

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ • ORIGINAL ARTICLES

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ДОППЛЕРОВСКАЯ ФЛОУМЕТРИЯ – МЕТОД ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ
ОЦЕНКИ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОЙ ПЕРФУЗИИ МИОКАРДА У БОЛЬНЫХ ИБСШевченко Ю.Л.¹, Сидоров В.В.², Мамадалиев Д.М.¹,
Миминошвили Л.Г.¹, Ульбашев Д.С.*¹, Мальсагова Д.Б.¹

DOI: 10.25881/20728255_2026_21_2_11

¹ Клиника грудной и сердечно-сосудистой хирургии Святого Георгия
ФГБУ «Национальный медико-хирургический Центр
им. Н.И. Пирогова», Москва² Научно-производственное предприятие «ЛАЗМА», Москва

Резюме. ИБС занимает лидирующие позиции в структуре причин смертности и инвалидизации взрослого населения. В РФ отмечается рост количества хирургических реваскуляризований, что требует совершенствования методов интраоперационного контроля качества коронарного шунтирования. Несмотря на применение ультразвуковой доплеровской флоуметрии как «золотого стандарта» оценки проходимости шунтов, данный метод не позволяет охарактеризовать восстановление перфузии на микроциркуляторном уровне, что особенно важно для профилактики периоперационного инфаркта миокарда. Лазерная доплеровская флоуметрия представляет собой перспективный способ интраоперационного мониторинга микроциркуляции сердца, однако объем опубликованных данных в этой области остается ограниченным, что определяет необходимость дальнейшего изучения особенностей перфузии миокарда при коронарном шунтировании.

Цель. Улучшение результатов коронарного шунтирования путем совершенствования контроля эффективности реваскуляризации методом прямой оценки перфузии миокарда.

Материалы и методы. Для оценки микроциркуляции применялась лазерная доплеровская флоуметрия с определением основных диагностических показателей, таких как M (средняя перфузия крови в системе микроциркуляции), $M_{\text{нутр}}$ (среднее значение нутритивного кровотока или доля кровотока по капиллярам) и $M_{\text{шунт}}$ (часть кровотока по артериоло-венулярным анастомозам). Дефинитивный контроль эффективности шунтирования осуществлялся методом ультразвуковой доплеровской флоуметрии.

Результаты. В большинстве наблюдений увеличение общей перфузии (ΔM) после реваскуляризации миокарда составило 20%. Данный умеренный прирост объясняется исходно низкими показателями микроциркуляции в зонах ишемизированного миокарда. При детальном анализе выявлено, что повышение показателей нутритивного (капиллярного) кровотока ($\Delta M_{\text{нутр}}$) оказалось более выраженным и достигло 60%, что свидетельствует о восстановлении кровоснабжения сердца. В то же время показатели обходного (шунтирующего) кровотока ($M_{\text{шунт}}$) оставались стабильными. Сопоставление показателей лазерной доплеровской флоуметрии с результатами ультразвуковой доплеровской флоуметрии шунтов показало, что прирост средней перфузии наблюдался исключительно при достижении объемной скорости кровотока по шунтам ≥ 25 мл/мин.

Заключение. Проведенное исследование подтверждает эффективность использования лазерной доплеровской флоуметрии для интраоперационной оценки перфузии миокарда при коронарном шунтировании. Дальнейшее совершенствование методики измерений и технического обеспечения позволит рассматривать данный метод в качестве ведущего инструмента контроля качества реваскуляризации миокарда.

Ключевые слова: ИБС, коронарное шунтирование, микроциркуляция, лазерная доплеровская флоуметрия, ультразвуковая доплеровская флоуметрия, эффективность реваскуляризации.

DIRECT LASER DOPPLER FLOWMETRY IS A METHOD
OF INTRAOPERATIVE ASSESSMENT OF MICROCIRCULATORY
PERFUSION OF THE MYOCARDIUM IN PATIENTS WITH
CORONARY ARTERY DISEASEShevchenko Yu.L.¹, Sidorov V.V.², Mamadaliev D.M.¹, Miminoshvili L.G.¹,
Ulbashev D.S.*¹, Malsagova D.B.¹¹ St. George thoracic and cardiovascular surgery clinic Pirogov National Medical
and Surgical Center, Moscow² Scientific and production enterprise "LAZMA", Moscow

Abstract. Coronary heart disease occupies a leading position in the structure of causes of death and disability of the adult population. In the Russian Federation, there is an increase in the number of surgical revascularizations, which requires improved methods of intraoperative quality control of coronary bypass surgery. Despite the use of ultrasound Doppler flowmetry as the "gold standard" for assessing the patency of shunts, this method does not allow us to characterize the restoration of perfusion at the microcirculatory level, which is especially important for the prevention of perioperative myocardial infarction. Laser Doppler flowmetry is a promising method for intraoperative monitoring of cardiac microcirculation, however, the amount of published data in this area remains limited, which determines the need for further study of the features of myocardial perfusion during coronary bypass surgery.

Aim. Improving the results of coronary bypass surgery by improving the control of revascularization effectiveness by direct assessment of myocardial perfusion.

Materials and methods. To assess microcirculation, laser Doppler flowmetry was used to determine the main diagnostic parameters, such as M (average blood perfusion in the microcirculation system), M_{nutr} (average nutritional blood flow or fraction of blood flow through capillaries) and M_{bypass} (part of blood flow through arteriovenous anastomoses). Definitive control of bypass surgery efficiency was carried out by ultrasonic Doppler flowmetry.

Results. In most cases, the increase in total perfusion (ΔM) after myocardial revascularization was 20%. This moderate increase is explained by the initially low microcirculation rates in the areas of ischemic myocardium. A detailed analysis revealed that the increase in nutritional (capillary) blood flow (ΔM_{nutr}) was more pronounced and reached 60%, which indicates the restoration of blood supply to the heart. At the same time, bypass blood flow (M_{bypass}) parameters remained stable. A comparison of laser Doppler flowmetry with the results of ultrasound Doppler flowmetry of shunts showed that an increase in average perfusion was observed only when the volumetric blood flow rate through the shunts was ≥ 25 ml/min.

Conclusion. The study confirms the effectiveness of using laser Doppler flowmetry for intraoperative assessment of myocardial perfusion during coronary bypass surgery. Further improvement of measurement methods and technical support will allow us to consider this method as a leading tool for quality control of myocardial revascularization.

Keywords: coronary artery disease, coronary bypass surgery, microcirculation, laser Doppler flowmetry, ultrasound Doppler flowmetry, revascularization efficiency.

* e-mail: dan103@mail.ru

Введение

Занимая лидирующие позиции в структуре причин стойкой утраты трудоспособности и смертности взрослого населения, ИБС остается наиболее значимой медико-социальной и экономической проблемой здравоохранения во всех странах мира [1–3]. Общая заболеваемость по данной нозологии в РФ в 2024 г. составила 8076,1 на 100 тыс. человек [4].

Прогрессивное развитие методов консервативного и хирургического лечения больных ИБС в последние десятилетия позволило значительно повысить выживаемость и улучшить качество жизни пациентов [5–7]. Вопреки росту числа случаев/дней временной нетрудоспособности с 257942/6979446 в 2023 г. до 265601/7305991 в 2024 г., количество летальных исходов от осложнений ИБС, в том числе инфаркта миокарда (ИМ), уменьшилось с 307,4 на 100 тыс. человек в 2022 г. до 297,9 в 2023 г., и сохраняется общая положительная динамика с 2015 г. (336,6) [4].

В РФ наблюдается устойчивая тенденция к увеличению количества пациентов, оперированных по поводу ИБС (выполнение коронарного шунтирования (КШ), рентгенэндоваскулярной реваскуляризации) [8]. Несмотря на совершенствование хирургической техники, периоперационный ИМ остается одним из наиболее грозных осложнений, частота которого варьирует от 2 до 19% в зависимости от хирургических клиник и применяемых диагностических критериев [9–14]. Следствием развития данного осложнения является высокая госпитальная летальность, достигающая, по данным различных авторов, 9–36% [15–17].

В связи с этим особое значение приобретает объективная интраоперационная оценка качества реваскуляризации миокарда, позволяющая своевременно выявить и скорректировать возможные дефекты анастомозов и кондуитов, особенно у пациентов с диффузным поражением коронарного русла. «Золотым стандартом» контроля проходимости сформированных шунтов остается ультразвуковая доплеровская флоуметрия (УДФ). Однако она имеет принципиальные ограничения: не предоставляет информации о распределении кровотока на микроциркуляторном уровне и тем самым не позволяет определить изменение перфузии после выполненного вмешательства [18].

В ряде исследований продемонстрировано, что метод лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) является эффективным инструментом мониторинга, позволяющим в режиме реального времени регистрировать динамику микроциркуляции в условиях изменяющейся гемодинамической нагрузки и при различных клинических условиях [19–23]. Вместе с тем на сегодняшний день объем опубликованных данных, характеризующих состояние перфузии миокарда, в том числе интраоперационно при проведении КШ, остается ограниченным [24; 25].

Материалы и методы

В исследование включены 30 пациентов, находившихся на лечении в Клинике грудной и сердечно-сосудистой хирургии имени Святого Георгия ФГБУ «НМХЦ

Табл. 1. Характеристика исследуемых пациентов

Показатели	Все пациенты (n = 30)
Возраст, Ме (Q ₁ -Q ₃)	65 (61–68)
Мужской пол, n (%)	25 (83,3)
Женский пол, n (%)	5 (16,7)
Рост (см), Ме (Q ₁ -Q ₃)	175 (167–178)
Масса тела (кг), Ме (Q ₁ -Q ₃)	88 (75–96)
Индекс массы тела, Ме (Q ₁ -Q ₃)	29 (27–32)
Площадь поверхности тела (м ²), Ме (Q ₁ -Q ₃)	2,076 (1,920–2,171)
Стенокардия напряжения III ФК, n (%)	26 (86,7)
Стенокардия напряжения IV ФК, n (%)	4 (13,3)
Фракция выброса левого желудочка по данным ЭхоКГ (%), Ме (Q ₁ -Q ₃)	61 (55–63)
Систолическое давление в лёгочной артерии (mm Hg), Ме (Q ₁ -Q ₃)	25 (20–27)
EuroSCORE II (%), Ме (Q ₁ -Q ₃)	1,96 (0,91–2,28)

им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, которым выполнено коронарное шунтирование в 2025 г. (Табл. 1).

Исследование проведено в соответствии с принципами, изложенными в Хельсинкской декларации, и с информированного добровольного согласия пациентов.

Для оценки динамики показателей перфузии миокарда после КШ использовался анализатор «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», регистрационное удостоверение Росздравнадзора от 26.11.2018 № РЗН 2018/7853). В анализаторе «ЛАЗМА ПФ» в качестве метода диагностики состояния микроциркуляции крови реализована ЛДФ [26; 27] (Рис. 1). В ходе исследования оценивались основные диагностические показатели, такие как М (средняя перфузия крови в системе микроциркуляции), М_{н_{утр}} (среднее значение нутритивного кровотока или доля кровотока по капиллярам) и М_{шунт} (часть кровотока по артериоло-веноулярным анастомозам).

Стерилизация датчиков проводилась методом сухого низкотемпературного воздействия газовой плазмы перекиси водорода на установке STERRAD 100S (Johnson & Johnson, New Brunswick, USA). После настройки про-



Рис. 1. Анализатор «ЛАЗМА ПФ».

граммного обеспечения и проверки исправности оборудования начата реализация экспериментальной части исследования.

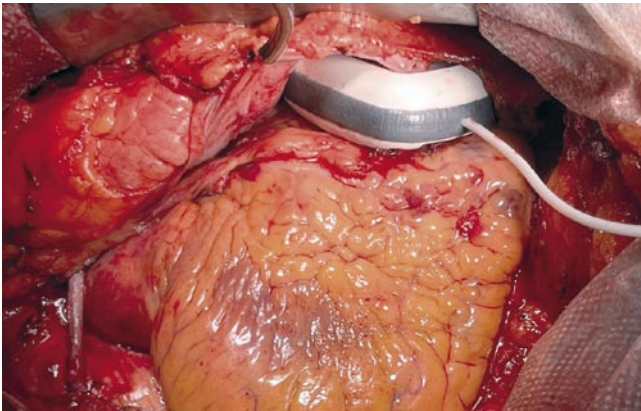


Рис. 2. Процесс позиционирования анализатора «ЛАЗМА ПФ».

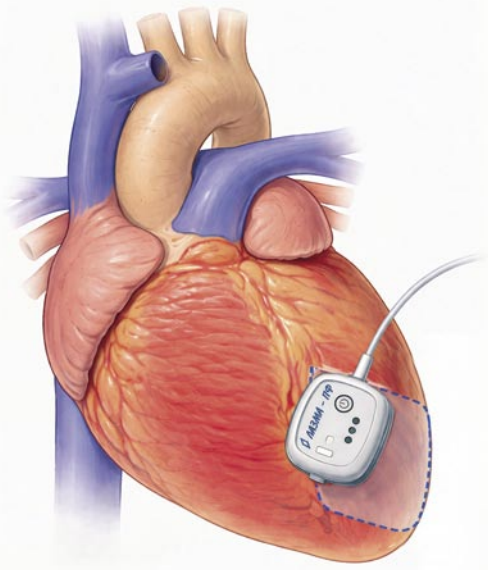


Рис. 3. Схематическое изображение области измерения показателей перфузии миокарда.

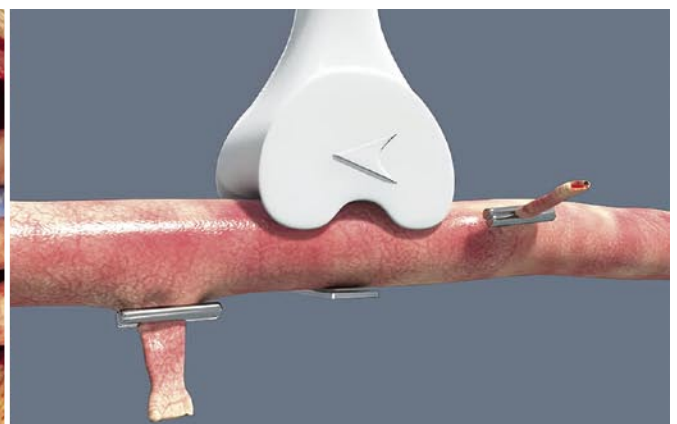
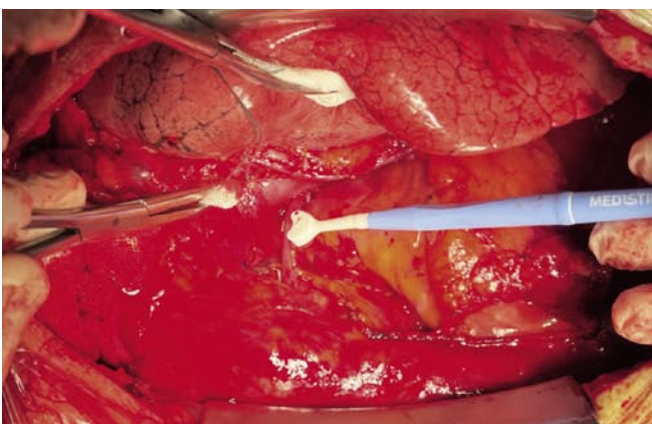


Рис. 4. Методика проведения УДФ (венозный графт).

Исследование параметров перфузии миокарда с помощью анализатора «ЛАЗМА ПФ» при КШ без искусственного кровообращения (ИК) ($n = 21$) выполнялось после выделения внутренних грудных артерий (ВГА) и рассечения перикарда. При КШ с ИК ($n = 9$) исследование проводилось после канюляции аорты, но до канюляции правого предсердия и начала ИК (Рис. 2).

Кровоснабжение миокарда изучалось в бассейне передней межжелудочковой ветви (ПМЖВ) левой коронарной артерии в области передне-боковой стенки левого желудочка ближе к верхушке сердца (Рис. 3). Скрининговое исследование проводилось в течение 2–3 минут, затем выполнялось КШ. После формирования всех анастомозов или остановки ИК и деканюляции предсердия показатели перфузии в интересующей зоне определялись повторно с той же продолжительностью.

Контроль эффективности КШ проводился посредством УДФ кровотока в сформированных кондуктах с помощью аппарата MiraQ Cardiac (Medistim ASA, Oslo, Norway). Оценивались средняя объемная скорость (Q_{mean} или MGF , ml/min), индекс пульсации (PI) и процент диастолического объемного наполнения (DF , %). Согласно руководству по реваскуляризации миокарда Европейского Общества Кардиологов (ESC) и Европейской Ассоциации Кардио-Торакальной Хирургии (EACTS) реваскуляризация миокарда признавалась успешной при значениях $MGF \geq 20$ ml/min , PI в пределах от 1 до 3, а $DF \geq 50\%$ [28–30].

УДФ так же выполнялась после формирования всех анастомозов или остановки ИК (Рис. 4).

В ходе исследования все данные были обработаны и проанализированы с помощью компьютерных программ Excel (Version 16.0.10417.20068, Microsoft Inc., USA) и Minitab (Version 17.1.0.0, Minitab Inc., USA). Для нормально распределенных количественных величин сравнение значений между собой выполнено с помощью сопряженного t -теста, для величин с ненормальным типом распределения – с помощью непараметрического критерия Уилкоксона.

Количественные данные описывались с помощью медианы (Me), и межквартильного интервала (Q_1-Q_3), категориальные – с указанием абсолютных значений (n) и процентных долей (%). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования

Согласно полученным данным, после выполнения КШ наблюдалось статистически значимое увеличение средней перфузии миокарда (M) в бассейне ПМЖВ с 37,47 до 46,64 ($p = 0,007$) и средних значений нутритивного кровотока ($M_{\text{нутр}}$) с 13,52 до 21,83 ($p = 0,002$). При этом средние значения кровотока по артерио-веноулярным анастомозам ($M_{\text{шунт}}$) до и после реваскуляризации значимо не отличались ($p = 0,123$) (Табл. 2).

Следует отметить, что в большинстве указанных случаев величина прироста перфузии (ΔM) составила 20%, вероятно, ввиду исходно низких показателей микроциркуляции крови (M) в изучаемых ишемизированных зонах. В то же время прирост значений нутритивного кровотока ($\Delta M_{\text{нутр}}$) оказался гораздо выше – более 60%. Учитывая неизменные показатели обходного кровотока ($M_{\text{шунт}}$) и удовлетворительные значения УДФ во всех случаях, полученные данные демонстрируют хирургический успех реваскуляризации, а не влияние медикаментозной поддержки на кровоснабжение миокарда.

Прирост средней перфузии крови в системе микроциркуляции наблюдался при значениях средней объемной скорости кровотока по шунтам ≥ 25 мл/мин. Полученные данные согласуются с критериями руководства по реваскуляризации миокарда ESC/EACTS. При этом положительная величина ΔM после КШ регистрировалась в 100% наблюдений.

Обсуждение

Существующие методы оценки результатов КШ, такие как коронарошунтография, УДФ, перфузионная скintiграфия миокарда, стресс-эхокардиография доказали свою эффективность и прочно вошли в рутинную клиническую практику. Однако ни один из данных способов при изолированном применении по-прежнему не позволяет однозначно ответить на вопрос качества выполненной реваскуляризации. Некоторые из представленных диагностических исследований сопряжены с дополнительными рисками развития осложнений, трудоемки и дорогостоящи при выполнении, не позволяют оценить микроциркуляторные аспекты перфузии крови, а интраоперационно могут быть выполнены только коронарошунтография и УДФ [18].

В данном исследовании с целью анализа эффективности КШ применялась ЛДФ – метод оценки состояния кровотока в системе микроциркуляции, который основывается на определении перфузии ткани кровью путём измерения доплеровского сдвига частот, возникающего при лазерном излучении, с последующей регистрацией отражённого от подвижных и неподвижных компонентов ткани излучения [31].

Табл. 2. Показатели перфузии миокарда

Показатель	До	После	Δ (%)	p
M	37,47 (30,72–45,12)	46,64 (40,83–53,22)	20 (11–41)	0,007*
M _{нутр}	13,52 (11,20–18,18)	21,83 (15,54–29,82)	61 (11–99)	0,002*
M _{шунт}	21,14 (19,31–26,69)	24,98 (19,70–29,43)	13 (-10–38,5)	0,123

Примечание: * – статистически значимые изменения, при $p < 0,05$.

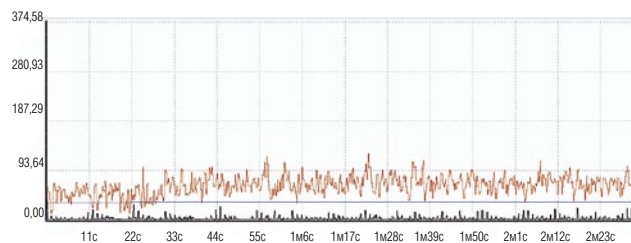


Рис. 5. Графическое отображение результатов, зарегистрированных анализатором «ЛАЗМА ПФ» в области ПМЖВ у пациента Д. до КШ: ЛДФ-грамма (красный цвет линии) – M = 69,6 перфузионных единиц; температура области исследования (синий цвет) – 34,2 °C; механические движения ткани миокарда (черный цвет).

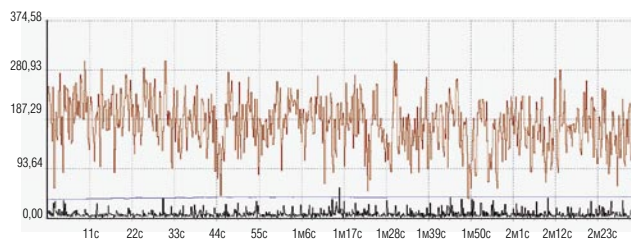


Рис. 6. Графическое отображение результатов, зарегистрированных анализатором «ЛАЗМА ПФ» в области ПМЖВ у пациента Д. после КШ: ЛДФ-грамма (красный цвет линии) – M = 178,0; температура области исследования (синий цвет) – 38,7 °C; механические движения ткани миокарда (черный цвет). Прирост по величине показателя микроциркуляции крови составил 156%, температура увеличилась на 4,5 °C.

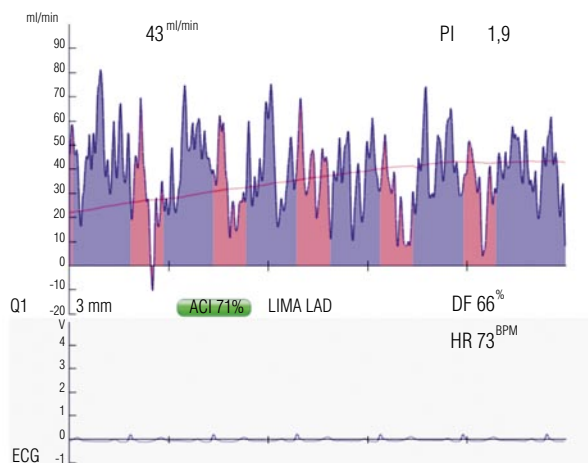


Рис. 7. УДФ-грамма (анастомоз левой ВГА с ПМЖВ) у пациента Д.

Одна из первых экспериментальных работ по использованию ЛДФ на сердце животных принадлежит Ahn H. C. (1988) [32]. Непрерывное измерение регионального кровотока в миокарде выполнял Bierbach V. (2012): в эксперименте на свиньях им продемонстрировано интраоперационное снижение перфузии миокарда на 70% при стенозе ПМЖВ, отмечена значимость коллатерального кровообращения [33]. Исследование ЛДФ во время КШ у 35 пациентов проводилось Karlsson M.G. (2005): по его данным, не было обнаружено существенной разницы между дооперационными и послеоперационными показателями [25]. Hellmann M. (2020) в своих исследованиях свидетельствует об эффективности коллатерального кровообращения для поддержания перфузии при КШ на работающем сердце. Им продемонстрирована положительная корреляция между микрососудистой перфузией миокарда (ЛДФ) и кровотоком в коронарном шунте (УДФ). Однако значимым недостатком этих исследований считалась инвазивность процедуры – для определения ЛДФ использовался внутримышечный оптоволоконный зонд [24].

В нашем исследовании реализация известного метода ЛДФ в виде портативного лазерного флоуметра «ЛАЗМА ПФ», работающего без оптического волоконного зонда и имеющего встроенный источник питания, лишена большинства недостатков и может быть успешно реализована в кардиохирургии интраоперационно. Установлено, что в большинстве наблюдений прирост общей перфузии (ΔM) после реваскуляризации миокарда составил 20%. Данный умеренный прирост объясняется исходно низкими значениями микроциркуляции в зонах ишемизированного миокарда. При детальном анализе структуры микроциркуляторного русла выявлено, что увеличение нутритивного (капиллярного) кровотока ($\Delta M_{\text{нур}}$) оказалось значительно более выраженным и достигло 60%, что свидетельствует о восстановлении значимого уровня перфузии тканей. В то же время показатели обходного (шунтирующего) кровотока ($M_{\text{шунт}}$) оставались стабильными, без существенной динамики.

Сопоставление данных ЛДФ с результатами инструментальной оценки функции шунтов (УДФ) показало, что прирост средней перфузии в системе микроциркуляции наблюдался исключительно при достижении объемной скорости кровотока по шунтам ≥ 25 мл/мин.

Ограничениями нашего исследования являются малая выборка пациентов и ее гетерогенность (отсутствие стратификации пациентов по сопутствующим заболеваниям), проведение измерений в интраоперационном периоде (долгосрочная динамика перфузии, влияние на нее ремоделирования миокарда, отдаленные результаты проходимости шунтов и клиническое состояние пациентов и не изучались).

Заключение

Результаты проведенного исследования достоверно демонстрируют эффективность оценки микроциркуляторной перфузии во время операции КШ методом ЛДФ,

который после детализирования параметров измерений и усовершенствования аппаратуры, может стать ведущим инструментом оценки качества реваскуляризации миокарда.

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

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Барбараш О.Л., Карпов Ю.А., Панов А.В., Акчурин Р.С. и др. Стабильная ишемическая болезнь сердца. Клинические рекомендации 2024 // Российский кардиологический журнал. – 2024. – Т.29. – №9. – С.6110. [Barbarash OL, Karpov YuA, Panov AV, Akchurin RS, et al. Stable Ischemic Heart Disease. Clinical Guidelines 2024. Russian Journal of Cardiology. 2024; 29(9): 6110. (In Russ.)] doi: 10.15829/1560-4071-2024-6110.
2. Погосова Н.В., Бойцов С.А. Профилактическая кардиология 2024: состояние проблемы и перспективы развития // Кардиология. – 2024. – Т.64. – № 1. – С.4-13. [Pogossova NV, Boytsov SA. Preventive Cardiology 2024: State of the Problem and Prospects for Development. Kardiologia. 2024; 64(1): 4-13. (In Russ.)] doi: 10.18087/cardio.2024.1.n2636.
3. Martin SS, Aday AW, Allen NB, et al. 2025 Heart Disease and Stroke Statistics: A Report of US and Global Data From the American Heart Association. Circulation. 2025; 151(8): e41-e660. doi: 10.1161/CIR.0000000000001303.
4. Окладников С.М., Никитина С.Ю. Здравоохранение в России. 2025: статистический сборник. – М.: Федеральная служба государственной статистики, 2025. [Okladnikov SM, Nikitina SYU. Healthcare In Russia. 2025: Statistical Collection. Moscow: Federal State Statistics Service, 2025. (In Russ.)]
5. Шевченко Ю.Л. Сердечно-сосудистая хирургия – показатель развития медицинской науки и здравоохранения в стране: основные тенденции развития. Корпоративное здоровье и промышленная медицина. – 2024. – Т.1. – №1. – С.8-19. [Shevchenko YuL. Cardiovascular Surgery as an Indicator of the Development of Medical Science and Healthcare in the Country: Main Trends of Development. Corporate Health and Industrial Medicine. 2024; 1(1): 8-19. (In Russ.)]
6. Шевченко Ю.Л., Борщев Г.Г., Ермаков Д.Ю. и др. Сравнительные результаты стандартного коронарного шунтирования, этапной гибридной реваскуляризации миокарда и сугубо эндоваскулярной коронарной коррекции у пациентов с ИБС в отдаленные сроки после операции // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. – 2024. – Т.32. – №3. – С.347-358. [Shevchenko YU, Borshchev GG, Ermakov DY, et al. Comparative results of standard coronary bypass surgery, staged hybrid myocardial revascularization, and purely endovascular coronary correction in patients with coronary artery disease in the long term after surgery. Russian Medical and Biological Bulletin named after Academician I.P. Pavlov. 2024; 32(3): 347-358. (In Russ.)] doi: 10.17816/PAVLOVJ632376.
7. Акчурин Р.С., Ширяев А.А., Андреев А.В. и др. Коронарное шунтирование при диффузном поражении коронарных артерий: использование аутоартериальных трансплантатов // Кардиологический вестник. – 2021. – Т.16. – №4. – С.5-10. [Akchurin RS, Shiryayev AA, Andreev AV, et al. Coronary artery bypass grafting in diffuse coronary artery disease: use of autografts. Kardiologicheskiy Vestnik. 2021; 16(4): 5-10. (In Russ.)]
8. Бокерия Л.А., Милюевская Е.Б., Прыанишников В.В. Сердечно-сосудистая хирургия – 2024. Болезни и врожденные аномалии системы кровообращения. – Москва: Издательство ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» Минздрава России, 2025. [Bokeria LA, Milievskaya EB, Pryanishnikov VV. Cardiovascular Surgery – 2024. Diseases and Congenital Abnormalities of the Circulatory System. Moscow: Publishing House of the A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery of the Russian Ministry of Health, 2025. (In Russ.)]
9. Борзов Е.А., Латыпов Р.С., Васильев В.П., Ширяев А.А. Госпитальные результаты коронарного шунтирования на работающем сердце при диффузном поражении коронарных артерий // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. – 2023. – Т.18. – №3. – С.4-8. [Borzov EA, Latypov RS, Vasilyev VP, Shiryayev AA. Hospital Results of Coronary Bypass Surgery on a Working Heart in Diffuse Coronary Artery Disease. Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center. 2023; 18(3): 4-8. (In Russ.)] doi: 10.25881/20728255_2023_18_3_4.

10. Шевченко Ю.Л., Попов Л.В., Борщев Г.Г. Отдаленные результаты операции коронарного шунтирования без ИК у пациентов с ИБС при выполнении разного объема реваскуляризации // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. – 2015. – Т.10. – №3. – С.9-14. [Shevchenko YU, Popov LV, Borshchev GG. Long-term results of coronary artery bypass grafting without cardiopulmonary bypass in patients with coronary artery disease undergoing different volumes of revascularization. Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center. 2015; 10(3): 9-14. (In Russ.)]
11. Бондарева З.Г., Тетерина Е.В. Периоперационный инфаркт миокарда у больных после аортокоронарного шунтирования: частота встречаемости и трудности диагностики // Российский кардиологический журнал. – 2008. – №5. – С.68-75. [Bondareva ZG, Teterina EV. Perioperative myocardial infarction in patients after aortocoronary bypass grafting: incidence and diagnostic difficulties. Russian Journal of Cardiology. 2008; 5: 68-75. (In Russ.)]
12. Борщев Г.Г., Попов Л.В., Вахромеева М.Н. Анализ отдаленных результатов при коронарном шунтировании без ИК у исходно тяжелобольных ИБС при разном объеме реваскуляризации // Материалы Всероссийского конгресса с международным участием «Хирургия – XXI век: соединяя традиции и инновации». – 2016. – С.114. [Borshchev GG, Popov LV, Vakhromeeva MN. Analysis of long-term results of coronary artery bypass grafting without cardiopulmonary bypass in initially severe patients with coronary artery disease with different volumes of revascularization. Materials of the All-Russian Congress with international participation "Surgery – 21st Century: Combining Traditions and Innovations". 2016. P.114. (In Russ.)]
13. Weidenmann V, Robinson NB, Rong LQ, et al. Diagnostic dilemma of perioperative myocardial infarction after coronary artery bypass grafting: A review. *Int J Surg.* 2020; 79: 76-83. doi: 10.1016/j.ijsu.2020.05.036.
14. Pözl L, Thielmann M, Cymorek S, et al. Impact of myocardial injury after coronary artery bypass grafting on long-term prognosis. *Eur Heart J.* 2022; 43(25): 2407-2417. doi: 10.1093/eurheartj/ehac054.
15. Белов Ю.В., Росейкин Е.В. Концепция «адекватной» реваскуляризации миокарда – новое направление в хирургическом лечении ишемической болезни сердца // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 2001. – №2. – С.50-54. [Belov YuV, Rosseikin EV. The concept of "adequate" myocardial revascularization is a new direction in the surgical treatment of coronary artery disease. *Thoracic and Cardiovascular Surgery.* 2001; 2: 50-54. (In Russ.)]
16. Hardiman SC, Villan Villan YF, Conway JM, et al. Factors affecting mortality after coronary bypass surgery: a scoping review. *J Cardiothorac Surg.* 2022; 17(1): 45. doi: 10.1186/s13019-022-01784-z.
17. Elosua R. Coronary artery bypass, percutaneous coronary intervention, and mortality: a reflection on methods. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed).* 2023; 77(5): 393-395. doi: 10.1016/j.rec.2023.11.016.
18. Шевченко Ю.Л., Зайчук Р., Борщев Г.Г., Землянов А.В., Ульбашев Д.С. Использование ультразвуковой флоуметрии для интраоперационной оценки эффективности коронарного шунтирования // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова. – 2019. – Т.14. – №3. – С.98-103. [Shevchenko YU, Zaichuk R, Borshchev GG, Zemlyanov AV, Ulbashev DS. Use of Ultrasonic Flowmetry for Intraoperative Assessment of Coronary Bypass Surgery Effectiveness. Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center. 2019; 14(3): 98-103. (In Russ.)] doi: 10.25881/BPNMSC.2019.74.65.020.
19. Salgado MA, Salgado-Filho MF, Reis-Brito JO, Lessa MA, Tibirica E. Effectiveness of laser Doppler perfusion monitoring in the assessment of microvascular function in patients undergoing on-pump coronary artery bypass grafting. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2014; 28(5): 1211-6. doi: 10.1053/j.jvca.2014.03.003.
20. Васильев А.П., Стрельцова Н.Н., Бессонов И.С., Колунин Г.В. Микрососудистое русло кожи нижней конечности при перемежающейся хромоте как возможная модель микроциркуляции миокарда у пациентов с ишемической болезнью сердца // Лазерная медицина. – 2023. – Т.27. – №1. – С.23-33. [Vasilyev AP, Streltsova NN, Bessonov IS, Kolunin GV. Microvascular bed of the lower limb skin in intermittent claudication as a possible model of myocardial microcirculation in patients with coronary artery disease. *Laser Medicine.* 2023; 27(1): 23-33. (In Russ.)] doi: 10.37895/2071-8004-2023-27-1-23-33.
21. Holowatz L.A., Thompson-Torgerson C.S., Kenney W.L. The human cutaneous circulation as a model of generalized microvascular function. *J Appl Physiol* (1985). 2008; 105(1): 370-372. doi: 10.1152/jappphysiol.00858.2007.
22. Каменская О.В., Караськов А.М., Чернявский А.М., Клинова А.С. Ишемическая болезнь сердца и особенности периферической микроциркуляции в различных возрастных группах // Российский кардиологический журнал. – 2014. – Т.112. – №8. – С.78-83. [Kamenskaya OV, Karaskov AM, Chernyavsky AM, Klinokva AS. Ischemic heart disease and features of peripheral microcirculation in different age groups. *Russian Journal of Cardiology.* 2014; 112 (8): 78-83. (In Russ.)] doi: 10.15829/1560-4071-2014-8-78-83.
23. Беленков Ю.Н., Привалова Е.В., Данилогорская Ю.А., Щендрыгина А.А. Структурные и функциональные изменения микроциркуляторного русла на уровне капилляров у больных сердечно-сосудистыми заболеваниями (артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца, хроническая сердечная недостаточность), которые можно наблюдать в ходе компьютерной видеокапилляроскопии // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2012. – Т.5. – №2. – С.49-56. [Belenkov YuN, Privalova EV, Danilogorskaya YuA, Shchendrygina AA. Structural and functional changes of the microcirculatory bed at the capillary level in patients with cardiovascular diseases (arterial hypertension, coronary heart disease, and chronic heart failure), which can be observed during computer video capillaroscopy. *Cardiology and Cardiovascular Surgery.* 2012; 5(2): 49-56. (In Russ.)]
24. Hellmann M, Piotrowski J, Kaszubowski M, Dudziak M, Anisimowicz L. Invasive Assessment of the Myocardial Microcirculation during Beating Heart Coronary Artery Bypass Grafting. *J Clin Med.* 2020; 9(3): 663. doi: 10.3390/jcm9030663.
25. Karlsson MG, Fors C, Wårdell K, Casimir-Ahn H. Myocardial perfusion monitoring during coronary artery bypass using an electrocardiogram-triggered laser Doppler technique. *Med Biol Eng Comput.* 2005; 43(5): 582-8. doi: 10.1007/BF02351031.
26. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови. Руководство для врачей. – М.: Медицина, 2005. [Krupatkin AI, Sidorov VV. Laser Doppler flowmetry of blood microcirculation. A guide for doctors. Moscow: Meditsina, 2005. (In Russ.)]
27. Sidorov VV, Rybakov YuL, Gukasov VM, Evtushenko GS. A System of Local Analyzers for Noninvasive Diagnostics of the General State of the Tissue Microcirculation System of Human Skin. *Biomedical Engineering.* 2022; 55(6): 379-382.
28. Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization. *European Heart Journal.* 2019; 40: 87-165.
29. Honda K, Okamura Y, Nishimura Y, et al. Graft flow assessment using a transit time flow meter in fractional flow reserve-guided coronary artery bypass surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2015; 149(6): 1622-8. doi: 10.1016/j.jtcvs.2015.02.050.
30. D'Ancona G, Karamanoukian HL, Ricci M, et al. Graft revision after transit time flow measurement in off-pump coronary artery bypass grafting. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2000; 17(3): 287-93. doi: 10.1016/s1010-7940(00)00332-8.
31. Козлов В.И., Соколов В.Г. Исследование колебаний кровотока в системе микроциркуляции. Материалы Второго Всероссийского симпозиума «Применение лазерной доплеровской флоуметрии в медицинской практике». – М., 1998. – С.8-13. [Kozlov VI, Sokolov VG. Study of blood flow fluctuations in the microcirculation system. Proceedings of the Second All-Russian Symposium "Application of Laser Doppler Flowmetry in Medical Practice." Moscow, 1998. P.8-13. (In Russ.)]
32. Ahn HC, Ekroth R, Hedenmark J, et al. Assessment of myocardial perfusion in the empty beating porcine heart with laser Doppler flowmetry. *Cardiovasc Res.* 1988; 22(10): 719-25. doi: 10.1093/cvr/22.10.719.
33. Bierbach B, Scheewe J, Derfuss T, et al. Continuous regional myocardial blood flow measurement: validation of a near-infrared laser Doppler device in a porcine model. *Microcirculation.* 2012; 19(6): 485-93. doi: 10.1111/j.1549-8719.2012.00173.x.