



УДК 616-07:616.13-005

DOI 10.17802/2306-1278-2026-15-4-144-152

ЭКСПЕРТНОЕ МНЕНИЕ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ

Е.В. Григорьев¹, Б.А. Аксельрод² от имени исследовательских групп

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний», бульвар имени академика Л.С. Барбараша, 6, Кемерово, Российская Федерация, 650002; ² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского», Абрикосовский пер., 2, Москва, Российская Федерация, 119991

Исследование микроциркуляции и принятие терапевтических решений для коррекции микроциркуляторного дистресса с восстановлением гемодинамической когерентности – одно из перспективных направлений интенсивной терапии полиорганной недостаточности, особенно в ходе перехода фазы острого критического состояния в фазу риска развития ПОН.

Несмотря на развитие ряда технологий мониторинга микроциркуляции, прежде всего в плане прямой визуализации микроциркуляции, большинство методов мониторинга не вошло в реальную клиническую практику.

В ходе прошедшей 7–8 ноября 2025 г. в Москве XXVII Всероссийской конференции с международным участием «Жизнеобеспечение при критических состояниях» и круглого стола по теме «Мониторинг микроциркуляции критических пациентов: первые шаги собственных технологий» рядом российских авторских коллективов были предложены наработки различного уровня готовности технологий, которые могут быть рассмотрены в качестве кандидатов для дальнейшего исследования и внедрения в реальную практику. С точки зрения клинической целесообразности и доказательной базы, востребованность данных технологий должна оцениваться с учетом рыночной конъюнктуры и перспектив коммерциализации.

Участники круглого стола представили свои разработки. При этом они отметили общие проблемы, характерные для всех рассматриваемых технологий. Как и для технологий, известных в качестве «золотого стандарта», в частности прямой визуализации

микроциркуляции – ручной видеомикроскопии, – для большинства методик мониторинга микроциркуляции отсутствуют стандартизированные характеристики изучаемых параметров по критериям SMART:

- S (Specific) – конкретный показатель, четко определенный для решения конкретной клинической задачи;
- M (Measurable) – понятные единицы измерения, четкие пороговые значения (cut-off values), диагностический порог, прогностический порог, целевое значение;
- A (Achievable) – доступность теста, время выполнения анализа, стоимость, простота реализации;
- R (Relevant) – показатель должен решать важную клиническую задачу, влияющую на тактику ведения пациента и его исход;
- T (Time-bound) – определены временные рамки для измерения параметра и интерпретации полученных результатов.

Прогнозируется рост объема рынка гемодинамических мониторов с 1,8 млрд долларов США в 2020 г. до 3 млрд долларов США и более к 2025–2026 гг. Основным трендом станет смещение в сторону менее инвазивных, высокотехнологичных и удобных систем, интегрируемых в инфраструктуру медицинских информационных систем.

Интеграция мониторинга микроциркуляции в существующие гемодинамические системы позволит довести микрососудистый мониторинг до прикроватного в режиме реального времени. Это позволит персонализировать терапию и улучшить исходы у пациентов с полиорганной недостаточностью.

Для цитирования: Григорьев Е.В., Аксельрод Б.А. от имени исследовательских групп. Экспертное мнение по исследованию микроциркуляции в критических состояниях. Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2026;15(4): 144-152. DOI: 10.17802/2306-1278-2026-15-4-144-152

To cite: Grigoriev E.V., Axelrod B.A. on behalf of the research groups. Expert opinion on the study of microcirculation in critical conditions. Complex Issues of Cardiovascular Diseases. 2026;15(4): 144-152. DOI: 10.17802/2306-1278-2026-15-4-144-152

Для корреспонденции: Евгений Валерьевич Григорьев, grigev@kemcardio.ru; адрес: бульвар имени академика Л.С. Барбараша, 6, Кемерово, Российская Федерация, 650002

Corresponding author: Evgeny V. Grigoriev, grigev@kemcardio.ru; address: 6, academician Barbarash blvd., Kemerovo, Russian Federation, 650002

МОНИТОРИНГ ОБЪЕМНОГО КРОВЕНАПОЛНЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

А.Н. Брико, П.Г. Рязанцев, Б.А., Аксельрод С.И. Щукин

Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского», Абрикосовский пер., 2, Москва, Российская Федерация, 119991

Принцип метода

Методом исследования гемодинамики, при помощи которого можно оценить биомеханические свойства микрососудов, является реография. Основой электроимпедансных измерений является измерение полного сопротивления биологической ткани высокочастотному (30–300 кГц) низкоинтенсивному (0,1–5 мА действующего значения) электрическому току.

Изменения регистрируемого электрического сопротивления обусловлены вариациями электрических свойств тканей исследуемого сегмента, прежде всего за счет динамики его кровенаполнения. Увеличение объема крови в сосудистом русле приводит к снижению измеряемого сопротивления, поскольку кровь обладает более высокой электропроводностью по сравнению с окружающими тканями.

Электрический импеданс Z [Ом] описывается как способность биологической ткани препятствовать прохождению электрического тока [1]. Полный электрический импеданс живых тканей равен сумме активного R и реактивного (емкостного) X_C сопротивлений.

Электрический импеданс биологической ткани и его составляющие меняются с изменением частоты зондирующего тока, на которой производится измерения. Это явление получило название дисперсии электрического импеданса (или электропроводности). Наличие данного явления обуславливает неравномерность проявления обеих составляющих импеданса.

Установлено, что на частотах до 100 кГц основной вклад вносит активная компонента R . Эта компонента обратно пропорциональна кровенаполнению исследуемого участка ткани, на чем и основана предлагаемая технология.

Состояние по разработке конечного продукта на текущий момент времени

На данный момент решены следующие задачи:

1. Определены параметры электродной системы

Для целей электроимпедансных исследований большое значение имеет выбор места проведения измерений и конфигурация электродной системы. Применительно к задаче оценки микроциркуля-

ции во время операции наиболее предпочтительной зоной можно считать кожные покровы лба, что обусловлено следующим: кожные покровы верхней трети лица имеют богатую сеть сосудов малого и среднего калибра и не имеют крупных магистральных сосудов, что минимизирует возможность регистрации параметров общей гемодинамики.

При операциях в области грудной клетки инсталляция электродов не мешает работе медицинского персонала. Для определения параметров электродной системы ткани головы были разделены на 3 слоя – скальп (содержащий сосуды микроциркуляторного русла), череп и головной мозг.

При численном моделировании методом конечных элементов [2] было установлено, что для тетраполярной электродной системы из одноразовых ЭКГ-электродов с контактным диаметром 15 мм (Medico Electrodes MSGST-27) и межэлектродным расстоянием 25 мм кровенаполнение скальпа на 89% формирует пульсовой электроимпедансный сигнал.

2. Разработан алгоритм объемной оценки микроциркуляторного русла на основе численного моделирования

Для оценки электрических свойств поверхностных тканей головы по экспериментальным данным применялся метод прямого поиска, основанный на сопоставлении измеренных значений импеданса с результатами конечно-элементного моделирования.

В расчетах использовались индивидуальные антропометрические параметры добровольцев, включая толщину поверхностного слоя мягких тканей и охват головы, что позволяло учитывать особенности строения и электропроводности тканей конкретного пациента. Такой подход обеспечивал персонализированное моделирование распределения электрического поля и повышение точности восстановления удельного сопротивления тканей.

Данная методика подробно описана и продемонстрирована в предыдущих работах авторов [3]. Подробно сам алгоритм определения объемного кровенаполнения описан у Briko A. et al. [4].

3. Проведена экспериментальная апробация разработанного алгоритма и электродной системы

Экспериментальные исследования проводились на группе пациентов в количестве 10 человек возрастом 41–73 года. В качестве референсного метода использовалась лазерная доплеровская флоуметрия, как наиболее распространенный подход к оценке микроциркуляции в Российской Федерации.

В работе нашей группы [4] была продемон-

стрирована статистически значимая корреляционная связь между электроимпедансной оценкой объемного кровенаполнения поверхностных тканей головы и параметрами лазерной доплеровской флоуметрии. Показано, что амплитудно-временные характеристики пульсовой составляющей импедансного сигнала согласованно изменяются с показателями микроциркуляции, регистрируемыми методом лазерной доплеровской флоуметрии, включая периоды выраженных гемодинамических перестроек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Al-Harosh M., Chernikov E., Shchukin S. Patient Specific Numerical Modeling for Renal Blood Monitoring Using Electrical Bio-Impedance. // *Sensors* (Basel). Switzerland, 2022. Т. 22, № 2.
2. Оценка применимости электроимпедансных методов для исследования микроциркуляции в области лба на основе численного моделирования / А. Н. Брико, А. В. Кобелев, П. Г. Рязанцев [и др.] // *Медицинская техника*. – 2025. – № 2(350). – С. 10-13
3. Ryazantsev P. G. и др. Approach to Assessing Electrical Impedance of Microcirculation: A Case Study // 2025 7th

International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2025. С. 1–6.

4. Briko, A.; Ryazantsev, P.; Gubko, A.; Kapravchuk, V.; Shchukin, S.; Akselrod, B. Method for Bioimpedance Assessment of Superficial Head Tissue Microcirculation. *Sensors* 2025, 25, 7190. <https://doi.org/10.3390/s25237190> Method for Bioimpedance Assessment of Superficial Head Tissue Microcirculation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/23/7190> (дата обращения: 06.12.2025).

ПЕРСПЕКТИВЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКЛ-КОНТРАСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В АНЕСТЕЗИОЛОГИИ-РЕАНИМАТОЛОГИИ

И.А. Рыжков¹, Е.В. Потапова²

¹ Научно-исследовательский институт общей реаниматологии имени В.А. Неговского Федерального научно-клинического центра реаниматологии и реабилитологии, ул. Петровка, 25, стр. 2, Москва, Российская Федерация, 107031; ² Научно-технологический центр биомедицинской фотоники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Наугорское шоссе, 29, Орел, Российская Федерация, 302020

Принцип метода

С учетом ряда ограничений методов прижизненной видеомикроскопии подъязычной области (относительная дороговизна, неприменимость для оценки перфузии в других органах и др.) целесообразна разработка и других технологий объективной оценки микроциркуляции и их адаптация для использования в анестезиологии-реаниматологии.

Одним из таких перспективных методов является лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ), в основе которой лежит анализ контраста лазерных спеклов, возникающих при рассеянии когерентного света (785 нм) на движущихся эритроцитах. Метод обеспечивает количественную оценку перфузии кровью (в условных единицах) без контрастных агентов, с высоким пространственным и временным разрешением.

ЛСКВ используют в клинических исследованиях для динамической оценки заживления ран

и ожогов, приживления трансплантатов (гингива, кожные лоскуты), выявления нарушений микроциркуляции при воспалительных заболеваниях кожи и осложнениях сердечно-сосудистых и эндокринных заболеваний (атеросклероз, сахарный диабет) [1, 2]. В экспериментальных исследованиях ЛСКВ широко применяется для оценки микроциркуляции в различных органах. В частности, была показана информативность этого метода для выявления нарушений мозгового кровообращения (при соответствующем хирургическом доступе) [3] и взаимосвязь нарушений кожного и мозгового кровообращения при геморрагическом шоке [4], что при дальнейшем подтверждении в клинических исследованиях повысит диагностическую значимость оценки периферической перфузии при шоке.

Ряд преимуществ ЛСКВ делает перспективным его более широкое внедрение в анестезиологи-

ю-реаниматологию: метод не только неинвазивен, но и бесконтактен, в связи с чем отсутствует риск инфицирования и возникновения артефактов от давления на ткань; в отличие от лазерной доплеровской флоуметрии он визуализирует перфузию на большей площади участка тела, что позволяет более надежно оценить перфузию анатомической области (например, ладони или предплечья); возможность мониторинга в реальном времени позволяет отслеживать динамику микроциркуляции при быстро меняющейся клинической ситуации; также технология предоставляет перспективу получения дополнительной информации о механизмах регуляции сосудистого тонуса на основании анализа спектральных характеристик колебаний микрокровотока.

В то же время, как и любой другой метод, ЛСКВ имеет ограничения, которые нужно учитывать при его использовании в медицинской практике: артефакты от движения, что ограничивает применение у беспокойных пациентов; оценка микроциркуляции в относительных перфузионных единицах и только в поверхностных слоях ткани (до 1–2 мм).

В медицине критических состояний метод демонстрирует потенциал для ранней диагностики

микроциркуляторных нарушений при сепсисе и различных видах циркуляторного шока [5, 6], но требует стандартизации протоколов диагностики.

В России приборов ЛСКВ полностью отечественного производства пока нет, но есть разработки соответствующих АПК на уровне отдельных научных групп (уровень готовности технологий 6, есть потребность в кооперации с индустриальным партнером). Такие системы собираются из зарубежных комплектующих, но программное обеспечение полностью отечественное [7]. Апробация проводилась на условно здоровых добровольцах в сравнении с другим широко используемым методом – лазерной доплеровской флоуметрией [8]. Более того, проводится разработка технологии ЛСКВ для применения в лапароскопической хирургии [9].

Таким образом, ЛСКВ является перспективным инструментом для оценки микроциркуляции у тяжелобольных пациентов, сочетающим неинвазивность и высокую информативность. Однако его дальнейшее широкое внедрение требует преодоления нескольких технических ограничений, а также валидации в крупных клинических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boas DA, Dunn AK. Laser speckle contrast imaging in biomedical optics. *J Biomed Opt.* 2010 Jan-Feb;15(1):011109. doi: 10.1117/1.3285504
2. Allen J, Howell K. Microvascular imaging: techniques and opportunities for clinical physiological measurements. *Physiol Meas.* 2014 Jul;35(7):R91-R141. doi: 10.1088/0967-3334/35/7/R91
3. Golubova N, Ryzhkov I, Lapin K, Seryogina E, Dunaev A, Dremin V, et al. Effect of Thinned-Skull Cranial Window on Monitoring Cerebral Blood Flow Using Laser Speckle Contrast Imaging. *IEEE J Select Topics Quantum Electron* 2025:1–8. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2025.3533950>
4. Рыжков И.А., Голубова Н.В., Лапин К.Н., Калабушев С.Н., Дремин В.В., Потапова Е.В., Дунаев А.В., Долгих В.Т., Мороз В.В. Параметры микроциркуляции в коже как диагностические маркеры нарушения центрального и церебрального кровообращения при геморрагическом шоке. *Общая реаниматология.* 2025;21(3):11–25. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2025-3-2559>
5. Ruan Z, Li R, Dong W, Cui Z, Yang H, Ren R. Laser speckle contrast imaging to monitor microcirculation: An effective method to predict outcome in patients with sepsis and septic shock. *Front Bioeng Biotechnol.* 2023 Jan 11;10:1067739. doi: 10.3389/fbioe.2022.1067739
6. Hsieh MC, Hu JJ, Lin YR, Li SY, Hsieh PY, Shing Ching CT, Liao LD. Improving the early diagnosis and clinical outcomes of shock patients via laser speckle contrast imaging assessment of peripheral hemodynamics. *iScience.* 2024 Nov 4;27(12):111307. doi: 10.1016/j.isci.2024.111307
7. Михайлова М.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020619474 Программный модуль контроля для спекл-контрастной визуализации в режиме реального времени / Дремин В.В., Козлов И.О., Михайлова М.А., Сдобнов А.Ю. М.: РосПатент; – заявл. 31.07.2020; опубл. 31.07.2020.
8. Mizeva I, Dremin V, Potapova E, Zharebtsov E, Kozlov I, Dunaev A. Wavelet Analysis of the Temporal Dynamics of the Laser Speckle Contrast in Human Skin. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2020 Jul;67(7):1882–1889. doi: 10.1109/TBME.2019.2950323
9. Патент № 2831912 Российская Федерация, МПК А61В 1/313, СПК А61В 1/313. Устройство для интраоперационного определения нарушения микроциркуляции крови в тканях органов брюшной полости при проведении лапароскопических вмешательств / Голубова Н.В., Потапова Е.В., Дремин В.В., Мамошин А.В., Дунаев А.В. – заявл. 26.06.2023; опубл. 16.12.2024 Бюл. № 35

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ЛДФ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ И ОПЕРАЦИЯХ

А.И. Крупаткин¹, В.В. Сидоров²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, ул. Приорова, 10, Москва, Российская Федерация, 127299; ² ООО НПП «Лазма», ул. Твардовского, 8, Москва, Российская Федерация, 123458

Принцип метода

Современные оптические технологии оценки микроциркуляторно-тканевых систем, включая лазерную доплеровскую флоуметрию (ЛДФ), широко применяются в экспериментальной и клинической медицине. ЛДФ с компьютерным спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет количественно оценить гемодинамику микрососудов (общий, нутритивный и шунтовой кровотоки, тонус артериол), состояние регуляторных механизмов (активных тонус-формирующих – эндотелиальных, нейрогенных, миогенных факторов и пассивных, связанных с формированием перфузионного давления – сердечных пульсовых и веноулярных дыхательных компонентов регуляции), типовые сосудистые патологические процессы (гиперемия, застой, ишемию, стаз), состояния адаптации (гипер- или гипoadaptивные состояния, истощение, срыв адаптации), окислительный метаболизм (флуоресцентный анализ НАДН и ФАД), микролимфоциркуляцию, информационные процессы, провести многочисленные функциональные пробы и т. д. [1].

С учетом специфических задач анестезиологии и реаниматологии актуальным является выбор адекватной схемы и набора параметров, приемлемых для оценки состояния микроциркуляции при тяжелых заболеваниях и операциях. Для этого следует учитывать ряд методологических принципов:

1. Кровоток в микроциркуляторном русле переменен в пространстве и времени. Вариабельность – это не недостаток методики, а неотъемлемое физиологическое свойство микроциркуляции, обусловленное приложением множества регуляторных факторов и требований гибкости «доставки – потребления» питательных веществ и кислорода в тканях. Поэтому строгое понятие нормы с установкой конкретной величины показателя микроциркуляции невозможно и заменяется границами показателя

микроциркуляции, очерченными состоянием ее компенсации.

2. ЛДФ-измерения целесообразно проводить в коже; на поверхности слизистой сложнее получить длительную стабильную запись. Оптимальны выбор акральных участков конечности (ладонная поверхность пальцев кисти, подошвенная поверхность пальцев стопы). Это зоны кожи с истинными артериоло-веноулярными анастомозами, исключительно зависящими от симпатической регуляции, надсегментарные нейроны которой, в отличие от других участков кожи, локализованы в гипоталамусе. Вектор регуляции именно этих зон отражает в наибольшей степени общее состояние организма.

3. Выбор для диагностики чисто перфузионных параметров (показателя микроциркуляции и др.) недостаточен, необходимо применять комплексные показатели, отражающие эффективность работы микроциркуляторно-тканевых систем (например, показатель кожной сосудистой проводимости; соотношение нутритивного и шунтового кровотока; коэффициент вариабельности для расчета состояния адаптации микроциркуляции; соотношение нутритивного кровотока и тканевого окислительного метаболизма НАДН и др.) [2]. Соответственно, оптимально применение портативных устройств, сочетающих в одном устройстве использование нескольких оптических методов диагностики [3].

4. При необходимости оценки конкретных регуляторных механизмов целесообразно применение функциональных проб, например, пробы с локальным нагревом для оценки состояния вазомоторной функции эндотелия микрососудов и т. п.

Необходимы дальнейшие пилотные исследования применения оптической диагностики микроциркуляторно-тканевых систем в анестезиологии и реаниматологии с целью выбора наиболее эффективных показателей при тяжелых заболеваниях и операциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: Колебания, информация, нелинейность (Руководство для врачей). М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»; 2013: 496.
2. Крупаткин А.И. Колебания кровотока - новый диагностический язык в исследовании микроциркуляции. Региональное кровообращение и микроциркуляция. 2014;13(1):83-

99. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2014-13-1-83-99>
3. Янушин В.С., Локтионова Ю.И., Жарких Е.В., Клева Д.Ф., Сидоров В.В., Крупаткин А.И., Дунаев А.В. Мониторинг микроциркуляторно-тканевых систем в конечностях организма человека во время различных фаз сна. Смоленский медицинский альманах. 2024; 4:170-173. DOI 10.37903/SMA.2024.4.47

ПЕРСПЕКТИВЫ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ С ФУНКЦИЕЙ АНГИОГРАФИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МИКРОЦИРКУЛЯТОРНЫХ НАРУШЕНИЙ ПАЦИЕНТОВ В КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ

А.А. Плеханов¹, Е.Б. Киселева¹, С.В. Панфилов², П.А. Шилягин³, Г.В. Геликонов³,
Н.Д. Гладкова¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «При-
волжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской
Федерации, пл. Минина и Пожарского, 10/1, Нижний Новгород, Российская Федерация, 603005; ² Го-
сударственное автономное учреждение здравоохранения Нижегородской области «Научно-исследо-
вательский институт клинической онкологии «Нижегородский областной клинический онкологический
диспансер», ул. Деловая, 11/1, Нижний Новгород, Российская Федерация, 603163; ³ Федеральное госу-
дарственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт при-
кладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», ул. Ульянова, 46, Нижний Новго-
род, Российская Федерация, 603951

Принцип метода оптической когерентной томо-
графии (ОКТ) заключается в детектировании обрат-
но рассеянного от изучаемых объектов света ближ-
него инфракрасного диапазона (1 310 нм). Интерфе-
рометрический способ регистрации сигнала в ОКТ
обуславливает возможность регистрации и локали-
зации микродвижений, что лежит в основе ангио-
графической модальности метода [2]. Характерные
скорости обнаруживаемого движения составляют от
долей до нескольких единиц миллиметров в секунду,
что в совокупности с типичным для технологии зна-
чением пространственного разрешения (на уровне
10 мкм) позволяет производить визуализацию кро-
веносных сосудов вплоть до капиллярного уровня.

Результатом исследования в режиме ангиогра-
фии является 2D-изображение в проекции en face
(вид сверху), на котором прорисована сеть перфу-
зируемых кровеносных сосудов.

В качестве ключевых преимуществ предлагае-
мой технологии ОКТ-А можно назвать:

1. режим реального времени;
2. визуализацию кровеносных сосудов различного
диаметра в объеме $4 \times 4 \times 2$ мм³ исследуемой ткани;
3. высокую скорость получения изображений
(26 сек);
4. высокое пространственное разрешение (10–
15 мкм);
5. отсутствие необходимости дополнительного
экзогенного контрастирования.

Использование торцевого зонда с удлиненной
рабочей частью обеспечивает легкий доступ к об-
ластям интереса в ротовой полости и высококаче-
ственный ОКТ-А-мониторинг изменений микро-
циркуляции [3].

ОКТ-А предлагается использовать в качестве
инструмента прямого прикроватного мониторинга
микроциркуляторных нарушений в сублингвальной
области у пациентов в критическом состоянии для
решения задач поиска предиктивных критериев раз-
вития полиорганной недостаточности и контроля

эффективности проводимой интенсивной терапии.

Ряд мировых исследований показал, что микро-
циркуляция сублингвальной области отражает со-
стояние кровоснабжения внутренних органов [4–6],
поэтому прямая визуализация кровеносных сосудов
сублингвальной области с возможностью их коли-
чественной оценки может существенно опережать
другие критерии в понимании тяжести состояния
пациента и помочь врачам своевременно принять
оптимальное решение.

Метод ОКТ-А получил широкое развитие для
решения задач в различных клинических областях
[7], включая растущий интерес к использованию
ОКТ для диагностики патологий слизистой поло-
сти рта [8–10].

Единственной опубликованной работой по реали-
зации оценки сублингвальной микроциркуляции ме-
тодом ОКТ-А является исследование немецких кол-
лег под руководством Alexandros Rovas (University
Hospital Muenster, Germany), проведенное на волон-
терах. Использовалась адаптированная коммерче-
ская офтальмологическая система. В результате вы-
явлена эффективность ОКТ-А в оценке микроцир-
куляции сублингвальной области, показана высокая
согласованность с результатами микроскопии смеж-
ного темного поля – передового метода витальной
сублингвальной видеомикроскопии [11]. Данное ис-
следование подтверждает высокую перспективность
применения ОКТ-А для решения различных клини-
ческих задач медицины критических состояний.

Собственным заделом для успешного примене-
ния ОКТ-А в реаниматологии является наш опыт
экспериментальных и клинических исследований
микроциркуляции слизистой оболочки ротовой
полости. На лабораторных животных при модели-
ровании острой кровопотери показана корреляция
снижения значений плотности перфузируемых со-
судов по ОКТ-А, снижения значений показателя
микроциркуляции по ЛДФ, снижения среднего АД
и повышения уровня лактата артериальной крови.

На добровольцах продемонстрирована возможность мониторинга изменений микроциркуляции слизистой ротовой полости в ответ на внешнее холодовое воздействие [12]; на пациентах показаны варианты сосудистой реакции необлученной части щеки в ответ на лучевую терапию опухолей головы и шеи [13].

Для минимизации артефактов движения во время записи ОКТ-А-изображений нами разработана специальная насадка, позволяющая с помощью вакуума атравматично фиксировать ткань в контакте с оптической поверхностью ОКТ-зонда [14].

На текущий момент на базе ГАУЗ НО НИИКО «Нижегородский областной клинический онкологический диспансер» проводятся клинические исследования по визуализации микроциркуляции сублингвальной области пациентов во время и после плановой хирургии (Протокол ЛЭК № 9 от 23.12.2024). Получено и проанализировано более 500 ОКТ-А-изображений от 18 пациентов.

Предварительные результаты подтверждают возможности ОКТ-А оценивать микроциркуляцию сублингвальной области в условиях клиники: уда-

лось отследить вазодилатацию кровеносных сосудов после индукции в анестезию, эффект вазоконстрикции кровеносных сосудов в ответ на воздействие вазопрессоров (норадреналина), а также повышение плотности перфузируемых сосудов после выполнения рекрутмент-маневра и расправления ателектазированных альвеол через некоторое время после перехода на однолегочную вентиляцию. Продemonстрирована корреляция снижения плотности перфузируемых сосудов сублингвальной области и нарастания тяжести органной недостаточности у реанимационных пациентов.

Таким образом, учитывая последние достижения Нижегородской группы в разработке подходов к ОКТ-А-диагностике изменений микроциркуляции тканей, не вызывает сомнений актуальность и перспективность развития технологии ОКТ-А для решения задач ранней диагностики критических состояний пациентов и поиска предиктивных критериев развития полиорганной недостаточности для контроля эффективности проводимой интенсивной терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Moiseev, A., Ksenofontov, S., Sirotkina, M., Kiseleva, E., Gorozhantseva, M., Shakhova, N., Matveev, L., Zaitsev, V., Matveyev, A., Zagaynova, E., Gelikonov, V., Gladkova, N., Vitkin, A., & Gelikonov, G. (2018). Optical coherence tomography-based angiography device with real-time angiography B-scans visualization and hand-held probe for everyday clinical use. *Journal of biophotonics*, 11(10), e201700292. <https://doi.org/10.1002/jbio.201700292>
- Matveev, L. A., Zaitsev, V. Y., Gelikonov, G. V., Matveyev, A. L., Moiseev, A. A., Ksenofontov, S. Y., Gelikonov, V. M., Sirotkina, M. A., Gladkova, N. D., Demidov, V., & Vitkin, A. (2015). Hybrid M-mode-like OCT imaging of three-dimensional microvasculature in vivo using reference-free processing of complex valued B-scans. *Optics letters*, 40(7), 1472–1475. <https://doi.org/10.1364/OL.40.001472>
- Plekhanov, A. A., Ryzhkov, I. A., Kiseleva, E. B., Panfilov, S. V., Mikhailova, A. A., Sirotkina, M. A., Gladkova, N. D., Grigoriev, E. V. (2025). Microcirculation in critical care: current pathophysiology and place in the strategy of monitoring critical conditions as a monitoring technology. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*, 14(5), 139–159. (In Russ.). <https://doi.org/10.17802/2306-1278-2025-14-5-139-159>
- De Backer, D., Creteur, J., Preiser, J. C., Dubois, M. J., & Vincent, J. L. (2002). Microvascular blood flow is altered in patients with sepsis. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 166(1), 98–104. <https://doi.org/10.1164/rccm.200109-0160c>
- Verdant, C. L., De Backer, D., Bruhn, A., Clausi, C. M., Su, F., Wang, Z., Rodriguez, H., Pries, A. R., & Vincent, J. L. (2009). Evaluation of sublingual and gut mucosal microcirculation in sepsis: a quantitative analysis. *Critical care medicine*, 37(11), 2875–2881. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181b029c1>
- Harki, J., Suker, M., Tovar-Doncel, M. S., van Dijk, L. J., van Noord, D., van Eijck, C. H., Bruno, M. J., Kuipers, E. J., & Ince, C. (2018). Patients with chronic mesenteric ischemia have an altered sublingual microcirculation. *Clinical and experimental gastroenterology*, 11, 405–414. <https://doi.org/10.2147/CEG.S159160>
- Leitgeb, R., Placzek, F., Rank, E., Krainz, L., Haindl, R., Li, Q., Liu, M., Andreana, M., Unterhuber, A., Schmoll, T., & Drexler, W. (2021). Enhanced medical diagnosis for dOCTors: a perspective of optical coherence tomography. *Journal of biomedical optics*, 26(10), 100601. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.26.10.100601>
- Chen, X. Y., Zhou, G., & Zhang, J. (2024). Optical coherence tomography: Promising imaging technique for the diagnosis of oral mucosal diseases. *Oral diseases*, 30(6), 3638–3651. <https://doi.org/10.1111/odi.14851>
- Plekhanov, A. A., Gazhva, S. I., Ibragimova, Y. S., Sovetsky, A. A., Mishina, N. V., Potapov, A. L., Matveev, L. A., Kalinkin, K. I., Anina, A. A., Matveyev, A. L., Sirotkina, M. A., Gladkova, N. D., Zaitsev, V. Y. (2025). Compression optical coherence elastography as a new tool for non-invasive identification of precancerous lesions of the oral mucosa. *Laser Physics Letters*, 22, 015602. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ad97b1>
- Hiu-Ki, L., Chung-Yu, C., Yen-Wen, L., Cheng-You, Y., Wen-Chuan, K. (2026). In vivo multiparametric imaging for human oral cavity using handheld polarization-sensitive optical coherence tomography and angiography. *Optics & Laser Technology*, 195, 114536. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.114536>
- Hessler, M., Nelis, P., Ertmer, C., Alnawaiseh, M., Lehmann, F., Schmidt, C., Kampmeier, T. G., Rehberg, S. W., Arnemann, P. H., & Rovas, A. (2020). Optical coherence tomography angiography as a novel approach to contactless evaluation of sublingual microcirculation: A proof of principle study. *Scientific reports*, 10(1), 5408. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62128-2>
- Plekhanov, A. A., Guseynov, N. A., Kiseleva, E. B., Bopkoev, S. V., Potapov, A. L., Ali, A. B. I., Moiseev, A. A., Ryabova, V. M., Ivanov, S. Y., Muraev, A. A., Gladkova, N. D., & Sirotkina, M. A. (2024). The Effect of Cryotherapy on Buccal Blood Vessels Evaluated by Optical Coherence Tomography Angiography: A Pilot Study. *Journal of biophotonics*, 17(11), e202400318. <https://doi.org/10.1002/jbio.202400318>
- Maslennikova, A. V., Sirotkina, M. A., Moiseev, A. A., Finagina, E. S., Ksenofontov, S. Y., Gelikonov, G. V., Matveev, L. A., Kiseleva, E. B., Zaitsev, V. Y., Zagaynova, E. V., Feldchtein, F. I., Gladkova, N. D., & Vitkin, A. (2017). In-vivo longitudinal imaging of microvascular changes in irradiated oral mucosa of radiotherapy cancer patients using optical coherence tomography. *Scientific reports*, 7(1), 16505. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16823-2>
- Ryabkov, M., Sizov, M., Bederina, E., Zarubenko, P., Peretyagin, P., Moiseev, A., Vorobiev, A., Gladkova, N., Zaitsev, V., & Kiseleva, E. (2023). Optical Coherence Tomography Angiography of the Intestine: How to Prevent Motion Artifacts in Open and Laparoscopic Surgery?. *Life (Basel, Switzerland)*, 13(3), 705. <https://doi.org/10.3390/life13030705>

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ У КРИТИЧЕСКИХ ПАЦИЕНТОВ

А.Ю. Зайцева, М.С. Мазинг

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А., Санкт-Петербург, Российская Федерация, 198095

Многие заболевания, в том числе и особо опасные, сопровождаются или происходят вследствие кислородного голодания. Нарушение микроциркуляции в тканях, представляющее собой обмен веществами между тканями и органами, лежит в основе патогенеза широкого спектра критических состояний (например, сепсис, кардиогенный шок). Каждый орган или ткань организма характеризуется уникальным статусом «тканевой нормы», включающим специфические параметры перфузии и оксигенации. Эти параметры напрямую влияют на оптические свойства тканей в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [1–5]. Таким образом, изучение нарушений микроциркуляции и их оценка являются важной проблемой медицинской практики, решение которой необходимо для ранней диагностики, персонализированного мониторинга и оценки эффективности терапии у критических пациентов.

Актуальность темы разработки аппаратно-программных комплексов, нацеленных на методы визуализации и верификации нарушений микроциркуляции

Существующие методы диагностики нарушений тканевого кровотока имеют ряд недостатков, таких как длительная подготовка пациентов, сложность интерпретации данных, а также необходимость специального оборудования и наличие высококвалифицированного персонала. Это создает непреодолимый барьер для их широкого внедрения, особенно в условиях отделений интенсивной терапии, где необходим непрерывный и быстрый мониторинг. Напротив, портативные оптические аппаратно-программные комплексы для мониторинга функционального состояния системы микроциркуляции представляют собой неинвазивные методы диагностики, что обеспечивает простоту, эффективность и безопасность для ослабленных пациентов [6–8].

Работа научно-практических групп по разработке подобного рода устройств

На базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) был разработан интеллектуальный аппаратно-программный комплекс (АПК) для мониторинга микроциркуляторно-тканевых систем и оценки общего состояния в режиме реального времени. Основу метода составляет применение методов машинного обучения для ана-

лиза многомерных оптических сигналов. Основной принцип работы основан на различии оптических свойств поглощения основных хромофоров биологической ткани (например, гемоглобина) [9]. Система учитывает биологические особенности поглощения тканями разных длин волн, обеспечивая физиологически значимую оптимальную глубину проникновения и позволяя расширить набор анализируемых биомаркеров.

Для анализа получаемых сигналов была разработана статистическая модель многомерного анализа оптического отклика, основанная на современных методах многомерной статистики (метод главных компонент и генетический алгоритм) [10]. Это позволяет системе выявлять скрытые закономерности и, вследствие этого, демонстрировать высокую диагностическую эффективность, что особенно важно для критических пациентов.

Апробация была проведена не только на группах здоровых добровольцев, но и в рамках пилотных клинических исследований на целевой группе пациентов в раннем послеоперационном периоде после кардиохирургических вмешательств, у которых были зарегистрированы нарушения состояния микроциркуляторно-тканевой системы различной степени выраженности. Последняя группа была также поделена на две подгруппы по степени тяжести осложнений. В качестве диагностических признаков использовалось отношение показаний на разных длинах волн.

В результате обработки и анализа сигналов был идентифицирован набор высокоинформативных спектральных биомаркеров. Установлено, что наибольший вклад в дифференциацию состояний вносят отношения интенсивностей на длинах волн 535/760 нм, 535/730 нм, 510/760 нм. Данный подход не только позволил достоверно разделить группы здоровых добровольцев и пациентов с нарушениями микроциркуляции, но и показал возможность дифференциации внутри группы пациентов – между теми, у кого послеоперационный период протекал с осложнениями и без них.

Таким образом, система демонстрирует способность не просто регистрировать сигнал, а выявлять скрытые паттерны, непосредственно связанные с патофизиологией микроциркуляторных нарушений, что переводит ее из разряда измерительного прибора в категорию интеллектуальной диагностической системы.

Потребность в кооперации с производителями данных АПК

Результаты проведенных исследований на основе разработанного в ИАП РАН комплекса «Л234-ДИОД» показали высокую эффективность разработанной многоканальной ОС. Важным конкурентным преимуществом является полный технологический цикл разработки, который открывает

потенциал для тонкой настройки сенсоров, оптимизации форм-фактора и адаптации алгоритмов под конкретные клинические сценарии. Однако трансформация портативного прототипа в коммерческий продукт, доступный для широкого применения в отделениях реанимации и кардиохирургии, невозможна без активного участия промышленного партнера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомолов А.Ю. Оптические мультисенсорные системы в аналитической спектроскопии // Журнал аналитической химии. 2022. Т. 77. № 3. С. 227–247. Bogomolov A.Yu. Optical multisensor systems in analytical spectroscopy // J. Analytical Chemistry [in Russian]. 2022. V. 77. № 3. P. 227–247.
2. Ali J., Cody J., Maldonado Y., et al. Near-infrared spectroscopy (NIRS) for cerebral and tissue oximetry: Analysis of evolving applications // J. Cardiothoracic and Vascular Anesthesia. 2022. V. 36. № 8. P. 2758–2766. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2021.07.015>
3. Scholkmann F., Scherer-Vrana A. Comparison of two NIRS tissue oximeters (moxy and nimo) for non-invasive assessment of muscle oxygenation and perfusion // Oxygen Transport to Tissue XLI. 2020. P. 253–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_32
4. Рогаткин Д.А., Лапитан Д.Г., Рогаткин Д.А. Функциональные исследования системы микроциркуляции крови методом лазерной доплеровской флоуметрии в клинической медицине: проблемы и перспективы // Альманах клинической медицины. 2016. Т. 44. № 2. С. 249–259. Rogatkin D.A., Lapitan D.G., Rogatkin D.A. Functional studies of the blood microcirculation system using laser Doppler flowmetry in clinical medicine: Problems and prospects [in Russian] // Almanac of Clinical Medicine. 2016. V. 44. № 2. P. 249–259.
5. Рогаткин Д.А., Лапитан Д.Г., Колбас Ю.Ю. и др. Индивидуальная вариабельность параметров микроциркуляции крови и проблемы функциональной диагностики системы микроциркуляции // Функциональная диагностика. 2012. Т. 4. С. 9–24. Rogatkin D.A., Lapitan D.G., Kolbas Yu.Yu., et al. Individual variability of blood microcirculation parameters and problems of functional diagnostics of the microcirculation system [in Russian] // Functional Diagnostics. 2012. V. 4. P. 9–24.
6. de Keijzer I.N., Massari D., Sahinovic M., et al. What is new in microcirculation and tissue oxygenation monitoring? // J. Clinical Monitoring and Computing. 2022. V. 36. № 2. P. 291–299. <https://doi.org/10.1007/s10877-022-00837-x>
7. Cornelis N., Chatzinikolaou P., Buys R., et al. The use of near infrared spectroscopy to evaluate the effect of exercise on peripheral muscle oxygenation in patients with lower extremity artery disease: a systematic review // Europ. J. Vascular and Endovascular Surgery. 2021. V. 61. № 5. P. 837–847. <https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2021.02.008>
8. Heise H.M. Medical applications of NIR spectroscopy // Near-Infrared Spectroscopy: Theory, Spectral Analysis, Instrumentation, and Applications / 2021. P. 437–473.
9. В.В. Гноевых, Ю.А. Шорохова, А.Ю. Смирнова, Е.В. Ефремова, Архив внутренней медицины, 13 (1), 75 (2023). DOI: 10.20514/2226-6704-2023-13-1-75-80
10. G. Gabrieli, M. Manica, P. Ruch, Electrochem. Soc. Meeting Abstracts, 244, 2919 (2023). DOI: 10.1149/MA2023-02622919mtgabs
11. A. Mackiewicz, W. Ratajczak. Computers & Geosciences, 19 (3), 303–342 (1993). DOI: 10.1016/0098-3004(93)90090-R