

«ПРОДВИНУТАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ» ДЛЯ СПАСЕНИЯ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ИЛИ НАИБОЛЕЕ АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ КРИТИЧЕСКОЙ ИШЕМИИ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

***А.З. Шарафеев** – [ORCID: 0000-0002-3483-7103]

д.м.н., профессор¹, зав. отд. РХМДил²

Д.И. Ситдикова – [ORCID: 0000-0001-5719-5812]

врач отд. РХМДил³

А.Ф. Халирахманов – [ORCID: 0000-0001-7758-3935]

к.м.н., ст. преподаватель¹

П.А. Токарев – [ORCID: 0000-0002-3501-3288]

врач отд. ОРХМДил^{4,5}

¹ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

420012 Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 74

²Хадасса Медикал Москва

420064 Российская Федерация, г. Москва, Инновационный центр Сколково, Большой бульвар, 46 стр. 1

³ГБУЗ МО «Сергиево-Посадская районная больница»

141301 Российская Федерация, Московская область, г. Сергиев-Посад, Новоугличское ш., 62А

⁴СПбГБУЗ «Городская Покровская больница»

199106 Российская Федерация, Санкт-Петербург, Большой проспект Васильевского острова, 85

⁵ФГБВОУ «Военно-Медицинская академия им. С.М. Кирова»

194044 Российская Федерация, Санкт-Петербург, улица Академика Лебедева, 6

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

- критическая ишемия нижних конечностей
- перфузия
- заболевание периферических артерий
- реваскуляризация
- методы диагностики

АННОТАЦИЯ:

Пациентам с подозрением на заболевание периферических артерий (ЗПА) и критической ишемией конечностей (КИНК) требуется реваскуляризация для спасения конечности. Успешность реваскуляризации напрямую зависит от качественной и точной визуализации сосудистого русла. Последние достижения в технологии визуализации значительно повлияли на предоперационную оценку пациентов с ЗПА. Далее приведено описание основных инвазивных методов с целью получения высококачественных изображений артерий нижних конечностей.

Цель: на основании современных литературных источников обобщить данные об эффективности современного спектра инструментальных методов диагностики для ранней и эффективной инвазивной оценки кровотока и перфузии нижних конечностей для планирования операции реваскуляризации и оценки ее эффективности.

Материал и методы: проведен анализ отечественной и зарубежной литературы за последние 5 лет по вопросу о современных возможностях инвазивной диагностики пациентов с критической ишемией нижних конечностей. Выбор источников литературы основывался на информативности описанных методик, актуальности исследований, и перспективы их применения в будущем.

Заключение: на протяжении многих лет, традиционным «золотым стандартом» сосудистой визуализации является цифровая субтракционная ангиография. С течением времени, этот метод был усовершенствован, поскольку технологические достижения позволили создать высококачественные альтернативы для предоперационной и интраоперационной визуализации (функциональная оценка кровотока, внутрисосудистое ультразвуковое исследование, оптическая когерентная томография и карбоксиангиография).

Для цитирования. Шарафеев А.З., Ситдикова Д.И., Халирахманов А.Ф., Токарев П.А. «ПРОДВИНУТАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ» ДЛЯ СПАСЕНИЯ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ИЛИ НАИБОЛЕЕ АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ КРИТИЧЕСКОЙ ИШЕМИИ НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ) Ж. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ И ИНТЕРВЕНЦИОННАЯ РАДИОЛОГИЯ. 2022; 16(2): 32–45.

«ADVANCED IMAGING» FOR SALVAGE OF LOWER LIMB OR THE MOST RELEVANT INVASIVE DIAGNOSTIC METHODS OF CRITICAL LOWER LIMB ISCHEMIA (LITERATURE REVIEW)

*Sharafiev A.Z. – [ORCID: 0000-0002-3483-7103]
MD, PhD, professor^{1,2}

Sitdikova D.I. – [ORCID: 0000-0001-5719-5812]
MD³

Khalirakhmanov A.F. – [ORCID: 0000-0001-7758-3935]
MD, PhD¹

Tokarev P.A. – [ORCID: 0000-0002-3501-3288]
MD^{4,5}

¹Kazan Federal University

74, Karla Marksa str., Kazan, Russian Federation, 420043

²Hadassah Medical Moscow

46c1, Bol'shoi boulevard, Moscow, Skolkovo Innovation Center, Russian Federation, 420064

³«Sergiev-Posad Regional Hospital»

62A, Novouglitchskoe highway, Sergiev-Posad, Russian Federation, 141301

⁴«City Pokrovskaya Hospital»

85, Bolshoy avenue of Vasilevsky Island, St. Petersburg, Russian Federation, 199106

⁵«Military Medical Academy named after S.M. Kirov»

6, Akademika Lebedev str., St. Petersburg, Russian Federation, 194044

KEY-WORDS:

- chronic lower limb ischemia
- perfusion
- peripheral artery disease
- revascularization
- diagnostic methods

ABSTRACT:

Patients with suspected peripheral artery disease (PAD) with critical limb ischemia (CLI) require intervention for limb salvage. Successful revascularization depends on quality and accurate visualization of vascular bed of lower limbs. Recent advances in imaging technology have significantly impacted the preoperative assessment of patients with PAD. The following is a description of main invasive techniques of obtaining high-quality images of arteries of lower limbs.

Aim: was to summarize data of modern literature sources, on the effectiveness of modern instrumental diagnostic methods for early and effective invasive assessment of blood flow and perfusion of lower limbs for planning revascularization interventions and assessing its effectiveness.

Material and methods: we analyzed sources of Russian and foreign literature over the past 5 years on the issue of modern possibilities of invasive diagnosis of critical lower limb ischemia. When choosing sources, we relied on the information content of described methods, the relevance of research, results of which are being applied today, and outlined prospects for their application in the future.

Conclusions: over the years, digital subtraction angiography has been traditionally the «gold standard» for intravascular imaging of lower limbs. Over time, this method has been improved because technological advances have created high-quality alternatives for preoperative (computed tomography [CT] angiography and magnetic resonance angiography [MRA]) and intraoperative imaging (Vascular Flow Reserve [VFR], intravascular ultrasound [IVUS], optical coherence tomography [OCT] and angiography CO₂).

Введение

Основным эффективным методом лечения пациентов с заболеваниями периферических артерий (ЗПА) и наличием критической ишемией конечностей (КИНК) является своевременная реваскуляризация. Все более значимую роль приобретают эндоваскулярные методы реваскуляризации. Успешность реваскуляризации напрямую зависит от своевременной, качественной и точной визуализации сосудистого русла. С каждым годом появляется большое количество неинвазивных и инвазивных методов диагностики поражений периферических артерий. Современные методы диагностики

позволяют оценить не только проходимость сосуда, но и перфузию ткани и структуру атеросклеротической бляшки [1].

Цель исследования - обобщить данные об эффективности современного спектра инструментальных методов диагностики для ранней и эффективной инвазивной оценки кровотока и перфузии нижних конечностей для планирования операции реваскуляризации и оценки ее эффективности на основании современных литературных источников.

Материалы и методы

Мы проанализировали источники литературы из базы данных PubMed и Scopus за последние 5 лет по вопросу о современных возможностях инвазивной диагностики критической ишемии нижних конечностей.

Полученные результаты

Своего рода революционным в диагностике и лечении сосудистых заболеваний стало начало применения метода цифровой ангиографии. Несмотря на то, что прошло много лет после внедрения данного метода, ангиография до сих пор считается «золотым стандартом» диагностики заболеваний периферических и коронарных артерий.

Дигитальная субтракционная ангиография (ДСА) - это метод визуализации магистральных сосудов, основанный на внутрисосудистом введении контрастного

вещества и усилении изображения за счет компьютерной постобработки и субтракции («вычитания») неподвижных объектов, не имеющих диагностической ценности: скелета и мягких тканей. Высокая разрешающая способность изображений, полученных данным способом, позволяет использовать меньшие объемы рентгенконтрастных препаратов. Особенно значимым является применение субтракции при визуализации артерий голени, так как данный метод позволяет получить изображение высокой четкости, что существенно облегчает манипуляции на артериях малого диаметра (**рис. 1**). Чувствительность и специфичность метода составляют 92,1% и 88,5% соответственно [2].

Основным недостатком широкого применения ДСА является необходимость введения нефротоксичных йодсодержащих рентгенконтрастных препаратов. Данная обстоятельство особенно актуально у пациентов с сахарным диабетом, частота которых достигает 25-30% среди всей популяции больных

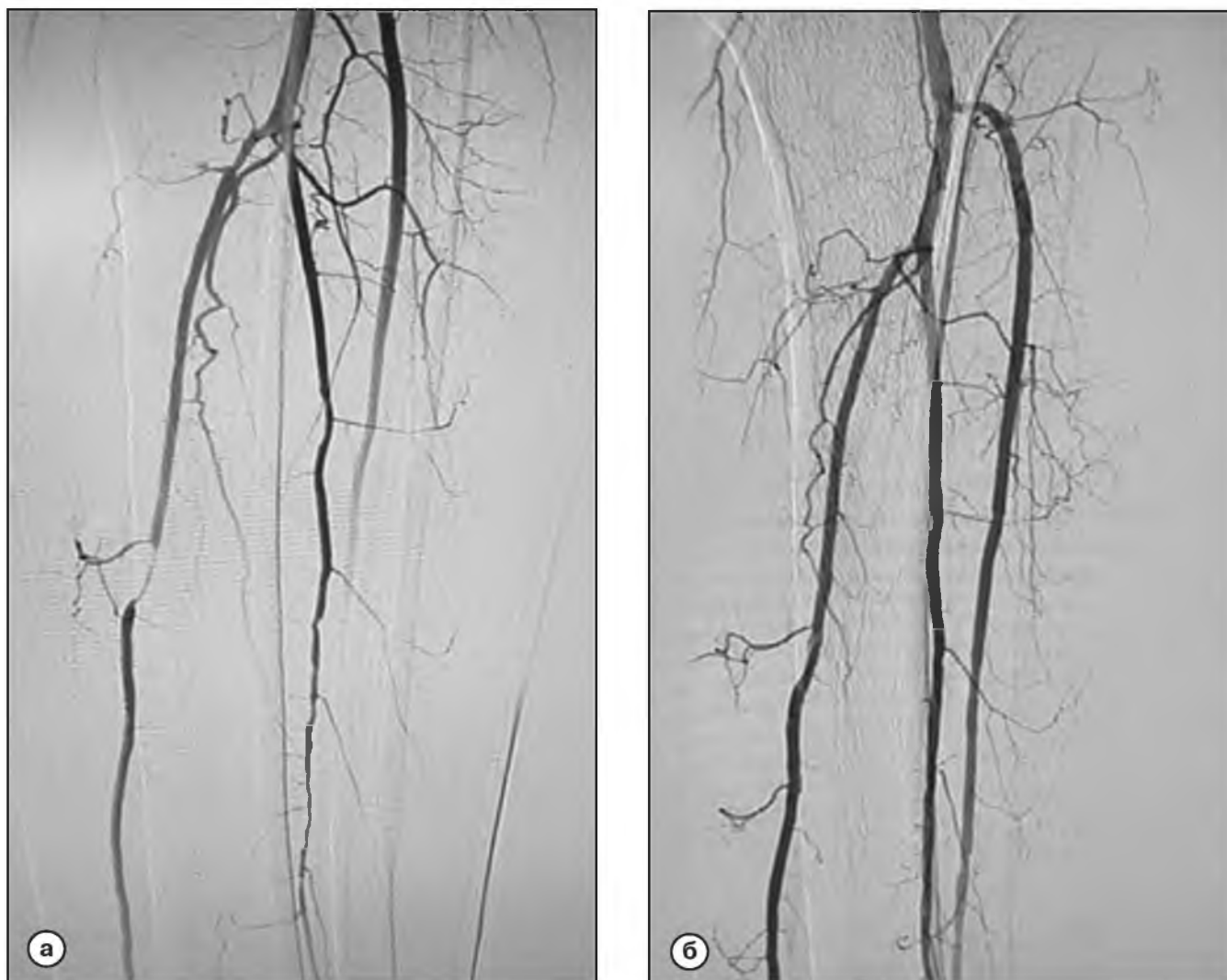


Рис. 1. Артериография левой голени.
а - стеноз передней большеберцовой артерии;
б - после проведения транслюминальной баллонной ангиопластики передней большеберцовой артерии.

с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Одним из способов уменьшения объема вводимого контрастного препарата является применение режима «Roadmap», позволяющего фиксировать статическую ангиографическую картинку, для последующего проведения оперативных вмешательств [3,4] (**рис. 2**).



Рис. 2. Режим «Roadmap».

Для оценки эффективности эндоваскулярных процедур на сосудах нижних конечностей существуют специальные методы ангиографической оценки перфузии конечности.

Одним из первых предложенным методом был Wound Blush (WB). Методика заключалась в определении плотности накопления контраста в области язвенно-некротического дефекта после выполнения эндоваскулярной реваскуляризации (**рис. 3**). Несмотря на то, что метод является качественным и субъективным, на большой группе пациентов была доказана его высокая прогностическая ценность в прогнозировании заживления трофических дефектов мягких тканей.

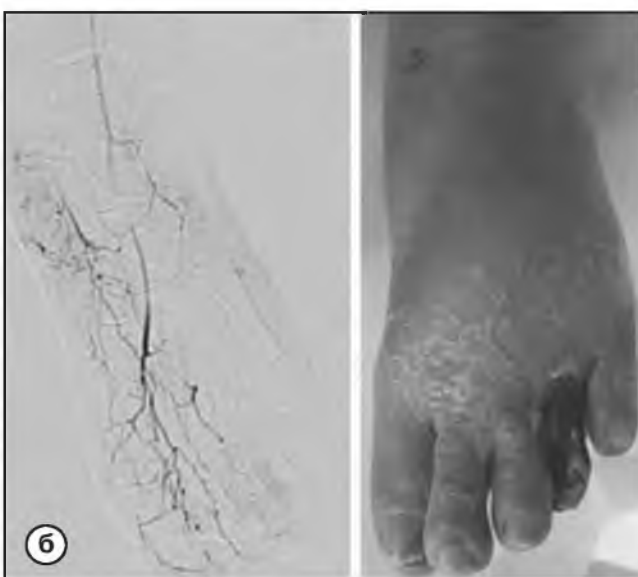
Убедительной наглядностью обладает метод Indigo Carmim Angiography - ангиография с использованием органического красителя индигокармин (**рис. 4**). Краситель вводится интраартериально и визуально оценивается интенсивность накопления контраста в



Рис. 3. Накопление контраста в области трофического дефекта после успешной реваскуляризации.



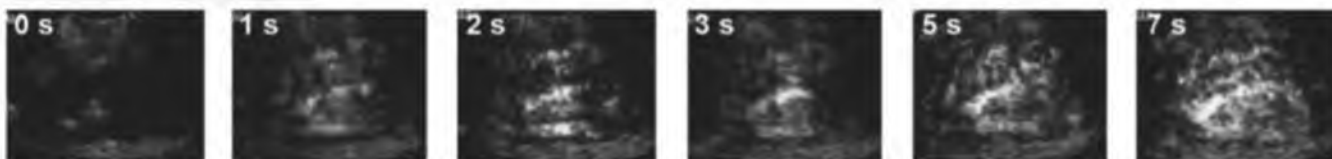
Рис. 4. Индигокармин ангиография при селективном введении красителя [5].



области язвенно-некротического дефекта. Методика позволяет визуально оценить ангиосомный принцип кровоснабжения тканей стопы [5]. Значительным минусом этого метода являются аллергические реакции на препарат и его токсическое действие на печень. Определенный интерес представляет ультразвуковое исследование с контрастным усилением (рис. 5). Используется специальный контрастный препарат на основе гексафторида серы. При приготовлении раствора для введения образуются микропузырьки, повышающие эхогенность крови и увеличивается контрастность между кровью и окружающими тканями. Таким образом можно оценить микроциркуляцию в тканях стопы во время интенсивного ультразвукового сигнала. Однако, методика требует значительной подготовки специалиста и является оператор-зависимой, что существенно снижает ее применение. Функциональную значимость стеноза и резерв кровотока позволяет оценить VFR (Vascular Flow Reserve)- фракционный резерв кровотока. По аналогии с исследованием коронарного резерва кровотока данное исследование производится с использованием внутрисосудистого проводника со встроенным оптоволо-

конным датчиком внутрисосудистого давления, с построением кривой Pd/Pa , где оценивается отношение инвазивного давления за стенозом к давлению в интактном магистральном сосуде. Выстраивается кривая с градиентом давления, оценкой функционального резерва. Производится фармакологическая гиперемия вазоактивными препаратами (папаверин, дилтиазем). Метод применим для стенозирующих поражений бедренно-подколенного сегмента (рис. 6). В последнее время набирают популярность методы параметрического цветового картирования потоков, полученных с помощью дигитальной (цифровой) субтракционной ангиографии (ДСА). Это методы постобработки, которые использовались ранее при диагностике и лечении цереброваскулярных заболеваний и у пациентов после трансплантации печени, сейчас успешно применяются при лечении пациентов с заболеваниями периферических артерий [4]. Собственно двумерная перфузионная ангиография является программным продуктом, позволяющим обработать стандартную субтракционную ангиографию с цветной кодировкой и построить график «время-плотность» (рис. 7). Техника основана на стандартной

Exercise - Baseline



Exercise - Post-revascularization

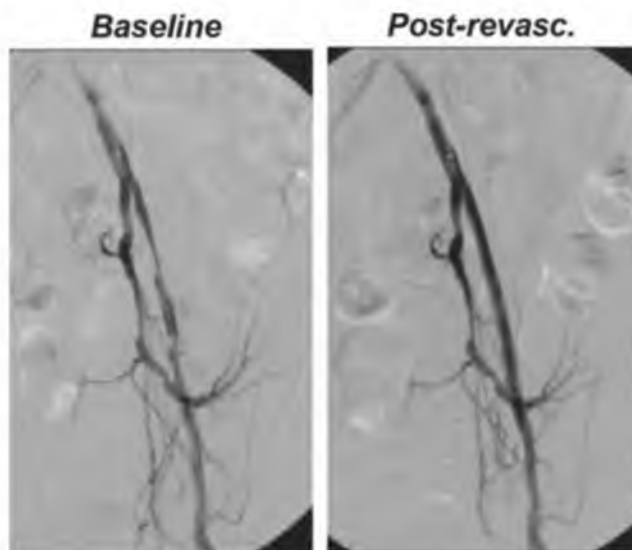
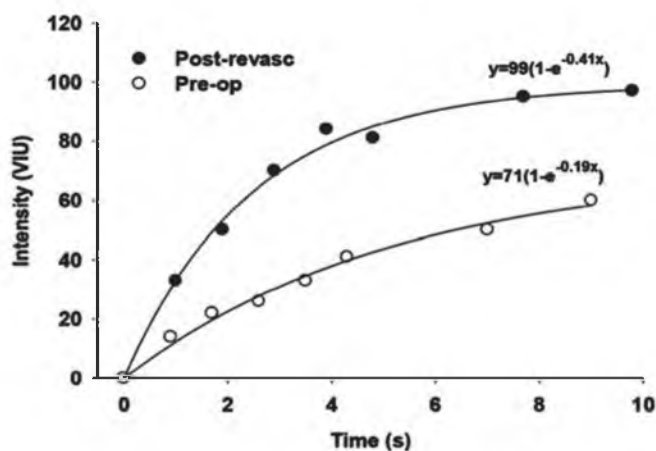
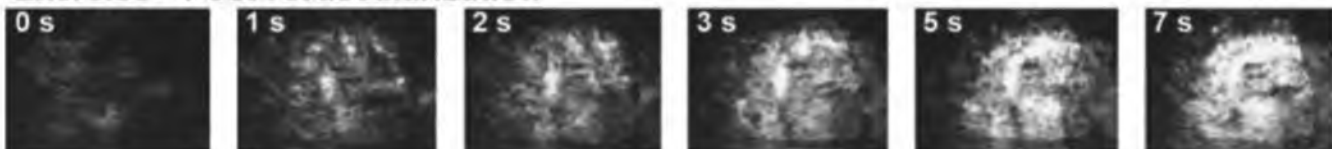


Рис. 5. Ультразвуковое исследование перфузии с контрастированием [15].

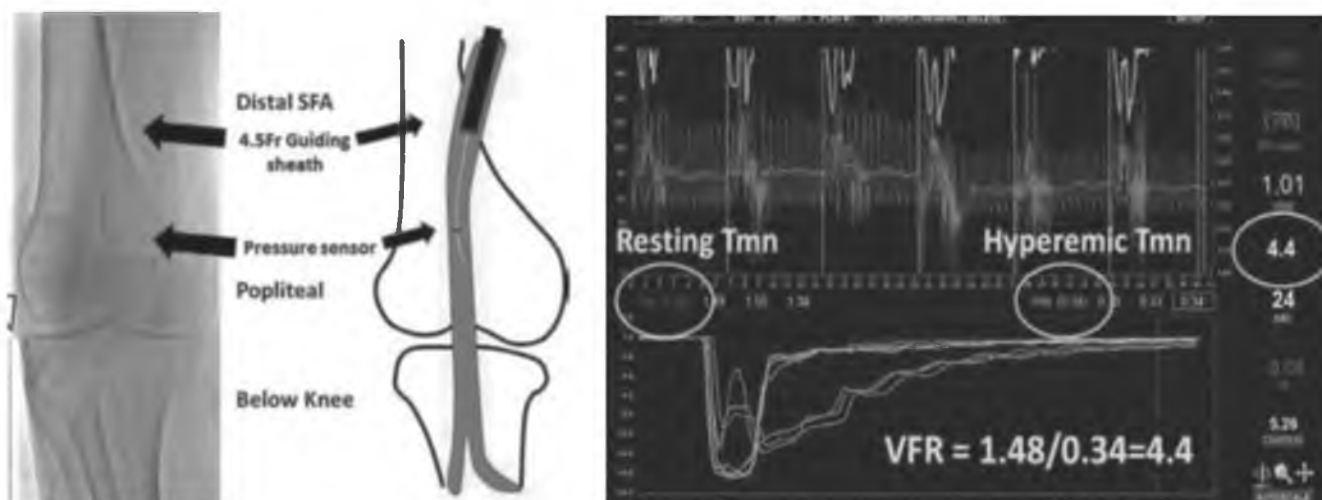


Рис. 6. Фракционный резерв кровотока в бедренно-подколенном сегменте [16].

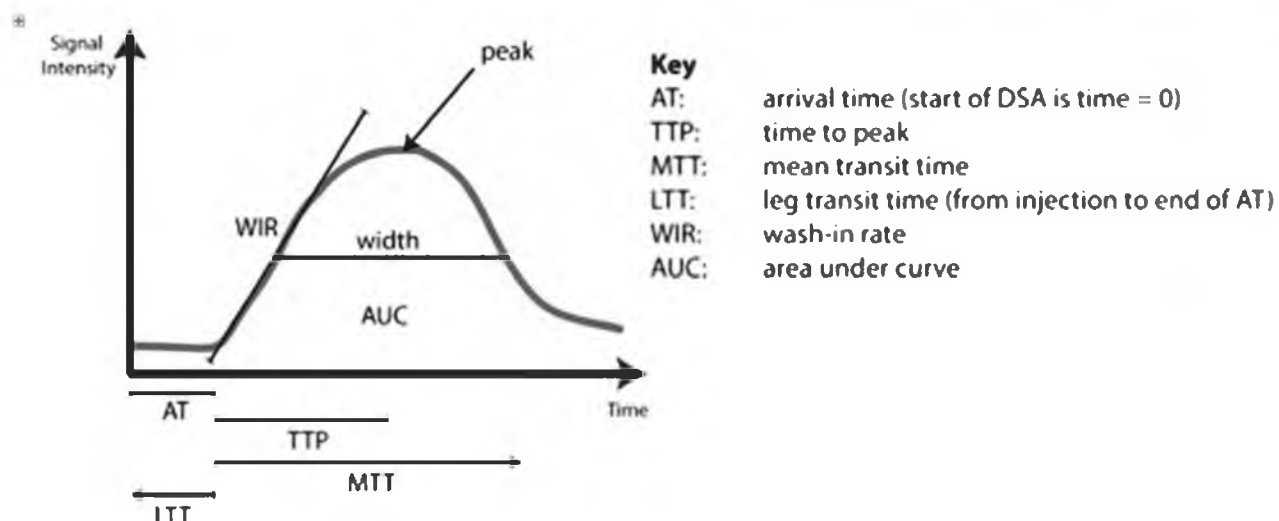


Рис. 7. Кривая «время-плотность» для оценки перфузионных параметров [7].

цифровой субтракционной ангиографии (DSA) с селективным введением контрастного препарата в артерию с заданными параметрами скорости и объема введения. Так же задаются такие параметры съемки как задержка введения контраста и количество кадров в секунду. Двумерные изображения перфузии автоматически восстанавливаются с помощью программного обеспечения постобработки на рабочей станции ангиографического комплекса [6].

Полученная при программном анализе кривая «время-плотность» отражает плотность контрастного вещества в магистральных артериях и в мягких тканях в определенный момент времени. Эту кривую можно проанализировать с использованием разных функциональных параметров. Так же анализируется пиковая плотность контраста в регионе интереса (зоне язвенно-трофического дефекта). Данные исследований позволяют говорить о прямой корреляции перфузионных параметров с такими методами оценки как ЛПИ, ЛД и транскутанное напряжение кислорода [7,8].

Каждому пикселю в двумерном изображении назначается конкретный цвет, варьирующий от красного до синего в зависимости от временной задержки между введением контраста и максимальным контрастированием, демонстрируя перемещение потока контраста во времени [4].

Полученный анализ кривых убывания времени экспортируются из постобработки программного обеспечения в прототип исследовательского программного обеспечения для дальнейшего численного анализа. На основе численного анализа каждой кривой можно определить следующие параметры [9]:

- время прохождения максимума контрастного вещества через заданную область;
- отношение 2D-перфузии зоны интереса к 2D-перфузии референсного участка;
- максимальная концентрация контрастного вещества в области интереса в сравнении с максимальной концентрацией на референсной области.

Цветовое картирование потока позволяет получить

отдельное составное изображение, показывающее динамику заполнения сосудов контрастным веществом в зависимости от времени в виде цветного изображения [3,9].

Функция цветового картирования потока может использоваться для дифференцирования особенностей распространения контрастного вещества во временные фазы на одном изображении. Эту функцию можно использовать в любых приложениях для рентгенохирургии, когда вводится контрастное вещество и присутствуют только незначительные артефакты движения [9]. Методика позволяет качественно и количественно оценить эффективность кровотока (рис. 8).

Недостатками данного метода являются требования абсолютной неподвижности зоны исследования, неизменяемые углы наклона трубки ангиографического аппарата и неизменные параметры инъекции контрастного вещества до и после выполнения реваскуляризации.

Весьма многообещающей выглядит методика карбоксиангиографии (рис. 9). По данной методике, изображение получается при внутрисосудистом введении стерильного медицинского углекислого газа. Основными достоинствами CO₂ являются его нетоксичность, негорючесть, невидимость, плавучесть и хорошая сжимаемость. CO₂ вводится эндогенно примерно 200 см³/мин., поэтому отсутствует риск аллергических реакций и нефротоксического действия газа. Вязкость CO₂ в 400 раз меньше вязкости йодсодержащих рентгеноконтрастных веществ, растворимость углекислоты в 20-30 раз выше, чем кислорода, поэтому частота эмболии при работе с CO₂ минимальна. При внутривенном введении газ растворяется в крови за 30-60 сек. и выводится из организма при однократном прохождении через легкие [10]. В настоящее время CO₂ безопасно применяется для проведения эндоваскулярных вмешательств как в венозной, так и в артериальной системах ниже диафрагмы [10]. Качество изображений при карбоксиангиографии сопоставимо с изображениями, получаемыми при ангиографии с использованием йодсодержащих рентгеноконтрастных веществ. Этот метод может эффективно применяться при непереносимости препаратов йода и должен использоваться у пациентов с высоким риском контраст-индуцируемой нефропатии. Карбоксиангиография - недорогой высокоинформативный метод, который следует иметь в арсенале многопрофильной клиники.

Благодаря своим физическим свойствам, CO₂ может считаться идеальным контрастным веществом во время проведения многих интервенционных процедур, в том числе баллонной ангиопластики и стентирования артерий нижних конечностей. Из-за быстрого растворения и выведения через легкие (от 12 секунд до 2 минут), его возможно использовать в максимальной дозе 100 мл каждые две минуты (средний объем одной

инъекции при карбоксиангиографии нижних конечностей 20-25 мл). Это дает большое преимущество при сложных рентгенохирургических вмешательствах, когда CO₂ может использоваться как самостоятельно, так и в сочетании с йодсодержащими рентгеноконтрастным веществом, что минимизирует риск развития контраст-индуцированной нефропатии.

К возможным осложнениям внутриартериального введения CO₂ можно отнести переходящую парестезию ног, боли в животе, тенезмы и тошноту. Разовый объем CO₂ 1,6 см³/кг не приводит к существенным изменениям сердечно-легочных параметров организма. При возникновении стаза газа в любом органе, он может быть легко удален путем массажа исследуемой области и/или перемещения пациента или конечности. Области высокого риска для карбоксиангиографии могут считаться легочная артерия, нижняя брыжеечная артерия и брюшная аорта у больных с аневризмой [10].

Современное ангиографическое оборудование позволяет получить изображение высокого разрешения, на многие ангиографические аппараты установлены программные пакеты, специально предназначенные для ангиографии CO₂. Это позволяет многократно увеличить количество выполняемых карбоксиангиографий.

В настоящее время существует несколько новых приложений для диагностических и интервенционной сосудистых вмешательств, в которых CO₂ имеет определенные преимущества по сравнению с «классическими» методами. Карбоксиангиография также играет важную роль при обследовании и лечении больных, у которых имеются противопоказания к использованию йодсодержащих КВ и невозможно выполнения МРТ.

CO₂ также может использоваться в качестве контрастного вещества в любом полем анатомическом образовании (артерии ниже диафрагмы, вены, желчные протоки, мочевой тракт, полость абсцесса, фистулы).

До сих пор не доказана безопасность карбоксиангиографии при рутинном применении, поэтому данную методику необходимо использовать с большой осторожностью и многие исследования в ангиографии целесообразнее выполнять по «классической» методике. Однако, можно с уверенностью заявлять, что углекислый газ является безопасной и эффективной альтернативной йодсодержащим контрастным веществам у пациентов с аллергическими реакциями на йод и йодсодержащие КВ и хронической болезнью почек.

Клинические показания могут потенцироваться в ряде случаев и показаниями экономическими. Связано это с тем, что в отличие от традиционных жидких контрастных препаратов карбоксиангиография многократно менее экономически затратна [10].

Диагностическая точность карбоксиангиографии составляет 89,8% (чувствительность 92,3%; специфичность 75%).

Внутрисосудистая ультразвуковая диагностика (ВСУЗИ) позволяет получить ключевую информацию

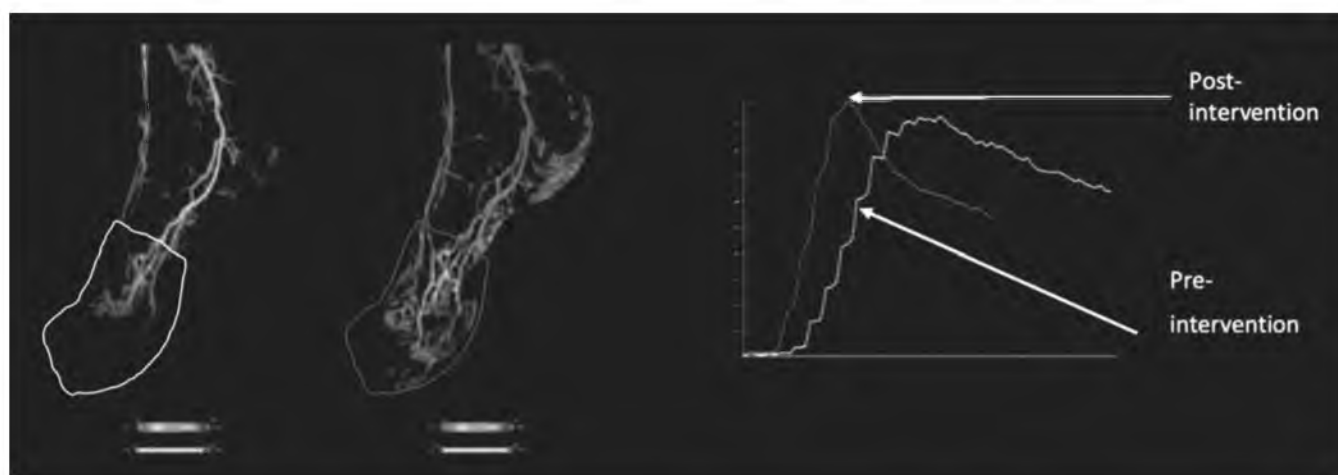


Рис. 8. Оценка эффективности реперфузии с помощью метода параметрического цветового картирования потоков [9].

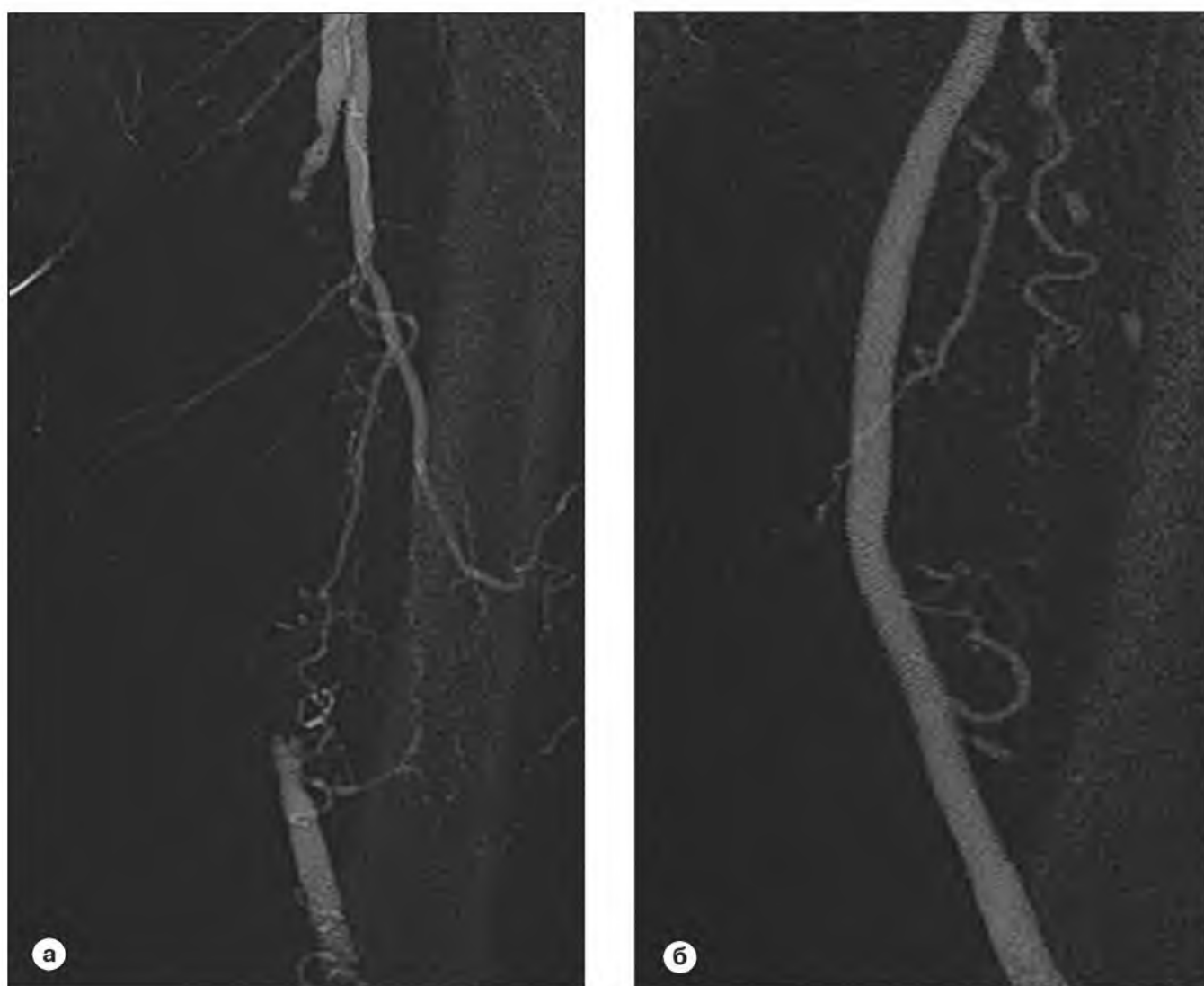


Рис. 9. Реканализация, баллонная ангиопластика со стентированием окклюзии поверхностной бедренной артерии с применением карбоксиангиографии [10].
а – до операции;
б – после операции.

об интралюминальных характеристиках сосудов и поражений и является многообещающим инструментом для улучшения качества эндоваскулярного лечения (ЭВЛ). Последние исследования показали эффективность ВСУЗИ при чрезкожных коронарных вмешательствах. Однако доказательства относительно его клинического воздействия на терапию заболеваний периферических артерий (ЗПА) остаются ограниченными, особенно для сложных поражений бедренно-подколенного сегмента [11].

Стандартный метод измерения диаметра сосудов при ангиографии основан на измерении внутреннего просвета сосуда, тогда как оценка диаметра сосудов методом ВСУЗИ проводится на основе анализа диаметра внешней эластичной мембраны (ВЭМ). Надлежащая оценка диаметра сосуда клинически важна при выборе диаметра стента, потому что имплантация максимального диаметра стента, обеспечит лучшую долгосрочную проходимость сосуда [12].

Степень кальцификации также влияет на клинические исходы после ЭВЛ. В частности, циркулярный кальциноз отрицательно влияет на первичную проходимость после стентирования и в отдаленном периоде. Учитывая это, следует более точно оценивать степени кальциноза, особенно потому, что это может определять стратегию лечения, включая предварительное использование атерэктомии. ВСУЗИ играет важную роль в детализации степени и тяжести кальциноза.

ВСУЗИ, несомненно, предоставляет обширную информацию. Необходимо использовать ВСУЗИ не только для обеспечения наилучшего ЭВЛ в отдельных случаях, но и тщательно собирать и анализировать данные для получения точных сведений о характеристиках сосудов и поражений до и после процедуры, которые влияют на клинические результаты (рис. 10). Эти результаты имеют жизненно важное значение для стратификации рисков в настоящее время и для разработки и усовершенствования процедур в будущем [10].

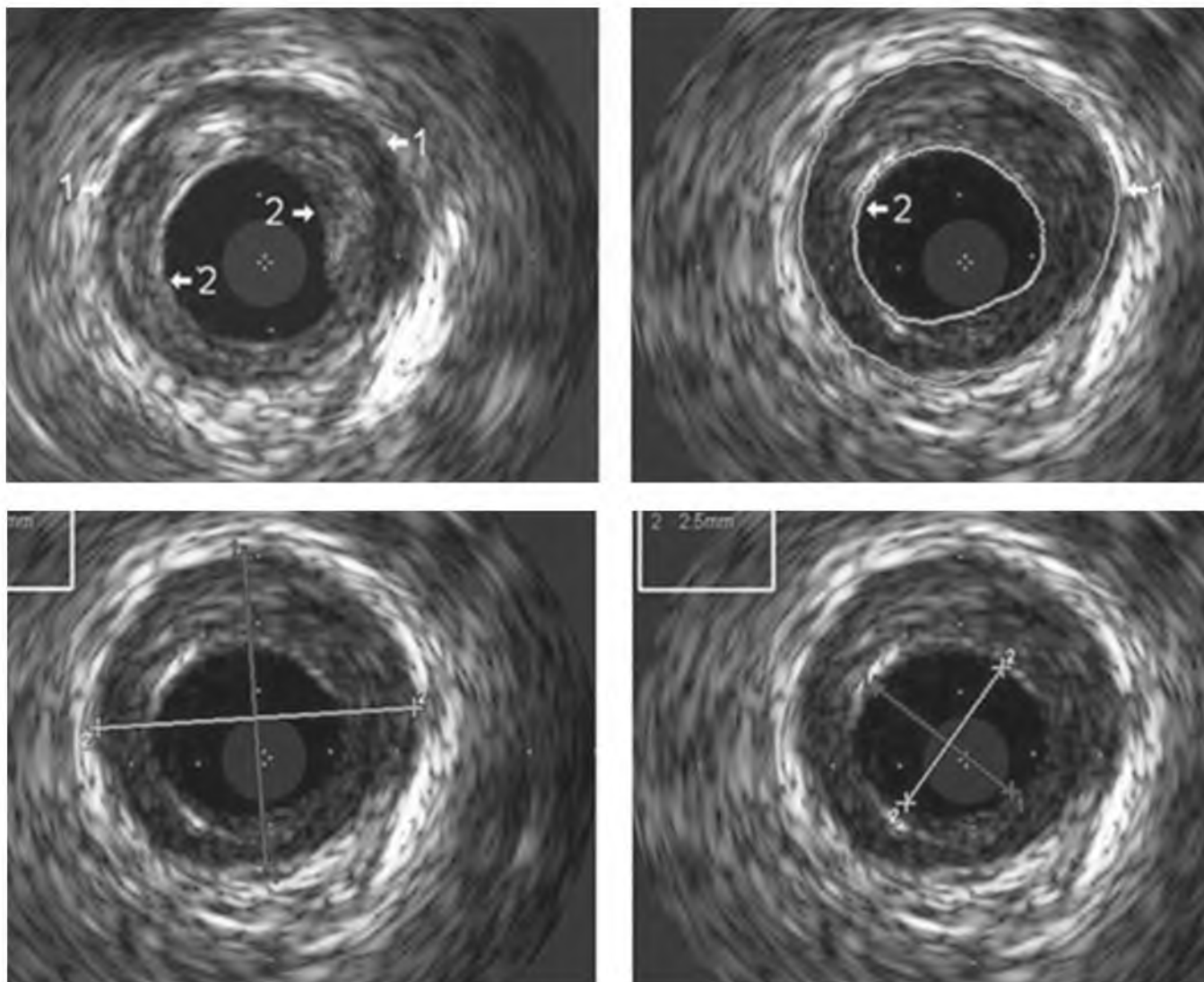


Рис. 10. Первичная диагностика атеросклеротически пораженного сосуда с помощью внутрисосудистого ультразвукового исследования [12].

В случаях с пациентами, страдающими сахарным диабетом (СД), стандартные методы диагностики не позволяют оценить тяжесть хронической ишемии нижних конечностей (ХИНК) из-за специфического поражения артерий и трофических изменений тканей.

Флуоресцентная ангиография с внутривенным введением индоцианина зеленого (ICG angiography) - метод оценки кровотока с помощью лазерной флоуметрии в ближнем инфракрасном диапазоне. Метод хорошо зарекомендовал себе в разных областях хирургии, офтальмологии (**рис. 11**) и является перспективным для оценки микроциркуляции в тканях стопы. Однако является технически сложным и трудоемким, требует абсолютной неподвижности стопы в течении длительного времени (около 5 минут), проникающая способность ограничена 5мм, что недостаточно для оценки микроциркуляции [13].

Метод флуоресцентной ангиографии в ближнем инфракрасном диапазоне (ФАГ в БИД) активно используется в различных отраслях медицины и предлагается, как один из дополнительных методов оценки ишемии нижних конечностей у лиц с СД и ЗПА [14].

Для получения флуоресценции внутривенно вводится флуорофориндоцианин зеленый (ИЦЗ), диодный лазер с источником излучаемого света длиной волны 785 нм направляется на область исследования (например, мягкие ткани стопы). Камера с объективом и набором фильтров фиксирует результаты ФАГ и передает компьютеру, где проводился анализ полученных данных. Продолжительность исследования составляет 15 мин. По предлагаемому протоколу оцениваются следующие параметры ФАГ в БИД: Tstart(c) - время появления флуоресценции (Istart, юнит) в анализируемой области после внутривенного введения ИЦЗ; Tmax(c) - время достижения максимальной

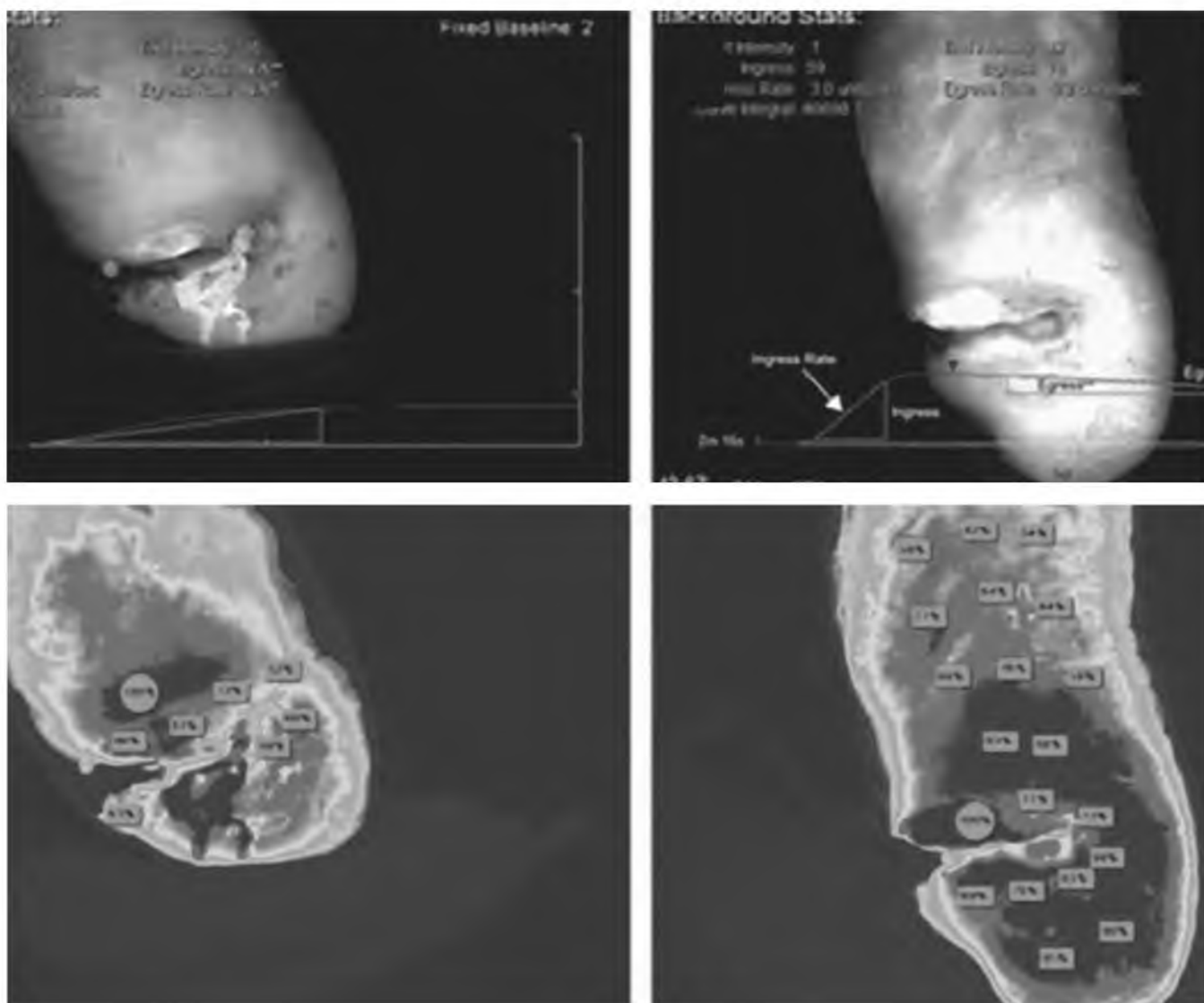


Рис. 11. Флуоресцентная ангиография в инфракрасном диапазоне до и после реваскуляризации [13].

флуоресценции (I_{max} , юнит) после внутривенного введения ИЦЗ; $T_{max} - T_{start}(c)$ - разница во времени достижения I_{max} и I_{start} (рис. 12) [10].

ФАГ в БИД дает возможность оценить количественные (временные) и качественные (уровень флуоресценции) параметры кровотока различных участков мягкой ткани стопы. На методику проведения исследования не влияет наличие окклюзий и кальциноза артерий нижних конечностей, отека стопы. В режиме реального времени можно было оценить интенсивность флуоресценции мягкой ткани стопы, что также может иметь преимущество в использовании данного метода в ходе реваскуляризации артерий нижних конечностей. Одним из условно отрицательных моментов данной методики можно считать необходимость внутривенного введения флуорофора ИЦЗ, являющегося трикарбоновым красителем, позволяющим получать изображения при воздействии света в БИД [15]. Требуется дальнейшие исследования с включением

репрезентативной выборки пациентов с СД для оценки прогностической значимости ФАГ в БИД в заживлении раневых дефектов и определения показаний для реваскуляризации артерий нижних конечностей у пациентов с КИНК. Чувствительность и специфичность метода составляют 85% и 100% соответственно [15]. Идеальными требованиями к методу, оценивающему конечный результат эндоваскулярного лечения, являются неинвазивность, объективность и возможность перипроцедурального применения. К сожалению, эти требования применимы к методам, использование которых возможно только на амбулаторном этапе, ввиду их технической сложности, зависимости от оценки оператора, и недостаточной специфичностью на интраоперационном этапе. В настоящее время интраоперационная оценка микроциркуляции возможна только с помощью инвазивных методов. Их характеристики, важные в клинической практике, приведены в таблице 1.

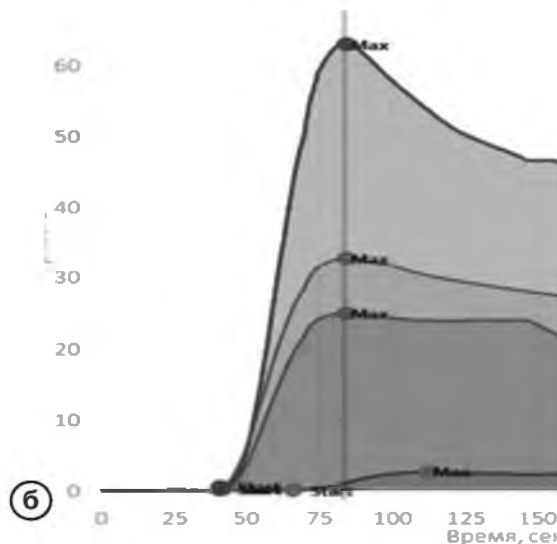
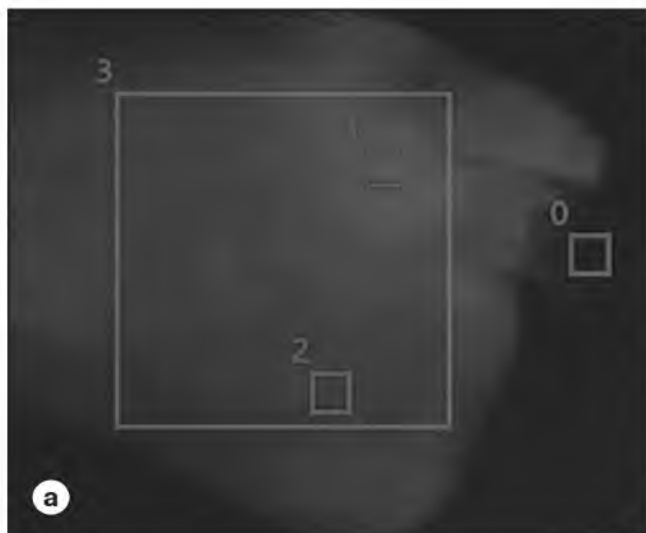


Рис. 12 Результат флуоресцентной ангиографии (ФАГ) в ближнем инфракрасном диапазоне (БИД) левой стопы [15].
 а - вид стопы в ходе проведения ФАГ в БИД.
 Области оценки параметров ФАГ в БИД:
 0 - область минимальной флуоресценции;
 1 - область максимальной флуоресценции;
 2 - область 1-го межпальцевого промежутка;
 3 - область исследования большей части стопы.
 в - диаграмма ФАГ в БИД в зонах интереса 0-3.
 $T_{start}(c)$ - время появления флуоресценции (I_{start} , юнит) в исследуемой области после внутривенного введения индоцианина зеленого (ИЦЗ);
 $T_{max}(c)$ - время достижения максимальной флуоресценции (I_{max} , юнит) после внутривенного введения ИЦЗ;
 $T_{max} - T_{start}(c)$ - разница во времени достижения I_{max} и I_{start} .

Таблица 1. Сопоставление различных методов оценки микроциркуляции сосудов нижних конечностей

| Название метода | Ограничение адаптации | Визуальная оценка | Количественная оценка |
|--|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| Плотность накопления контраста (Wound Blush) | + | + | - |
| Функциональный резерв кровотока (VFR) | +/- | - | + |
| Индиго-кармин ангиография (ICA) | +/- | + | - |
| Двухмерная перфузионная ангиография (2DPA) | + | + | + |

Заключение

В арсенале эндоваскулярных хирургов имеется большое количество высокоинформативных методов диагностики сосудистой патологии. Рациональное применение вышеописанных методик позволяет оценить

степень поражения сосудистого русла, структуру атеросклеротической бляшки, перфузию тканей пораженного бассейна. Восстановление кровотока на основе анализа вышеперечисленных факторов может способствовать максимально эффективной реваскуляризации. ■

Список литературы

1. Шарафеев А.З., Ситдикова Д.И., Максимов А.В. и др. Современные методы неинвазивной оценки перфузии при хронической ишемии, угрожающей потерей конечности. *Ж. Диагностическая и интервенционная радиология*. 2020; 3(14): 56-66.
2. Скрипников А.В. Магнитно-резонансная и рентгенконтрастная ангиография при облитерирующих поражениях артерий нижних конечностей. Диссертация. Москва, 2014.
3. Мизин А.Г., Удовиченко О.В., Терехин С.А. Критическая ишемия нижних конечностей и ишемические формы синдрома диабетической стопы. Москва, 2017; 120.
4. Ng J.J., Papadimas E., Dharmaraj R.B. Assessment of flow after lower Extremity Endovascular Revascularisation: A Feasibility Study Using Time Attenuation Curve Analysis of Digital Subtraction Angiography. *EJVES Short Reports*. 2019; 45: 1-6.
5. Higashimori, et al. The relation of 2D perfusion angiography after BTK intervention and wound healing in patient with CLI. *J Endovasc Ther*. 2015; 22(3): 352-5.
6. Manzi M., van den Berg J.C. 2D Perfusion Angiography: A Useful Tool for CLI Treatment. *Endovascular today*. 2015; 14(5): 76-79.
7. Jens S., Marquering H.A., Koelemay M.J., et al. Perfusion angiography of the foot in patients with critical limb ischemia: description of the technique. *Cardiovasc Intervent Radiol*. 2015; 38: 201-205.
8. Hinrichs J.B., Murray T., Akin M., et al. Evaluation of a novel 2D perfusion angiography technique independent of pump injections for assessment of interventional treatment of peripheral vascular disease. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017; 33: 295-301.
9. Капралов А.В. Специальные возможности ангиографического оборудования для проведения процедур на сосудах нижних конечностей. КИНК-2019.
10. Максимов А.В., Макаримов Э.Ш., Глинкин В.В., Фейсханов А.К. Опыт применения двуокиси углерода в ангиографии. *Практическая медицина*. 2015; 1(4): 89.
11. Демин В.В., Долгов С.А., Григорьев А.В. и др. Двадцатилетний опыт клинического применения внутрисосудистого ультразвукового сканирования в многопрофильной клинике. 20 лет отделению рентгенхирургических методов диагностики и лечения ГБУЗ «Оренбургская областная клиническая больница». *Ж. Международный журнал интервенционной кардиоангиологии*. 2016; 1(44): 23-30.
12. Makris G., Little M.W., Patel R. The role of intravascular ultrasound in lower limb revascularization in patients with peripheral arterial disease. *Int Angiol*. 2017; 36(6): 505-516.
13. Rogers R.K., Montero-Baker M., Biswas M., et al. Assessment of foot perfusion: Overview of modalities, review of evidence, and identification of evidence gaps. *Vascular Medicine*. 2020; 25(3): 235-245.
14. Джемилова З.Н., Ситкин И.И., Сергеева С.В. и др. Применение метода флуоресцентной ангиографии в ближнем инфракрасном диапазоне у пациента с сахарным диабетом и критической ишемией нижней конечности. *Сахарный диабет*. 2018; 21(4): 319-324.
15. Misra S., Shishehbor M.H., Takahashi E.A., et al. Perfusion Assessment in Critical Limb Ischemia: Principles for Understanding and the Development of Evidence and Evaluation of Devices. *Circulation*. 2019; 140(12): 657-672.
16. Fukunaga M., Fujii K., Kawasaki D., et al. Vascular Flow Reserve Immediately After Infrapopliteal Intervention as a Predictor of Wound Healing in Patients With Foot Tissue Loss. *Circulation: Cardiovascular Interventions*. 2015; 8: e002412.

References

1. Sharafeev AZ, Sitdikova DI, Maksimov AV, et al. Modern methods of non-invasive diagnosis of perfusion of critical limb ischemia (literature review). *Diagnosticheskaya i intervencionnaya Radiologiya*. 2020; 3(14): 56-66 [In Russ].
2. Skripnikov AV. Magnetic-resonance and digital angiography in obliterating lesions of lower limb arteries. Dissertatsiya. Moskva, 2014 [In Russ].
3. Mizin AG, Udovichenko OV, Terekhin SA. Critical ischemia of lower limbs and ischemic forms of diabetic foot syndrome. Moskva, 2017; 120 [In Russ].

4. Ng JJ, Papadimas E, Dharmaraj RB. Assessment of flow after lower Extremity Endovascular Revascularisation: A Feasibility Study Using Time Attenuation Curve Analysis of Digital Subtraction Angiography. *EJVES ShortReports*. 2019; 45: 1-6.
5. Higashimori, et al. The relation of 2D perfusion angiography after BTK intervention and wound healing in patient with CLI. *J Endovasc Ther*. 2015;22(3):352-5.
6. Manzi M, van den Berg JC. 2D Perfusion Angiography: A Useful Tool for CLI Treatment. *Endovascular today*. 2015; 14(5): 76-79.
7. Jens S, Marquering HA, Koelemay MJ, et al. Perfusion angiography of the foot in patients with critical limb ischemia: description of the technique. *Cardiovasc Intervent Radiol*. 2015; 38: 201-205.
8. Hinrichs JB, Murray T, Akin M, et al. Evaluation of a novel 2D perfusion angiography technique independent of pump injections for assessment of interventional treatment of peripheral vascular disease. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2017; 33: 295-301.
9. Kapralov AV. Special abilities of angiographic equipment for procedures in arteries of lower limbs. KINK-2019 [In Russ].
10. Maksimov AV, Makarimov ESh, Glinkin VV, Fejskhanov AK. Experience of CO₂ in angiography. *Prakticheskaya medicina*. 2015; 1(4): 89 [In Russ].
11. Demin VV, Dolgov SA, Grigor'ev AV, et al. Twenty years of experience in clinical application of intravascular ultrasound scanning in a multidisciplinary clinic. 20th Anniversary of the Department of X-ray Surgical Methods of Diagnosis and Treatment GBUZ «Orenburgskaya oblastnaya klinicheskaya bol'nica». *J International Journal of Interventional Cardioangiologie*. 2016; 1(44): 23-30 [In Russ].
12. Makris G, Little MW, Patel R. The role of intravascular ultrasound in lower limb revascularization in patients with peripheral arterial disease. *Int Angiol*. 2017; 36(6): 505-516.
13. Rogers RK, Montero-Baker M, Biswas M, et al. Assessment of foot perfusion: Overview of modalities, review of evidence, a and identification of evidence gaps. *Vascular Medicine*. 2020; 25(3): 235-245.
14. Dzhemilova ZN, Sitkin II, Sergeeva SV, et al. Near-infrared fluorescence imaging with indocyanine green in diabetic patient with critical limb ischemia: a case report. *Saharniy diabet*. 2018; 21(4): 319-324 [In Russ].
15. Misra S, Shishehbor MH, Takahashi EA, et al. Perfusion Assessment in Critical Limb Ischemia: Principles for Understanding and the Development of Evidence and Evaluation of Devices. *Circulation*. 2019;140 (12): 657-672.
16. Fukunaga M, Fujii K, Kawasaki D, et al. Vascular Flow Reserve Immediately After Infrapopliteal Intervention as a Predictor of Wound Healing in Patients With Foot Tissue Loss. *Circulation: Cardiovascular Interventions*. 2015; 8: e002412.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ШАРАФЕЕВ АЙДАР ЗАЙТУНОВИЧ [ORCID: 0000-0002-3483-7103]

*д.м.н., профессор ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»,
зав. отд. РХМДиЛ Хадасса Медикал Москва*

СИТДИКОВА ДИАНА ИЛЬДАРОВНА [ORCID: 0000-0001-5719-5812]

врач отд. РХМДиЛ ГБУЗ МО «Сергиево-Посадская районная больница»

ХАЛИРАХМАНОВ АЙРАТ ФАЙЗЕЛГАЯНОВИЧ [ORCID: 0000-0001-7758-3935]

к.м.н., ст. преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

ТОКАРЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ [ORCID: 0000-0002-3501-3288]

*врач отд. ОРХМДиЛ СПбГБУЗ «Городская Покровская больница»,
ФГБВОУ «Военно-Медицинская академия им. С.М. Кирова»*

Конфликт интересов, информация о клинической базе и финансировании

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
