



DOI 10.56618/20712693_2022_14_3_130

ВКЛАД УЗИ В ОЦЕНКУ ТРАВМАТИЧЕСКИХ ПОРАЖЕНИЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ НЕРВОВ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Ш. М. Айтемиров, В. В. Островский, С. П. Бажанов,
И. Н. Щаницын, Т. А. Бордюгова, А. П. Петрова

ФГБОУ ВО «Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского» МЗ РФ
им. Н. Г. Чернышевского ул., 148, Саратов, 410012

РЕЗЮМЕ. Травма периферических нервов конечностей приводит к ухудшению качества жизни и инвалидизации, создавая тяжелое социальное бремя. В последние 10–15 лет УЗИ стало широко распространенным методом диагностики поражения периферических нервов. Проведенные исследования показали его высокую чувствительность при травматическом повреждении нервов и даже определенные преимущества перед ЭНМГ и МРТ. В этом обзоре мы показали историю развития УЗИ нервов, провели анализ всех опубликованных на сегодняшний день исследований применения УЗИ при травме периферических нервов (базы данных Web of Science, Google Scholar, PubMed и Elibrary до 2022 г.), а также описали перспективы развития метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: периферический нерв, повреждение нерва, ультрасонография, ультразвук, нейропатия

Для цитирования: Айтемиров Ш. М., Островский В. В., Бажанов С. П., Щаницын И. Н., Бордюгова Т. А., Петрова А. П. Вклад УЗИ в оценку травматических поражений периферических нервов: прошлое, настоящее и будущее. Российский нейрохирургический журнал им. проф. А. Л. Поленова. 2022;14(3):130–139. DOI 10.56618/20712693_2022_14_3_130

ULTRASONOGRAPHY CONTRIBUTION IN EVALUATING TRAUMATIC LESIONS OF PERIPHERAL NERVES: PAST, PRESENT AND FUTURE (REVIEW)

Sh. M. Aitemirov, V. V. Ostrovskij, S. P. Bazhanov, I. N. Shchanitsyn, T. A. Bordugova, A. P. Petrova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education ‘V.I. Razumovsky Saratov State Medical University’,
the Russian Federation Ministry of Healthcare
148, N. G. Chernyshevskogo str., Saratov, 410012, Russia

SUMMARY. Injury to peripheral nerves of the extremities leads to a deterioration in the quality of life and disability, and creates a heavy social burden. In the last 10–15 years, ultrasonography has become a widespread method for diagnosing peripheral nerve damage. Studies have shown its high sensitivity for traumatic nerve injury, and even certain advantages over electroneuromyography and magnetic resonance imaging. This review presents the progress history of ultrasound diagnostics of peripheral nerves, analyzes all published studies on the use of the studied techniques for peripheral nerve traumas (Web of Science, Google Scholar, PubMed and Elibrary databases up to 2022), and describes the prospects of this method.

KEY WORDS: peripheral nerve, nerve damage, ultrasound, neuropathy

For citation: Aitemirov Sh. M., Ostrovskij V. V., Bazhanov S. P., Shchanitsyn I. N., Bordugova T. A., Petrova A. P. Ultrasonography contribution in evaluating traumatic lesions of peripheral nerves: past, present and future (review). Rossiiskii neurokhirurgicheskii zhurnal imeni professora A. L. Polenova. 2022;14(3):130–139. DOI 10.56618/20712693_2022_14_3_130

Введение.

Травма периферических нервов конечностей не является частой причиной обращения в стационар. Общая заболеваемость составляет около 13–23 случаев на 100000 человек в год. Однако последующие нарушения функции конечностей и прогрессирующая атрофия денервированных мышц приводят к ухудшению качества жизни и инвалидизации, создавая тяжелое социальное бремя. В последние 10–15 лет УЗИ стало широко распространенным методом диагностики поражения периферических нервов [1]. Исследования показали его высокую чувстви-

тельность при травматическом повреждении нервов и определенные преимущества перед ЭНМГ и МРТ. В этом обзоре литературы мы показали историю развития УЗИ нервов, провели анализ всех опубликованных на сегодняшний день исследований применения УЗИ при травме периферических нервов, а также описали перспективы развития метода.

Проведен поиск статей в базах Web of Science, Google Scholar, PubMed и Elibrary 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 or УЗИ) and (нейропатия or повреждение) and (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 мы выделили 32 статьи с опи-

санием ретроспективных и проспективных исследований применения УЗИ при травме периферических нервов (табл. 1). Стоит обратить внимание, что 78 % исследований (25/32) опубликовано после 2010 г. Что, вероятно, связано со стремительным развитием и внедрением ультрасонографии нервов в последние годы.

Таблица 1. Исследования применения УЗИ при травматической нейропатии периферических нервов.

Table 1. Studies on the use of ultrasound in traumatic neuropathy of peripheral nerves

Автор, год	Тип	Популяция	Результаты
Bodner, et al, 2001 [39]	П	11 пациентов Локтевой нерв	УЗИ позволяет выявить ущемление нерва между костными фрагментами, полный и неполный перерыв нерва, расположение нерва на краю костного отломка, вовлечение нерва в костную мозоль.
Peer, et al, 2001 [40]	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 и др., 2004 [12]	Р	103 пациента в/к и н/к	Результаты ультразвукового исследования практически в 100 % случаев совпадали с интраоперационными данными.
Cokluk, et al, 2007 [41]	П	36 пациентов в/к	Данные УЗИ сравнивались с интраоперационными данными. Использование УЗИ играет важную роль в диагностике травмы нерва
Cokluk, et al, 2007 [42]	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, et al, 2009 [43]	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 и др., 2010 [44]	Р	22 пациента Лучевой нерв	УЗИ является высокоинформативным вспомогательным методом диагностики у больных с повреждением лучевого нерва.
Федяков и др., 2009 [45]	Р	14 пациентов в/к и н/к	УЗИ данные способствовали ранней диагностике и планированию тактики операции
Filippou, et al, 2010 [46]	П	91 пациент Локтевой нерв	При нейропатии локтевого нерва УЗИ позволяет выявить: дислокацию локтевого нерва, остеофиты, добавочные мышцы, посттравматическое повреждение, фрагменты кости.
Tang, et al, 2012 [6]	Р	38 пациентов 8 нервов 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, et al, 2011 [47]	Р	42 пациента Локтевой нерв	УЗИ позволяет выявить повреждение локтевого нерва на всем протяжении, определить анатомию нерва.
Салтыкова и др., 2010 [9]	Р	450 больных Плечевое сплетение и 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, et al, 2011 [21]	Р	13 пациентов в/к и н/к	УЗИ позволяет определить локализацию невринома, ограничить объем диссекции, найти проксимальный отдел лучевого нерва при переломе плечевой кости. Интраоперационное УЗИ позволило определить точный диагноз и локализацию поражения.
Koenig, et al, 2011 [18]	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, et al, 2011 [48]	П	202 пациента Нервы 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 [8]	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 в периоде реабилитации. Чувствительность 89,8–96,7 %, специфичность 95,2–99,3 %.
Padua, et al, 2013 [49]	П	98 пациентов в/к и н/к	УЗИ позволяет: поставить диагноз и изменить тактику лечения в 60 % случаев; выявить поражение нервов (невротмезис/аксонотмезис); определить этиологию и локализацию поражения; установить диагноз в случае невозможности проведения электрофизиологических методов; осуществлять хирургическое планирование.
Bilgici, et al, 2013 [13]	Р	10 пациентов Седативный 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, et al, 2013 [50]	Р	24 детей	УЗИ предоставляет патоморфологическую информацию. Результаты УЗИ коррелировали с интраоперационными данными.
Салтыкова и др., 2012 [51]	Р	62 пациента в/к и н/к	Чувствительность УЗИ — 93,6 %, специфичность — 100 %, точность теста — 95,7 %.
Gruber, et al, 2014 [52]	Р	10 пациентов Подмышечный 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, et al, 2014 [53]	Р	204 пациента Плечевое сплетение	Комбинированное использование УЗИ и МРТ повышает чувствительность (76 %) и специфичность (96 %) при выявлении поражения плечевого сплетения. Количественная оценка FR может быть использована в будущих исследованиях.
Toia, et al, 2016 [14]	Р	109 пациентов 36 с травмой нервов в/к и н/к.	УЗИ позволяет визуализировать причину и степень поражения нервов.
Нинель и др., 2016 [17]	Р	109 пациентов в/к и н/к	УЗИ является высокоинформативным методом диагностики, что обосновывает целесообразность ее выполнения с целью объективной оценки тяжести и характера повреждения ствола нерва как перед операцией, так и интраоперационно.
Aggarwal, et al, 2017 [27]	Р	55 пациентов 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, et al, 2018 [23]	Р	16 пациентов. в/к и н/к	При УЗИ для количественной оценки повреждения нервов и послеоперационной структурной реорганизации можно использовать FR.
Arányi, et al, 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 и др., 2019 [28]	Р	154 пациента в/к и н/к	УЗИ с точностью 86,4 %, чувствительность 93,6 %, специфичность 68,2 % позволяет, как выявить повреждения, при которых всегда показано оперативное лечение, так и подтвердить анатомическую целостность нервного ствола, при которой травма является обратимой, и операция не показана.
Мажорова и др., 2020 [54]	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 %).
Omejес, et al, 2020 [1]	Р	143 пациента в/к и н/к	При острой травме периферических нервов УЗИ наиболее полезно для выявления аксонотмезиса или невротмезиса. УЗИ, вероятно, не требуется у пациентов после острой тупой травмы с незначительными клиническими нарушениями и/или небольшими изменениями по данным ЭНМГ.
Endo, et al, 2021 [7]	Р	29 пациентов Ладонные пальцевые нервы	УЗИ по длинной оси может быть менее полезным и надежным, чем по короткой оси для оценки повреждений пальцевых нервов. Невромы гиподермичны и четко очерчены, а их размер может варьироваться в зависимости от времени, прошедшего с момента травмы. Чувствительность метода — 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, FR — Fascicular Ratio (фасцикулярное соотношение), ЭНМГ — электронейромиография, н/о — послеоперационная

История развития УЗИ нервов. Применение УЗИ в медицине началось с 1940-х годов, когда были разработаны линейные датчики передающие один импульс и позволяющие записывать изменения интенсивности эхосигнала в виде амплитуды в режиме А. Дальнейшие технологические достижения позволили разработать В-режим, используемый до сих пор, когда данные нескольких линейных каналов накладываются друг на друга для создания изображения. Однако, из-за недостаточного разрешения изображения и трудности разграничения нервов и окружающих тканей, УЗИ не применялось для оценки периферических нервов до 1980-х годов. Первым упоминанием УЗИ периферических нервов считается статья Solbiati с соавт. 1985 г., в которой они применили этот метод для оценки возвратного гортанного нерва при опухолях щитовидной и паращитовидной желез [2]. Исследование, проведенное Fornage с соавт. впервые систематизировало ЭХО-признаки периферических нервов в норме и при патологии. Показано, что в норме нервы имеют экзогенную фибриллярную структуру, тогда как при различных патологических состояниях отмечается усиление гипозоногенного компонента и утолщение нерва [3]. Silvestri с соавт. при сравнении УЗИ и данных гистологического исследования доказали, что гипозоногенные участки соответствуют пучкам нейронов, и именно чередование гиперэхогенных и гипозоногенных участков является необходимым паттерном для дифференциации нервов от окружающих сухожилий [4]. Первый отчет о применении УЗИ периферических нервов для диагностики синдрома запястного канала был опубликован в 1991 г. [5]. С тех пор разные исследователи подтвердили высокий потенциал УЗИ для визуализации в нейротравматологии, онкологии, при травматической и компрессионной нейропатии, при этом УЗИ оказалось надёжным, практичным и легко доступным 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 1.

В настоящее время технические возможности УЗИ позволяют установить характер повреждения нерва: полный или неполный перерыв нерва, наличие и расположение проксимальной и дистальной культи нерва, отёк аксонов, наличие рубцового процесса (фиброза), гематомы и инородного тела, наличие невромы [1, 6–9]. Электродиагностические исследования часто дают неубедительные результаты в первые несколько недель после травмы нерва. Это может привести к задержке хирургического вмешательства и плохим результатам. В отличие от ЭНМГ УЗИ может дифференцировать тяжелые аксонотмеческие поражения и полное пересечение нерва (невротмезис) до того, как произойдет реиннервация [10].

При предоперационном планировании УЗИ позволяет выявлять и маркировать (гибкая проволоочная игла) локализацию дистальных ветвей, проксимальной культи нерва и минимизировать диссекцию тканей при доступе [1]. УЗИ помогает обнаружить посттравматические и послеоперационные невромы, в том числе размером до 2 мм² [11]. УЗИ позволяет выявить повреждения стволов плечевого сплетения [12], седалищного и бедренного нервов, в том числе и ретроперитонеально [13]. Данные УЗИ позволяют спланировать метод хирургического лечения. Во время предоперационного обследования можно одновременно оценить нерв, который может быть использован для потенциального трансплантата. УЗИ помогает в оценке многоуровневых поражений нервов, а также в случаях невозможности по каким-либо причинам проведения электрофизиологических методов исследования [1, 8, 14]. УЗИ позволяет контролировать процесс регенерации нерва в послеоперационном периоде [15] и выявлять ранние осложнения хирургического лечения [16].

Интраоперационное применение УЗИ при травме периферических нервов описано лишь в нескольких работах [17–21]. 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 достоверно судить о регенеративном потенциале [18, 21]. Интраоперационное УЗИ хорошо коррелирует с гистологическим исследованием. Применение УЗИ во время операции может значительно помочь в определении протяженности невролиза, резекции и трансплантации и является важным дополнением для принятия интраоперационных решений [17, 20].

В настоящее время достаточно подробно описана экзогенная структура периферических нервов конечностей в норме и при различной патологии (рис. 1) [8, 9, 22]. Оценивают экзогенность нерва, утолщение эпинеурia, площадь поперечного сечения нерва (CSA — cross-sectional area). В острой фазе патологии периферических нервов отмечается гипозоногенность вследствие эндоневрального отека нерва, и, наоборот, гиперэхогенность в хронической фазе вследствие эндоневрального фиброза. Возможно определение количества и плотности пучков в нерве, что позволяет перевести визуализацию с чисто описательного на количественный уровень [23]. Определение фасцикулярного соотношения (FR — fascicular ratio) позволяет отличить воспалительные, опухолевые или компрессионные нейропатии. Уменьшение количества пучков наблюдается в хронической фазе патологии периферических нервов за счет частичного замещения соединительной тканью. В острой фазе патологии выявляется увеличение размера пучков вследствие эндоневрального отека. УЗИ высокого разрешения позволяет оценить микроциркуляцию нерва. В острую фазу повреждения отмечается снижение интраневральной васкуля-

ризации из-за сдавления капилляров на фоне отека нерва и компенсаторная дилатация эпинеуральных сосудов. В хронической фазе отмечается усиление

интра и экстраневральной васкуляризации из-за эндотелиальной гиперплазии и дилатации сосудов (рис. 1).



Рисунок 1. Ультразвуковые критерии повреждения периферического нерва

Figure 1. Ultrasound signs of peripheral nerve damage

Сравнение методов диагностики повреждения периферических нервов. 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 могут регистрироваться практически нормальные показатели электронейромиографии. Помимо этого, ЭНМГ исследование не в состоянии диагностировать невроту, оценить состояние окружающих тканей и наличие инородных тел [14]. Поэтому предоперационное обследование должно дополняться методами нейровизуализации (МРТ, нейрорафия, УЗИ) [24]. 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 [25]. В послеоперационном периоде, после восстановления нерва, МРТ, хотя и не являет-

ся частью рекомендуемого протокола, все чаще используется благодаря ее многочисленным преимуществам: неинвазивный метод, объективная визуализация нервных и периневральных тканей. Методы МРТ, такие как микронейрография, DTI и DWI, являются многообещающими методиками в визуализации повреждений нервов [26].

Несмотря на высокую контрастность мягких тканей и возможность оценки в разных плоскостях, МРТ имеет ряд существенных недостатков (табл. 2). 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 [27].

Таблица 2. Преимущества и ограничения МРТ и УЗИ периферических нервов

Table 2. Advantages and limitations of MRI and ultrasound of peripheral nerves

	МРТ	УЗИ
ПРЕИМУЩЕСТВА	- 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)	- Более высокое пространственное разрешение (100–400 мкм для датчика 5–18 МГц и до 75 мкм для датчика 20 МГц) - Быстрое исследование по всей длине нерва - Сравнение с контралатеральной стороной - Динамическая оценка. - Недорогой и широко доступный метод - Оценка мелких ветвей нервов - Оценка кровотока при доплерографии - Контроль хирургических манипуляций рядом с нервом - Визуализация при наличии металлических баллистических, костных или хирургических обломков - Интраоперационное применение - Нет противопоказаний
ОГРАНИЧЕНИЯ	- Артефакты от металлических имплантатов - Более низкое пространственное разрешение (450 мкм) - Ограничение при клаустрофобии и кардиостимуляторе - Артефакт «магического угла» - Дорогой, менее доступный и более длительный метод - Статическое изображение - Противопоказана в случае травмы с наличием металла в ране, например, при огнестрельных ранениях	- Операторзависимый метод и требует времени для обучения - Анизотропия при исследовании по длинной оси может привести к ошибкам интерпретации - Меньшая глубина поля зрения. Затруднена оценка глубоко расположенных нервов на бедре и у пациентов с ожирением - Меньшая чувствительность к изменениям межтканевой жидкости. - Плохое контрастное разрешение

Чувствительность предоперационного УЗИ при травме периферического нерва по данным разных авторов составляет 76–96,7 %, а специфичность — 50–99,5 % [7–9, 28]. Проведено несколько исследований сравнивающих результаты МРТ и УЗИ при патологии периферических нервов. Выявлена высокая чувствительность УЗИ, сопоставимая с МРТ 3Т, 81 % и 95 %, соответственно [27], и даже большая чувствительность УЗИ при сравнении с МРТ 1,5 Т — 93 % и 67 %, соответственно [29].

Перспективы развития УЗИ нервов. Ни один из доступных в настоящее время методов визуализации нервов не является идеальным, а методы с высоким разрешением обычно ограничиваются невозможностью интраоперационного применения. В перспективе необходимы новые методы визуализации тонких нервных структур. В связи с удобством применения, в том числе интраоперационного, различные методы УЗИ в настоящее время активно развиваются для достижения поставленных целей. Ультрасонография с контрастным усилением (CEUS — contrast-enhanced ultrasound) являются относительно новым методом, позволяющим предоставить дополнительную информацию об интраневральном кровотоке [30]. В настоящее время проявление любого интраневрального кровотока обычно считается патологическим состоянием, выявляемым при компрессионной нейропатии, хронической воспалительной демиелинизирующей полинейропатии, лепре и некоторых опухолях оболочки нервов. Кроме того, в моделях на животных было показано, что развитие сосудистой сети является ключевым элементом регенерации нерва [31, 32]. CEUS уже является рутинной клинической процедурой во многих клиниках по всему миру при эхокардиографии, что делает реальным возможность быстрого перехода с экспериментальных моделей в клиническую практику. Несколько исследований показали успешное использование CEUS для количественной оценки изменения перфузии поврежденных периферических нервов [30, 33, 34].

Повышение интереса к CEUS при УЗИ нервов вдохновила на создание новой методики, которая привела к важному прорыву в фундаментальной характеристике ультразвука. УЗИ сверхвысокого разрешения в сочетании с CEUS улучшило разрешающую способность УЗИ в 10 раз по отношению к дифракционному пределу (длина волны/2) [35]. Путем локализации отдельных микропузырьков и отслеживания их перемещения с субволновым разрешением можно создавать карты сосудистой системы в масштабе микрометра. Сверхвысокочастотное УЗИ позволяет значительно лучше понять внутренние нервные структуры, предоставляет подробные данные о размере, количестве и плотности пучков, экзогенности и интраневральной васкуляризации. Однако такое резкое увеличение разрешения происходит за счет снижения глубины проникновения ультразвука. В частности, датчики с частотой 70 МГц способны отображать только поверхностные структуры, глубина которых

не превышает 3 см. В настоящее время эта методика уже применяются доклинически и клинически для визуализации микроциркуляторного русла головного мозга, почек, кожи, опухолей, лимфатических узлов, оценки хронической воспалительной полинейропатии и спинальной мышечной атрофии [35]. Кроме того, появились исследования интраоперационного применения сверхвысокочастотных датчиков [36].

Помимо CEUS, развиваются и другие методики количественной оценки интраневрального кровотока без использования контраста, такие как измерение MPI (maximum perfusion intensity — максимальная интенсивность перфузии). При этом используется полуавтоматическое измерения перфузии путем количественного определения кровотока с использованием интенсивности цветовых оттенков пикселей в интересующей области. Пилотные исследования выявили высокую корреляцию данных MPI с ЭНМГ и CSA нерва [34]. SMI (superb microvascular imaging — превосходная микрососудистая визуализация) — это новый метод визуализации сосудов без контрастного усиления. Метод позволяет отделить сигналы низкоскоростного кровотока от артефактов окружающей ткани и визуализировать интраневральный кровоток с высоким разрешением, значительно превосходящим цветную или энергетическую доплерографию [37, 38].

Соноэластография (SWE — Shear wave elastography, эластография сдвиговой волной) — метод УЗИ для оценки упругих свойств мягких тканей, а не акустического импеданса. В клинике этот метод используется при оценке патологии мышечной/сухожильной тканей и патологии печени, однако, недавно появились сообщения о применении соноэластографии при компрессионных нейропатиях. При этом увеличение жесткости выявлялось до выявления стандартных УЗИ признаков синдрома карпального канала. Исследования применения SWE при потравматической нейропатии показывают, что жесткость нерва постепенно увеличивается после травмы. Через 8 недель жесткость седалищного нерва значительно увеличивается по сравнению с контрольной группой и предыдущими временными точками [30]. По мнению авторов увеличение жесткости нерва можно объяснить повышенным отложением коллагена во внеклеточном матриксе на фоне отека, повышения давления внутри нерва, ишемии и гипоксии при травме нерва.

Заключение. 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). Интраоперационное УЗИ высокого разрешения, учитывая дальнейший технический прогресс, обладает большим клиническим потенциалом. Мультимодальное УЗИ может предоставить количественную информацию о морфологических изменениях, механических свойствах и кровоснабжении поврежденного нерва и денервирован-

ной мышцы. Дальнейшие исследования позволят выявить роль УЗИ в оценке дегенеративных и регенеративных изменений нерва после травмы и операции. Уже сейчас, учитывая оснащенность большинства клиник аппаратами УЗИ экспертного класса, возможность применения УЗИ при повреждении периферических нервах является реальностью. А накопление опыта и разработка новых, более совершенных аппаратов, датчиков и методов УЗИ позволят передвинуть этот метод на первые позиции в диагностике поврежденных периферических нервов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. **Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИР НИИТОН СГМУ «Разработка системы поддержки принятия врачебных решений при комплексном лечении травм периферической нервной системы методами электронейромодуляции», номер государственной регистрации 121032300173–9.

Financing. The research was performed as part of NIITON SSMU project 'Development of the medical decision-making support system for the complex treatment of peripheral nerve injuries with electroneuromodulation methods', state registration number 121032300173–9.

ORCID авторов / ORCID of authors

Айтемиров Шамиль Малачилович /
Ajtemirov Shamil Malachilyaevich
<https://orcid.org/0000-0002-8889-5851>

Островский Владимир Владимирович /
Ostrovskij Vladimir Vladimirovich
<https://orcid.org/0000-0002-8602-2715>

Бажанов Сергей Петрович / Bazyanov Sergej Petrovich
<https://orcid.org/0000-0001-9474-9095>

Щаницын Иван Николаевич / Shchaniysyn Ivan Nikolaevich
<https://orcid.org/0000-0003-0565-517>

Бордюгова Татьяна Александровна /
Bordugova Tatyana Aleksandrovna
<https://orcid.org/0000-0003-2410-4309>

Петрова Анна Петровна / Petrova Anna Petrovna
<https://orcid.org/0000-0001-9192-7378>

Литература/References

- Omejce G, Podnar S. Contribution of ultrasonography in evaluating traumatic lesions of the peripheral nerves. *Neurophysiol Clin.* 2020;50(2):93–101. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCL.2020.01.007>
- Solbiati L, de Pra L, Ierace T, Bellotti E, Derchi LE. High-resolution sonography of the recurrent laryngeal nerve: anatomic and pathologic considerations. *AJR Am J Roentgenol.* 1985;145(5):989–93. <https://doi.org/10.2214/AJR.145.5.989>
- Fornage BD. Peripheral nerves of the extremities: imaging with US. *Radiology.* 1988;167(1):179–82. <https://doi.org/10.1148/RADIOLOGY.167.1.3279453>
- Silvestri E, Martinoli C, Derchi LE, Bertolotto M, Chiaramondia M, Rosenberg I. Echotexture of peripheral nerves: correlation between US and histologic findings and criteria to differentiate tendons. *Radiology.* 1995;197(1):291–6. <https://doi.org/10.1148/RADIOLOGY.197.1.7568840>
- Buchberger W, Schon G, Strasser K, Jungwirth W. High-resolution ultrasonography of the carpal tunnel. *J Ultrasound Med.* 1991;10(10):531–7. <https://doi.org/10.7863/JUM.1991.10.10.531>
- Tang P, Wang Y, Zhang L, He C, Liu X. Sonographic evaluation of peripheral nerve injuries following the Wenchuan earthquake. *J Clin Ultrasound.* 2012;40(1):7–13. <https://doi.org/10.1002/JCU.20895>
- Endo Y, Sivakumaran T, Lee SC, Lin B, Fufa D. Ultrasound features of traumatic digital nerve injuries of the hand with surgical confirmation. *Skeletal Radiol.* 2021;50(9):1791–800. <https://doi.org/10.1007/S00256-021-03731-W/TABLES/5>
- Чуловская И. Г. Ультрасонография периферических нервов предплечья и кисти в норме и при патологии. *Российский медицинский журнал.* 2010;10(3):45–47. [Chulovskaya IG. Ultrasonography of peripheral nerves of the forearm and hand in health and disease. *Rossiyskiy Meditsinskiy Zhurnal.* 2010;10(3):45–47. (In Russ.).]
- Салтыкова В. Г., Митьков В. В., Карпов И. Н., Шток А. В. Ультразвуковая диагностика повреждений плечевого сплетения на различных уровнях. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2010;2:71–80. [Saltykova VG, Mitkov VV, Karpov IN, Shtok AV. Brachial Plexus Injuries Ultrasound Diagnostics. *Ultrasound and functional diagnostics.* 2010;2:71–80. (In Russ.).]
- Tagliafico A, Altafini L, Garello I, Marchetti A, Gennaro S, Martinoli C. Traumatic neuropathies: Spectrum of imaging findings and postoperative assessment. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2010;14(5):512–22. <https://doi.org/10.1055/S-0030-1268071/ID/38>
- Renna R, Erra C, Almeida V, Padua L. Ultrasound study shows nerve atrophy in post herpetic neuralgia. *Clin Neurol Neurosurg.* 2012;114(10):1343–4. <https://doi.org/10.1016/J.CLINURO.2012.03.022>
- 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;3:3–4. [Mironov SP, Eskin NA, Golubev VG. Ultrasound diagnosis of pathology of tendons and nerves of the extremities. *N. N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics.* 2004;3:3–4. (In Russ.).]
- Bilgili A, Çokluk C, Aydın K. Ultrasound Neurography in the Evaluation of Sciatic Nerve Injuries. *J Phys Ther Sci.* 2013;25(10):1209. <https://doi.org/10.1589/JPTS.25.1209>
- Toia F, Gagliardo A, D'Arpa S, Gagliardo C, Gagliardo G, Cordova A. Preoperative evaluation of peripheral nerve injuries: What is the place for ultrasound? *J Neurosurg.* 2016;125(3):603–14. <https://doi.org/10.3171/2015.6.JNS.151001>
- Лапицкая Е. В., Шивцов Д. В., Самойлова О. Б., Маркова Т. А. Ультразвуковое исследование периферических нервов при травматическом повреждении кисти. Клинический пример. *Вестник Челябинской областной клинической больницы.* 2021;4(52):39–44. [Lapitskaya EV, Shitsov DV, Samoylova OB, Markova TA. Ultrasound examination of peripheral nerves in traumatic hand injury. *Clinical case study. Bulletin of the Chelyabinsk Regional Clinical Hospital.* 2021;4(52):39–44. (In Russ.).]

16. Fantoni C, Erra C, Fernandez Marquez EM, Ortensi A, Faiola A, Coraci D, et al. Ultrasound Diagnosis of Postoperative Complications of Nerve Repair. *World Neurosurg.* 2018;115:320–3. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.04.179>
17. 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 НН Приорова.* 2016;1:62–6. [Ninel' VG, Aitemirov SM, Korshunova GA, Norkin IA. Complex Diagnosis in Surgical Treatment of Peripheral Nerves Injuries of the Extremities. *N. N. Priorov Journal of Traumatology And Orthopedics.* 2016;1:62–6. (In Russ.).] <https://doi.org/10.17816/vto201623162-66>
18. Koenig RW, Schmidt TE, Heinen CPG, Wirtz CR, Kretschmer T, Antoniadis G, et al. Intraoperative high-resolution ultrasound: a new technique in the management of peripheral nerve disorders: Clinical article. *J Neurosurg.* 2011;114(2):514–21. <https://doi.org/10.3171/2010.9.JNS.10464>
19. Lauretti L, D'Alessandris QG, Granata G, Padua L, Roselli R, Di Bonaventura R, et al. Ultrasound evaluation in traumatic peripheral nerve lesions: from diagnosis to surgical planning and follow-up. *Acta Neurochir.* 2015;157(11):1947–51. <https://doi.org/10.1007/S00701-015-2556-8>
20. Burks SS, Cajigas I, Jose J, Levi AD. Intraoperative imaging in traumatic peripheral nerve lesions: Correlating histologic cross-sections with high-resolution ultrasound. *Oper Neurosurg.* 2017;13(2):196–202. <https://doi.org/10.1093/ONS/OPW016>
21. Lee FC, Singh H, Nazarian LN, Ratliff JK. High-resolution ultrasonography in the diagnosis and intraoperative management of peripheral nerve lesions: Clinical article. *J Neurosurg.* 2011;114(1):206–11. <https://doi.org/10.3171/2010.2.JNS.091324>
22. Ricci V, Ricci C, Cocco G, Gervasoni F, Donati D, Fari G, et al. Histopathology and high-resolution ultrasound imaging for peripheral nerve (injuries). *J Neurol.* 2022;1–13. <https://doi.org/10.1007/S00415-022-10988-1>
23. Heinen C, Dömer P, Schmidt T, Kewitz B, Janssen-Bienhold U, Kretschmer T. Fascicular Ratio Pilot Study: High-Resolution Neurosonography-A Possible Tool for Quantitative Assessment of Traumatic Peripheral Nerve Lesions before and after Nerve Surgery. *Clin Neurosurg.* 2019;85(3):415–22. <https://doi.org/10.1093/NEUROS/NYY355>
24. Джумагишиев Д. К., Норкин И. А., Горшков Р. П., Нинель В. Г. Способ и возможности интраоперационного контрастирования нервных стволов в эксперименте. *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2007;1:80–3. [Dzumagishiev DK, Norkin IA, Gorskov RP, Ninel VG. Way and opportunities intraoperation contrastihg of nervous trunks in experiment. *Saratov Journal of Medical Scientific Research.* 2016;1:62–6. (In Russ.).]
25. Braga Silva J, Chammas M, Chammas PE, Andrade R, Hochhegger B, Leal BLM. Evaluation of peripheral nerve injury by magnetic resonance neurography: A systematic review. *Hand Surg Rehabil.* 2022;41(1):7–13. <https://doi.org/10.1016/j.hansur.2021.09.001>
26. Purger DA, Sakamuri S, Hug NF, Biswal S, Wilson TJ. Imaging of Damaged Nerves. *Clin Plast Surg.* 2020;47(2):245–59. <https://doi.org/10.1016/j.cps.2019.12.003>
27. Aggarwal A, Srivastava DN, Jana M, Sharma R, Gamanagatti S, Kumar A, et al. Comparison of Different Sequences of Magnetic Resonance Imaging and Ultrasonography with Nerve Conduction Studies in Peripheral Neuropathies. *World Neurosurg.* 2017;108:185–200. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.08.054>
28. Журбин Е. А., Гайворонский А. И., Декан В. С. с соавт. Диагностическая эффективность ультразвукового исследования при повреждениях периферических нервов. *Российский нейрохирургический журнал им профессора А. Л. Поленова.* 2019;11(1):23–9. [Zhurbin EA, Gajvoronskij AI, Dekan VS, et al. Diagnostic efficiency of ultrasound research in damage of peripheral nerves. *Russian Neurosurgical Journal named after professor A. L. Polenov.* 2019;11(1):23–9. (In Russ.).]
29. Zaidman CM, Seelig MJ, Baker JC, Mackinnon SE, Pestronk A. Detection of peripheral nerve pathology. *Neurology.* 2013;80(18):1634–40. <https://doi.org/10.1212/WNL.0B013E3182904F3F>
30. Zhu Y, Jin Z, Luo Y, Wang Y, Peng N, Peng J, et al. Evaluation of the Crushed Sciatic Nerve and Denervated Muscle with Multimodality Ultrasound Techniques: An Animal Study. *Ultrasound Med Biol.* 2020;46(2):377–92. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2019.10.004>
31. Arányi Z, Csillik A, Dévay K, Rosero M. Ultrasonographic demonstration of intraneural neovascularization after penetrating nerve injury. *Muscle Nerve.* 2018;57(6):994–9. <https://doi.org/10.1002/MUS.26065>
32. Свистов Д. В., Исаев Д. М., Гайворонский А. И., Чуриков Л. И., Беляков К. В. Оценка внутривольного кровотока при операциях на периферических нервах. *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А. Л. Поленова.* 2021;13(1):51–7. [Svistov DV, Isaev DM, Gajvoronskij AI, Churikov LI, Belyakov KV. Assessment of intra-trunk blood flow during operations on peripheral nerves. *Russian Neurosurgical Journal named after professor A. L. Polenov.* 2021;13(1):51–7. (In Russ.).]
33. Qureshi AI, Saleem MA, Ahrar A, Raja F. Imaging of the Vasa Nervorum Using Contrast-Enhanced Ultrasound. *J Neuroimaging.* 2017;27(6):583–8. <https://doi.org/10.1111/JON.12429>
34. Carroll AS, Simon NG. Current and future applications of ultrasound imaging in peripheral nerve disorders. *World J Radiol.* 2020;12(6):101–29. <https://doi.org/10.4329/WJR.V12.I6.101>
35. Christensen-Jeffries K, Couture O, Dayton PA, Eldar YC, Hynynen K, Kiessling F, et al. Super-resolution Ultrasound Imaging. *Ultrasound Med Biol.* 2020;46(4):865–91. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2019.11.013>
36. Cartwright MS, Baute V, Caress JB, Walker FO. Ultrahigh-frequency ultrasound of fascicles in the median nerve at the wrist. *Muscle Nerve.* 2017;56(4):819–22. <https://doi.org/10.1002/MUS.25617>
37. Endo T, Matsui Y, Kawamura D, Urita A, Momma D, Ota M, et al. Diagnostic Utility of Superb Microvascular Imaging and Power Doppler Ultrasonography for Visualizing Enriched Microvascular Flow in Patients With Carpal Tunnel Syndrome. *Front Neurol.* 2022;13. <https://doi.org/10.3389/FNEUR.2022.832569>
38. Zhang J, Zhu W, Lin M, Jiang C. Superb microvascular imaging for detecting carpal tunnel syndrome compared with power Doppler ultrasonography: A protocol for systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore).* 2021;100(9):e24575. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000024575>
39. Bodner G, Buchberger W, Schocke M, Bale R, Huber B, Harpf C, et al. Radial Nerve Palsy Associated with Humeral Shaft Fracture: Evaluation with US — Initial Experience. *Radiology.* 2001;219(3):811–6. <https://doi.org/10.1148/RADIOLOGY.219.3.R01JN09811>
40. Peer S, Bodner G, Meirer R, Willeit J, Piza-Katzer H. Examination of Postoperative Peripheral Nerve Lesions with High-Resolution

- Sonography. *Am J Roentgenol.* 2012;177(2):415–9. <https://doi.org/10.2214/ajr.17721770415>.
41. Cokluk C, Aydin K. Ultrasound Examination in the Surgical Treatment for Upper Extremity Peripheral Nerve Injuries: Part I. *Turk Neurosurg.* 2007;17(4):277–82.
 42. Cokluk C, Aydin K. Ultrasound Examination in the Surgical Treatment of Lower Extremity Peripheral Nerve Injuries: Part II. *Turk Neurosurg.* 2007;17(3):197–201.
 43. Toros T, Karabay N, Özaksar K, Sugun TS, Kayalar M, Bal E. Evaluation of peripheral nerves of the upper limb with ultrasonography: A comparison of ultrasonographic examination and the intra-operative findings. *J Bone Jt Surg — Ser B.* 2009;91(6):762–5. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.91B6.22284>
 44. Асилова С. У., Нуримов Г. К., Рустамова У. М., Назарова Н. З. Ультрасонографическая диагностика при повреждении лучевого нерва. *Травма.* 2010;11(3):313–6. [Asilova SU, Nurimov GK, Rustamova UM, Nazarova NZ Ultrasonographic diagnosis in damage to the radial nerve. *J Injury.* 2010;11(3):313–6. (In Russ.).]
 45. Федяков А. Г., Древал О. Н., Кузнецов А. В., Севастьянов В. И., Перова Н. В., Немец Е. А., Сатанова Ф. С. Экспериментальное обоснование применения гелевого имплантата «сферо®гель» и пленочного имплантата «эластопоб®» при травме периферической нервной системы в эксперименте. *Вестник трансплантологии и искусственных органов.* 2009;11(4):75–80. [Fedyakov AG, Dreval ON, Kouznetsov AV, Sevastianov VI, Perova NV, Nemets EA, Satanova FS. Experimental substantiation of application gel implant «sfero®gel» and film implant «elastopob®» at a trauma of peripheral nervous system in experiment. *Russian Journal of Transplantology and Artificial Organs.* 2009;11(4):75–80. (In Russ.).] <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2009-4-75-80>
 46. Filippou G, Mondelli M, Greco G, Bertoldi I, Frediani B, Galeazzi M, et al. Ulnar neuropathy at the elbow: How frequent is the idiopathic form? An ultrasonographic study in a cohort of patients. *Clin Exp Rheumatol.* 2010;28(1):63–7.
 47. Ng ES, Vijayan J, Therimadasamy AK, Tan TC, Chan YC, Lim A, et al. High resolution ultrasonography in the diagnosis of ulnar nerve lesions with particular reference to post-traumatic lesions and sites outside the elbow. *Clin Neurophysiol.* 2011;122(1):188–93. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.04.035>
 48. Zhu J, Liu F, Li D, Shao J, Hu B. Preliminary study of the types of traumatic peripheral nerve injuries by ultrasound. *Eur Radiol.* 2010;21(5):1097–101. <https://doi.org/10.1007/S00330-010-1992-3>
 49. Padua L, Di Pasquale A, Liotta G, Granata G, Pazzaglia C, Erra C, et al. Ultrasound as a useful tool in the diagnosis and management of traumatic nerve lesions. *Clin Neurophysiol.* 2013;124(6):1237–43. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.10.024>
 50. Lee J, Bidwell T, Metcalfe R. Ultrasound in pediatric peripheral nerve injuries: Can this affect our surgical decision making? A preliminary report. *J Pediatr Orthop.* 2013;33(2):152–8. <https://doi.org/10.1097/BPO.0B013E318263A130>
 51. Салтыкова В. Г., Голубев И. О., Меркулов М. В., Шток А. В. Роль ультразвукового исследования при планировании объема пластики периферических нервов. *Ультразвуковая и функциональная диагностика.* 2012;4:62–69. [Saltykova VG, Golubev IO, Merkulov MV, Shtok AV. Value of ultrasound in planning of peripheral nerves surgical repair. *Ultrasonic and functional diagnosis.* 2012;4:62–69. (In Russ.).]
 52. Gruber H, Peer S, Gruber L, Loescher W, Bauer T, Loizides A. Ultrasound imaging of the axillary nerve and its role in the diagnosis of traumatic impairment. *Ultraschall der Medizin.* 2014;35(4):332–8. <https://doi.org/10.1055/S-0034-1366089/ID/JR324-21>
 53. Tagliafico AS, Tagliafico G. Fascicular ratio: A new parameter to evaluate peripheral nerve pathology on magnetic resonance imaging: A feasibility study on a 3T MRI system. *Med (United States).* 2014;93(14). <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000000068>
 54. Мажорова И. И., Трофимова Е. Ю., Хамидова Л. Т., Титов П. С., Боголюбовский Ю. А., Евграфов П. Г. Ультразвуковое исследование повреждений периферических нервов у больных с травмами конечностей в раннем посттравматическом или послеоперационном периодах. *Лучевая диагностика и терапия.* 2020;11(4):87–95. [Mazhorova II, Trofimova EY, Khamidova LT, Titov RS, Bogolyubsky YA, Evgrafov PG. Ultrasound examination of peripheral nerve injuries in patients with limb injuries in the early post-traumatic or postoperative periods. *Diagnostic radiology and radiotherapy.* 2020;11(4):87–95. (In Russ.).] <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-4-87-95>