

УДК 616-005.4:616-71

DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-1-37-43

В. П. ЗОЛОТНИЦКАЯ, В. И. АМОСОВ, А. Я. БЕДРОВ,
А. А. МОИСЕЕВ, А. П. ЛИТВИНОВ, Р. Б. ПЕРЛОВ

Оценка артериального кровотока в микроциркуляторном русле нижних конечностей у пациентов с хронической ишемией методом ОФЭКТ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8
E-mail: zolotnitskaja68@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 29.12.23 г.; принята к печати 29.01.24 г.

Резюме

Введение. Облитерирующий атеросклероз сосудов нижних конечностей – хроническое неуклонно прогрессирующее заболевание артерий ног, с высоким риском ампутации конечности и смерти. Своевременная диагностика и адекватное лечение помогут замедлить прогрессирование болезни, надолго сохранить хорошее самочувствие пациента и избежать осложнений. **Цель.** Исследовать артериальный кровоток в микроциркуляторном русле нижних конечностей, качественно и количественно оценить нарушение перфузии в функционально значимых мышцах нижних конечностях. **Материал и методы.** Радионуклидное исследование магистральных сосудов и микроциркуляторного русла нижних конечностей выполнено 36 пациентам, пяти – в динамике с диагнозом «облитерирующий атеросклероз нижних конечностей». Введение радиофармпрепарата (РФП) проводилось через катетер, установленный эндоваскулярно над бифуркацией аорты при выполнении пациентам аортоартериографии сосудов нижних конечностей, что также предполагает внутриартериальное введение рентгеноконтрастного препарата. **Результаты.** При обработке результатов радиологического исследования оценивали визуальное распределение РФП в сосудистом русле нижних конечностей, выявляли асимметрию в накоплении РФП в процентах, количественно определяли накопление импульсов РФП в проекции мышц таза, бедер, голеней и стоп, определяя в процентах уровень накопления в каждой из интересующих зон. Полученные результаты радиологического исследования и прямой аортоартериографии нижних конечностей с определением уровня стеноза артерий подтверждали ишемическую природу болевого синдрома, при контрольном исследовании эффективность лечения сопровождалась улучшением перфузионных показателей. **Выводы.** Внутриартериальное введение РФП позволяет оценить состояние периферического артериального русла, что оказывает значительную роль в прогнозе атеросклероза нижних конечностей и результатов реконструктивно-восстановительных вмешательств. Метод дает возможность гибридного топометрического сопоставления артерио-перфузионных карт для диагностики, планируемого лечения и контроля за его результатами в динамике.

Ключевые слова: атеросклероз, хроническая ишемия, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, ОФЭКТ, реваскуляризация нижних конечностей

Для цитирования: Золотницкая В. П., Амосов В. И., Бедров А. Я., Моисеев А. А., Литвинов А. П., Перлов Р. Б. Оценка артериального кровотока в микроциркуляторном русле нижних конечностей у пациентов с хронической ишемией методом ОФЭКТ. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2024; 23(1): 37–43. Doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-1-37-43.

UDC 616-005.4:616-71

DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-1-37-43

V. P. ZOLOTNITSKAYA, V. I. AMOSOV, A. Ya. BEDROV,
A. A. MOISEEV, A. P. LITVINOV, R. B. PERLOV

Assessment of arterial blood flow in the microvasculature of the lower extremities in patients with chronic ischemia using a single-photon emission computed tomography (SPECT)

Pavlov University, Saint Petersburg, Russia
6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, Russia, 197022
E-mail: zolotnitskaja68@yandex.ru.

Received 29.12.23; accepted 29.01.24

Summary

Introduction. Obliterating atherosclerosis of the lower extremity vessels is a chronic, steadily progressive disease of the leg arteries, with a high risk of limb amputation and death. Timely diagnosis and adequate treatment will help slow

the disease progression, maintain the patient's good health for a long time and avoid complications. *Purpose.* To study arterial blood flow in the microvasculature of the lower extremities, to qualitatively and quantitatively assess perfusion disturbances in functionally significant muscles of the lower extremities. *Material and methods.* Radionuclide examination of the main vessels and microvasculature of the lower extremities was performed in 36 patients, five of them with a diagnosis of lower extremity obliterating atherosclerosis in dynamics. Radiopharmaceuticals was administered through a catheter installed endovascularly above the aortic bifurcation when patients underwent arteriography of the lower extremity vessels, which also involves intra-arterial administration of a radiopaque contrast agent. *Results.* When processing the radiological study results, we visually assessed the distribution of radiopharmaceuticals in the vascular bed of the lower extremities, identified the asymmetry in the accumulation of radiopharmaceuticals as a percentage, quantified the accumulation of radiopharmaceutical pulses in the projection of the pelvic, thigh, leg and foot muscles, determining the level of accumulation in each of the areas of interest as a percentage. The radiological study results and direct aortic arteriography of the lower extremities with determination of the level of arterial stenosis confirmed the ischemic nature of the pain syndrome; and in the control study, the effectiveness of treatment with an improvement in perfusion parameters. *Conclusions.* Intra-arterial administration of radiopharmaceuticals makes it possible to assess the condition of the peripheral arterial bed, which has a significant role in the prognosis of lower extremity atherosclerosis and the results of reconstructive interventions. The method makes possible a hybrid topometric comparison of arterio-perfusion maps for diagnosis, planned treatment and monitoring of its results in dynamics.

Keywords: atherosclerosis, chronic ischemia, single-photon emission computed tomography, SPECT, lower extremity revascularization

For citation: Zolotnitskaya V. P., Amosov V. I., Bedrov A. Ya., Moiseev A. A., Litvinov A. P., Perlov R. B. Assessment of arterial blood flow in the microvasculature of the lower extremities in patients with chronic ischemia using a single-photon emission computed tomography (SPECT). *Regional hemodynamics and microcirculation.* 2024;23(1):37–43. Doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-1-37-43.

Введение

Облитерирующий атеросклероз сосудов нижних конечностей – заболевание, которым страдает 2–3 % населения России, преимущественно мужчины старше 50 лет. Ежегодно регистрируется от 500 до 1000 новых случаев на 1 млн человек [1]. Атеросклероз периферических артерий нижних конечностей значительно снижает качество жизни пациентов, при отсутствии лечения приводит к формированию длительно незаживающих язв, атрофии мускулатуры и развитию гангрены, сопровождается высоким риском ампутации конечности. По данным отечественной и зарубежной литературы, около 90 % всех ампутаций выполняются по поводу прогрессирования хронической критической ишемии сосудов нижних конечностей [2]. Без оперативного вмешательства 40 % пациентов теряют конечность в первые 6 месяцев от начала заболевания, в течение первого года эта цифра возрастает до 90 %, а смертность в течение первого полугодия может достигать 20 % [3, 4]. При проведении реконструктивно-восстановительных вмешательств явления критической ишемии могут быть купированы у 87,8 % больных, позволяя сохранить конечность у 94,4 % пациентов на сроке наблюдения 1 год [5]. При этом результаты оперативного вмешательства во многом зависят от состояния периферического сосудистого русла у пациента.

Нарушение перфузии нижних конечностей является ключевым звеном патогенеза, которое обуславливает осложнения у пациентов с хронической ишемией сосудов нижних конечностей [6, 7]. Поэтому можно уверенно сказать, что оптимальным решением проблемы хронической ишемией, угрожающей потерей конечности (ХИУПК), является своевременная реваскуляризация [8]. Для доказательства данной тактики и обоснования повышения числа реконструктивных операций необходима объективная оценка эффективности выполнения оперативного лечения. В настоящее время для объективной оценки сосудов нижних конечностей используют ультразвуковое дуплексное скани-

рование, дигитальную субтракционную ангиографию, рентгеновскую компьютерную томографическую ангиографию и др. Все эти методы исследуют преимущественно магистральный кровоток, практически не затрагивая микроциркуляторное русло.

Радионуклидные методы визуализации – однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) делают оценку перфузии ценным инструментом для определения прогрессирования заболевания и эффективности терапии [9, 10]. Оба метода, хотя и обеспечивают более высокую чувствительность, имеют более низкое пространственное разрешение в сравнении с компьютерной томографией (КТ) и магнитно-резонансной томографией (МРТ). ПЭТ позволяют исследовать и оценить перфузию и оксигенацию тканей, метаболизм, биологические процессы, в том числе ангиогенез [9]. ОФЭКТ является более доступным и менее дорогим методом, позволяющим оценить состояние кровообращения в нижних конечностях на этапах планирования и оценки лечения. Существующие лучевые методики оценки состояния микроциркуляции и жизнеспособности тканей позволяют решить эту задачу.

Цель исследования – качественно и количественно оценить нарушение перфузии в функционально значимых мышцах нижних конечностей с помощью выполнения новой методики оценки артериального кровотока в микроциркуляторном русле нижних конечностей.

Материал и методы исследования

В период с 2022 по 2023 г. проведены исследования кровообращения в артериально-капиллярном русле нижних конечностей 36 пациентам (30 мужчин, возраст $57,6 \pm 6,7$ лет, 6 женщин, возраст $59,9 \pm 7,6$ лет), проходившим обследование и лечение в отделении сосудистой хирургии НИИ хирургии и неотложной медицины ПСПбГМУ им. акад. И. П. Павлова в связи с наличием клинической картины хронической

ишемии нижних конечностей. Пяти пациентам проведено исследование кровообращения в нижних конечностях через полгода после операции по реваскуляризации нижних конечностей.

Пациентам выполнялось внутриаартериальное введение радиофармпрепарата Макротех 99m-Tc в дозе 3,4 МБк на 1 кг массы тела пациента через катетер, установленный эндоваскулярно над бифуркацией аорты. Для этого проводилась пункция и катетеризация магистральной артерии по Селдингеру (методика катетеризации сосудов по проводнику), предпочтительнее через лучевую артерию. Диагностический катетер проводили до бифуркации аорты, выполняли ангиографию нижних конечностей, по окончании которой через тот же катетер вводили медленно РФП в небольшом объеме (1–2 мл). Увеличение количества препарата, в сравнении с рекомендациями по применению для диагностики заболеваний легких, предложенными ООО «Диамед», обусловлено увеличением площади обследования и выбрано эмпирическим путем. Препарат фиксируется в микрососудах артериального русла (не менее 95 % макроагрегатов имеют размер от 10 до 90 мкм) нижних конечностей, тем самым позволяя визуализировать перфузию органа в течение 2–3 часов после его введения при проведении ОФЭКТ в режиме сканирования всего тела.

Исследование выполняли на однофотонном эмиссионном компьютерном томографе (*Philips Forte*, США) в течение 2 часов после введения РФП в режиме сканирования всего тела, 10 см в минуту, коллиматор средней энергии. При сканировании получали картину распределения радиоиндикатора в органах и тканях в передней и задней проекциях. При обработке результатов исследования оценивали визуальное распределение РФП в сосудистом русле нижних конечностей и получали количественную информацию накопления импульсов РФП по передней и задней проекции в окне Patient info, number of counts (общее накопление РФП в области всего тела). В режиме ROI вводили зоны интереса на каждую из нижних конечностей: в проекции бедер, голени и стоп, выявляя асимметрию в накоплении РФП в процентах. Для того, чтобы оценить микроциркуляцию в мышцах нижних конечностей, например *m. tibialis anterior* и *m. digitorum longus*, как наиболее функционально значимых для выполнения их физиологической функции, вводили зоны интереса на область этих мышц, получали информацию в виде накопления импульсов РФП и для оценки перфузии в зоне интереса определяли процентное соотношение количества импульсов в зоне интереса к общему количеству импульсов, приходящихся на всю переднюю проекцию. Такие же действия проводили для оценки накопления РФП в *m. gastrocnemius caput laterale*, *m. gastrocnemius caput mediale* по задней проекции.

Относительные противопоказания для выполнения исследования: беременность и лактация.

Статистическая обработка данных проводилась при помощи стандартных пакетов IBM SPSS Statistics для Windows (версия 26.0). Проверка наличия нормального распределения количественных

показателей в выборке проводилась с использованием критерия Шапиро–Уилка. Качественные данные представлены в виде абсолютного числа и процента. Оценка значимости различий количественных показателей для трех и более сравнений двух показателей проведена с использованием непараметрического U-критерия Манна–Уитни. Исследование выполнено в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (2013).

Результаты исследования и их обсуждение

В нашем исследовании в группе оперированных пациентов ($n=5$), при исследовании кровообращения в нижних конечностях удалось добиться положительных результатов у 5 человек (100 %).

Клинический пример. Больной Г., 71 год, поступил в клинику с жалобами на боль в нижних конечностях, больше слева, по типу низкой перемежающейся хромоты при ходьбе на расстояние 100–150 метров. Данные жалобы беспокоят на протяжении 3 лет. Пациент амбулаторно обращался за помощью к сосудистому хирургу, получал консервативную терапию без положительного эффекта. По данным прямой аортоартериографии нижних конечностей установлено: слева – стеноз 75 % внутренней подвздошной артерии, стеноз 90 % глубокой бедренной артерии, окклюзия поверхностной бедренной артерии в дистальной трети, окклюзия задней и передней большеберцовой артерии; справа – окклюзия поверхностной бедренной и передней большеберцовой артерии. Лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ) слева – 0,56, справа – 0,83 (разница 32,6 %). По результатам ОФЭКТ (рис. 1) получены следующие данные, указывающие на разницу накопления РФП (в %) в мышцах нижних конечностей (табл. 1).

Полученная разница показателей ЛПИ при проведении прямой аортоартериографии (32,6 %) и показателей разницы накопления РФП в мышцах нижних конечностей достоверно выше ($p<0,05$), что свидетельствует о разнице между магистральным кровотоком и микроциркуляцией. Что в свою очередь свидетельствует о развитии коллатерального кровообращения в микрососудистом русле пораженных атеросклерозом артерий нижних конечностей.

Больному выполнена операция: эндовидеохирургическая поясничная симпатэктомия слева. В послеоперационном периоде пациент отметил улучшение, увеличение дистанции безболевой ходьбы. При контрольной ОФЭКТ через 6 месяцев (рис. 2, табл. 2) после операции получены следующие данные:

В результате проведенного лечения были получены результаты (табл. 3), показывающие положительную динамику микроциркуляции в обеих нижних конечностях, с преобладанием положительных изменений в левой нижней конечности.

При анализе полученных данных обследований 5 пациентов, проведенных до и после эндовидеохирургической поясничной симпатэктомии, были получены результаты (табл. 4), показывающие динамику изменений микроциркуляции в обеих нижних конечностях.

Таким образом, при выполнении комплексного рентгенорадиологического исследования подтверждена ишемическая природа болевого синдрома с

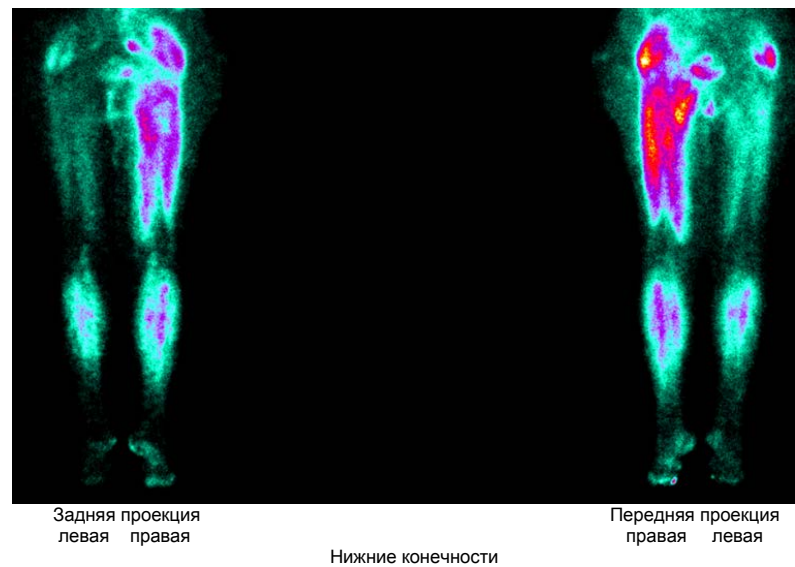


Рис. 1. Распределение РФП в тазовой области и в нижних конечностях пациента Г., 71 год, в передней и задней проекциях, полученное по результатам ОФЭКТ до операции
Fig. 1. Distribution of radiopharmaceuticals in the pelvis and lower extremities of patient G., 71 years old, in the anterior and posterior projections, obtained from the SPECT results before surgery

Показатели накопления РФП в мышцах нижних конечностей до операции, выполнено с помощью ROI в % от всей введенной активности

Table 1			
Indicators of radiopharmaceutical accumulation in the lower extremity muscles before surgery, performed using ROI as a percentage of the total administered activity			
Мышцы	Слева	Справа	Разница в накоплении в мышцах левой и правой нижней конечности, %
m. tibialis anterior	2,10	2,51	16,4
m. digitorum longus	0,26	0,22	15,4
m. gastrocnemius:			
caput laterale	1,28	1,79	28,5
caput mediale	1,44	1,78	19,1

преимущественным поражением левой нижней конечности. При контрольном исследовании подтверждена эффективность лечения с улучшением перфузионных показателей после выполнения операции и купированием явлений низкой перемежающейся хромоты.

Заявленный способ позволяет исследовать артериальный кровоток в микроциркуляторном русле нижних конечностей, качественно и количественно оценивать нарушение перфузии в функционально значимых мышцах нижних конечностей.

В настоящее время для объективной оценки нарушений кровообращения в периферических сосудах нижних конечностей используются ультразвуковое дуплексное сканирование, дигитальная субтракционная ангиография (ДСА), рентгеновская компьютерная томографическая ангиография (КТА), в ряде случаев – магнитно-резонансная томографическая ангиография (МРА). Известные рентгенологические способы диагностики с использованием йодсодержащего контрастного вещества – дигитальная субтракционная ангиография и рентгеновская компьютерная томографическая ангиография имеют ряд недостатков: неудовлетворительная визуализация

эксцентричных стенозов и оценки степени стеноза извилистых сосудов; нет возможности оценки коллатерального кровообращения и микроциркуляторного звена сосудов нижних конечностей; применение йодсодержащего контрастного вещества оказывает токсичное воздействие на эндотелий сосудистой стенки, форменные элементы крови, почки, может вызывать анафилактические реакции; высокая лучевая нагрузка [11]. Широко доступный способ ультразвукового дуплексного сканирования (УЗДС) – относительно недорогой и неинвазивный метод визуализации сосудов. Его преимущество заключается в предоставлении информации об анатомии артерий и кровотоке. Ультразвуковое исследование, особенно в цветном режиме, позволяет также визуализировать коллатеральные сосуды. Недостатки исследования: ограничено костными структурами, ожирением, скоплением воздуха, трудностями оценки просвета кальцифицированных артерий, дуплексное сканирование не позволяет сразу получить изображение артерии на всем протяжении [12]. Магнитно-резонансная ангиография является неинвазивным методом диагностики, позволяющим визуализировать артерии нижних конечностей, в том числе – дистальные их

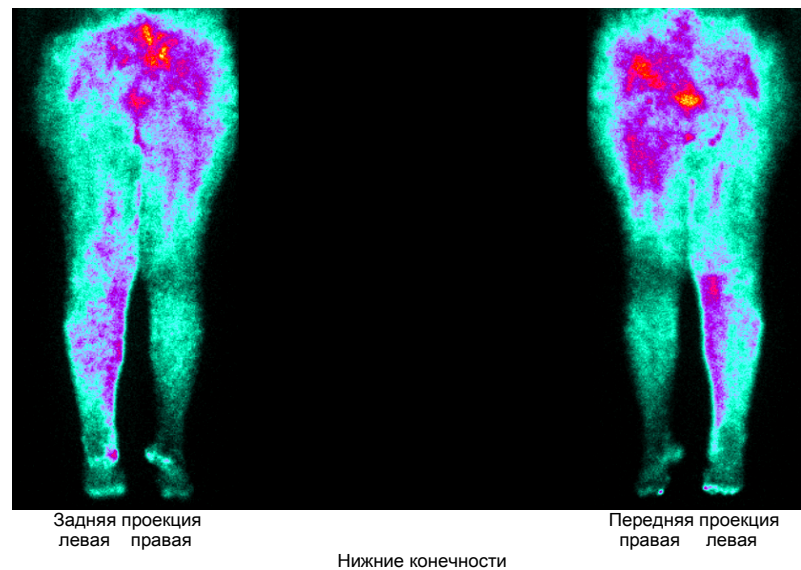


Рис. 2. Распределение РФП в тазовой области и в нижних конечностях пациента Г., 71 года, в передней и задней проекциях, полученное по результатам ОФЭКТ после операции
Fig. 2. Distribution of radiopharmaceuticals in the pelvis and lower extremities of patient G., 71 years old, in the anterior and posterior projections, obtained from the SPECT results after surgery

Таблица 2

Показатели накопления РФП в мышцах нижних конечностей после операции, выполнено с помощью ROI в % от всей введенной активности

Table 2

Indicators of radiopharmaceutical accumulation in the lower extremity muscles after surgery, performed using ROI as a percentage of the total administered activity

Мышцы	Слева	Справа	Разница в накоплении в мышцах левой и правой нижней конечности, %
m. tibialis anterior	3,11	2,76	11,3
m. digitorum longus	1,27	0,97	23,7
m. gastrocnemius: caput laterale	2,39	2,16	9,7
caput mediale	2,09	2,10	0,5

Таблица 3

Показатели накопления РФП в мышцах нижних конечностей через 6 месяцев операции, выполнено с помощью ROI в % от всей введенной активности

Table 3

Indicators of radiopharmaceutical accumulation in the lower extremity muscles 6 months after the surgery, performed using ROI as a percentage of the total administered activity

Мышцы	Динамика (%)	
	слева	справа
m. tibialis anterior	+32,5	+9,1
m. digitorum longus	+79,6	+77,3
m. gastrocnemius caput laterale	+46,5	+17,2
caput mediale	+31,2	+15,3

отделы. Разрешающая способность МРА с контрастированием гадолинием приближается к ДСА. Метод позволяет оценить тканевую перфузию и оксигенацию тканей, при выполнении исследования требует провокации реактивной гиперемии. Имеет ряд недостатков: сложен при измерении перфузии в покое, нельзя выполнять пациентам с водителями ритма или металлическими имплантатами, с клаустрофобией,

с тяжелой почечной недостаточностью (гадолиний нефротоксичен); не позволяет визуализировать кальциноз артерий, что может ограничить ее применение при выборе места для наложения анастомоза; быстрое попадание контраста в венозную сеть не позволяет оценить периферические сосуды; использование 2D времяпролетной бесконтрастной МРА, полезной для оценки стенозов и окклюзии артерий

Таблица 4

Показатели накопления РФП в мышцах нижних конечностей 5 пациентов (выполнено с помощью ROI в % от всей введенной активности) до и после проведенного оперативного лечения

Table 4

Indicators of radiopharmaceutical accumulation in the lower extremity muscles of five patients (performed using ROI as a percentage of the total administered activity), before and after surgical treatment

Мышцы	Динамика (%) (M+m)	
	слева	справа
m.tibialis anterior	40,7+12,6	31,4+17,3
m.digitorum longus	62,3+17,5	57,3+18,4
m.gastrocnemius		
caput laterale	51,5+14,9	27,8+16,7
caput mediale	41,3+18,1	32,3+16,2

голени и стопы, значительно увеличивает время исследования [13]. В послеоперационном периоде современные методы диагностики, используемые для определения успешности реваскуляризации, ограничены в применении, особенно у пациентов с несжимаемыми артериями и локальным отеком. Все они оценивают магистральный кровоток, но не мышечную перфузию.

Применяемый в настоящее время способ оценки кровообращения в нижних конечностях при помощи сцинтиграфии с остеотропным радиофармпрепаратом (например, препарат Пирфотех, ООО «Диамед», Москва) позволяет визуализировать проходимость магистральных артерий и оценить состояние общей перфузии в нижних конечностях [1, 10, 14]. Однако при выполнении этого исследования невозможно изолированно исследовать артериальный кровоток в микрососудистом русле нижних конечностей; нет возможности визуализации коллатерального артериального кровообращения. Но для объективного состояния кровообращения в артериальном русле нижних конечностей необходима оценка дефицита перфузии, в соответствии с тяжестью заболевания и степенью развития коллатералей [15].

Заявленный способ исследования кровообращения в периферическом артериальном микроциркуляторном русле нижних конечностей, включающий внутриартериальное введение через катетер, установленный эндоваскулярно над бифуркацией аорты, РФП Макротех 99mTc в дозе 3,4 МБк на кг массы тела пациента, и последующее выполнение однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) в режиме сканирования всего тела позволяет провести оценку перфузии в нижних конечностях [16].

1. Одновременно выполняется ангиография сосудов нижних конечностей путем внутриартериального введения рентгеноконтрастного препарата с последующим введением радиофармацевтического препарата Макротех-Тс-99м, с одновременной оценкой магистрального периферического кровотока и перфузии в нижних конечностях.

2. Одновременно качественно и количественно оценивается степень окклюзии артерий и дефицит перфузии в исследуемых зонах.

3. Способ предполагает возможность гибридного топометрического сопоставления ангио-перфузи-

онных карт для диагностики, планируемого лечения и контроля за его результатами в динамике.

Заявленный метод диагностики может быть дополнительным методом для контроля успеха хирургического лечения.

Заключение

Оценка периферического русла играет значительную роль в прогнозе атеросклероза нижних конечностей и результатов реконструктивно-восстановительных вмешательств. Применяемые в настоящее время методы диагностики преимущественно исследуют магистральный кровоток. Необходимы дальнейшие исследования для поиска новых оптимальных методов оценки микроциркуляции у пациентов с заболеваниями периферических артерий.

Перспективы применения нового метода диагностики: в настоящее время изучение перфузии играет важную роль в разработке и тестировании препаратов, предназначенных для улучшения микроциркуляции. Например, представленный способ оценки артериального русла нижних конечностей может быть использован для оценки эффективности лечения заболеваний периферических артерий препаратами группы статинов, простагландинов, генноотерапевтическими препаратами [17]. Целесообразность использования метода в рутинной клинической практике и в клинических испытаниях обусловлена практическими преимуществами метода, такими как скорость, низкая цена и наличие техники в большинстве многоцентровых учреждений.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Литература / References

1. Козловский Б.В., Михайлов И.П., Исаев Г.А. и др. Оценка эффективности оперативного лечения больных с хронической критической ишемией нижних конечностей в стадии трофических осложнений // НМП. – 2020. – Т. 9, № 4. – С. 545–550. [Kozlovsky BV, Mikhailov IP, Isaev GA, Kudryashova NE, Leshchinskaya OV. Evaluation of the effectiveness of surgical treatment of patients with chronic critical ischemia of the lower extremities in the stage of trophic complications. EMC. 2020;9(4):545-550. (In Russ.)]. Doi: 10.23934/2223-9022-2020-9-4-545-550.

2. Хамдамов Б.З., Тешаев Ш.Ж., Хамдамов И.Б. Усовершенствованный способ ампутации на уровне голени при тяжелых

- формах синдрома диабетической стопы // *Опер. хир. и клин. анат.* – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 37–40. [Khamdamov BZ, Teshayev ShZh, Khamdamov IB. Improved method of amputation at shin level in severe forms of diabetic foot syndrome. *Russ J Oper Surg Clin Anat.* 2020;4(2):37–40. (In Russ.)]. Doi: 10.17116/operhirurg2020402137.
3. Norgen L, Hiatt WR, Dorandy JA, Nehler MR, Harris KA, Fowkes FG. Inter-Society Consensus for the Management of Peripheral Arterial Disease (TASC II). *J Vasc Surg.* 2007;45(SupplS):S5–S67. Doi: 10.1016/j.jvs.2006.12.037.
4. Conte MS, Bradbury AW, Kolh P, White JV, Dick F, Fitridge R et al. Global vascular guidelines on the management of chronic limb-threatening ischemia. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2019;58(1S):S1–S109.e33. Doi: 10.1016/j.ejvs.2019.05.006.
5. Калинин Р.Е., Сучков И.А., Мжаванадзе Н.Д. и др. Перспективные методы исследования перфузии у пациентов с атеросклерозом периферических артерий // *Ангиол. и сосуд. хир.* – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 32–38. [Kalinin RE, Suchkov IA, Mzhavanadze ND, Klimentova EA, Ncheye AF. Promising methods of studying perfusion in patients with atherosclerosis of peripheral arteries. *Angiol Vasc Surg.* 2018;24(3):32–38. (in Russ.)].
6. Отдаленные результаты лечения пациентов с критической ишемией конечностей / Максимов А.В., Гайсина Э.А., Ситдикова Д.И., Нуретдинов Р.М. // *Практ. мед.* – 2016. – № 4–1. – С. 120–122. [Maksimov AV, Gaisina EA, Sitdikova DI, Nuretdinov RM. Long-term results of treatment of patients with critical limb ischemia. *Pract Med.* 2016;(4–1):120–122. (In Russ.)].
7. Waters RE, Terjung RL, Peters KG, Annex BH. Preclinical models of human peripheral arterial occlusive disease: implications for investigation of therapeutic agents. *J Appl Physiol.* 2004;97(2):773–780. Doi: 10.1152/japplphysiol.00107.2004.
8. Алехин Д.И., Фокин А.А. Новый метод лечения хронической ишемии конечностей с преимущественным поражением дистального артериального русла // *Вестн. хир. им. И.И. Грекова.* – 2004. – № 4. – С. 24–28. [Alekhin DI, Fokin AA. A new method for the treatment of chronic limb ischemia with predominant damage to the distal arterial bed. *Bull Surg named after I.I. Grekov.* 2004;(4):24–28. (In Russ.)].
9. Wolfram RM, Budinsky AC, Sinzinger H. Assessment of peripheral arterial vascular disease with radionuclide techniques. *Semin Nucl Med.* 2001;31(2):129–142. Doi: 10.1053/snuc.2001.21267.
10. Золотницкая В.П., Леонтьева Н.В., Талантов С.В. и др. Радионуклидная диагностика в контроле за эффективностью лазеротерапии при заболеваниях сосудов нижних конечностей // *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* – 2002. – Т. 1, № 3. – С. 28–33. [Zolotnitskaya VP, Leontyeva NV, Talantov SV, Andryushina NB, Sedletskaia EYu. Radionuclide diagnostics in monitoring the effectiveness of laser therapy for vascular diseases of the lower extremities. *Regional blood circulation and microcirculation.* 2002;1(3):28–33. (In Russ.)].
11. Ota H, Takase K, Rikimaru H, Rikimaru H, Tsuboi M, Yamada T, Sato A et al. Quantitative vascular measurements in arterial occlusive disease. *Radiographics.* 2005;25(5):1141–1158. Doi: 10.1148/rg.255055014.
12. Visser K, Hunink MG. Peripheral arterial disease: gadolinium-enhanced MR angiography versus color-guided duplex US—a meta-analysis. *Radiology.* 2000;216(1):67–77. Doi: 10.1148/radiology.216.1.r00jl0367.
13. Pollak AW, Norton PT, Kramer CM. Multimodality imaging of lower extremity peripheral arterial disease: current role and future directions. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2012;5(6):797–807. Doi: 10.1161/CIRCIMAGING.111.970814.
14. Лазаренко В.А., Бобровская Е.А., Путинцева Е.В. Микроциркуляторные изменения у больных облитерирующим атеросклерозом при реконструкции аорто-бедренного артериального сегмента // *Вестн. эксперим. и клин. хир.* – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 315–320. [Lazarenko VA, Bobrovskaya EA, Putintseva EV. Microcirculatory Changes in Patients with Arteriosclerosis Obliterans after Aorta Femoral Arterial Reconstruction. *Bull Experim Clin Surg.* 2014;7(4):315–320. (In Russ.)].
15. Duerschmied D, Zhou Q, Rink E et al. Simplified contrast ultrasound accurately reveals muscle perfusion deficits and reflects collateralization in PAD. *Atherosclerosis.* 2009;202(2):505–512. Doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2008.05.046.
16. Патент № RU2808916C1 Российская Федерация, МПК A61F 2/06, A61L 27/26, A61L 27/34, A61L 27/40, A61L 27/50. Способ исследования кровообращения в периферическом артериальном микроциркуляторном русле нижних конечностей: заявл. 26.06.2023 : опубл. 05.12.2023 / Амосов В.И., Золотницкая В.П., Бедров А.Я. и др. [Amosov VI, Zolotnitskaya VP, Bedrov AY et al. Method for studying blood circulation in the peripheral arterial microcirculatory system bed of the lower extremities. Patent RF, no. RU2808916C1, 2023.]
17. Kundi R, Prior SJ, Addison O, Odessa A, Michael Lu, Alice SR, Brajesh KL. Contrast-enhanced ultrasound reveals exercise-induced perfusion deficits in claudicants. *J Vasc Endovasc Surg.* 2017;2(1):1–8. Doi: 10.21767/2573-4482.100041.

Информация об авторах:

Золотницкая Валентина Петровна – д-р биол. наук, старший научный сотрудник НКЦ лучевой диагностики и лучевой терапии, ПСПбГМУ им. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: zolotnitskaja68@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-7982-3805.

Амосов Виктор Иванович – д-р мед. наук, профессор, зав. кафедры рентгенологии и радиационной медицины, ПСПбГМУ им. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vikt-amosov@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1888-277X.

Бедров Александр Ярославович – д-р мед. наук, зав. отделением сосудистой хирургии, ПСПбГМУ им. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: abedrov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8382-1127.

Моисеев Алексей Андреевич – канд. мед. наук, ассистент кафедры хирургии госпитальной с клиникой, ПСПбГМУ им. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: moiseev85@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9923-4688.

Литвинов Андрей Петрович – зав. радиологическим отделением научно-клинического центра лучевой диагностики, ПСПбГМУ им. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: apetrovich@me.com, ORCID: 0000-0002-7095-1413.

Перлов Роман Борисович – врач-хирург 4 хирургического отделения (неотложной хирургии), ПСПбГМУ им. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: romanperlov8@mail.ru, ORCID: 0009-0004-4834-3536.

Authors information

Zolotnitskaya Valentina P. – Doctor of Sciences in Biology, Senior Researcher, Research and Clinical Center for Radiation Diagnostics and Radiation Therapy, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: zolotnitskaja68@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-7982-3805.

Amosov Victor I. – MD, Professor, Head, Department of Radiology and Radiation Medicine, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: vikt-amosov@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1888-277X.

Bedrov Alexandr Ya. – MD, Head, Department of Vascular Surgery, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: abedrov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8382-1127.

Moiseev Alexey A. – Candidate of Medical Sciences (PhD), Assistant, Department of Hospital Surgery with the Clinic, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: moiseev85@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9923-4688.

Litvinov Andrey P. – Head, Radiological Department, Research and Clinical Center for Radiation Diagnostics, Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: apetrovich@me.com, ORCID: 0000-0002-7095-1413.

Perlov Roman B. – Surgeon, 4th Surgical Department (Emergency Surgery), Pavlov University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: romanperlov8@mail.ru, ORCID: 0009-0004-4834-3536.