

УДК 616-089.844

DOI: <https://doi.org/10.17816/brmma.61378>

ИНТРАОПЕРАЦИОННАЯ ИНФРАКРАСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ АНГИОГРАФИЯ В ХИРУРГИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ НЕРВОВ

© Д.В. Свистов¹, Д.М. Исаев¹, А.И. Гайворонский^{1,2}, Л.И. Чуриков¹, К.В. Беляков¹¹ Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Резюме. Зачастую при выполнении реконструкции нервных стволов между концами поврежденного нерва отмечается наличие диастаза, требующего значительного натяжения нерва с целью его преодоления. Это, в свою очередь, может приводить к нарушению кровоснабжения нерва и повреждению его ультраструктур, что влечет за собой неудовлетворительные результаты лечения. Рассмотрена возможность применения интраоперационной инфракрасной флуоресцентной ангиографии при реконструктивных оперативных вмешательствах по поводу повреждения периферических нервов с целью оценки степени нарушения кровотока в нервном стволе. У пациентов с полным анатомическим перерывом во время операции осуществляли попытку преодоления диастаза с измерением силы натяжения (до 3 Н), с которой воздействовали на нерв. Одновременно выполняли инфракрасную флуоресцентную ангиографию с индоцианином зеленым. Полученные ангиограммы подвергались анализу, определялось влияние силы натяжения на изменение кровотока в нервном стволе. Установлено, что при воздействии с силой до 2 Н существенного изменения интраневрального кровотока не происходит. При этом воздействие силы в 3 Н проявляется на ангиограммах существенным снижением объема кровотока, что обусловлено, как правило, констрикцией сосудов вследствие их растяжения. После реконструкции (микрохирургического эпиневрального шва) проводили повторную ангиографию с целью оценки сохранности и адекватности кровоснабжения нерва. Выявлено, что применение интраоперационной ангиографии с индоцианином зеленым является доступной и легко выполнимой методикой, позволяющей определить сохранность и, что не менее важно, адекватность и эффективность кровотока в нервном стволе. Указанная методика позволяет проводить контроль сохранности кровотока в нервном стволе, изучить механизмы компенсации кровоснабжения нерва после микрохирургического эпиневрального шва, оценить качество сопоставления культей нерва по оси, исключая вероятность их «перекрута».

Ключевые слова: повреждения периферических нервов; эпиневральный шов; кровоснабжение нерва; интраоперационная ангиография; натяжение нерва; невральные сосуды; микроциркуляторное русло; реактивность кровеносных сосудов.

Как цитировать:

Свистов Д.В., Исаев Д.М., Гайворонский А.И., Чуриков Л.И., Беляков К.В. Интраоперационная инфракрасная флуоресцентная ангиография в хирургии повреждений периферических нервов // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2021. Т. 23, № 1. С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.17816/brmma.61378>

DOI: <https://doi.org/10.17816/brmma.61378>

INTRAOPERATIVE INFRARED FLUORESCENCE ANGIOGRAPHY IN SURGERY OF PERIPHERAL NERVE INJURIES

© D.V. Svistov¹, D.M. Isaev¹, A.I. Gaivoronsky^{1,2}, L.I. Churikov¹, K.V. Belyakov¹

¹ Military Medical Academy named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT: Often, when performing reconstruction of nerve trunks, between the ends of the damaged nerve, the presence of diastasis is noted, which requires significant nerve tension in order to overcome it. This, in turn, can lead to a violation of the blood supply to the nerve and damage to its ultrastructures, which leads to unsatisfactory treatment results. The possibility of using intraoperative infrared fluorescence angiography in reconstructive surgical interventions for peripheral nerve damage, in order to assess the degree of blood flow disturbance in the nerve trunk, is considered. In patients with a complete anatomical break during the operation, an attempt was made to overcome diastasis by measuring the tension force (up to 3 N) with which the nerve was affected. Infrared fluorescence angiography with indocyanine green was performed simultaneously. The obtained angiograms were analyzed, and the effect of the tension force on the change in blood flow in the nerve trunk was determined. It was found that when exposed to a force of up to 2 N, there is no significant change in the intraneural blood flow. At the same time, the effect of a force of 3 N is manifested on angiograms by a significant decrease in the volume of blood flow, which is usually due to constriction of the vessels due to their stretching. After reconstruction (microsurgical epineural suture), repeated angiography was performed to assess the safety and adequacy of blood supply to the nerve. It was revealed that the use of intraoperative angiography with indocyanine green is an affordable and easily feasible technique that allows to determine the safety and, equally important, the adequacy and efficiency of blood flow in the nerve trunk. This technique makes it possible to monitor the safety of blood flow in the nerve trunk, to study the mechanisms of compensation of blood supply to the nerve after microsurgical epineural suture, to assess the quality of comparison of nerve stumps along the axis, excluding the possibility of their "twist".

Keywords: peripheral nerve damage; epineural suture; nerve blood supply; intraoperative angiography; nerve tension; neural vessel; microcirculatory roll; blood vessel reactivity.

To cite this article:

Svistov DV, Isaev DM, Gaivoronsky AI, Churikov LI, Belyakov KV. Intraoperative infrared fluorescence angiography in surgery of peripheral nerve injuries. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2021;23(1):59–66. DOI: <https://doi.org/10.17816/brmma.61378>

Received: 14.01.2021

Accepted: 15.02.2021

Published: 28.03.2021

ВВЕДЕНИЕ

Повреждения периферических нервов в мирное время составляют от 1,5 до 10% от всех травм и наиболее часто возникают вследствие бытовых травм, дорожно-транспортных происшествий, ятрогенных воздействий. При невротизме абсолютно показано выполнение оперативных вмешательств, направленных на реконструкцию нервного ствола. Несмотря на активное внедрение микрохирургической техники, отсроченные результаты восстановления функции нерва в 10–40% случаев, в зависимости от поврежденного нервного ствола, остаются неудовлетворительными [1].

Анатомо-топографические особенности некоторых нервов, например общего малоберцового, зачастую не позволяют произвести адекватную мобилизацию его культей, что, в свою очередь, не позволяет преодолевать интраоперационный диастаз без значимого натяжения. С целью уменьшения натяжения на линии шва применяют методы укорочения с приданием конечности вынужденного положения, различные варианты транспозиции нерва. Однако, несмотря на это, преодоление диастаза даже менее 5 см зачастую сопровождается значительным натяжением отрезков нерва. Избыточное натяжение, в свою очередь, приводит к повреждению ультраструктур нерва, нарушению его трофики, что может препятствовать росту нервных волокон в дистальном направлении и негативно отражаться на исходах. При значительном диастазе показано выполнение более трудоемкого, чем эпинеуральный шов, оперативного вмешательства — межпучковой аутопластики [2].

Изучение особенностей кровоснабжения нервов встречается уже с середины XVIII в., когда Isenflamm и Doerfflen в 1768 г. опубликовали свою работу по изучению *vasa nervorum*, используя перфузионный метод. С тех пор многие ученые продолжали исследование кровоснабжения нервных стволов, используя эту методику [3]. Представленные в отечественной и зарубежной литературе данные о кровоснабжении нервов, как правило, разрозненны и противоречивы, что является следствием выраженной индивидуальной анатомической изменчивости строения периферической нервной системы. Современные представления о кровоснабжении нервного ствола подразумевают наличие двух уровней [4]. Экстраневральный уровень представлен перифасциальной сосудистой сетью, анастомозирующей с внешними сосудами. Второй уровень — интраневральная сосудистая система, которая является внутрифасциальной и состоит из артериол, венул и капилляров. Сосудистый компонент и нервная ткань разделены барьером, в формировании которого участвуют периневрий и эндоневрий [5].

Ю.И. Борода [2] при выборе тактики оперативного лечения пациентов с травматическими повреждениями нервов отмечал, что важным моментом является сохранение кровотока при воздействии силы натяжения. Однако

в его исследованиях не проводилось интраоперационное изучение кровотока в реконструируемом нервном стволе. Экспериментально доказано, что влияние силы натяжения в 4 Н и более приводит к повреждению до 80% нервных волокон [6].

Впервые в нейрохирургической практике технология интраоперационного контрастирования сосудов (мозговых) с помощью флуоресцирующего контраста, внешней камеры и светофильтров была продемонстрирована W. Feindel et al. в 1967 г. [7]. В 1994 г. С. Wrobel et al. [8] описали первый опыт применения видеоангиографии с индоцианином в хирургии аневризм. В последующем методика интраоперационной флуоресцентной ангиографии с использованием индоцианина зеленого в инфракрасном излучении с длиной волны 800 нм активно использовалась как отечественными, так и зарубежными нейрохирургами для оценки радикальности клипирования аневризм головного мозга, радикальности удаления артериовенозных мальформаций, оценки функционирования анастомоза при реваскуляризирующих операциях, оценки сохранения кровотока в перфорантных артериях при иных оперативных вмешательствах по поводу сосудистой патологии головного мозга [9, 10]. С 2014 г. интраоперационная флуоресцентная ангиография с индоцианином зеленым достаточно востребована и в пластической хирургии для оценки кровоснабжения перемещенного лоскута, в хирургической онкоколопроктологии с целью объективизации перфузии анастомозов [10, 11].

Применяемый в качестве контрастного вещества индоцианин зеленый представляет собой йодсодержащий краситель, флуоресцирующий в инфракрасном свете с длиной волны в диапазоне 750–950 нм с пиком 800 нм, который можно вводить внутривенно.

Цель исследования — изучить возможность применения интраоперационной флуоресцентной ангиографии с индоцианином зеленым при выполнении реконструкции поврежденных нервных стволов для оценки особенностей кровоснабжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на базе кафедры и клиники нейрохирургии Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова. Исследуемая группа представлена 12 пациентами с полным травматическим анатомическим перерывом одного из нервов верхней или нижней конечности. Половозрастная характеристика исследуемой группы: 10 мужчин и 2 женщины в возрасте от 22 до 56 лет. В 8 (66,7 %) исследуемых случаях встречалось повреждение общего малоберцового нерва, у 2 (16,7%) пациентов отмечено одномоментное повреждение срединного и локтевого нервов. В одном (8,3 %) случае выявлена мононевропатия лучевого нерва, еще в одном — изолированное повреждение срединного нерва.

Как правило, на верхних конечностях отмечено повреждение нервных стволов в сочетании с повреждением костей, сосудов, мышц и сухожилий, в то время как повреждение малоберцового нерва в основном носило изолированный характер, в том числе и ятрогенный.

Всем пациентам перед оперативным вмешательством выполнялись электронейромиография (ЭНМГ) и ультразвуковое исследование (УЗИ) нерва. Критериями выбора служили: наличие у пациентов травмы крупного нервного ствола с полным анатомическим перерывом, подтвержденным по данным УЗИ, с клинической картиной полного нарушения функции нерва, подтвержденной данными нейрофизиологических методов обследования (ЭНМГ), отсутствие в анамнезе аллергических реакций на йодсодержащие лекарственные препараты, добровольное согласие пациента на проведение оперативного вмешательства с интраоперационной ангиографией. Диаметр поврежденного нервного ствола должен был превышать 3 мм.

В 10 (83%) случаях травма была открытой. Данным пациентам в течение первых суток была выполнена первичная хирургическая обработка раны без какого-либо вмешательства на нервном стволе. По обстоятельствам получения травмы преобладал бытовой травматизм (41,7%), в трех (25%) случаях встречалась ятрогенная травма, еще в трех (25%) случаях — криминальная травма (в том числе дважды — ножовое резаное ранение конечности), в одном (8,3%) случае травма была получена вследствие дорожно-транспортного происшествия. Всем пациентам оперативное вмешательство по поводу выявленной невропатии выполнено в срок от 1 до 6 мес. с момента получения травмы.

Перед началом операции выполнялась предоперационная УЗ-разметка. Оперативные вмешательства сопровождалась интраоперационной УЗ-ассистенцией. Стандартно осуществляли проекционный доступ к поврежденному нервному стволу. Например, при доступе

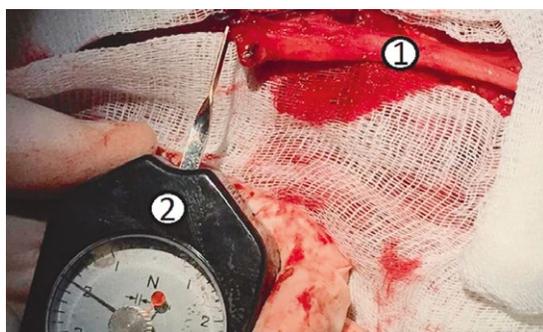


Рис. 1. Воздействие силой натяжения на проксимальный отрезок нерва: 1 — проксимальный отрезок общего малоберцового нерва; 2 — устройство для изучения биомеханических свойств нерва в глубине операционной раны

Fig. 1. The effect of tension on the proximal segment of the nerve: 1 — the proximal segment of the common fibular nerve; 2 — a device for studying the biomechanical properties of the nerve in the depth of the surgical wound

к общему малоберцовому нерву, в зависимости от уровня поражения и данных ультразвуковой навигации, основным ориентиром являлась головка малоберцовой кости. С использованием интраоперационной УЗ-ассистенции в рубцово-измененных тканях осуществляли поиск и бережное выделение проксимального и дистального отрезков поврежденного нерва. Во всех случаях интраоперационно подтверждался полный анатомический перерыв нерва с формированием на проксимальном конце нерва посттравматической невротомы.

Дальнейшие этапы операции осуществлялись под увеличением операционного микроскопа Zeiss Opmi Pentero 900. Интраоперационную ангиографию выполняли с помощью установленного флуоресцентного модуля Infrared 800, позволяющего во время операции визуально оценить кровоток и проходимость сосудов, провести картирование кровотока, качественно и количественно оценить скорость прохождения болюса контраста.

В качестве контрастирующего вещества использовали йодсодержащий водорастворимый флуоресцентный краситель индоцианин зеленый (ИЦЗ), разведенный в дозировке 5 мг вещества на 1 мл воды для инъекций.

С целью оценки степени натяжения нерва использовали запатентованное «Устройство для изучения биомеханических свойств периферических нервов в глубине операционной раны», предварительно подвергшееся холодноплазменной стерилизации [12]. С помощью монофиламентного шовного материала Premilene 5/0 осуществлялась фиксация посттравматической невротомы к «ножке» устройства (рис. 1).

После фиксации выполняли попытку преодоления диастаза, воздействуя на нерв по вектору, обратному силе натяжения, с шагом в 1 Н. С целью недопущения повреждения ультраструктур нерва прилагаемая сила не превышала 3 Н. Одновременно выполняли регистрацию степени удлинения нервного ствола с помощью линейки. С целью оценки изменения кровенаполнения сосудов нерва в момент ограниченной тракции проводили интраоперационную флуоресцентную ангиографию с длиной волны 800 нм — IR 800. Изображение настраивали на центр зоны «интереса» с фокусным расстоянием менее 300 мм. После включения модуля микроскоп автоматически проводил процедуру калибровки, оценивая фокусное расстояние до раны. Далее по команде оперирующего хирурга анестезист внутривенно болюсно вводила разведенное контрастирующее вещество через периферический катетер в дозировке из расчета 0,2–0,5 мг на 1 кг массы тела пациента. В этот момент в реальном времени начиналась видеозапись ангиографии на экране монитора микроскопа. После фиксирования пика контрастирования, в среднем через 28–32 с, на нерв воздействовали с силой натяжения в 2 Н и 3 Н, регистрируя при этом момент времени после введения контраста. Среднее время контрастирования составило 12–14 с. Полученные данные, в том

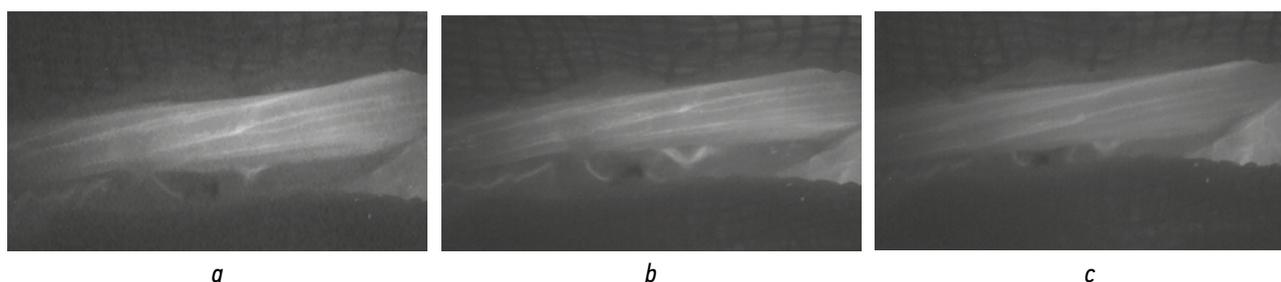


Рис. 2. ИЦЗ-ангиограммы ствола лучевого нерва: *a* — без воздействия силы натяжения; *b* — при воздействии силой натяжения в 2 Н; *c* — при воздействии силы натяжения в 3 Н

Fig. 2. Indocyanine green (ICG)-angiograms of the radial nerve trunk: *a* — without the influence of the tension force; *b* — when exposed to a tension force of 2 N; *c* — when exposed to a tension force of 3 N

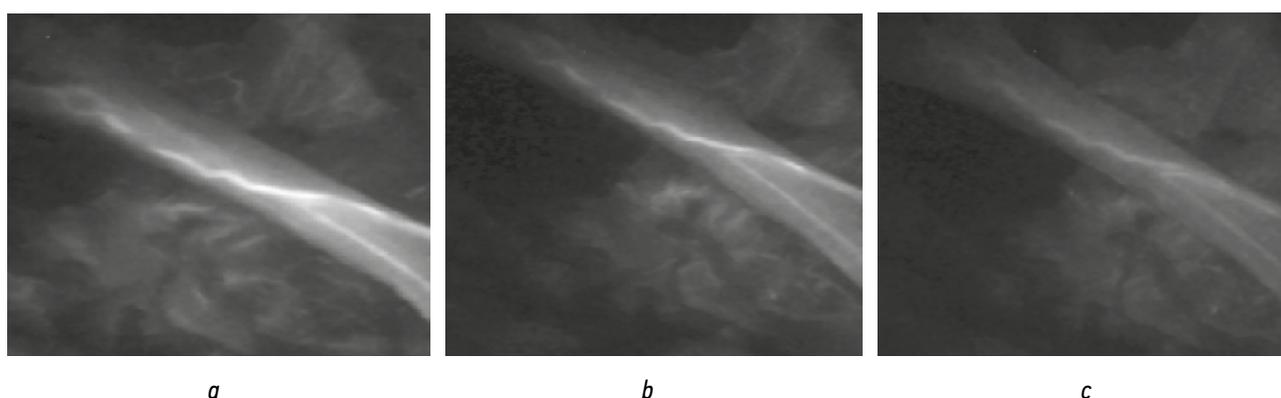


Рис. 3. ИЦЗ-ангиограммы ствола общего малоберцового нерва: *a* — без воздействия силы натяжения; *b* — при воздействии силой натяжения в 2 Н; *c* — при воздействии силы натяжения в 3 Н

Fig. 3. ICG-angiograms of the radial nerve trunk: *a* — without the influence of the tension force; *b* — when exposed to a tension force of 2 N; *c* — when exposed to a tension force of 3 N

числе и ангиографическая картина, в дальнейшем подвергались обработке, в результате которой были получены ИЦЗ-ангиограммы до приложения силы натяжения, при приложении силы в 2 Н и при приложении силы в 3 Н. В случае, если после иссечения невromы приложение силы натяжения в 2 Н позволяло преодолеть диастаз, оперативное вмешательство завершали восстановлением целостности нерва путем эпинеурального микрохирургического шва. В противном случае выполняли аутонейропластику с использованием в качестве донора фрагментов ипсилатерального *n. suralis*. Дальнейшие этапы операции выполнялись по стандартной методике восстановления целостности поврежденного нерва (микрохирургический эпинеуральный шов, аутонейропластика).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процедура интраоперационной флуоресцентной ангиографии, включая этап подготовки, занимала около 15 мин. Пациентам, которым выполнялся эпинеуральный микрохирургический шов, она была выполнена дважды — во время непосредственного исследования влияния силы натяжения на кровоснабжение и после восстановления целостности нерва. Представленные ИЦЗ-ангиограммы

свидетельствуют, что применение интраоперационной флуоресцентной ангиографии позволяет наглядно оценить кровоток в нервном стволе и изменения его при воздействии силы натяжения (рис. 2, 3).

Выявлено, что при приложении силы в 2 Н происходит снижение объема кровотока в основном за счет растяжения сосудов и уменьшения их диаметра. При этом сохраняется сниженное, но достаточно интенсивное контрастирование интраневрального магистрального сосуда, визуализируются сосуды мелкого калибра. Однако в сосудах меньшего диаметра отмечается более существенное снижение интенсивности свечения и их выраженная констрикция (см. рис. 2, 3). Приложение силы натяжения влияет также и на ангиоархитектонику нервного ствола. Так, при воздействии с силой в 2–3 Н изменения проявляются в основном в виде вытяжения, выпрямления сосудов по оси и уменьшения их извитости. При приложении силы в 3 Н визуально отмечается существенное снижение объема кровотока. Несмотря на сохраняющееся остаточное контрастирование интраневральной магистральной ветви, отмечается выраженное снижение интенсивности ее окрашивания, уменьшение диаметра. Также прекращается контрастирование большей части мелких по калибру сосудов, что свидетельствует об отсутствии или снижении в них кровотока. При этом после прекращения воздействия

силы натяжения моментально отмечается восстановление контрастирования этих сосудов, что свидетельствует о восстановлении кровотока. Таким образом, установлено, что приложение силы до 2 Н существенно не влияет на кровоток. В то же время приложение силы в 3 Н уже значительно отражается на кровоснабжении нервного ствола, что подтверждается данными ИЦЗ-ангиографии. Однако и в этом случае не происходит полного прекращения кровотока. Приложение силы более чем в 3 Н мы не проводили с учетом того, что при воздействии на ствол силой более 3 Н происходит выраженное повреждение ультраструктур нерва [13].

Выполнение ангиографии после основного хирургического приема — выполнения микрохирургического эпинеурального шва — позволяет оценить сохранность и, что не менее важно, эффективность кровотока. Как правило, выполнение эпинеурального шва неотъемлемо сочетается с необходимостью натяжения нервов с целью преодоления диастаза. Последнее, в свою очередь, ведет к транзиторному нарушению кровоснабжения нервного ствола. Так, на интраоперационных ИЦЗ-ангиограммах отчетливо визуализируется зона обрыва контрастирования, вызванного частичным тромбозом сосудов, что является реакцией на продолжающееся кровотечение из культей нерва. Несмотря на это, отмечается сохранение кровотока в интраневральных магистральных сосудах, доходящих практически до линии шва. С течением времени отмечается восстановление кровотока, что проявляется контрастированием более мелких сосудов. Это, в свою очередь, позволяет судить о сохранении эффективного кровотока как в проксимальном, так и в дистальном отрезках нерва (рис. 4).

Интраневральные сосуды являются одними из важных анатомических ориентиров для точного сопоставления фрагментов поврежденного нервного ствола. Ориентация на сосуды, проходящие в эпинеурии, позволяет избежать перекручивания культы нерва по оси и способствует более точному соприкосновению пучков нервных волокон. Таким

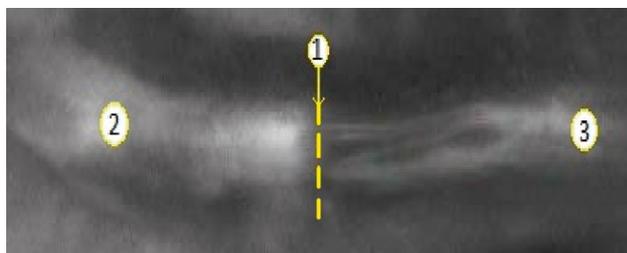


Рис. 4. ИЦЗ-ангиограмма ствола срединного нерва после наложения эпинеурального шва: 1 — проекция линии микрохирургического эпинеурального шва; 2 — проксимальный отрезок срединного нерва; 3 — дистальный фрагмент срединного нерва

Fig. 4. ICG-angiogram of the median nerve trunk after epineurial suture: 1 — projection of the microsurgical epineurial suture line; 2 — proximal segment of the median nerve; 3 — distal fragment of the median nerve

образом, интраоперационная ангиография после выполнения эпинеурального шва может рассматриваться и как способ контроля качества его выполнения.

Нарушение кровоснабжения нерва на ИЦЗ-ангиограммах проявляется отсутствием контрастирования его сосудов на фоне активного контрастирования прилежащих мягких тканей. При этом в случае выраженного рубцового процесса в зоне оперативного вмешательства возможно снижение интенсивности кровенаполнения и в мягких тканях. В случае избыточного натяжения на линии шва, частичного тромбирования магистральных сосудов нерва отмечается нарушение адекватного кровоснабжения нервного стола. Например, на рис. 5 представлен случай микрохирургического эпинеурального шва локтевого нерва, выполнение которого сопровождалось натяжением отрезков нерва. Отмечается лишь незначительное контрастирование интраневрального магистрального сосуда только в проксимальном сегменте на удалении 2 см от места шва. С учетом данных выполненной ИЦЗ-ангиографии было принято решение распустить эпинеуральные швы и закончить операцию межпучковой аутопластикой.

Ведение пациентов в послеоперационном периоде проводилось по стандартным протоколам в соответствии с объемом выполненного оперативного вмешательства. Осложнений, в том числе связанных с введением контрастирующего вещества в послеоперационном периоде, не наблюдалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на повсеместное внедрение микрохирургической техники, исходы лечения травм периферических нервов не всегда бывают удовлетворительными [1]. Не редкостью являются случаи, когда идеально выполненный с технической точки зрения микрохирургический шов нерва не приводит к ожидаемому восстановлению функции. Одной из наиболее вероятных причин неудач

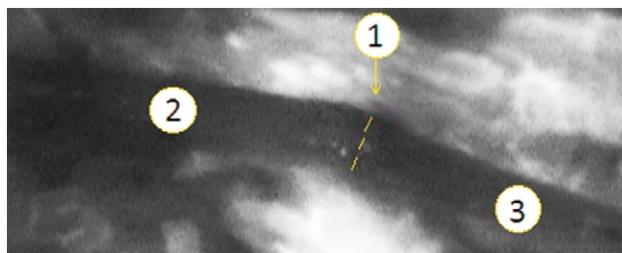


Рис. 5. ИЦЗ-ангиограмма ствола локтевого нерва после наложения эпинеурального шва, отсутствие адекватного кровоснабжения: 1 — проекция линии эпинеурального микрохирургического шва; 2 — дистальный отрезок локтевого нерва; 3 — проксимальный отрезок локтевого нерва

Fig. 5. ICG-angiogram of the ulnar nerve trunk after epineurial suture, lack of adequate blood supply: 1 — projection of the epineurial microsurgical suture line; 2 — distal segment of the ulnar nerve; 3 — proximal segment of the ulnar nerve

может являться избыточное натяжение нервного ствола, влекущее за собой ишемию тканей в области шва.

Нами была рассмотрена возможность применения методики интраоперационной флуоресцентной ангиографии с использованием в качестве контрастного вещества индоцианина зеленого для оценки изменения кровотока в нервном стволе. Интраоперационная инфракрасная ангиография с индоцианином зеленым активно применяется в различных областях хирургии. В микрохирургии инфракрасная ангиография позволяет проводить периоперационный мониторинг перфузии тканей [8, 14, 15]. Однако мы не обнаружили сведений о применении данной методики в реконструктивной хирургии периферических нервов.

Выявлено, что при воздействии на нервный ствол силой натяжения до 2 Н не происходит значимого нарушения интраневрального кровообращения. При этом при воздействии силы натяжения в 3 Н происходит видимое на ангиограммах уменьшение кровотока, связанное в первую очередь с констрикцией сосудов вследствие их растяжения. Это может привести к состоянию острой ишемии или хронической недостаточности кровообращения нервного ствола в области шва, что, в свою очередь, чревато неудовлетворительным результатом лечения, несмотря на ультразвуковую картину состоятельности шва в послеоперационном периоде [16]. Доказано, что в условиях адекватного

и эффективного кровотока происходит пролиферация в первую очередь шванновских клеток, препятствующая образованию рубцовой ткани в области шва [17]. Увеличение числа интраневральных сосудов происходит в период от 2 до 6 нед. с момента операции за счет развития процессов неопластического ангиогенеза, однако в условиях ишемии скорость формирования рубцовой ткани может опередить скорость пролиферации шванновских клеток и рост поврежденных аксонов [18].

Интраоперационная инфракрасная ангиография с использованием индоцианина зеленого является доступной и легко выполнимой методикой, позволяющей определить сохранность и, что не менее важно, адекватность и эффективность кровотока в нервном стволе. Интраоперационная ангиография может быть использована с целью контроля сохранности кровотока, изучения компенсации кровоснабжения нерва после микрохирургического эпиневрального шва. Помимо этого, интраоперационная ангиография позволяет оценить качество сопоставления культей нерва по оси, исключая вероятность их «перекрута».

Перспективным является применение интраоперационной ангиографии с индоцианином зеленым в изучении влияния мобилизации нерва на его кровоснабжение. С целью оценки клинической значимости методики, а также оценки эффективности применения ее в повседневной практике целесообразно дальнейшее исследование на большей выборке пациентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говенько Ф.С. Хирургия поврежденных периферических нервов. СПб.: Феникс, 2010.
2. Борода Ю.И. Выбор реконструктивной операции на нерве в зависимости от степени натяжения в зоне шва // Гений ортопедии. 2000. № 2. С. 32–33.
3. Peng T.H., Ding H.M., Chen S.H., et al. Demonstration of three injection methods for the analysis of extrinsic and intrinsic blood supply of the peripheral nerve // *Surg Radiol Anat*. 2009. Vol. 31, No. 8. P. 567–571. doi: 10.1007/s00276-009-0480-4
4. Reinhold A.K., Rittner H.L. Barrier function in the peripheral and central nervous system – a review // *Pflügers Archiv: European journal of physiology*. 2017. Vol. 469, No. 1. P. 123–134. doi: 10.1007/s00424-016-1920-8
5. Mizisin A.P., Weerasuriya A. Homeostatic regulation of the endoneurial microenvironment during development, aging and in response to trauma, disease and toxic insult // *Acta Neuropathol*. 2011. Vol. 121, No. 3. P. 291–312. doi: 10.1007/s00401-010-0783-x
6. Lundborg G. The intrinsic vascularization of human peripheral nerves: structural and functional aspects // *J Hand Surg Am*. 1979. Vol. 4, No. 1. P. 34–41. doi: 10.1016/s0363-5023(79)80102-1
7. Feindel W., Yamamoto Y.L., Hodge C.P. Intracarotid fluorescein angiography: a new method for examination of the epicerebral circulation in man // *CMAJ*. 1967. Vol. 96, No. 1. P. 1–7.
8. Wrobel C.J., Meltzer H., Lamond R., Alksne J.F. Intraoperative Assessment of Aneurysm Clip Placement by Intravenous Fluorescein Angiography // *Neurosurgery*. 1994. Vol. 35, No. 5. P. 970–973. doi: 10.1097/00006123-199411000-00027
9. Элиава Ш.Ш., Шехтман О.Д., Пилипенко Ю.В., и др. Интраоперационная флуоресцентная ангиография с индоцианином в хирургии аневризм головного мозга. Первый опыт применения и обзор литературы // *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2015. Т. 79. № 1. С. 33–41.
10. Munabi N.C., Olorunnipa O.B., Goltsman D., et al. The ability of intra-operative perfusion mapping with laser-assisted indocyanine green angiography to predict mastectomy flap necrosis in breast reconstruction: A prospective trial // *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2014. Vol. 67, No. 4. P. 449–455. doi: 10.1016/j.bjps.2013.12.040
11. Newman M.I., Samson M.C., Tamburrino J.F., et al. An investigation of the application of laser-assisted indocyanine green fluorescent dye angiography in pedicle transverse rectus abdominis myocutaneous breast // *Canadian Journal of Plastic Surgery*. 2011. Vol. 19, No. 1. P. 1–5. doi: 10.1177/229255031101900101
12. Чуриков Л.И. Вариантная анатомия лучевого нерва и особенности оперативных вмешательств при его повреждениях: дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2018.
13. Чуриков Л.И., Гайворонский А.И., Гайворонский И.В., и др. Влияние дозированного растяжения и мобилизации на структуры лучевого нерва в области плеча // *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2017. Т. 9, № 3. С. 33–40.

14. Аляев Ю.Г., Безруков Е.А., Сирота Е.С., Морозов А.О. Флуоресцентная визуализация с индоцианином зеленым в урологии // Урология. 2016. № 1. С. 106–111.
15. Tsujino Y., Mizumoto K., Matsuzaka Y. Fluorescence navigation with indocyanine green for detecting sentinel nodes in extramammary Paget's disease and squamous cell carcinoma // *J Dermatol.* 2009. Vol. 36, No. 2. P. 90–94. doi: 10.1111/j.1346-8138.2009.00595.x
16. Koshima I., Moriguchi T., Soeda S. Reinnervation of denervated Pacinian corpuscles: ultrastructural observations in rats following free nerve grafts // *Plast Reconstr Surg.* 1993. Vol. 92, No. 4. P. 728–735. doi: 10.1097/00006534-199309001-00025

REFERENCES

1. Goven'ko FS. *Khirurgiya povrezhdenii perifericheskikh nervov.* Sankt-Peterburg: Feniks; 2010. (In Russ).
2. Boroda Yul. Vybory rekonstruktivnoy operatsii na nerye v zavisimosti ot stepeni natjazheniya v zone shva. *Genij ortopedii.* 2000;(2):32–33. (In Russ).
3. Peng TH, Ding HM, Chen SH, et al. Demonstration of three injection methods for the analysis of extrinsic and intrinsic blood supply of the peripheral nerve. *Surg Radiol Anat.* 2009;31(8):567–571. doi: 10.1007/s00276-009-0480-4
4. Reinhold AK, Rittner HL. Barrier function in the peripheral and central nervous system – a review. *Pflügers Archiv: European journal of physiology.* 2017;469(1):123–134. doi:10.1007/s00424-016-1920-8
5. Mizisin AP, Weerasuriya A. Homeostatic regulation of the endoneurial microenvironment during development, aging and in response to trauma, disease and toxic insult. *Acta Neuropathol.* 2011;121(3):291–312. doi: 10.1007/s00401-010-0783-x
6. Lundborg G. The intrinsic vascularization of human peripheral nerves: structural and functional aspects. *J Hand Surg Am.* 1979;4(1):34–41. doi:10.1016/s0363-5023(79)80102-1
7. Feindel W., Yamamoto Y.L., Hodge C.P. Intracarotid fluorescein angiography: a new method for examination of the epicerebral circulation in man. *CMAJ.* 1967;96(1):1–7.
8. Wrobel CJ, Meltzer H, Lamond R, Alksne JF. Intraoperative Assessment of Aneurysm Clip Placement by Intravenous Fluorescein Angiography. *Neurosurgery.* 1994;35(5):970–973. doi: 10.1097/00006123-199411000-00027
9. Eliava ShSh, Shekhtman OD, Piliipenko IuV., et al. Intraoperative indocyanine green fluorescence angiography in surgery of brain aneurysms. The first experience with using the technique and literature review. *Voprosy neirokhirurgii imeni NN Burdenko.* 2015;79(1):33–41. (In Russ). doi:10.17116/neiro201579133-41
10. Munabi NC, Olorunnipa OB, Goltsman D, et al. The ability of intra-operative perfusion mapping with laser-assisted indocyanine green angiography to predict mastectomy flap necrosis in breast

17. Tanaka K., Okazaki M., Yano T., et al. Quantitative evaluation of blood perfusion to nerves included in the anterolateral thigh flap using indocyanine green fluorescence angiography: a different contrast pattern between the vastus lateralis motor nerve and femoral cutaneous nerve // *J Reconstr Microsurg.* 2015. Vol. 31, No. 3. P. 163–170. doi: 10.1055/s-0034-1390382
18. Caillaud M., Richard L., Vallat J.M., et al. Peripheral nerve regeneration and intraneural revascularization // *Neural Regen Res.* 2019. Vol. 14, No. 1. P. 24–33. doi: 10.4103/1673-5374.243699

- reconstruction: A prospective trial. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2014;67(4):449–455. doi: 10.1016/j.bjps.2013.12.040
11. Newman MI, Samson MC, Tamburrino JF, et al. An investigation of the application of laser-assisted indocyanine green fluorescent dye angiography in pedicle transverse rectus abdominis myocutaneous breast. *Canadian Journal of Plastic Surgery.* 2011;19(1):1–5. doi: 10.1177/229255031101900101
12. Churikov LI. *Variatnaya anatomiya luchevego nerva i osobennosti operativnykh vmeshatel'stv pri ego povrezhdeniyakh.* [dissertation] Saint Petersburg; 2018. (In Russ).
13. Churikov LI, Gayvoronsky AI, Gayvoronsky IV, et al. Influence of the dosed treatment and mobilization on structures of the radial nerve in the region of shoulder. *Rossiiskii neirokhirurgicheskii zhurnal im. professora A.L. Polenova.* 2017;9(3):33–40. (In Russ).
14. Alyaev YuG, Bezrukov EA, Sirota ES, Morozov AO. Indocyanine green fluorescent imaging in urology. *Urologiya.* 2016;(1):106–111. (In Russ).
15. Tsujino Y, Mizumoto K, Matsuzaka Y. Fluorescence navigation with indocyanine green for detecting sentinel nodes in extramammary Paget's disease and squamous cell carcinoma. *J Dermatol.* 2009;36(2):90–94. doi: 10.1111/j.1346-8138.2009.00595.x
16. Koshima I, Moriguchi T, Soeda S. Reinnervation of denervated Pacinian corpuscles: ultrastructural observations in rats following free nerve grafts. *Plast Reconstr Surg.* 1993;92(4):728–735. doi: 10.1097/00006534-199309001-00025
17. Tanaka K, Okazaki M, Yano T, et al. Quantitative evaluation of blood perfusion to nerves included in the anterolateral thigh flap using indocyanine green fluorescence angiography: a different contrast pattern between the vastus lateralis motor nerve and femoral cutaneous nerve. *J Reconstr Microsurg.* 2015;31(3):163–170. doi: 10.1055/s-0034-1390382
18. Caillaud M, Richard L, Vallat JM, et al. Peripheral nerve regeneration and intraneural revascularization. *Neural Regen Res.* 2019;14(1):24–33. doi: 10.4103/1673-5374.243699

ОБ АВТОРАХ

*Гайворонский Алексей Иванович, доктор медицинских наук, профессор; Контактный телефон: +7-911-917-53-45.

Свистов Дмитрий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент.

Исаев Джамалудин Магомедрасулович, преподаватель.

Чуриков Леонид Игоревич, кандидат медицинских наук.

Беляков Кирилл Владимирович, кандидат медицинских наук.

AUTHORS INFO

*Gaivoronski Alexei I., doctor of medical sciences, professor; Contact phone: +7-911-917-53-45.

Svistov Dmitry V., candidate of medical sciences professor.

Isayev Jamaludin M., lecturer.

Churikov Leonid I., candidate of medical sciences.

Belyakov Kirill V., candidate of medical sciences.