Вопросы курортологии, физиотерапии
и лечебной физической культуры
2024, Т. 101, №4, с. 36–44
https://doi.org/10.17116/kurort202410104136

Problems of balneology, physiotherapy
and exercise therapy
2024, Vol. 101. no. 4, pp. 36–44
https://doi.org/10.17116/kurort202410104136

Восстановление функции периферических нервов внутритканевой электростимуляцией

© А.А. ГЕРАСИМОВ[1], Н.А. БУРМАТОВ[2], С.А. КОПЫЛОВ[3]

[1]ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, Екатеринбург, Россия;
[2]ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России, Тюмень, Россия;
[3]ФГБОУ ВО «Омский государственный медицинский университет» Минздрава России, Омск, Россия

РЕЗЮМЕ

Для восстановления функции поврежденных периферических нервов используют метод внутритканевой электростимуляции, сопровождающийся раздражением их центральных нейронов. Результаты лечения превзошли таковые при использовании накожной электростимуляции, что подтверждено сравнительными результатами предварительных экспериментов на животных. Остаются неизвестными скорость и качество восстановления функции периферических нервов при сравнении методов внутритканевой и накожной электростимуляции.

Цель исследования. Оценить скорость и качество восстановления функций периферических нервов после их сшивания и проведения в послеоперационном периоде двух разных методов электростимуляции — внутритканевой и накожной в проекции центральных нейронов поврежденных нервов позвоночника.

Материал и методы. Отработаны основные технические параметры метода восстановления функций периферических нервов в послеоперационном периоде. Проведено послеоперационное восстановительное лечение у 77 пациентов с травматическими повреждениями периферических нервов на уровне предплечья: у 42 с использованием внутритканевой электростимуляции, у 35 — накожной при аналогичных характеристиках электрического тока и сопутствующей медикаментозной терапии. Продолжительность наблюдения составила 2 года.

Результаты. При использовании внутритканевой электростимуляции получено существенное (в 4—6 раз) сокращение сроков лечения и более значительное улучшение качественных показателей по сравнению с использованием накожной стимуляции. Эффективность восстановительной терапии зависела от количества процедур, и полное восстановление функций поврежденных периферических нервов отмечалось после проведения трех курсов внутритканевой электростимуляции.

Заключение. Скорость и степень восстановления функций периферических нервов зависит от функциональной активности их центральных нейронов на уровне спинного мозга. Возбуждение этих нейронов низкочастотным электрическим током позволяет активизировать их трофическую функцию. При этом накожная электростимуляция не вызывает необходимого уровня раздражения нейронов вследствие того, что кожа является барьером для электрического тока и уменьшает силу его воздействия в 200—500 раз. Внутритканевая электростимуляция позволяет решить проблему за счет подведения иглы-электрода значительно ближе к «мишени» воздействия. Предлагаемый метод внутритканевой электростимуляции показал свое преимущество перед накожной электростимуляцией, в значительной степени сократив сроки восстановительного лечения и повысив его качественные показатели.

Ключевые слова: *периферические нервы, повреждение нервов, внутритканевая электростимуляция, позвоночник, восстановление функций.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Герасимов А.А. — https://orcid.org/0000-0002-3581-1917
Бурматов Н.А. — https://orcid.org/0000-0002-5362-148X
Копылов С.А. — https://orcid.org/0009-0001-7031-2646
Автор, ответственный за переписку: Бурматов Н.А. — e-mail: burmatov.n@yandex.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Герасимов А.А., Бурматов Н.А., Копылов С.А. Восстановление функции периферических нервов внутритканевой электростимуляцией. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2024;101(4):36–44.
https://doi.org/10.17116/kurort202410104136

Peripheral nerves' function recovery by intratissual electric stimulation

© A.A. GERASIMOV[1], N.A. BURMATOV[2], S.A. KOPYLOV[3]

[1]Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia;
[2]Tyumen State Medical University, Tyumen, Russia;
[3]Omsk State Medical University, Omsk, Russia

ABSTRACT
An intratissual electrical stimulation, accompanied by irritation of their central neurons, is used to recover the function of damaged peripheral nerves. Treatment results exceeded those with the use of cutaneous electrical stimulation, which is confirmed by comparative results of trial animal experiments. The time and quality of peripheral nerves' function recovery in comparison of intratissual and cutaneous electrical stimulation methods remain unknown.
Objective. To evaluate the time and quality of peripheral nerves' functions recovery after their suturing and conducting two different methods of electrical stimulation, namely intratissual and cutaneous, in projection of central neurons of damaged spinal nerves in the postoperative period.
Material and methods. The basic technical parameters of the method of peripheral nerves' functions recovery in the postoperative period were ptacticed. Postoperative rehabilitation treatment was performed in 77 patients with traumatic peripheral nerves' injuries at the level of the forearm: in 42 with intratissual electrical stimulation, in 35 — using cutaneous one with similar characteristics of electrical current and concomitant pharmacological therapy. The follow-up duration was 2 years.
Results. A significant (in 4—6 times) reduction in time of treatment and a greater improvement in qualitative indicators when using intratissual electrical stimulation compared to the use of cutaneous stimulation were obtained. The effectiveness of the restorative therapy was dependent on the number of procedures, and a complete recovery of the damaged peripheral nerves' functions was observed after three courses of intratissual electrical stimulation.
Conclusion. The time and degree of recovery of peripheral nerves' functions depends on the functional activity of their central neurons at the level of the spinal cord. The activation of these neurons by low-frequency electrical current allows to activate their trophic function. Thus, the cutaneous electrical stimulation does not cause the necessary level of irritation of the neurons due to the fact that the skin is a barrier to electrical current, which reduces its impact in 200—500 times. The intratissual electrical stimulation allows to solve the problem by supplying the needle-electrode much closer to the «target». The proposed method of intratissual electrical stimulation has shown its advantage over cutaneous electrical stimulation, significantly reducing the duration of the restorative treatment and increasing its qualitative indicators.

Keywords: *peripheral nerves, damages of nerves, intratissual electrical stimulation, spine, functions recovery.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Gerasimov A.A. — https://orcid.org/0000-0002-3581-1917
Burmatov N.A. — https://orcid.org/0000-0002-5362-148X
Kopylov S.A. — https://orcid.org/0009-0001-7031-2646
Corresponding author: Burmatov N.A. — e-mail: burmatov.n@yandex.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Gerasimov AA, Burmatov NA, Kopylov SA. Peripheral nerves' function recovery by intratissual electric stimulation. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy.* 2024;101(4):36–44. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/kurort202410104136

Введение

Эффективность восстановления функций поврежденных периферических нервов конечностей после хирургического восстановления их целостности зависит от сохранения анатомической непрерывности (качества хирургического шва) и от скорости дальнейшего прорастания нервных волокон в дистальном направлении. При этом сроки восстановления остаются длительными — от 1 до 10 лет, и полного восстановления функции поврежденных нервов практически не достигается, несмотря на проведение активной и длительной восстановительной терапии [1—4]. Даже при использовании микрохирургической и прецизионной техники шва нервов, обеспечивающих правильную ориентацию аксонов, не происходит значительного улучшения степени восстановления функциональной активности нервов [1, 5—7]. Такая ситуация заставила искать более эффективные пути увеличения скорости и качества реиннервации конечностей, разрабатывать новые методы реабилитации. Среди консервативных методов восстановительного лечения широкое распространение получила электростимуляция мышц и нервов. Однако классические методики электростимуляции имеют недостатки, и причина этого видится в том, что местом непосредственного воздействия электрического тока является ствол нерва, по существу, аксон центрального нейрона, расположенного в спинном мозге и контролирующего рост и функционирование аксонов. При этом существенного эффективного воздействия на нейрон не происходит. Непосредственно после повреждения и последующего хирургического восстановления анатомической целостности периферического нервного ствола центральный нейрон, конечно же, участвует в восстановительном процессе, обеспечивая трофические функции прорастания нервных волокон. Но в последующем нейрон, не получая должное раздражение с периферии, постепенно теряет свою активность, что приводит к заметному снижению клинических характеристик восстановительного процесса [8, 9]. Как показали исследования [1], указанное снижение восстановительной активности происходит в среднем спустя 3 мес после травмы и проведения хирургического восстановления анатомической целостности периферического нерва. В этот период не происходит какого-либо безвозвратного и полного угасания функциональной

активности нейронов, например, их некроза или же апоптоза. Нейроны живы, и достаточно их возбудить, в том числе с помощью электрического тока, чтобы вновь начался процесс регенерации поврежденных структур, в данном случае аксонов, дендритов, с продолжением в образования периферических нервов. Подведение электрического тока, точнее его проводников-электродов непосредственно к нейронам, требует хирургического вмешательства и небезопасно. Накожная электростимуляция в проекции соответствующих поврежденным периферическим нервам зон спинного мозга оказывается недостаточно эффективной вследствие значительного сопротивления прохождению электрического тока, оказываемому кожей и подлежащими тканями [10, 11]. Манипуляция осуществляется посредством металлической иглы-электрода, которую вводят в межостистую связку в области позвоночника на уровне расположения центральных образований — нервных клеток пораженного нерва. Метод внутритканевой электростимуляции (ВТЭС) разработан в Уральском государственном медицинском университете [12—14]. Для осуществления метода также разработан аппарат-генератор импульсного электротока «ЭСП-01» (РЗН 2013/1050, «Вектор-МС», Россия)[1]. Опытным путем установлены оптимальные параметры воздействия электрического тока. Они близки к естественным биотокам в периферических нервных образованиях, но превышают их по амплитуде. С другой стороны, оказалось, что эффективность разработанного метода ВТЭС прямо зависит от силы тока, воздействующего на организм. Активный электрод в виде иглы подводят к позвонкам на уровне расположения в спинном мозге центральных нейронов пораженного периферического нерва. Пассивный электрод укладывают накожно на конечности в проекции поврежденного нерва. Длительность процедуры составляет 40 мин. Курс лечения — 10—20 процедур. С целью изучения возможности ускорения восстановительных процессов в периферических нервах под действием электростимуляции спинного мозга были проведены экспериментальные исследования на собаках, у которых производили пересечение седалищного нерва [15, 16]. Исследования доказали, что ВТЭС в зоне спинного мозга, в которой располагаются центральные нейроны седалищного нерва, обладает стойким системообразующим влиянием на клеточные тела нейронов и моделирует их структурно-функциональную активность в процессе реиннервации. Электростимуляция в группе исследования в сравнении с контрольной группой ускорила восстановление функций нервов [15]. Эффективность восстановления оказалась существенно выше после двух курсов электростимуляции [15, 16]. Таким образом, позитивные результаты применения ВТЭС в эксперименте подтвердили возможность использования этого метода в клинической практике.

Цель исследования — оценить скорость и качество восстановления функций периферических нервов после их сшивания и проведения в послеоперационном периоде двух разных методов электростимуляции — внутритканевой и накожной в проекции центральных нейронов поврежденных нервов позвоночника.

Материал и методы

В городской клинической больнице №24 г. Екатеринбурга, в специализированном отделении хирургии кисти были обследованы и прооперированы 77 пациентов (50 мужчин, 27 женщин) в возрасте от 17 до 40 лет с травматическими изолированными повреждениями локтевого (24 случая) и срединного (53 случая) нервов в нижней трети предплечья. В период от 1 до 3 мес после операции эпиневрального сшивания нерва в процессе проведения курса восстановительной терапии пациентам была начата процедура электростимуляции в проекции центральных нейронов поврежденных, а затем восстановленных нервов. Все наблюдения были подразделены на 2 группы (основная группа и группа сравнения) в зависимости от методов проводимой послеоперационной восстановительной терапии. В основной группе (42 пациента) в качестве метода восстановительного лечения применяли только внутритканевую электростимуляцию на уровне шейного и верхне-грудного отделов позвоночника. В группе сравнения (35 пациентов) при восстановительном лечении использовали накожные методы электростимуляции этой же области, дополнительно назначали витамины группы В и прозерин — синтетический обратимый ингибитор холинэстеразы, способствующий усилению действия ацетилхолина на органы и ткани и восстановлению нервно-мышечной проводимости. Медикаменты в основной группе не применяли. Выбор варианта восстановительного лечения определяли слепым методом с применением конвертов.

У пациентов обеих групп для электростимуляции использовали одинаковые параметры электрического тока от аппарата «ЭСП-01» («Вектор-МС», Россия). Применяли следующие параметры тока: импульсы прямоугольной формы длительностью 0,5—1,5 мс; частота следования импульсов изменялась в течение 1 с от 20 до 70 Гц с периодической подачей «пачки» импульсов 2:2 с. Сила тока была в пределах комфортных ощущений, а именно 15—40 мА, при продолжительности процедуры 50—

[1] Аппарат ЭСП-01 – «Вектор-МС» (по А.А. Герасимову). Регистрационное удостоверение Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения №РЗН 2013/1050 от 14.08.2013 и Регистрационное удостоверение Министерства здравоохранения Республики Казахстан №РК-МТ-7 №012761 от 14.04.2014.

60 мин. Курс лечения составлял 20 процедур. В обеих группах каждая процедура восстановительного лечения проходила в 2 этапа. На 1-м этапе осуществляли электростимуляцию нервных клеток спинного мозга. Этот этап является главным и обязательным, длится 30 мин, и полученный результат зависит от амплитуды электрического тока: чем она выше, тем активней и быстрее происходит процесс восстановления. Методики проведения лечения в группах применяли разные. Так, чрескожная электростимуляция осуществляется накожными электродами, внутритканевая является инвазивным методом с подведением активного электрода к дужке позвонка. Сопротивление кожи и ряда других образований (связки, кости, твердая мозговая оболочка, спинномозговая жидкость), расположенных на пути проведения электрического импульса при чрескожной электростимуляции, уменьшает силу тока и иных его параметров в 200—500 раз [10, 11, 13]. Использование методики ВТЭС с подведением иглы-электрода непосредственно к структурам позвоночника и спинного мозга обеспечивает исключение сопротивления кожи и частично связочного аппарата прохождению электрического тока. Это, в свою очередь, увеличивает степень эффективности электрического раздражения элементов спинного мозга и тем самым активизации нейротрофической функции центральных нейронов. При использовании методики ВТЭС активный электрод катод (−) в виде стерильной иглы подводят непосредственно к остистому отростку или к дужке позвонка в проекции заинтересованных сегментов спинного мозга — С6, С7, Th1, содержащих центральные нейроны, от которых начинаются периферические образования поврежденных нервов.

В группе сравнения использовали накожное воздействие в проекцию тех же позвонков и сегментов спинного мозга пластинчатым электродом катодом (−) общей площадью 40 см^2. Вне зависимости от метода электростимуляции дистальный пластинчатый электрод анод (+) площадью 4 см^2 располагали в проекции срединного (в локтевой ямке) или локтевого (позади внутреннего надмыщелка плеча) нервов. Согласно концепции используемого метода электростимуляции [13], этот электрод создавал направления для роста осевого цилиндра в дистальном направлении и стимулировал иннервируемые нервами мышцы предплечья и кисти. Каждая процедура всегда состояла из 2 последовательных этапов. На 1-м первом этапе (30 мин) воздействие проводили на позвоночник и спинной мозг.

При 2-м этапе процедуры продолжительностью 20—30 мин применяли для возбуждения дистального нервного ствола, нервно-мышечной передачи, мышц и чувствительных рецепторов кожи. На этом этапе у пациентов групп использовали только накожные электроды и процедуры проводили одинаково. К электроду, расположенному в локтевой ямке, присоединяли катод (−), а анод (+) площадью 40 см^2 располагали ниже места повреждения нерва, обычно на кисти в зоне денервированных мышц или в автономной зоне иннервации кожи поврежденного нерва. Важным условием является правильное расположение полярности электродов: верхний, проксимально расположенный электрод, всегда является катодом (−), дистальный — анодом (+). Каждый курс лечения состоял из 20 процедур, которые проводились через день. Повторные курсы проводились через 2—3 мес. В итоге все пациенты получили 2—3 курса восстановительного лечения.

Результаты лечения оценивались трижды: через 6 мес после проведенной операции хирургического шва поврежденного нерва, через 1 год, через 2 года. Через 6 мес были обследованы все 77 (100%) пациентов, через 1 и через 2 года — 49 (63,6%) пациентов, которые получили 2 курса восстановительного лечения (28 пациентов из основной группы, 21 пациент из группы сравнения), и 21 (27,3%) пациент, получивший 3 курса терапии (10 из основной группы, 11 из группы сравнения). Паицентов обследовали перед вторым курсом электростимуляции. Как правило, других методов лечения они не получали. Остальные 7 (9,1%) пациентов по разным причинам не прошли катамнестические этапы исследований и были исключены из дальнейших наблюдений.

При определении степени результативности проведенного восстановительного лечения использовали 4 следующих критерия динамики: 1) двигательной функции; 2) чувствительной функции; 3) параметров стимуляционной электромиографии (ЭМГ); 4) трофической функции. Применяли известные и разработанные авторские шкалы [14, 17].

Динамика двигательной функции мышц кисти, иннервируемых поврежденным нервом, оценивали в баллах: отсутствие двигательной реакции — 0 баллов; слабые двигательные реакции — 1 балл; движение есть, но мышечная сила ослаблена — 2 балла; восстановление движения — 3 балла.

Динамику чувствительной функции в зоне автономной иннервации на коже также оценивали в баллах: отсутствие чувствительности — 0 баллов; наличие тактильной и болевой чувствительности — 1 балл; наличие температурной чувствительности и дискриминации двух точек, расположенных на расстоянии более 20 мм (при норме 3 мм) — 2 балла; присутствие дискриминационной чувствительности двух точек, расположенных на расстоянии от 3 до 20 мм друг от друга — 3 балла.

Динамику результатов стимуляционной электронейромиографии (ЭНМГ) определяли в виде изменений амплитуды М-ответа, скорости распространения возбуждения (СРВ), резидуальной латентности. Наиболее показательной являлась амплитуда

М-ответа. Отсутствие М-ответа оценивали в 0 баллов; 5—10% от нормальной амплитуды — 1 балл; 11—60% — 2 балла; свыше 60% — 3 балла.

Динамику трофической функции кожи, связанную с изменением ее гидрофильности, определяли прибором с измерением электрического потенциала кожи на концевой фаланге пальца в автономной зоне иннервации пораженного нерва и на симметричном участке контралатеральной кисти. Соотношение этих параметров в виде коэффициента асимметрии (КА) являлась стабильной величиной (в норме КА=1—1,5). При отсутствии трофики — ангидрозе кожи пальца — КА составлял 200 и более (0 баллов);. при КА более 60 трофическую функцию оценивали в 1 балл, при КА от 10 до 60 — в 2 балла; при КА менее 10 — в 3 балла. Тест достаточно чувствительный, подтверждает динамику даже небольших регенераторных изменений [17].

Суммарную результативность лечения оценивали следующим образом. За хороший результат принимали восстановление всех видов чувствительности, в том числе дискриминантной, до 3 баллов, восстановление функции мышц, основных видов захвата кисти и данных ЭНМГ до 3 баллов, КА кожного электрического потенциала — менее 10. Удовлетворительным результатом признавали восстановление основных функций нерва до 2 баллов. Отдельно был выделен критерий «малополезных» позитивных изменений функциональной способности кисти, недостаточных для оценки даже в качестве удовлетворительного результата лечения. При этом суммарные позитивные изменения не превышали 1 балл. Неудовлетворительный результат соответствовал 0 баллам.

Результаты, связанные с возникновением внутристволовых невром, ошибками в технике операций, не принимали во внимание, и такие пациенты были исключены из исследования (7 человек).

Локальным этическим комитет ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол №3 от 16.03.2018) было указано, что метод ВТЭС внедрен в рутинную клиническую практику, имеет 15-летний период применения, не требует одобрения локальным этическим комитетом на использование. Разрешение на применение медицинской технологии «Лечение болевых синдромов позвоночника и суставов внутритканевой электростимуляцией» было выдано Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения и социального развития (ФС 210/379 от 26.10.2010). Используемый аппарат Вектор-МС находится в серийном выпуске с 2003 г. (регистрационное удостоверение №РЗН 2013/1050 от 14.08.2013).

Статистическую обработку результатов исследования производили с применением программы Microsoft Office Excel, 2016. Материалы исследования проверили на нормальность распределения с использованием теста Шапиро—Уилка, полученные результаты свидетельствовали о соответствии исследуемых выборок нормальному распределению. Для статистического анализа применяли параметрический *t*-критерий Стьюдента и коэффициент корреляции Пирсона, а также критерий Манна—Уитни для малых выборок; различия считали достоверными при $p<0,05$.

Результаты

Обследование после операции перед началом электростимуляции показало отсутствие двигательных функций, какой-либо чувствительности в автономной зоне иннервации кожи, отсутствие М-ответа при ЭНМГ. Наблюдалось появление незначительных восстановительных явлений трофики, КА электропотенциала колебался от 120 до 170. Симпатическая иннервация начинала восстанавливаться первой. При наличии невромы или неудачном шве нерва КА был всегда больше 200, динамики восстановления не было.

В течение первых 6 мес после проведенного хирургического шва поврежденных нервов у всех 77 (100%) наблюдаемых пациентов, вне зависимости от числа курсов проведенного восстановительного лечения, появились первые начальные, минимальные клинические признаки реиннервации поврежденных нервов. Восстановление происходило в определенной последовательности. Вначале динамично восстанавливалась трофическая функция, затем болевая и тактильная чувствительность, позже температурная чувствительность. Двигательные функции восстанавливались в разные сроки, но поздней, чем чувствительные. Дискриминационная, особенно стереогностическая, чувствительность восстанавливалась еще позднее и только после 2—3 курсов ВТЭС. После проведения курсов чрескожной электростимуляции эти виды тонкой чувствительности не восстанавливались. Отчетливая динамика показателей стимуляционной ЭМГ несколько отставала от динамики клинической симптоматики **(табл. 1)**. После проведения 2 курсов ВТЭС, через 2 года наблюдений, хорошие результаты восстановительного лечения были зарегистрированы у 22 (78,6%) пациентов, после проведении чрескожной электростимуляции — у 5 (23,8%) ($p<0,05$). Отмечалось восстановление всех видов чувствительности, восстановление функции мышц и улучшение результатов ЭНМГ. При этом удовлетворительные результаты отчетливо преобладали среди пациентов, которым проводили курсы чрескожной электростимуляции (11 пациентов; 52,4%) по сравнению с лицами, которым применяли ВТЭС (6 пациентов; 28,6%). При этом у 5 (45,5%) из 11 пациентов с удовлетворительными результатами использования чрескожной электростимуляции эффективность лечения оказалась

Таблица 1. **Динамика параметров стимуляционной ЭМГ после проведения 2 курсов лечения**
Table 1. **Dynamics of stimulation EMG parameters after 2 courses of treatment**

Метод электростимуляции	Через 1 год		Через 2 года	
	СРВ, м/с	М-ответ, мВ	СРВ, м/с	М-ответ, мВ
Внутритканевая, *n*=28	35,3±4,4	2,8±0,6	55,1±2,9	4,9±0,2
Чрескожная, *n*=21	18,4±2,4	1,5±0,4	22,6±3,4	3,0±0,6
p	0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Таблица 2. **Динамика восстановления трофических функций на основе коэффициента асимметрии после проведения курсов электростимуляции**
Table 2. **Dynamics of the trophic functions recovery based on the asymmetry coefficient after electrical stimulation courses**

Метод электростимуляции	Непосредственно после операции	Через 1 год	Через 2 года
Внутритканевая, *n*=28	90,0±12,3	8,8±1,8	2,4±0,9
Чрескожная, *n*=21	87±11,7	32,6±7,6	18,4±3,4
p	0,05	0,05	0,05

незначительной. Среди пациентов, которым применяли ВТЭС, такого низкого показателя качества проведенного лечения не отмечено. Кроме того, у пациентов основной группы, получавших ВТЭС, степень восстановления чувствительных функций оказалась высокой — вплоть до восстановления дискриминационной чувствительности, в группе сравнения таких случаев не было. У подавляющего большинства пациентов после ВТЭС (22 случая; 78,6%) в значительной степени восстановились двигательная и трофическая функции кисти, что было подтверждено при инструментальных исследованиях, в том числе динамикой показателей стимуляционной ЭМГ **(см. табл. 1)**.

Из приведенных в **табл. 1** данных следует, что восстановление двигательной функции нервов достоверно быстрее происходит при лечении с применением ВТЭС. При лечении с использованием традиционной чрескожной электростимуляции позитивная динамика СРВ и М-ответа отставала почти на 1 год.

Результаты повторных обследований с помощью стимуляционной ЭМГ отчетливо и достоверно коррелировали с позитивной динамикой силы мышц кисти. У всех (28 случаев; 100%) пациентов основной группы через 1 год после операции шва срединного нерва в той или иной степени восстанавливалась оппозиция I пальца, после шва локтевого нерва появилась двигательная активность червеобразных, межкостных мышц, наметилась функция приведения V пальца кисти, уменьшилась степень атрофии. У пациентов группы сравнения после чрескожной стимуляции через 1 год после шва срединного нерва только в 1/2 случаев (11 пациентов; 52,4%) восстановилась оппозиция I пальца, при повреждении локтевого нерва признаки приведения V пальца определялись только у 4 (19,0%) пациентов. Через 2 года после проведения курсов ВТЭС двигательная функция кисти в полной степени восстановилась у всех пациентов. В группе сравнения отчетливое восстановление двигательных функций кисти и восстановление движений кисти было отмечено лишь в 10 (47,6%) наблюдениях. Таким образом, метод ВТЭС оказался достоверно (p<0,05) более результативным в плане восстановления двигательных функций кисти, чем метод чрескожной электростимуляции.

В **табл. 2** приведены результаты сравнительного анализа показателей КА, используемого для оценки состояния электрического потенциала кожи (норма 1,0—1,5) в зоне автономной иннервации, что свидетельствует о состоянии трофических функций.

Из результатов, представленных в **табл. 2**, очевидно, что трофическая функция поврежденных нервов восстанавливается значительно быстрее и полнее в процессе проведения ВТЭС, чем чрескожной электростимуляции (p<0,05). Среди пациентов основной группы через 2 года после операции шва нерва трофические функции восстановились в той или иной степени во всех случаях, у 8 (28,6%) пациентов произошло полное восстановление трофических функций кисти уже через 10—12 мес после операции при прочих благоприятных условиях. При традиционном комплексе таких случаев не было. Таким образом, применение ВТЭС в послеоперационной восстановительной терапии способствует ускорению восстановления трофической функции поврежденных нервов, и этот процесс положительно коррелирует с восстановлением чувствительности.

После проведения 3 курсов электростимуляции 10 пациентам основной группы и 11 пациентам группы сравнения положительный эффект наблюдался в основной группе уже в течение первого года с полным восстановлением функции нерва у 8 (80%) больных, т.е. у большинства. Второй и третий курсы лечения проводили в течение первого года. Через 2 года полное восстановление функций было зарегистрировано у всех 10 пациентов основной группы.

Среди пациентов группы сравнения чрез 1 год наблюдения произошло частичное восстановление основных функций кисти у 3 (27,3%) из 11 пациентов, через 2 года у 3 (27,3%) этих же пациентов продолжалась незначительная динамика восстановления, но уже в более медленном темпе. При этом отчетливые удовлетворительные результаты восстановительного лечения через 1—2 года были достигнуты у 6 (54,5%) пациентов, а в 2 (18,2%) наблюдениях эти удовлетворительные результаты оказались крайне незначительными, «малополезными» для функционирования.

При сравнении показателей результативности по отношению к числу проведенных курсов электростимуляции — 2 или 3 курса — определилось некоторое преимущество при большем количестве проведенных курсов лечения. Однако в плане доли пациентов с хорошими или удовлетворительными результатами лечения ни в одной из сравниваемых групп эти различия не достигали степени статистической достоверности (p>0,05). Для окончательного решения вопроса требуется, вероятно, значительно большее число наблюдений.

Следовательно, применение ВТЭС при повреждении периферических нервов существенно сокращает сроки лечения и наиболее полно восстанавливает качество функционирования конечности. Применение 2—3 курсов ВТЭС повышает возможности полного восстановления функций нервов. Указанное восстановление при использовании ВТЭС происходит динамично и постоянно. Общий процесс восстановления у пациентов основной группы наблюдений динамично продолжался по прошествии 1 года, а к 2 годам у большинства пациентов качественные показатели функционирования кисти приближались к нормальным значениям. Стереогностическая чувствительность восстановилась в 27% наблюдений, хотя известно, что при использовании иных методов восстановительного лечения данный вариант чувствительности не восстанавливается [18]. Чрескожная электростимуляция активизирует восстановление функций поврежденных нервов преимущественно в течение первого года, а затем наступает определенного рода статический период, в котором заметной динамики не происходит. Кроме того, у пациентов группы сравнения динамика всех функциональных показателей существенно отставала от таковой при использовании ВТЭС, и данные показатели достигали в основном уровня удовлетворительной результативности.

Обсуждение

Послеоперационное восстановление функций поврежденных нервов является важнейшим этапом лечения, и его исход зависит от качества и скорости процесса реиннервации [19]. Считается, что после хирургического сшивания нерв прорастает на периферию из центрального конца со скоростью 1,0—1,5 мм в сутки. В ходе эксперимента и на клиническом материале это было подтверждено [20]. Но по прошествии 3 мес прорастание нерва останавливается, т.к. функции нейрона после травмы и последующего хирургического вмешательства угнетены. Происходит исчезновение тигроидного вещества Ниссля, прекращается синтез белка, замедляется аксональный транспорт [21]. Известная валлеровская дегенерация — процесс разрушения участка аксона, отделенного от основной части нейрона при разрыве [22], проявляется распадом осевых цилиндров и миелина. Такой распад обусловлен отсутствием естественных биологических электрических импульсов, генерируемых нервной клеткой, распространяющихся по нервному волокну и поддерживающих обмен веществ и функционирование аксона.

Возникает ситуация, когда нервная клетка, т.е. перикарион, представляющий собой тело нейрона и отходящие от него отростки — аксон и дендриты, жива, но функция ее резко заторможена. Активность нервных клеток поддерживается раздражением, приходящим по чувствительным волокнам от рецепторов кисти. При травме нерва данные чувствительные волокна повреждены, поэтому для активизации функции аксона необходим другой источник раздражения. Существующие медикаменты практически не активизируют нервную клетку и аксон, поэтому наиболее физиологичным является раздражение электрическими импульсами.

При традиционной чрескожной электростимуляции воздействие электрического тока бывает значительно ослабленным многочисленными анатомическими барьерами, имеющими большое электрическое сопротивление. Прохождение этих барьеров может вызвать необходимое и достаточно мощное раздражение нейронов с целью дальнейшей активизации поврежденных, а затем хирургически восстановленных нервов. При этом желательно, чтобы параметры раздражающего электрического тока были близки по своим характеристикам биологическим токам в нервных образованиях.

После применения хирургического шва нерва сохраняется цепочка шванновских клеток (леммоцитов) — вспомогательных клеток нервной ткани,

которые формируются вдоль аксонов периферических нервных волокон. Эта цепочка, по существу, и служит направляющим путем для регенерации аксонов из центрального отрезка нерва. Вероятно, высокая эффективность метода ВТЭС объясняется тем, что раздражение нервных клеток низкочастотными импульсами электрического тока, минуя анатомические барьеры, приводит к активизации нейротрофических функций нейронов, ускорению аксонального транспорта и способствует направленному росту аксонов. При этом в начале процесса реиннервации передача возбуждения происходит за счет аксоплазмы, а затем на основе возбуждения аксоплазмы происходит прорастание нейрофибрилл, что ещё больше улучшает качество восстановления нерва. Раздражение нейронов в спинном мозге приводит к восстановлению их функции, по нашим данным [14], уже после 5 процедур ВТЭС, т.к. самые первые признаки положительной динамики клинической симптоматики периферического нервного расстройства начинают появляться именно в этот период. При накожных процедурах существенной динамики восстановления нервов при аналогичных условиях не выявлено, что свидетельствует о недостаточном раздражающем эффекте импульсов в процессе использования традиционной методики электростимуляции. При сравнении результатов скорости реиннервации выявлено, что метод ВТЭС ускоряет восстановление нерва в 4—6 раз по сравнению с методом чрескожной электростимуляции.

Заключение

Клиническими исследованиями показано отчетливое преимущество ВТЭС соответствующих сегментов спинного мозга для активизации процессов восстановления функциональной активности срединного и локтевого нервов после их травматического повреждения по сравнению с традиционным методом чрескожной электростимуляции. Использование ВТЭС существенно ускоряет сроки восстановления всех функций поврежденных нервов: двигательной, чувствительной, трофической, повышая качественные показатели восстановления в сравнении с чрескожной электростимуляцией. Качество и скорость восстановления функций нервов имеют определенную зависимость от количества процедур и курсов восстановительной терапии при неуклонном нарастании восстановительного эффекта после каждого курса ВТЭС.

Участие авторов: концепция и дизайн исследования — Н.А. Бурматов, А.А. Герасимов; сбор и обработка материала, статистическая обработка данных — С.А. Копылов; написание текста — Н.А. Бурматов; редактирование — Н.А. Бурматов, А.А. Герасимов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Говенько Ф.С., Кокин Г.С. Диспансеризация больных после шва срединного и локтевого нервов. Методические рекомендации. Ленинград; 1984.
Govenko FS, Kokin GS Dispenserisation of patients after suture of the median and ulnar nerves: Methodical recommendations. Leningrad; 1984. (In Russ.).
2. Цимбалюк В.И., Третьяк И.Б., Каддум Г.М. Особенности хирургического лечения травматического повреждения периферических нервов. *Вестник научных исследований*. 1997;8(4-5):49-51.
Tsimbalyuk VI, Tretiak IB, Kaddum GM Features of surgical treatment of traumatic peripheral nerve injury. *Bulletin of Scientific Research*. 1997;8(4-5):49-51. (In Russ.).
3. Damercheli S, Buist M, Ortiz-Catalan M. Mindful SensoriMotor Therapy combined with brain modulation for the treatment of pain in individuals with disarticulation or nerve injuries: a single-arm clinical trial. *BMJ Open*. 2023;13(1):e059348.
https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-059348
4. Cheng H, Huang Y, Yue H, Fan Y. Electrical Stimulation Promotes Stem Cell Neural Differentiation in Tissue Engineering. *Stem Cells Int*. 2021;2021:6697574.
https://doi.org/10.1155/2021/6697574
5. Герасимов А.А., Дубовик Е.А. Эффективность восстановления нервов после разных видов хирургического шва. *Фундаментальные и прикладные науки сегодня*. 2015;2:23-26.
Gerasimov AA, Dubovik EA. Efficiency of nerve restoration after different types of surgical sutures. *Fundamental and applied sciences today*. 2015;2:23-26. (In Russ.).
6. Шевелев И.Н., Решетин Б.Н. О значении внутриствольной идентификации для восстановления повреждений нервов верхних конечностей. *Периферическая нервная система*. 1984;4:35-39.
Shevelev IN, Reshetin BN On the importance of intra-sternal identification for repairing nerve injuries of the upper limbs. *Peripheral nervous system*. 1984;4:35-39. (In Russ.).
7. Ni L, Yao Z, Zhao Y, et al. Electrical stimulation therapy for peripheral nerve injury. *Front Neurol*. 2023;14:1081458.
https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1081458
8. Chu XL, Song XZ, Li Q, et al. Basic mechanisms of peripheral nerve injury and treatment via electrical stimulation. *Neural Regen Res*. 2022;17(10):2185-2193.
https://doi.org/10.4103/1673-5374.335823
9. O. Brown WF. Functional compensation of human motor units in health and disease. *J Neurol Sci*. 1973;20(2):199-209.
10. Джонсон К.К., Гай А.В. Воздействие неионизирующего излучения на биологические среды и системы. *ТИИЭР*. 1972;6:49-81.
Johnson KK, Guy AV Effects of non-ionising radiation on biological media and systems. *TIIER*. 1972;6:49-81. (In Russ.).
11. Пресман С. Электромагнитные поля и живая природа. М.: Наука; 1968.
Presman S. Electromagnetic Fields and Living Nature. Moscow: Science; 1968. (In Russ.).
12. Герасимов А.А. *Восстановительное лечение при повреждениях периферических нервов*. Актуальные вопросы современной патологии (Сборник научных работ). Екатеринбург; 1995.
Gerasimov AA. *Restorative treatment in peripheral nerve injuries*. Actual questions of modern pathology (Collection of scientific works). Ekaterinburg; 1995. (In Russ.).
13. Герасимов А.А., Мещанинов В.Н., Щербаков Д.Л. Механизмы патогенетической терапии болевого синдрома позвоночника внутритканевой электростимуляцией. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2019;96(4):12-18.
Gerasimov AA, Meshchaninov VN, Shcherbakov DL Mechanisms of pathogenetic therapy of spinal pain syndrome by intrathecal electrical stimu-

lation. Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy. 2019;96(4):12-18. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/kurort20199604112

14. Герасимов А.А. Способ лечения заболеваний позвоночника. Патент СССР на изобретение №1103855/11.04.84. Бюлл. №27.
Gerasimov AA. Method of treatment of spine diseases. The USSR patent for invention №1103855/11.04.84. Bulletin No. 27. (In Russ.).

15. Герасимов А.А. Способ объективной диагностики болевых синдромов. *Российский журнал боли*. 2013;1(36):76-77.
Gerasimov AA. Method of objective diagnostics of pain syndromes. *Russian journal of pain*. 2013;1(36):76-77. (In Russ.).

16. Шудло Н.А., Филимонова Г.Н., Меньшикова И.А., Голобкова И.А. Влияние электростимуляции на морфометрические характеристики реиннервируемой мышцы. *Гений ортопедии*. 2008;3:40-43.
Shudlo NA, Filimonova GN, Menshikova IA, Golobkova IA Effect of electrostimulation on morphometric characteristics of reinnervated muscle. *Genius of Orthopaedics*. 2008;3:40-43. (In Russ.).

17. Герасимова Е.А., Герасимов А.А., Меньшикова И.А. *Экспериментальное обоснование применения внутритканевой электростимуляции позвоночника для восстановления функции периферических нервов*. Актуальные вопросы современной диагностики и лечения. Екатеринбург; 2006.
Gerasimova EA, Gerasimov AA, Menshikova IA. *Experimental substantiation of the use of intrathecal electrical stimulation of the spine to restore the function of peripheral nerves*. Actual questions of modern diagnostics and treatment. Ekaterinburg; 2006. (In Russ.).

18. Карчикян С.И. *Травматические поражения периферических нервов*. Л.: Медгиз; 1962.
Karchikyan SI. Traumatic lesions of peripheral nerves. Leningrad: Medgiz; 1962. (In Russ.).

19. Costello MC, Errante EL, Smartz T, et al. Clinical applications of electrical stimulation for peripheral nerve injury: a systematic review. *Front Neurosci*. 2023;17:1162851.
https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1162851

20. Buchtal F, Kuchl V. Nerve conduction, tactile sensibility and the electromyogram after suture or compression of peripheral nerve: a longitudinal study in man. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 1979;42:436-451.

21. *Гистология*. Под ред. Э.Г. Улумбекова, Ю.А. Челышева. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2002.
Histology. Edited by Ulumbekov EG, Chelyshev YA. Moscow: GEOTAR-Media; 2002. (In Russ.).

22. Waller A. Experiments on the Section of the Glossopharyngeal and Hypoglossal Nerves of the Frog, and Observations of the Alterations Produced Thereby in the Structure of Their Primitive Fibres. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1850;140:423-429.

Получена 09.10.2023
Received 09.10.2023
Принята в печать 18.04.2024
Accepted 18.04.2024