagliafico 2014 [96]	Р	204 пациента плечевое сплетение	Комбинированное использование УЗИ и МРТ повышает чувствительность (76%) и специфичность (96%) при выявлении поражения плечевого сплетения.
Toia 2016 [99]	Р	36 с травмой нервов в/к и н/к	УЗИ позволяет визуализировать причину и степень поражения нервов.
Aggarwal 2017 [30]	Р	30 с травмой нервов в/к и н/к	УЗИ является чувствительным методом диагностики периферических невропатий. УЗИ следует использовать в качестве метода скрининга с последующим проведением МРТ.
Heinen 2019 [55]	Р	16 пациентов в/к и н/к	При УЗИ для количественной оценки повреждения нервов и послеоперационной структурной реорганизации можно использовать FR.
Arányi 2018 [31]	П	30 пациента в/к и н/к	Неоваскуляризация нервов, проксимальных к местам повреждения, по-видимому, является важным элементом регенерации нервов после проникающих повреждений нервов.
Журбин 2019 [8]	Р	154 пациента в/к и н/к	УЗИ с точностью 86,4%, чувствительностью 93,6%, специфичностью 68,2% позволяет, как выявить повреждения, при которых всегда показано оперативное лечение, так и подтвердить анатомическую целостность нервного ствола.
Мажорова 2020 [14]	Р	106 пациентов в/к и н/к	УЗИ является высокоинформативным методом объективной оценки характера повреждения нервов конечностей в ранние сроки после травмы и в раннем послеоперационном периоде. Чувствительность УЗИ в выявлении полного разрыва волокон нерва составила 100% (39,8–100%), специфичность — 99,0% (94,7–100,0%).
Omejec 2020 [74]	Р	143 пациента в/к и н/к	При острой травме периферических нервов УЗИ наиболее полезно для выявления аксонотмезиса или невротмезиса.
Endo 2021 [44]	Р	29 пациентов ладонные пальцевые нервы	Невромы гипоехогенны и четко очерчены, а их размер могут варьировать в зависимости от времени, прошедшего с момента травмы. Чувствительность - 96,4%, специфичность 50%, точность 88,2% при интраоперационном контроле.
Примечание: в/к - верхняя конечность, н/к - нижняя конечность, П - проспективное исследование, Р - ретроспективное исследование, ЭНМГ - электронейромиография, п/о – после операции			