

ЛЕКЦИЯ

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2025

ТРАВМА НЕРВА: РОЛЬ ЭЛЕКТРОНЕЙРОМИОГРАФИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В ДИАГНОСТИКЕ

Климкин А.В., Ирикова М.А., Войтенков В.Б., Скрипченко Е.Ю.

ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр инфекционных болезней Федерального медико-биологического агентства», Санкт-Петербург, Россия

Резюме

Обзор посвящен классификации, механизмам восстановления, электронейромиографической и ультразвуковой диагностике травмы нерва. В частности параметрам сенсорного и моторного проведения, игольчатой электромиографии, ультразвуковому исследованию степени повреждения нерва, прогнозированию восстановления функции нерва и тактике лечения травмы нерва. Механизмы восстановления функции мышцы при травме нерва могут включать ремиелинизацию, аксональный спраутинг, рост аксонов с места повреждения и мышечную гипертрофию. Восстановление силы мышцы обычно занимает 18–24 месяца после травмы нерва. При диагностике травмы нерва по типу невротомезиса следует сразу направлять пациента для оперативного лечения и скорейшей реиннервации мышцы.

Ключевые слова: травма нерва, электронейромиография, ультразвуковое исследование, хирургия нерва, индекс невромы

Для цитирования: Климкин А.В., Ирикова М.А., Войтенков В.Б., Скрипченко Е.Ю. Травма нерва: роль электронейромиографии и ультразвукового исследования в диагностике. *Российский неврологический журнал*. 2025;30(1):51–62. DOI 10.30629/2658-7947-2025-30-1-51-62

Для корреспонденции: Климкин А.В., e-mail: klinkinpark@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки.

Информация об авторах

Климкин А.В., <https://orcid.org/0000-0002-6180-4403>; e-mail: klinkinpark@mail.ru

Ирикова М.А., <https://orcid.org/0000-0001-8924-5300>; e-mail: dr.bedova@yandex.ru

Войтенков В.Б., <https://orcid.org/0000-0003-0448-7402>; e-mail: vlad203@inbox.ru

Скрипченко Е.Ю., <https://orcid.org/0000-0002-8789-4750>; e-mail: wwave@yandex.ru

NERVE INJURY: THE ROLE OF ELECTRONEUROMYOGRAPHY AND ULTRASOUND IN DIAGNOSTICS

Klimkin A.V., Irikova M.A., Voitenkov V.B., Skripchenko E.Yu.

Federal Scientific and Clinical Center of Infectious Diseases of the Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia

Abstract

The review is devoted to the classification, recovery mechanisms, electroneuromyographic and ultrasound diagnostics of nerve injury. In particular, the article is devoted to the parameters of sensory and motor conduction, needle electromyography, ultrasound examination of the degree of nerve damage, prognosis of restoration of nerve function and tactics of treatment of nerve injury. The mechanisms of muscle function recovery in case of nerve injury may include remyelination, axonal sprouting, axon growth from the site of injury and muscle hypertrophy. Muscle strength recovery usually takes 18–24 months after nerve injury. When diagnosing a nerve injury by the neurotmesis type, the patient should be immediately referred to a surgeon for surgery and rapid muscle reinnervation.

Keywords: nerve injury, electromyography, ultrasound, nerve surgery, neuroma index

For citation: Klimkin A.V., Irikova M.A., Voitenkov V.B., Skripchenko E.Yu. Nerve injury: the role of electroneuromyography and ultrasound in diagnostics. *Russian Neurological Journal (Rossijskij Nevrologicheskij Zhurnal)*. 2025;30(1):51–62. (In Russian). DOI 10.30629/2658-7947-2025-30-1-51-62

For correspondence: Klimkin A.V., e-mail: klinkinpark@mail.ru

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

Funding. The study had no sponsorship.

Information about authors

Klimkin A.V., <https://orcid.org/0000-0002-6180-4403>; e-mail: klinkinpark@mail.ru

Irikova M.A., <https://orcid.org/0000-0001-8924-5300>; e-mail: dr.bedova@yandex.ru

Voitenkov V.B., <https://orcid.org/0000-0003-0448-7402>; e-mail: vlad203@inbox.ru

Skripchenko E.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-8789-4750>; e-mail: wwave@yandex.ru

Сокращения: кПа — килопаскаль, МРТ — магнитно-резонансная томография, ПДЕ — потенциал двигательной единицы, ПОВ — положительные острые волны, ППС — площадь поперечного сечения, ПФ — потенциалы фибрилляций, СПИ — скорость проведения импульса, УЗИ — ультразвуковое исследование, ЭНМГ — электронейромиография.

Введение

Травматическое повреждение нервов ежегодно приводит к значительному росту количества людей с инвалидностью во всем мире. В травматологических отделениях 5–10% пациентов имеют признаки поражения периферических нервов [1, 2]. При травмах рук чаще всего поражаются срединный, лучевой и локтевой нервы, в ногах чаще поражаются седалищный и малоберцовый нервы [3]. Нервы с небольшим количеством крупных фасцикул и периневрия, такие как малоберцовый нерв более подвержены повреждению [4]. Переломы костей — основная причина травмы нервов (например, перелом плечевой кости с развитием невропатии лучевого нерва). В мирное время основными причинами травм нервов являются транспортные аварии, ятрогенные причины, производственный и бытовой травматизм [5]. Огнестрельные и осколочные ранения нервов — основной вид травмы в военное время [1, 6]. Травма нерва приводит к нарушению чувствительности, парезу мышц, трофическим нарушениям, хронической боли и каузалгии. Понимание классификации и патофизиологии, а также знание и применение электронейромиографического (ЭНМГ) и ультразвукового исследований (УЗИ) повреждений нервов имеют решающее значение для правильной диагностики, локализации и лечения травм нервов.

Степень травмы нерва. В 1890 г. испанский врач и гистолог С.Рамон-и-Кахаль впервые описал конусы роста перерезанного нерва и тем самым показал, что нерв имеет механизм регенерации за счёт роста аксонов с места повреждения [7]. Во время второй мировой войны британский хирург Н. Seddon предложил концептуальную классификацию травмы нерва: невпраксия, аксонотмезис и невротмезис [8]. В 1951 г. классификация была дополнена 5 степенями повреждения австралийским врачом S. Sunderland [9] и в настоящее время классификация травмы нерва имеет 6 степеней повреждения [10] (таблица 1).

В зависимости от целостности кожных покровов травмы нервов разделяют на открытые (резаные, колотые, рубленые, рваные, размозжённые, огнестрельные, травма нерва при открытых переломах костей) и закрытые (компрессия, контузия, ушиб, тракция, травма нерва при закрытых переломах костей, термотравма, электротравма). Концептуально вне зависимости от вида травмирующего агента по механизму повреждения травмы нервов могут быть изолированными или сочетаться с компрессией, контузией, тракцией или разрывом. Нерв более устойчив к компрессии, чем к тракции. Предел

эластичности нерва составляет 20% его длины, порог разрыва — 30% [11].

Невпраксия — это степень повреждения нерва, при которой нарушена сенсорная и/или моторная функции в результате локальной демиелинизации нерва без развития Валлеровской дегенерации. В этом случае дистально повреждению нерва проводимость не нарушена, количество аксонов в нерве не уменьшается и, соответственно, не развивается мышечная атрофия. Причины изолированной невпраксии: кратковременная компрессия и нарушение кровоснабжения нерва. При устранении компрессии и восстановлении кровоснабжения нерва невпраксия разрешается в течение 1–3 мес.

Аксонотмезис — это степень повреждения нерва, при которой нарушена сенсорная и/или моторная функции в результате частичного/полного поражения аксонов нерва с развитием Валлеровской дегенерации с последующим возможным ростом аксонов с места повреждения по эндоневральным трубкам. Причины аксонотмезиса: длительная компрессия, тракция, контузия. Восстановление функций зависит от степени дезорганизации нерва, а также расстояния от места травмы нерва до иннервируемой мышцы.

Невротмезис — это степень повреждения нерва, при которой полностью или частично нарушена целостность нерва с отсутствием возможности роста аксонов с места повреждения. Причины невротмезиса: высококинетическая тракция, огнестрельные, резаные, рваные, колотые и рубленые раны. Прогноз восстановления функций без хирургической операции неблагоприятный.

В классификации S. Sunderland I степень соответствует невпраксии. Повреждение II степени включает поражение аксонов, но с интактным эндоневрием и стромой. Восстановление при II степени происходит за счёт роста аксонов вдоль эндоневральных трубок. Травма III степени представляет собой поражение аксонов и эндоневральных трубок, но окружающий периневрий не поврежден. Восстановление зависит от того, насколько хорошо аксоны могут пересечь место поражения и прорасти в эндоневральные трубки. При травме IV степени (часто из-за тракции) происходит потеря непрерывности аксонов, эндоневральных трубок и периневрия. Отдельные нервные пучки разрываются, непрерывность нервного ствола сохраняется только за счёт окружающего эпиневирия. Без хирургического вмешательства прогноз неблагоприятный из-за выраженной внутренней дезорганизации направляющих соединительнотканых элементов и сопутствующего рубцевания. При травме V степени наблюдается разрыв нерва аналогично невротмезису по Н. Seddon. Травма VI степени — смешанное повреждение с наличием невпраксии, аксонотмезиса, возможно и частичного невротмезиса на одном участке поврежденного нерва.

Механизмы восстановления. Имеются механизмы восстановления функции денервированной мышцы при травме (рис. 1). При невпраксии

Классификация степени повреждения нерва (Maskinnon S., Dellon A., 1988 [10])

Степень повреждения нерва		Поврежденные структуры нерва					Восстановление функции без операции	Непрерывность нерва
		миелин	аксон	эндоневрий	периневрий	эпиневрй		
I	Невпраксия	+					Полное до 3 мес	Сохранена
II	Аксонотмезис	+	+				Полное, медленное	Сохранена
III		+	+	+			Неполное, медленное	Сохранена
IV		+	+	+	+		Нет восстановления	Сохранена
V	Невротмезис	+	+	+	+	+	Нет восстановления	Нарушена
VI	Разные степени повреждения						Варьирует в разных пучках	Сохранена/нарушена

Table 1

Classification of the degree of nerve injury [10]

Degree of nerve injury		Damaged nerve structures					Recovery without surgery	Nerve continuity
		myelin	axon	endoneurium	perineurium	epineurium		
I	Neurapraxia	+					Complete up to 3 months	Preserved
II	Axonotmesis	+	+				Complete, slow	Preserved
III		+	+	+			Incomplete, slow	Preserved
IV		+	+	+	+		No recovery	Preserved
V	Neurotmesis	+	+	+	+	+	No recovery	Nerve rupture
VI	Different degrees of damage						Varies in different bundles	Preserved /not

полное восстановление функции происходит в течение 1–3 месяцев за счет процесса ремиелинизации.

При частичном аксонотмезисе восстановление происходит с участием трех механизмов: 1) с 7–10-го дня от травмы сохраненные аксоны начинают реиннервировать мышцы за счет нодального и терминального спраутинга [12]; 2) рост аксонов с места повреждения со скоростью 1 мм/день; 3) мышечная гипертрофия. С 7-го дня после травмы нерва из интактных аксонов начинают формироваться отростки (спраутинг) из дистальных перехватов Ранвье (нодальный спраутинг) и из нервных окончаний (терминальный спраутинг) к денервированным миоцитам [13]. Каждый аксон может увеличить свою территорию иннервации мышцы в 5–8 раз; то есть при гибели до 80% моторных аксонов можно восстановить нормальную силу мышцы [14].

При полном аксонотмезисе реиннервация происходит только с помощью роста аксонов с места повреждения со скоростью 1 мм/день. Реализация реиннервации мышцы зависит от расстояния от места травмы нерва до мышцы, наличия рубцов, возраста пациента, а также от сохранности мышцы в тот

момент, когда аксоны этой мышцы ее достигнут. Мышцы остаются жизнеспособными для реиннервации в течение 18–24 мес. после травмы. Длительный период полной денервации приводит к грубому фиброзу и атрофии мышцы, что делает неэффективной реиннервацию, если с момента травмы прошло 2 года и более. Например, при полном аксонотмезисе или невротмезисе плечевого сплетения восстановление функции мышц кисти не ожидается, так как аксонам требуется много времени, чтобы достичь мышц, которые к моменту реиннервации атрофируются. По этой причине дистальная нервотизация (анастомоз здорового нерва с поврежденным) нервов позволяет обеспечить более раннюю реиннервацию мышц [15, 16]. Активное произвольное сокращение реиннервированных мышц позволяет вернуть утраченную силу мышцы за счет гипертрофии миоцитов. При невротмезисе восстановление функции денервированной мышцы без операции невозможно.

Восстановление сенсорной функции имеет те же механизмы, как и у моторных аксонов, исключение составляет мышечная гипертрофия. После повреждения сенсорного аксона может произойти

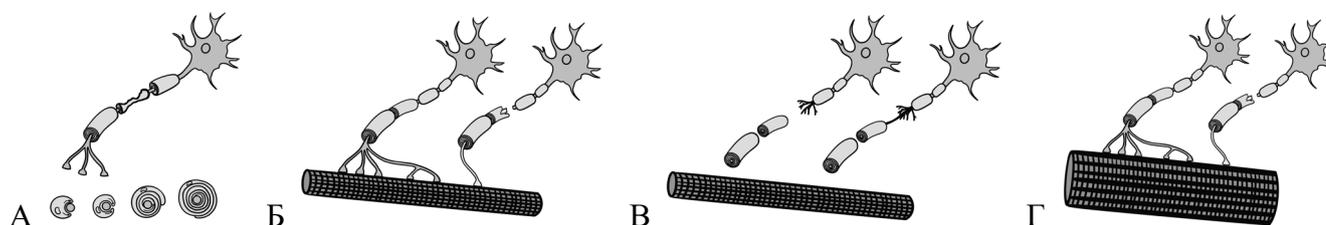


Рис. 1. Механизмы восстановления при травме нерва: А — ремиелинизация; Б — аксональный спраутинг; В — рост аксонов с места повреждения; Г — мышечная гипертрофия
Fig. 1. Mechanisms of recovery of the nerve injury: A — remyelination; Б — axonal sprouting; В — axonal growth from the site of injury; Г — muscle hypertrophy

перераспределение чувствительной зоны иннервации, таким образом, что неповрежденные волокна будут обеспечивать кожную чувствительность на большей площади, чем раньше [17]. Важным отличием восстановления сенсорной функции от моторной является то, что кожа не атрофируется через 18–24 мес., в отличие от мышц; сенсорное восстановление может продолжаться в течение более длительного периода, чем восстановление силы мышцы.

Диагностика травмы нерва. Основные задачи диагностики травмы нерва: определить степень повреждения нерва, прогноз восстановления функции и тактику лечения. Важен анамнез травмы: дата получения травмы, механизм получения травмы, вид травмирующего агента, время применения кровоостанавливающего жгута, длительность острой компрессии, переломы костей и рентгенологические исследования травм костей. Клинические проявления травматической невропатии: вялый парез/плегия мышц, чувствительные нарушения в зоне иннервации нерва, боль, каузалгия, трофические изменения кожи, тест Тинеля при оценке локализации невромы и роста аксонов. Оценка степени пареза мышцы осуществляется с помощью 6-балльной шкалы MRC

(Medical Research Council): 0 — нет сокращения, 1 — минимальное сокращение, 2 — объем движений в суставе значительно снижен, движения возможны без преодоления силы тяжести по плоскости, 3 — значительное сокращение объема движений в суставе, мышцы способны преодолеть силу тяжести, трения (возможность отрыва конечности от поверхности), 4 — легкое снижение силы мышц при полном объеме движения, 5 — нормальная сила мышц, полный объем движений [18].

Электронейромиография (ЭНМГ) и ультразвуковое исследование (УЗИ) позволяют провести диагностику невропраксии (частичной или полной), аксонотмезиса (частичного или полного) и невротмезиса. С помощью ЭНМГ возможно определить полную/частичную невропраксию и частичный аксонотмезис. Провести дополнительную дифференциальную диагностику между полным аксонотмезисом и невротмезисом позволяет УЗИ нерва [19]. С помощью ЭНМГ диагностируется степень повреждения нерва, начиная с 10-го дня травмы, так как сенсорный потенциал нерва как патогномоничный признак невропатии в первые 10 дней сохраняет нормальные значения. При невропраксии амплитуда дистального

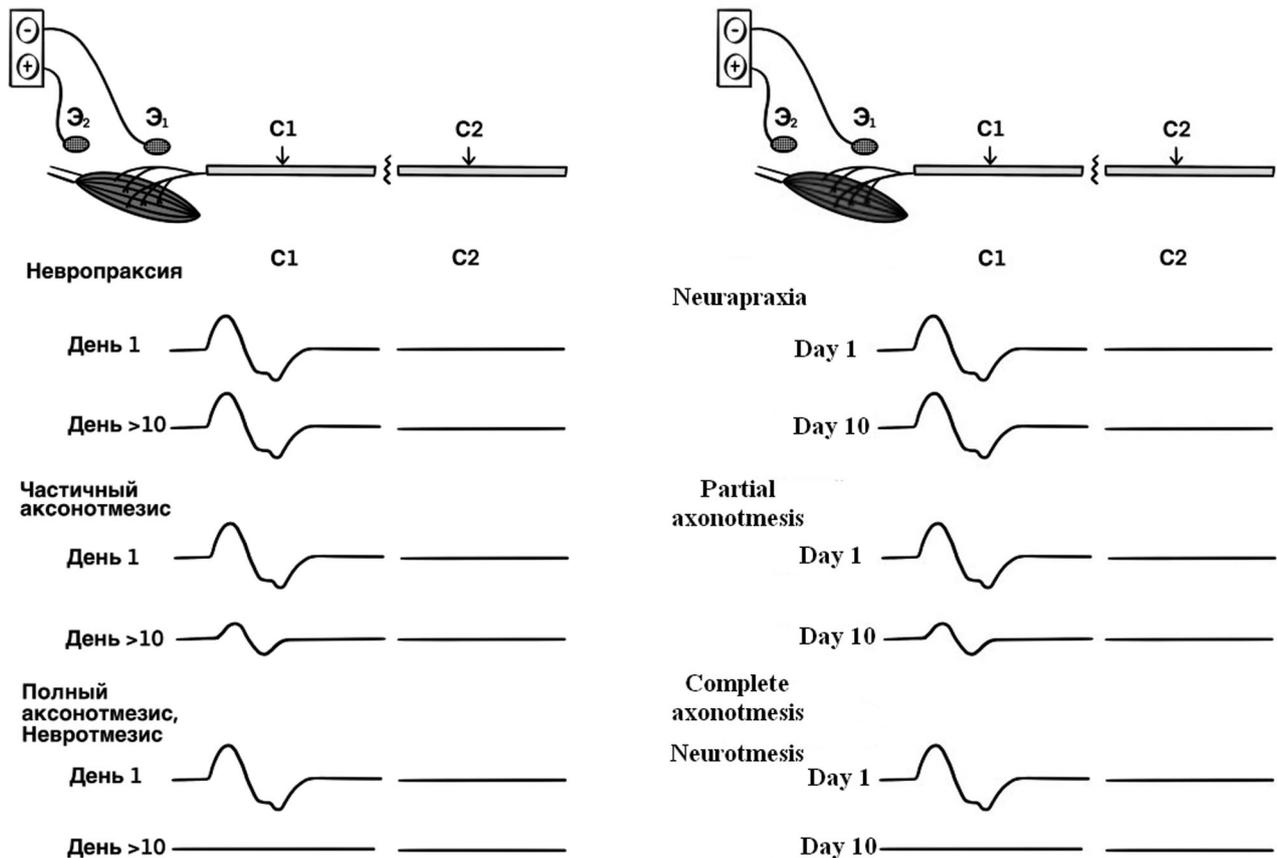


Рис. 2. Дистальный М-ответ в зависимости от степени повреждения нерва в 1-й и на 10-й и более день от травмы. C1 — стимуляция дистально травме нерва, C2 — стимуляция проксимально травме нерва. Э1 — активный регистрирующий электрод на брюшке мышцы, Э2 — референтный регистрирующий электрод.

Fig. 2. Distal M-response depending on the degree of nerve injury at 1 and 10 days after injury. C1 — stimulation distal to the nerve injury, C2 — stimulation proximal to the nerve injury. Э1 — active recording electrode on the belly of the muscle, Э2 — reference recording electrode

М-ответа парализованной мышцы сохраняется нормальной, при частичном аксонотмезисе амплитуда дистального М-ответа снижается на 10-й и более день после травмы, при полном аксонотмезисе и невротмезисе дистальный М-ответ не регистрируется на 10-й день после травмы нерва (рис. 2). Игольчатая и стимуляционная ЭНМГ позволяет проводить оценку реиннервации мышц в динамике и прогнозировать восстановление функции денервированной мышцы. При полной денервации мышцы снижение или отсутствие спонтанной активности по игольчатой ЭНМГ указывает на значимую атрофию и неблагоприятный прогноз восстановления силы мышцы.

Визуализация нерва с помощью УЗИ имеет преимущества в сравнении с МРТ: режим реального времени, мобильность аппарата УЗИ, простота выполнения в том числе у детей, возможность обследования пациентов с металлоконструкциями. Если ЭНМГ позволяет оценить функциональное состояние нерва, то УЗИ — это визуализация: 1) уровня травмы нерва, увеличения площади поперечного сечения (ППС); 2) компрессии рубцом, костными отломками, металлоконструкцией; 3) невромой; 4) разрыва нерва (полный или частичный); 5) шва нерва; 6) денервированной мышцы.

УЗИ денервированной мышцы при травме нерва применяется для оценки степени атрофии мышцы по 4-балльной шкале денервации мышцы Хекматта (Heckmatt scale) [20]:

1-я степень. Норма. Нормальная структура мышцы выглядит как «звездная ночь» с черными мышечными волокнами, перемежающимися с белыми фасциальными структурами («звезды»). Обязательно четкий белый контур кости.

2-я степень. По сравнению с вышележащим жировым слоем интенсивность эхосигнала от мышцы повышена. Мышца становится более гиперэхогенной, то есть белой, но площадь белых участков в мышце не превышает 50% от всей площади мышцы. Имеется четкий белый контур кости.

3-я степень. Мышца гиперэхогенная (белых участков в мышце > 50% от всей площади мышцы) и обязательно снижается белый контур от кости (эхогенность кости уменьшается, контур кости нечеткий).

4-я степень. Мышца выражено гиперэхогенная с отсутствием визуализации контура от кости.

Искусственный интеллект в виде машинного обучения данных сократительной активности и УЗИ мышцы поможет в принятии клинического решения о степени денервации мышцы и реабилитационного потенциала восстановления силы мышцы после травмы нерва [21].

Соноэластография сдвиговой волны денервированной мышцы — это современный метод оценки жесткости мышцы. Жесткость здоровой мышцы человека в покое 5–40 кПа, при сокращении увеличивается до 300 кПа [22]. Экспериментально показано, что при полной денервации икроножной мышцы кролика жесткость мышцы снижается первые 30 дней от травмы нерва, а на 60-й день от травмы жесткость мышцы достоверно увеличивается [23].

Неврапраксия. Повреждение нерва по типу неврапраксии характеризуется нормальной амплитудой дистального М-ответа и сенсорного потенциала нерва, так как аксоны нерва интактны и не формируются Валлеровской дегенерации. При частичной неврапраксии наблюдается снижение амплитуды проксимального к месту повреждения нерва М-ответа > 20% по сравнению с дистальным М-ответом. Полная неврапраксия характеризуется отсутствием регистрации проксимального М-ответа (рис. 2). Увеличение силы мышцы и уменьшение чувствительных расстройств будет коррелировать с увеличением амплитуды проксимального М-ответа в процессе саногенеза в течение 1–3 мес. после травмы.

Изменения F-волны и H-рефлекса могут быть информативны при неврапраксии проксимальных участков нервов (например, нижнего пучка плечевого сплетения, седалищного нерва) в виде увеличения латентности или отсутствия поздних ответов при условии отсутствия на 10-й и более день от травмы нейрогенных изменений по данным игольчатой ЭНМГ.

При игольчатой ЭНМГ возможна регистрация потенциалов фибрилляций без потери количества аксонов нерва. Наиболее очевидные изменения на игольчатой ЭНМГ будут связаны с характером рекрутирования. Это происходит сразу после травмы. При полной неврапраксии потенциалы действия двигательных единиц (ПДЕ) отсутствуют. При частичной неврапраксии будет уменьшено количество ПДЕ, активирующихся быстрее, чем обычно, то есть будет наблюдаться уменьшенное рекрутирование. При неврапраксии не происходит потери аксонов и аксонального спраутинга, следовательно параметры ПДЕ (продолжительность, амплитуда и фазность) остаются в норме. Достоверно диагностировать изолированную неврапраксию возможно после 10 дней от момента травмы.

В 2/3 случаев при неврапраксии ППС нерва в месте травмы остается в пределах нормы. Увеличение ППС нерва в месте травмы не коррелирует с проявлениями сегментарной демиелинизации в виде уменьшения амплитуды проксимального М-ответа [24].

Аксонотмезис. В течение первых 10 дней от травмы нерва по типу аксонотмезиса амплитуда М-ответа и сенсорного потенциала нерва остаются в норме так же, как при неврапраксии. Дистальный участок нерва от места травмы нерва остается возбудим и демонстрирует нормальную проводимость. Валлеровская дегенерация всех чувствительных аксонов происходит обычно примерно через 10 дней после травмы. Сенсорному потенциалу нерва требуется больше времени, чтобы продемонстрировать снижение амплитуды, чем М-ответу (11 дней против 9) из-за более ранних аксональных нарушений [25]. Амплитуда дистального М-ответа падает примерно с 3-го дня и достигает своего минимума при частичном аксонотмезисе или полностью исчезает при полном аксонотмезисе к 10-му дню от момента травмы.

Для оценки степени повреждения чувствительных аксонов нерва использование амплитуды сенсорного потенциала имеет ограничение из-за

вариабельности амплитуд, наблюдаемой у здоровых людей, поэтому необходимо сравнение с контралатеральной стороной. Еще один косвенный вывод, который можно сделать на основе сенсорного потенциала нерва — это тракционное повреждение чувствительных спинномозговых корешков. Поражение проксимальнее чувствительных спинномозговых ганглиев не приводит к снижению амплитуды сенсорного потенциала нерва, хотя клинически будет определяться сниженная или отсутствующая чувствительность кожи. Это плохой прогностический признак, который указывает на возможный отрыв спинномозгового корешка. Смешанные пре- и постганглионарные поражения аксонов как дистальнее, так и проксимальнее спинномозгового ганглия трудно интерпретировать, поскольку сенсорный потенциал небольшой амплитуды может указывать на сочетанный разрыв корешка и частичный разрыв спинномозгового нерва [26].

Частичный аксонотмезис характеризуется денервацией мышц и снижением амплитуды дистального М-ответа, которая примерно пропорциональна количеству сохранных моторных аксонов. Степень потери моторных аксонов нерва возможно оценивать в процентах (амплитуда дистального М-ответа здоровая/денервированная мышца), либо в процентах от нормы [25]. Например, амплитуда дистального М-ответа денервированной *m. tibialis anterior* 3 мВ, на здоровой стороне 10 мВ, следовательно 70% аксонов нерва повреждены, 30% аксонов нерва интактны. Использование данного метода оценки степени денервации мышцы после 3 мес. от момента травмы нерва будет иметь тенденцию недооценивать степень потери моторных аксонов, поскольку отдельные аксоны расширяют территорию иннервации за счет спраунтинга, что увеличивает амплитуду дистального М-ответа мышцы.

Регистрация дистального М-ответа сниженной амплитуды через 1 мес. после травмы указывает на относительно благоприятный прогноз реиннервации мышцы. Отсутствие в динамике увеличения амплитуды М-ответа денервированной мышцы в течение 1 года уменьшает оптимизм относительно возможности восстановления силы мышцы, так как за этот период времени возможности аксонального роста и спраунтинга будут исчерпаны.

Игольчатая ЭМГ более чувствительна к выявлению потери моторных аксонов при умеренном частичном аксонотмезисе, чем амплитуда дистального М-ответа, которая может быть в норме. При аксонотмезисе игольчатая ЭМГ выявляет спонтанную активность: потенциалы фибрилляций (ПФ) и позитивные острые волны (ПОВ). Время между травмой и появлением спонтанной активности в мышце будет зависеть от длины дистальной культы нерва. Если дистальный участок нерва короткий, то спонтанная активность регистрируется в мышце через 10–14 дней после травмы. При длинном дистальном участке (например, иннервация мышц руки локтевым нервом при плечевой плексопатии) появление потенциалов фасцикуляций (ПФ) и потенциалов

острых волн (ПОВ) занимает от 3 до 4 недель с момента травмы. ЭНМГ через 3–4 недели после травмы дадут больше диагностической информации, поскольку ПФ будут видны на игольчатой ЭМГ. Таким образом, специалист по ЭНМГ должен четко знать время, прошедшее с момента травмы. Плотность ПФ и ПОВ обычно оценивают по 4-балльной шкале (++++). Четыре плюса предполагают выраженную активность денервации, но это не указывает на полную потерю аксонов и фактически может отражать потерю небольшого количества аксонов. Амплитуда ПФ со временем будет уменьшаться. В первые месяцы после травмы ПФ составляют несколько сотен мкВ, но, когда повреждению более 1 года, размер ПФ не будет превышать 100 мкВ. Это знание может помочь определить давность повреждения нерва, когда время не ясно, например, при множественных травмах. ПФ могут возникать после прямого повреждения мышц.

При частичном аксонотмезисе оставшиеся ПДЕ изначально имеют нормальную морфологию, но демонстрируют сниженное рекрутирование. Аксональный спраунтинг будет проявляться изменениями в морфологии оставшихся ПДЕ. Амплитуда, продолжительность и фазность ПДЕ увеличатся по мере терминальной реиннервации. Этот процесс начинается на 4-й день после частичной денервации [12].

Наличие нескольких оставшихся ПДЕ после травмы не всегда гарантирует существенное восстановление силы мышцы. Иногда на ранней стадии присутствует несколько ПДЕ, но со временем дополнительные ПДЕ не появляются, в этих случаях у пациента не восстанавливается сила мышцы [27]. При выраженном аксонотмезисе наблюдается деформация эндоневральных трубок с периневральным разрушением (III и IV степени по S. Sunderland), прогноз спонтанного роста аксонов хуже. Обширное рубцевание снижает скорость роста аксонов и снижает вероятность того, что аксоны когда-либо достигнут мышцы. Когда происходит реиннервация с места травмы, может происходить aberrантная иннервация другой мышцы, например, синкинезия мимических мышц при травме лицевого нерва [28].

При полном аксонотмезисе изначально ПДЕ отсутствуют. Когда все аксоны потеряны, единственным возможным механизмом восстановления является рост аксонов с места повреждения. Аксоны, которые прорастают к мышце с места травмы нерва, формируют ПДЕ мелкой амплитуды, уменьшенной длительности, повышенной фазности, такие ПДЕ называют «зарождающимися потенциалами». Появление таких «зарождающихся потенциалов» представляет собой самое раннее свидетельство реиннервации, обычно предшествующее началу клинически очевидных произвольных движений. При проведении ЭНМГ в поисках новых ПДЕ необходимо обязательно принимать в анализ только «четкие», с коротким временем нарастания ПДЕ, поскольку отдаленные потенциалы, зарегистрированные от других мышц, могут дать ложную информацию реиннервации. Иногда полезно увеличить

частоту фильтра низких частот с типичных 20 Гц до 200 Гц, чтобы исключить из анализа отдаленные ПДЕ, которые обычно являются низкочастотными. Как правило, ЭНМГ рекомендуется проводить в динамике 2–3 раза с промежутком в 2–3 мес., чтобы установить темп реиннервации мышцы, прежде чем уверенно оценивать прогноз или назначать хирургическое лечение. На время реиннервации мышцы влияет длина дистального сегмента нерва между травмой нерва и мышцей; более короткие сегменты будут быстрее реиннервировать мышцу.

При сочетанном повреждении по типу аксонотмезиса и неврапраксии игольчатая ЭМГ может потенциально ввести в заблуждение, если интерпретировать ее изолированно. Если, например, травма приводит к повреждению 50% моторных аксонов и блоку проводимости остальных 50%, то игольчатая ЭМГ демонстрирует ПФ и отсутствие ПДЕ. Вместо того, чтобы делать вывод о полном аксонотмезисе, врач ЭНМГ должен оценить дистальный М-ответ,

чтобы определить, какая часть поражения является причиной невпраксии, а какая — аксонотмезисом. Важным моментом здесь является не воспринимать наличие большого количества ПФ и отсутствие ПДЕ как свидетельство полной потери аксонов.

В случае аксонотмезиса и формирования внутрисуставной невromы необходимо измерение с помощью УЗИ ППС максимально утолщенного участка невromы. Неврома с ППС больше 5 нормальных размеров указывает на неблагоприятный прогноз реиннервации и восстановления силы мышцы, показано, что при таких размерах невromы аксоны не прорастают к мышце [29]. На рис. 3 представлен клинический пример из собственной практики сформированной невromы седалищного нерва через 1 год после реконструктивной операции. Сформированная неврома по толщине в 8 раз больше нормального размера и у пациента наблюдалась полная денервация *m. biceps brachii caput brevis et caput longus*, *m. tibialis anterior et m. gastrocnemius* без признаков

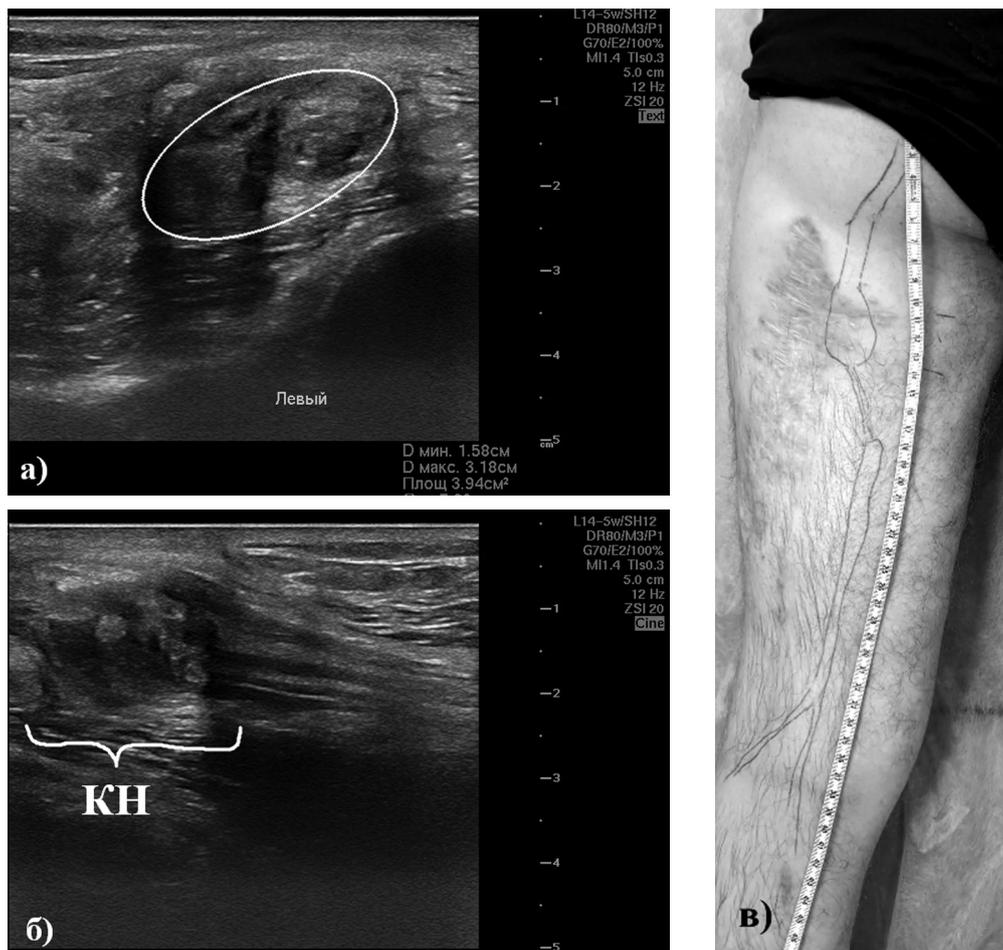


Рис. 3. Неврома левого седалищного нерва проксимально к аутографтам двумя икроножными нервами длиной 8 см у мужчины 37 лет с последствиями осколочного ранения и разрыва седалищного нерва на уровне верхней трети бедра: а) УЗИ в поперечном сканировании левого седалищного нерва, площадь поперечного сечения невromы 394 мм²; б) УЗИ в продольном сканировании левого седалищного нерва, КН — концевая неврома, длиной 25 мм; в) схема и сантиметровая лента на коже невromы левого седалищного нерва и вставок икроножными нервами

Fig. 3. Neuroma of the left sciatic nerve proximal to the autografts of the sural nerves, 8 cm long, in a 37-year-old man with consequences of a shrapnel wound and rupture of the sciatic nerve at the level of the upper third of the thigh. a) Ultrasound in transverse scanning of the left sciatic nerve, cross-sectional area of the neuroma is 394 mm²; б) УЗI в продольном сканировании левого седалищного нерва, КН — терминальная неврома, длиной 25 мм; в) диаграмма и сантиметровая лента на коже невromы левого седалищного нерва и вставок икроножными нервами

Данные УЗИ нерва и ЭНМГ у пациентов с травмой седалищного нерва на уровне бедра

№	Пол	Возраст, лет	Вид травмы	Срок проведения УЗИ после травмы, месяцы	ППС невромы, мм ²	ППС нерва контралатерально, мм ²	Индекс невромы	m. tibialis anterior M-ответ, мВ
	м	13	Бамперный перелом	3	56	24	2,3	0
	м	15	Перелом бедренной кости	12	186	25	7,4	0
	м	37	Минно-взрывное ранение	14	394	47	8,4	0
	м	17	Ножевое ранение	11	239	33	7,2	0
	ж	10	Постинъекционная	5	42	24	1,8	0
	м	13	Рубленая рана бедра	5	100	46	2,2	0
	м	70	Постинъекционная	3	126	30	4,2	0
	м	40	Минно-взрывное ранение	4	114	50	2,3	0,7
	м	36	Огнестрельное ранение	13	130	54	2,4	0,2

Table 2

Ultrasound and EMG data of the nerve in patients with sciatic nerve injury at the hip level

№	Gender	Age, years	Type of injury	Duration of ultrasound after injury, months	CSA of neuroma, mm ²	CSA of nerve contralaterally, mm ²	Neuroma index	m. tibialis anterior M-response, mV
	m	13	Bumper fracture	3	56	24	2,3	0
	m	15	Femur fracture	12	186	25	7,4	0
	m	37	Mine-explosive injury	14	394	47	8,4	0
	m	17	Knife wound	11	239	33	7,2	0
	f	10	Post-injection	5	42	24	1,8	0
	m	13	Chopped thigh wound	5	100	46	2,2	0
	m	70	Post-injection	3	126	30	4,2	0
	m	40	Mine-explosive injury	4	114	50	2,3	0,7
	m	36	Gunshot injury	13	130	54	2,4	0,2

роста новых аксонов с места повреждения, что потребовало повторной реконструктивной операции. ЭНМГ и УЗИ-характеристики степени травмы нерва, и их значение в прогнозе восстановления

функции денервированной мышцы представлены в таблице 3.

В нашем Центре был проведен анализ 9 пациентов с травмами седалищного нерва на уровне бедра

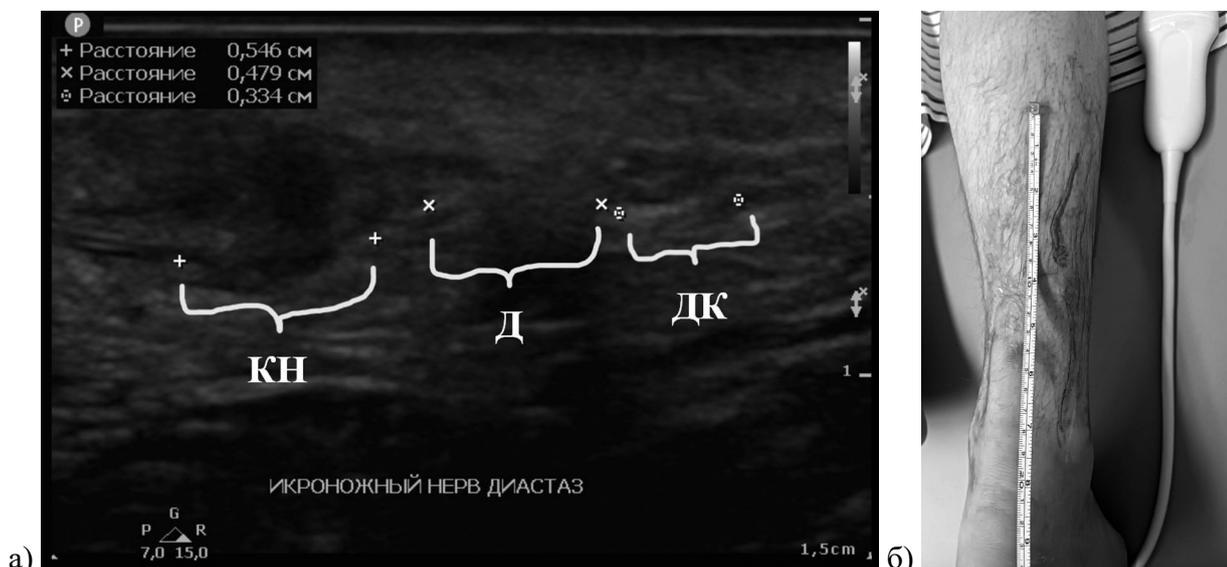
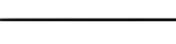
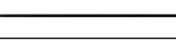


Рис. 4. Разрыв икроножного нерва ударной волной при минно-взрывной травме у мужчины 36 лет. а) УЗ изображение разрыва икроножного нерва через 40 дней после травмы: КН — концевая неврома, длиной 5 мм, Д — диастаз длиной 5 мм, ДК — дистальная культя длиной 3 мм. Прогнозируемый диастаз для шва нерва ≈ 15 мм. б) разметка на коже места разрыва икроножного нерва

Fig. 4. Rupture of the sural nerve by a shock wave in a mine blast injury. а) ultrasound image of rupture of the sural nerve: КН — terminal neuroma, 5 mm long, Д — diastasis, 5 mm long, ДК — distal stump, 3 mm long. Predicted diastasis for nerve suture ≈ 15 mm. б) Marking the site of sural nerve rupture on the skin

Таблица 3

Электронейромиографические и ультразвуковые изменения в зависимости от степени повреждения нерва, прогноза и механизмов восстановления

Степень повреждения нерва (Seddon 1943 г.)	Прогноз	Механизм восстановления функции	Дистальный М-ответ в зависимости от дня после травмы	Потенциалы двигательных единиц	Ультразвуковое исследование
Невrapраксия	Благоприятный, восстановление в течение 3 месяцев	Ремиелинизация	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	В норме	Нерв непрерывный Возможно увеличение ППС в месте повреждения
Аксонотмезис частичный	Благоприятный если: 1. М-ответ снижен не больше 90% от нормы 2. ППС невromы < 5 размеров нормы	Дистальный аксональный спрутинг Рост аксона с места повреждения (1 мм/день) Мышечная гипертрофия	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	С 10 дня после травмы увеличение длительности и амплитуды, полифазные	Нерв непрерывный Увеличение ППС в месте повреждения Снижена эхогенность нерва в месте повреждения Возможно формирование внутривольной невromы
Аксонотмезис полный	Благоприятный если: 1. Короткая дистанция между мышцей и местом повреждения 2. Есть признаки реиннервации через 3–6 месяцев после травмы 3. ППС невromы < 5 размеров нормы	Рост аксона с места повреждения (1 мм/день) Мышечная гипертрофия	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	Не регистрируются При спонтанной реиннервации регистрируются полифазные потенциалы сниженной амплитуды	Нерв непрерывный Увеличение ППС в месте повреждения Снижена эхогенность нерва в месте повреждения Возможно формирование внутривольной невromы
Неврoтмезис	Неблагоприятный	Необходима операция	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	Не регистрируются без операции	Разрыв нерва

(табл. 2). При ретроспективном анализе выявлено, что у 4 пациентов на 2-м году после травмы не реализовалась реиннервация к полностью денервированной *m. tibialis anterior* по данным игольчатой ЭМГ. Предложен расчет индекса невromы: максимальный ППС невromы седалищного нерва / ППС седалищного нерва контралатерально. По данным ROC-анализа показано, что индекс невromы седалищного нерва > 4,2 через 3 мес. после травмы указывает на то, что реиннервация к полностью денервированной *m. tibialis anterior* с большой вероятностью не произойдет (очень хорошая модель — AUROC 0,875, чувствительность 60%, специфичность 100%).

Полный аксонотмезис и невротмезис имеют схожие ЭНМГ-проявления, поскольку разница между этими типами повреждений заключается в целостности нерва. Таким образом, для диагностики полного аксонотмезиса и невротмезиса необходимо УЗИ нерва.

Неврoтмезис. При невротмезисе (V степень по S. Sunderland) реиннервация за счет роста аксонов произойдет, если нерв будет освобожден от рубцовой ткани и будет реализован шов нерва. Шов нерва позволяет реализовать рост аксонов вдоль эндоневральных трубок дистальных сегментов нерва.

Визуализация травмы нерва по типу невротмезиса с помощью УЗИ может помочь принять решение

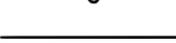
о тактике хирургического лечения в первые дни травмы. В случае невротмезиса с помощью УЗИ проводится разметка в виде рисунка на коже места разрыва с указанием размера концевой невromы, диастаза, дистальной культуры (рис. 4). Разметку травмы нерва желательнее сфотографировать с линейкой и узнаваемым анатомическим ориентиром (сустав, контур мышцы и др.).

Роль ЭНМГ и УЗИ в тактике ведения травмы нерва

Травма нерва по типу невропраксии и аксонотмезиса с признаками реиннервации мышцы по данным ЭНМГ, а также увеличение силы мышцы через 3 и 6 мес. от травмы указывают на благоприятный прогноз при консервативной тактике лечения.

Сроки хирургической реконструкции нерва можно разделить на немедленные, ранние (1 мес.), отсроченные (от 3 до 6 мес.) и поздние (от 1 до 2 лет и более) [30]. ЭНМГ и УЗИ нерва может повлиять на решение о хирургическом вмешательстве в каждый из этих моментов времени. Поскольку специалист по ЭНМГ и УЗИ часто является первым врачом, который дает характеристику травмы нерва, на нем лежит обязанность обеспечить своевременное направление на хирургическое вмешательство, чтобы не была потеряна возможность для эффективной реиннервации мышц. В то же время результаты

Electroneuromyographic and ultrasound changes depending on the degree of nerve damage, prognosis and recovery mechanisms

Degree of nerve damage (Seddon 1943)	Prediction	Recovery mechanisms	Distal M response depending on day after injury	Motor unit potentials	Ultrasound
Neurapraxia	Good, recovery within 3 months	Remyelination	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	Normal	Nerve continuous Possible increase in CSA at the site of injury
Partial axonotmesis	Good if: 1. M-response is reduced to no more than 90% of the norm 2. CSA of neuroma < 5 sizes of norms	Distal axonal sprouting Axon growth from the injury site (1 mm/day) Muscle hypertrophy	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	From the 10th day after injury, the duration and amplitude increase, polyphasic	Nerve continuous Increased CSA at the site of injury Reduced echogenicity of the nerve at the site of injury Possible formation of intrastem neuroma
Complete axonotmesis	Good if: 1. Short distance between muscle and injury site 2. There are signs of reinnervation through 3–6 months after injury 3. PPS neuromas < 5 normal sizes	Axon growth from the injury site (1 mm/day) Muscle hypertrophy	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	Not registered During reinnervation, polyphasic and reduced amplitude potentials	Nerve continuous Increased CSA at the site of injury Reduced echogenicity of the nerve at the site of injury Possible formation of intrastem neuroma
Neurotmesis	Poor prognosis	Surgery necessary	<p>День 1 </p> <p>День 10 </p>	Not registered without operation	Nerve rupture

спонтанной реиннервации мышцы, если она происходит, обычно лучше, чем результаты хирургического вмешательства — следовательно, есть смысл подождать до 6 мес. для получения доказательств спонтанной достаточной реиннервации мышцы, прежде чем приступать к операции. В качестве общего подхода в случаях, когда имеются выраженные нарушения и рассматривается возможность хирургической операции, полезно провести ЭНМГ через 3 мес. после травмы, после того как невпраксия разрешится, чтобы оценить возможность реиннервации мышцы. Второе ЭНМГ исследование, оценивающее темпы реиннервации через 4–6 мес. позволит при необходимости провести хирургическое вмешательство к 6-му мес. [31].

Немедленная реконструкция обычно показана пациентам с колотыми и резаными ранениями. Пациентов с тупой травмой или обширным сопутствующим повреждением мягких тканей не всегда оперируют немедленно.

Ранняя реконструкция часто рекомендуется пациентам, перенесшим тупую травму с полным повреждением нервов, требующую хирургического вмешательства. Пациенты с острым разрывом нерва, которые не были кандидатами на немедленную реконструкцию, также могут быть прооперированы в это время. У пациентов с неполными поражениями может произойти спонтанное выздоровление, которое часто лучше, чем после хирургического вмешательства.

Отсроченная реконструкция нерва в первую очередь показана пациентам, у которых не ясно,

сохраняется ли непрерывность нерва, например, при тракционных травмах [32]. Если непрерывность действительно присутствует, о чем свидетельствуют зарождающиеся ПДЕ, начинающиеся появляться в мышцах, дистальнее места повреждения, то естественное восстановление будет лучше, чем хирургическое вмешательство на нерве. С другой стороны, если непрерывность нерва отсутствует, операцию лучше всего сделать к 6 мес., чтобы нерв мог реиннервировать мышцу до того, как произойдет дегенерация мышц; операция после 6 мес. связана с худшим хирургическим результатом из-за дополнительного времени, которое требуется нерву, чтобы достичь мышцы.

Заключение

ЭНМГ и УЗИ нерва — «золотой стандарт» инструментальной диагностики травмы нерва.

ЭНМГ-признаки благоприятного прогноза при травме нерва:

- 1) регистрация дистального М-ответа денервированной мышцы с 10 дня от травмы;
- 2) регистрация ПДЕ в денервированной мышце;
- 3) при полной денервации мышцы регистрация «зарождающихся» ПДЕ через 6 мес. после травмы.

УЗ-признаки благоприятного прогноза при травме нерва:

- 1) непрерывный нерв;
- 2) отсутствие вовлечения нерва в рубцовый конгломерат, костные отломки, металлоконструкцию;

- 3) индекс невротизации нервов верхних конечностей < 5;
4) индекс невротизации седалищного нерва < 4,2.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Одинак М.М., Живолупов С.А. Заболевания и травмы периферической нервной системы (обобщение клинического и экспериментального опыта). СПб.: СпецЛит, 2009. [Odinak M.M., Zhivolupov S.A. Diseases and injuries of the peripheral nervous system (summary of clinical and experimental experience). St. Petersburg: SpetsLit, 2009. (In Russ.)]
- Jung C, Yun JH, Kim EJ, Park J, Yeom J, Kim KE. Traumatic peripheral nerve injuries in young Korean soldiers: a recent 10-year retrospective study. *J Trauma Inj*. 2024 Sep;37(3):192–200. doi: 10.20408/jti.2024.0001
- Литвиненко И.В., Живолупов С.А., Булатов А.Р., Кузина Е.Э., Рашидов Н.А., Иванов В.С. Анализ диагностических и тактических ошибок при ведении пациентов с травматическими невропатиями конечностей. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2019;2(66):204–208. [Litvinenko I.V., Zhivolupov S.A., Bulatov A.R., Kuzina E.E., Rashidov N.A., Ivanov V.S. Analysis of diagnostic and tactical errors in the management of patients with traumatic neuropathies of the extremities. *Vestnik Rossijskoj Voenno-meditsinskoj akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2019;2(66):204–208. (In Russ.)] doi: 10.17816/brmma25945
- Bateman EA, Pripotnev S, Larocerie-Salgado J, Ross DC, Miller TA. Assessment, management, and rehabilitation of traumatic peripheral nerve injuries for non-surgeons. *Muscle Nerve*. 2024 Jun 21. doi: 10.1002/mus.28185
- Padovano WM, Dengler J, Patterson MM, Yee A, Snyder-Warwick AK, Wood MD, Moore AM, Mackinnon SE. Incidence of Nerve Injury After Extremity Trauma in the United States. *Hand (N Y)*. 2022 Jul;17(4):615–623. doi: 10.1177/1558944720963895
- Howard IM, Sedarsky K, Gallagher M, Miller M, Puffer RC. Combat-related peripheral nerve injuries. *Muscle Nerve*. 2024 Jun 5. doi: 10.1002/mus.28168
- Ramón y Cajal S. A quelle époque apparaissent les expansions des cellules nerveuses de la moelle épinière du poulet. *Anat. Anz*. 1890;5:609–613.
- Seddon HJ. Peripheral Nerve Injuries. *Glasgow Med J*. 1943 Mar;139(3):61–75. PMID: 30437076; PMCID: PMC5950788.
- Sunderland S. A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function. *Brain*. 1951 Dec;74(4):491–516. doi: 10.1093/brain/74.4.491
- MacKinnon SE, Dellon AL. Classification of nerve injuries as the basis for treatment. In: Mackinnon SE, Dellon AL, editors. *Surgery of the peripheral nerve*. New York: Thieme. 1988b. p 35–63.
- Perruisseau-Carrier AC, Marco Y, Fleury V, Brogan DM, Forli A, Bahlouli N. Biomechanical characterization of cadaveric brachial plexus microstructure. *Hand Surg Rehabil*. 2024 Sep;43(4):101745. doi: 10.1016/j.hansur.2024.101745
- Живолупов С.А., Рашидов Н.А., Самарцев И.Н., Яковлев Е.В. Современные представления о регенерации нервных волокон при травмах периферической нервной системы. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2013;3(43):190–198. [Zhivolupov S.A., Rashidov N.A., Samartsev I.N., Yakovlev E.V. Modern concepts of nerve fiber regeneration in injuries of the peripheral nervous system. *Vestnik Rossijskoj Voenno-meditsinskoj akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. (In Russ.) 2013;3(43):190–198.]
- Mehrotra P, Jablonski J, Toftegaard J, Zhang Y, Shahini S, Wang J, Hung CW, Ellis R, Kayal G, Rajabian N, Liu S, Roballo KCS, Udin SB, Andreadis ST, Personius KE. Skeletal muscle reprogramming enhances reinnervation after peripheral nerve injury. *Nat Commun*. 2024 Oct 25;15(1):9218. doi: 10.1038/s41467-024-53276-4
- Gordon T. Peripheral Nerve Regeneration and Muscle Reinnervation. *Int J Mol Sci*. 2020 Nov 17;21(22):8652. doi: 10.3390/ijms21228652
- Коротченко Е.Н., Семенова Ж.Б. Селективная невротизация срединного нерва у молодых пациентов с осложненной позвоночно-спинномозговой травмой на уровне CV—CVII. *Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко*. 2020;84(6):59–66. [Korotchenko E.N., Semenova Zh.B. Selective neurotization of the median nerve in young patients with complicated spinal cord injury at the level of CV–CVII. *Zhurnal «Voprosy nejroxirurgii» imeni N.N. Burdenko = Journal «Questions of Neurosurgery» named after N.N. Burdenko*. 2020;84(6):59–66. (In Russ.)] doi: 10.17116/neiro20208406159
- Pejkova S, Filipce V, Peev I, Nikolovska B, Jovanoski T, Georgieva G, Srbov B. Brachial Plexus Injuries — Review of the Anatomy and the Treatment Options. *Pril (Makedon Akad Nauk Umet Odd Med Nauki)*. 2021 Apr 23;42(1):91–103. doi: 10.2478/prilozi-2021-0008
- Provitera V, Piscosquito G, Manganelli F, Mozzillo S, Caporaso G, Stancanelli A, Borreca I, Di Caprio G, Santoro L, Nolano M. A Model to Study Myelinated Fiber Degeneration and Regeneration in Human Skin. *Ann Neurol*. 2020 Mar;87(3):456–465. doi: 10.1002/ana.25662
- McGillivray MK, Haldane C, Doherty C, Berger MJ. Evaluation of muscle strength following peripheral nerve surgery: A scoping review. *PM R*. 2022 Mar;14(3):383–394. doi: 10.1002/pmrj.12586
- Журбин Е.А., Гайворонский А.И., Декан В.С., Железняк И.С., Чуриков Л.И., Исаев Д.М. Диагностическая эффективность ультразвукового исследования при повреждениях периферических нервов. *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2019;11(1):23–29. [Zhurbin E.A., Gaivoronsky A.I., Dekan V.S., Zheleznyak I.S., Churikov L.I., Isaev D.M. Diagnostic efficiency of ultrasound examination in peripheral nerve injuries. *Rossijskij nejroxirurgicheskij zhurnal im. professora A.L. Polenova = Russian Neurosurgical Journal named after Professor A.L. Polenov*. 2019;11(1):23–29. (In Russ.)]
- Wijnjtes J, Saris C, Doorduyn J, van Alfen N, van Engelen B, Mul K. Improving Heckmatt muscle ultrasound grading scale through Rasch analysis. *Neuromuscul Disord*. 2024 Sep;42:14–21. doi: 10.1016/j.nmd.2024.07.001
- DA Silva DG, Angleri V, Scarpelli MC, Bergamasco JGA, Nóbrega SR, Damas F, Chaves TS, Camargo HA, Ugrinowitsch C, Libardi CA. Application of Artificial Intelligence to Automate the Reconstruction of Muscle Cross-Sectional Area Obtained by Ultrasound. *Med Sci Sports Exerc*. 2024 Sep 1;56(9):1840–1848. doi: 10.1249/MSS.0000000000003456
- Xie Y, Thomas L, Hug F, Johnston V, Coombes BK. Quantifying cervical and axio-shoulder muscle stiffness using shear wave elastography. *J Electromyogr Kinesiol*. 2019 Oct;48:94–102. doi: 10.1016/j.jelekin.2019.06.009
- Zhu Y, Jin Z, Luo Y, Wang Y, Peng N, Peng J, Wang Y, Yu B, Lu C, Zhang S. Evaluation of the Crushed Sciatic Nerve and Denervated Muscle with Multimodality Ultrasound Techniques: An Animal Study. *Ultrasound Med Biol*. 2020 Feb;46(2):377–392. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2019.10.004
- Tsukamoto H, Granata G, Coraci D, Paolasso I, Padua L. Ultrasound and neurophysiological correlation in common fibular nerve conduction block at fibular head. *Clin Neurophysiol*. 2014 Jul;125(7):1491–5. doi: 10.1016/j.clinph.2013.11.041
- Ferrante MA. The Assessment and Management of Peripheral Nerve Trauma. *Curr Treat Options Neurol*. 2018 Jun 1;20(7):25. doi: 10.1007/s11940-018-0507-4
- Hearn SL, Pieper JR, Yang LJ, Chang KW, Kratz AL. Implications of median sensory study to the thumb and deltoid/biceps motor unit recruitment on identifying C6 root avulsion in upper

- neonatal brachial plexus palsy. *Muscle Nerve*. 2022 Jul;66(1):24–30. doi: 10.1002/mus.27550
27. Impastato DM, Impastato KA, Dabestani P, Ko JH, Bunnell AE. Prognostic value of needle electromyography in traumatic brachial plexus injury. *Muscle Nerve*. 2019 Nov;60(5):595–597. doi: 10.1002/mus.26684
28. Husseman J, Mehta RP. Management of synkinesis. *Facial Plast Surg*. 2008 May;24(2):242–9. doi: 10.1055/s-2008-1075840
29. Coraci D, Pazzaglia C, Doneddu PE, Erra C, Paolasso I, Santilli V, Padua L. Post-traumatic neuroma due to closed nerve injury. Is recovery after peripheral nerve trauma related to ultrasonographic neuroma size? *Clin Neurol Neurosurg*. 2015 Dec;139:314–8. doi: 10.1016/j.clineuro.2015.10.034
30. Goubier J-N, Teboul F. Grading of nerve injuries. In: Tubbs RS, Rizk E, Shoja MM, Loukas M, Barbaro N, Spinner RJ, editors. *Nerves and nerve injuries*. Amsterdam: Elsevier;2015. p. 603–10.
31. Robinson LR, Binhammer P. Role of electrodiagnosis in nerve transfers for focal neuropathies and brachial plexopathies. *Muscle Nerve*. 2022 Feb;65(2):137–146. doi: 10.1002/mus.27376
32. Говенько Ф.С., Снищук В.П., Клишкин А.В., Малецкий Э.Ю. Закрытые повреждения срединного нерва у детей: тактика, варианты операции. *Детская хирургия*. 2023;27(3):202–209. [Govenko F.S., Snishchuk V.P., Klimkin A.V., Maletsky E.Yu. Closed injuries of the median nerve in children: tactics, surgical options. *Pediatric surgery*. 2023;27(3):202–209. (In Russ.)] doi: 10.55308/1560-9510-2023-27-3-202-209

Поступила 23.09.2024
Принята к печати 17.12.2024