

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ ДОППЛЕРОВСКОЙ ФЛОУМЕТРИИ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ АРТЕРИАЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ

A MODERN APPROACH TO INTERPRETATION LASER DOPPLER FLOWMETRY DATA IN CHRONIC ARTERIAL INSUFFICIENCY

**N. Barkhatova
I. Barkhatov
K. Borisyuk
E. Barkhatova**

Summary. The article presents the results of a comparative study of skin blood flow in chronic arterial insufficiency of the lower extremities using spectrometry, laser Doppler flowmetry and clinical and morphological comparison of their results. The study was conducted to simplify the interpretation of the obtained graphic and digital indicators of wavelet analysis of the frequencies of regulatory mechanisms and phase portraits of microcirculation for use in clinical practice. The result of the work was the identification of 4 main types of microcirculation state: normal circulation, microvascular spasm, stasis, and blood stagnation with maximum simplification of the assessment of the type of violations due to the graphical presentation of research results and the original alphanumeric code for the type of regulation of tissue perfusion. The use of the proposed technology makes it possible to simplify the interpretation of LDF-metry data in the practice of a doctor and use the technique for adequate selection of systemic angiotropic therapy and assessment of its effectiveness.

Keywords: chronic arterial insufficiency, laser Doppler flowmetry, microcirculation.

Бархатова Наталья Анатольевна

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный
медицинский университет», Минздрав России
barhatova.2020@mail.ru

Бархатов Игорь Викторович

кандидат медицинских наук, заведующий отделением
ультразвуковой диагностики, ГАУЗ «Областная
клиническая больница №3», г. Челябинск
ig3489032@yandex.ru

Борисюк Кирилл Андреевич

врач-хирург, МАУЗ ОТКЗ Городская клиническая
больница №1, г. Челябинск
icewater@mail.ru

Бархатова Екатерина Игоревна

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный
медицинский университет», Минздрав России
barhatova_katya_75@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты сравнительного исследования кожного кровотока при хронической артериальной недостаточности нижних конечностей с помощью спектрометрии, лазерной доплеровской флоуметрии и клинко-морфологического сопоставления их результатов. Исследование проведено с целью упрощения интерпретации полученных графических и цифровых показателей вейвлет-анализа частот регуляторных механизмов и фазовых портретов микроциркуляции для использования в клинической практике. Результатом работы стало выделение 4 основных типов состояния микроциркуляции: нормоциркуляция, спазм микрососудов, стаз и застой крови с максимальным упрощением оценки типа нарушений за счёт графического представления результатов исследований и оригинального буквенно-цифрового кода типа регуляции перфузии тканей. Применение предложенной технологии позволяет упростить интерпретацию данных ЛДФ-метрии в практической деятельности врача и использовать методику для адекватного подбора системной ангиотропной терапии и оценки её эффективности.

Ключевые слова: хроническая артериальная недостаточность, лазерная доплеровская флоуметрия, микроциркуляция.

Патология сосудистого русла сохраняет лидирующие позиции по частоте встречаемости и причинам смертности в мире. Сахарный диабет, атеросклероз, системные заболевания сосудистой стенки с вторичными стено-окклюзионными поражениями становятся причиной вторичных некротических изменений конечностей и являются одной из причин инвалидизации. По этой причине вопросы ранней диагностики данной патологии и адекватная компенсация имеющихся нарушений является приоритетным направлением

современной клинической практики [1, 6, 7, 8]. Среди способов диагностики патологии артерий широко используют ультразвуковое дуплексное сканирование, МСКТ-ангиографию, МР-ангиографию, которые позволяют оценить степень нарушений магистрального кровотока. В то же время причиной вторичных трофических нарушений конечностей нередко становятся изменения тканевой перфузии на фоне дисрегуляции или недостаточности микроциркуляторного русла. Нередко изменения трофики наблюдаются в раннем послеопера-

ционном периоде после открытых и эндоваскулярных методов реваскуляризации, что требует своевременной диагностики и существенно ухудшает прогноз [8, 9, 10].

С разработкой и внедрением методики лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) и спектрометрии появилась возможность оценки микроциркуляции, оксигенации тканей и резервных возможностей организма, что существенно расширило спектр направлений терапии [3, 5]. Методика лазерной доплеровской флоуметрии позволяет оценить кожный кровоток и его функциональные характеристики, включающие параметры кровенаполнения тканей и его изменение во времени, участие и вклад целого комплекса регуляторных систем в состояние тонуса микрососудов, объёма перфузии и скорости движения крови по капиллярной системе в исследуемой части организма [2, 4]. Несмотря на широкий спектр возможностей данного диагностического метода широкое внедрение он не получает, так как имеет ряд сложностей и нюансов интерпретации полученных данных, а также по мнению ряда исследователей имеет низкую степень «повторяемости» и «воспроизводимости» результата, в связи с быстрой динамикой изменения параметров перфузии тканей. Определённую роль в ограниченном использовании метода играет необходимость наличия более глубоких познаний нормальной и патологической физиологии микроциркуляции [4, 5]. Быстрая динамика показателей имеет и свою положительную сторону, так как метод является более чувствительным при изучении ответной реакции микроциркуляторного русла на рефлекторные и лекарственные воздействия. Данная методика в руках профессионала позволяет более «тонко» настроить компоненты терапии и оценить воздействие лекарственных препаратов или иных методов улучшения кровотока на ранних этапах лечения.

Для более широкого внедрения методики и упрощения интерпретации данных аппараты оснащены пакетом программ для цифровой обработки полученных показателей, которые основаны на математических принципах прогнозирования поведения нелинейных динамических систем и результат данной обработки имеет не только цифровой вариант, но и графический вейвлет-анализ частот ЛДФ-грамм, двухмерные и трёхмерные фазовые портреты микроциркуляции, что призвано облегчить и упростить оценку и интерпретацию полученных результатов [2, 5]. Учитывая зависимость показателей микроциркуляции от анатомической области и состояния системной и местной гемодинамики сохраняют актуальность исследования, направленные на сопоставление клиники и результатов ЛДФ-грамм с максимальным упрощением техники интерпретации получаемых данных.

Цель исследования — произвести сопоставление графического отображения состояния микроциркуляции

и регуляции перфузии тканей с клиническими и патоморфологическими проявлениями хронической артериальной недостаточности нижних конечностей.

Материалы и методы исследования

Проведён анализ и клинко-патоморфологическое сопоставление результатов исследования микроциркуляции 194 клинических случаев хронической артериальной недостаточности (ХАН) нижних конечностей на фоне сахарного диабета и атеросклероза. В ходе исследований для оценки микроциркуляции использовали методику лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с помощью аппаратов «Спектротест» (спектрометрия) и ЛАКК-М (ЛДФ-граммы). В ходе спектрометрии («Спектротест») оценивали показатели микроциркуляции: SO_2 (суммарная артериовенозная сатурация крови), $V_{кр}$ (объёмное кровенаполнение тканей) и SO_2 уд.п. (удельное потребление кислорода в тканях). В зависимости от сочетания показателей выделяли 5 типов состояния микроциркуляции: спазм, спастико-атония, застой, стаз и гиперемия.

При получении ЛДФ-грамм с помощью аппарата ЛАКК-М оценивали показатель микроциркуляции (М), среднее квадратичное отклонение (σ) и коэффициент вариации ($K_V = \sigma/M \times 100$). В ходе вейвлет анализа частот ЛДФ-грамм получали данные о степени вклада миогенного (ALF), кардиального (ACF) и дыхательного (АНФ) компонентов регуляции в обеспечение перфузии тканей. Дополнительно рассчитывали индекс эффективности микроциркуляции (ИЭМ = ALF/АНФ + ACF) и внутрисосудистое сопротивление ($BCC = ACF/M$). Для наглядности оценки состояния перфузии тканей использовали вейвлет анализ частот и построение фазовых портретов гемодинамики с помощью цифровой обработки данных, основанных на принципах нелинейной динамики. В отсутствие принятой классификации фазовых портретов, для интерпретации полученных графических данных было произведено их сопоставление с основными вариантами состояния перфузии тканей и лидирующей активностью регуляторных факторов. Результаты проведённого сопоставления легли в основу рабочей классификации визуально-графических типов микроциркуляции кожного кровотока нижних конечностей.

При статистической обработке полученных данных производили расчет средних значений показателей и стандартной ошибки среднего. Оценка достоверности различий абсолютных показателей в группах производили путём расчета критерия Крускала-Уоллиса. При сравнении относительных величин использовали хи-квадрат с поправкой Йетса. Для расчёта критериев использовали пакет программ Microsoft Office Excel для Windows и «Statistica 6». Уровень значимости различий был принят менее 0,05.

Результаты исследований

В ходе лечения у больных с атеросклерозом и диабетической ангиопатией сосудов нижних конечностей исследование микроциркуляции кожных покровов в зоне ишемии сегментов нижних конечностей производили до начала лечения и в ходе консервативной или оперативной реваскуляризации конечностей. Полученные данные спектрометрии позволяли выделить тип нару-

шения перфузии. При этом полученные через короткий промежуток времени (1–2 минуты), практически одновременно, в одной и той же точке кожных покровов показатели спектрометрии и лазерной доплеровской флоуметрии позволяли провести сопоставление полученных показателей микроциркуляции с графическим отображением фазового портрета микроциркуляции и вейвлет анализа частот регуляторных механизмов. При интерпретации преобладания регуляторных меха-

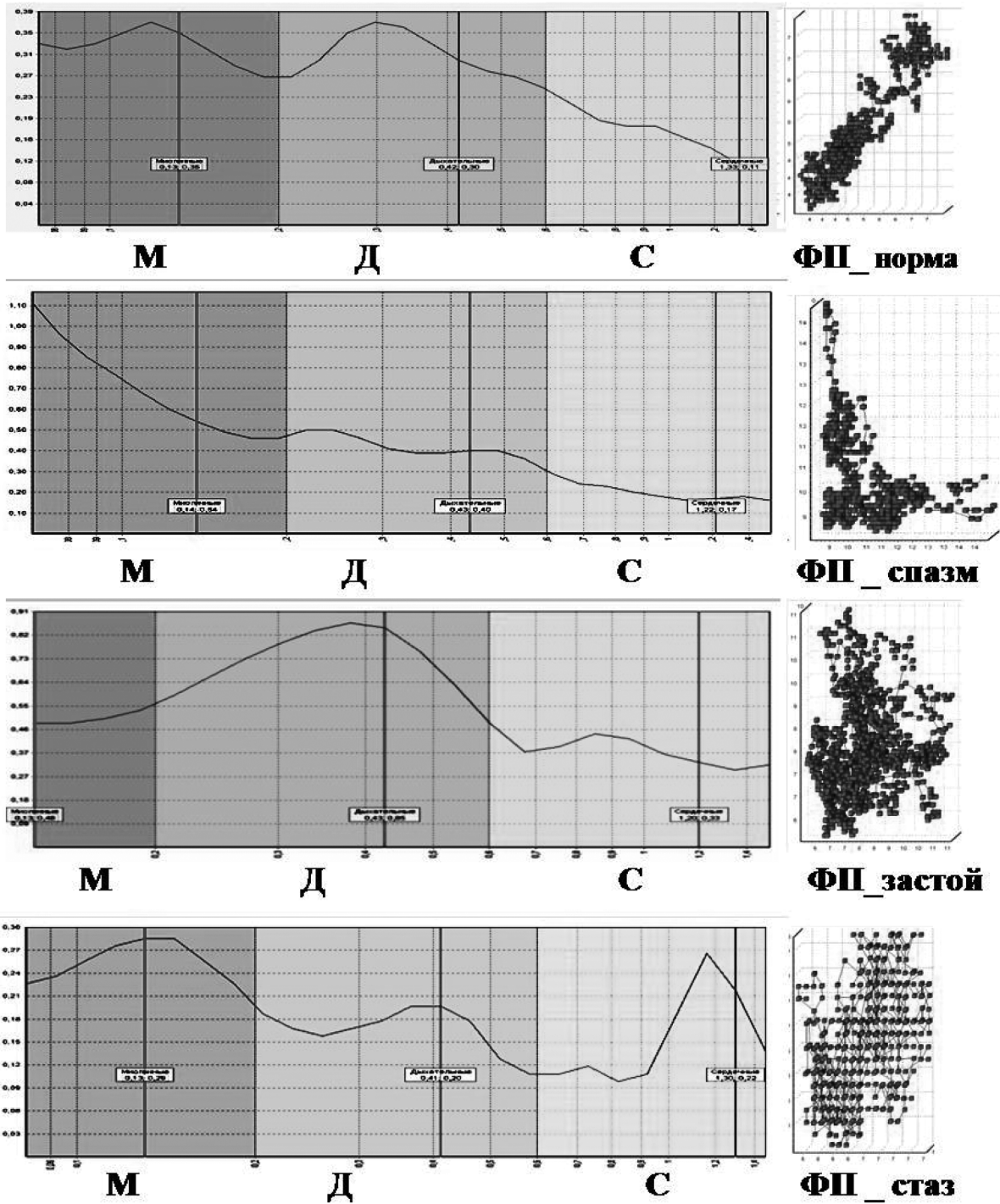


Рис. 1. Варианты фазовых портретов и типов регуляции перфузии тканей

низмов микроциркуляции учитывали превалирование миогенного (М), дыхательного (Д) или кардиального (С) компонентов регуляции перфузии тканей. Для удобства фиксации результатов исследований в документации и протоколах ЛДФ использовали «формулы» типа регуляции с представленными выше буквенными аббревиатурами регуляторных механизмов (МДС) и цифровой индикацией (1, 2, 3) их влияния на перфузию тканей.

В ходе лечения, под действием различных лекарственных средств отмечали соответствующие отклонения в тоне сосудов, объёмном кровенаполнении тканей и в скорости кровотока, что давало возможность при последующем сопоставлении графических и цифровых данных подобрать наиболее частые варианты фазовых портретов и графиков вейвлет анализа для таких состоя-

ний микроциркуляции как стаз, застой, спазм, спастикоатония и нормоциркуляция. При этом вид графического представления данных относили к соответствующему типу микроциркуляции при совпадении с цифровыми показателями нарушения перфузии в 75 % и более случаев ($r > 0,75$ при $p < 0,05$).

В соответствии с полученными данными и примерами математического описания графического изображения портретов [2], нами были выделены 4 типа фазовых портретов (ФП) и типов регуляции перфузии (ТР) (по данным вейвлет — анализа частот регуляторных механизмов) (рис. 1)

Выделенные графические варианты соответствовали следующим типам микроциркуляции: 1) нормо-

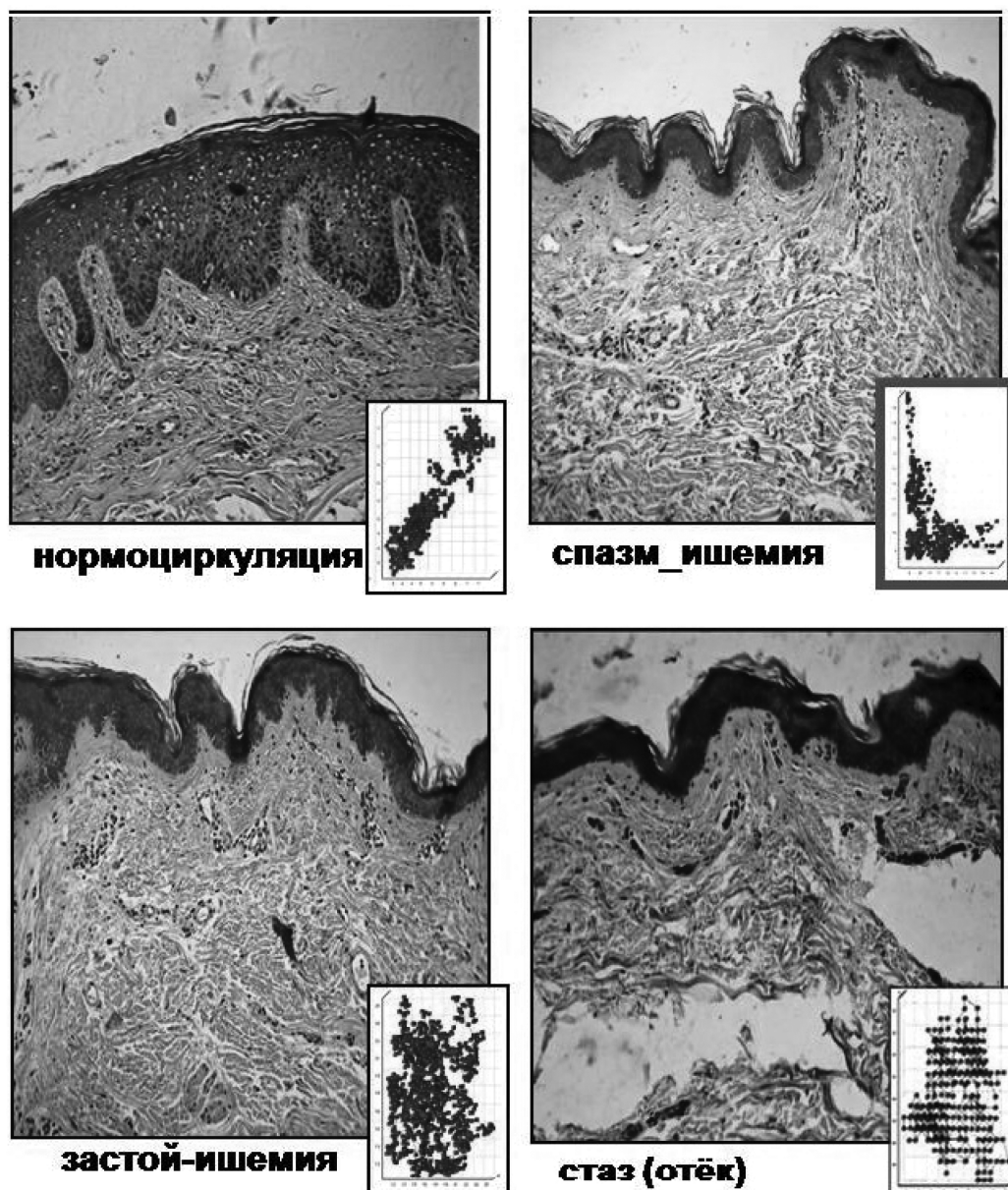


Рис. 2. Сопоставление патоморфологии биоптатов кожи и фазовых портретов микроциркуляции

циркуляция — $TR=M1D1C2$ (тип регуляции кровотока) ФП (фазовый портрет) — хаотический (линейный (норма), расширенный линейный (спастико-атония)) 2) спазм — $TR=M1D2C3$, ФП — предельно-циклический (гиперболический, линейно-гиперболический), 3) застой — $TR=D1M2C2$, ФП — хаотически-циклический (расширенный гиперболический, параболический или линейно-гиперболический), 4) стаз — $TR=M1C2D3$, TR — циклический (сетчатый, петлистый)

Так как полученные результаты исследований и сопоставлений были основаны на оценке параметров микроциркуляции, полученных при спектрометрии и ЛДФ, для объективного подтверждения данных произвели сопоставление клинических симптомов, функциональных показателей перфузии и патоморфологических исследований биотатов кожи (рис. 2).

Биопсию кожи выполняли в ходе выполнения этапных некрэтомий, ампутаций конечностей на различном уровне с предварительным исследованием микроциркуляции с помощью спектрометрии и ЛДФ. Полученные результаты морфологии и данные морфометрии сосочкового слоя кожи показали совпадение типов фазовых портретов микроциркуляции, полученных при ЛДФ и спектрометрии с морфологическими отклонениями кожного кровотока в 85–92 % случаев. Как показала

практика фазовые портреты нормоциркуляции, спазма и спастико-атонии микрососудов соответствовали показателям морфометрии кожи. При этом стаз и застой крови имели отличия фазовых портретов при ишемическом и гиперемическом типах микроциркуляции, что потребовало выделения таких состояний как спазм-ишемия, застой-ишемия или стаз-ишемия (отёк).

Заключение

Применение ЛДФ при ангиопатии нижних конечностей с цифровой обработкой данных и представлением результата в виде буквенно-цифрового кода типа регуляции (ТРМДС) и графического фазового портрета (ФП) микроциркуляции упрощает и ускоряет диагностику варианта нарушения перфузии тканей. Такой подход к диагностике типа отклонения показателей микроциркуляции позволяет не только уточнить характер патологии, но и подобрать наиболее эффективную патогенетически обоснованную терапию ангиотропными средствами, направленную на коррекцию регуляторных механизмов, компенсацию и восстановление перфузии тканей. Так как кожный кровоток является наиболее дистальным уровнем кровоснабжения конечности, его изменения достаточно быстро и точно отражают степень нарушения перфузии тканей и эффект от применяемой терапии

ЛИТЕРАТУРА

1. Бенсман В.М. Хирургия гнойно-некротических осложнений диабетической стопы: Руководство для врачей. М.: ИД «МЕДПРАКТИКА-М», 2015. 496 с.
2. Васильев П.В., Ерофеев Н.П., Шишкин А.Н. Диагностические возможности различных методик оценки спектральных показателей лазерной доплеровской флоуметрии у пациентов с диабетической микроангиопатией // Biomedical Photonics. 2021. Т. 10. № 2. С. 18–24
3. Ипполитов Ю.А., Коровкин В.В., Коровкина А.Н. Оценка поведения нелинейной динамической системы микроциркуляторного русла тканей пародонта в фазовом пространстве при диагностике методом лазерной доплеровской флоуметрии // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. — №2. Публикация 2–19. URL: <http://www.medsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2015-2/5180.pdf>
4. Козлов И.О. Метод анализа спектров доплеровского уширения лазерного излучения в оценке нарушений микрокровотока при сахарном диабете второго типа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4 (342). С. 80–87
5. Крупаткин А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: Колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 496 с.
6. Покровский А.В., Казаков Ю.И., Лукин И.Б. Критическая ишемия конечностей. Инфраингинальное поражение. Тверь: Ред-изд. Центр Твер. Гос. ун-та, 2018. 225 с.
7. Behroozian A., Beckman J.A. Microvascular disease increases amputation in patients with peripheral artery disease // Arterioscler Thromb Vasc Biol. 2020 Mar. V.40 (3). P. 534–540.
8. Conte M.S., Bradbury A.W., Kolh P., White J.V., Dick F., Fitrudge R., Mills J.L., Ricco J.B., Suresh K.R., Murad M.H.; GVG Writing Group. Global vascular guidelines on the management of chronic limb-threatening ischemia // J. Vasc. Surg. 2019. V.69(6S). P. 3–125.
9. Ipema J., Huizing E., Schreve M.A., de Vries J.P.M., Ünlü Ç. Editor's Choice — Drug Coated Balloon Angioplasty vs. Standard percutaneous transluminal angioplasty in below the knee peripheral arterial disease: a systematic review and meta-analysis // Eur J Vasc Endovasc Surg. 2020. V.59(2). P. 265–275.
10. Vriens B., D'Abate F., Ozdemir B.A., Fenner C., Maynard W., Budge J., Carradice D., Hinchliffe R.J. Clinical examination, and non-invasive screening tests in the diagnosis of peripheral artery disease in people with diabetes-related foot ulceration // Diabet Med. 2018. V.35(7). P. 895–902.

© Бархатова Наталия Анатольевна (barhatova.2020@mail.ru); Бархатов Игорь Викторович (ig3489032@yandex.ru); Борисюк Кирилл Андреевич (icewater@mail.ru); Бархатова Екатерина Игоревна (barhatova_katya_75@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»