

Мониторинг микроциркуляции в отделении интенсивной терапии: современные методы и клинические перспективы

Зокир Бурханович Урунов

Ташкентский государственный медицинский университет

Аннотация: Мониторинг микроциркуляции в отделении интенсивной терапии представляет собой одно из ключевых направлений современной критической медицины, поскольку именно нарушения тканевой перфузии и оксигенации лежат в основе развития полиорганной недостаточности при критических состояниях. Несмотря на достижение целевых макродинамических показателей, у значительной части пациентов сохраняется так называемая «гемодинамическая несогласованность» между макро- и микроциркуляцией, что обуславливает необходимость внедрения методов прямой оценки микроциркуляторного русла. В данной работе представлен обзор современных методов мониторинга микроциркуляции, включая видеомикроскопические технологии (SDF, IDF), лазерную доплеровскую флоуметрию, транскутанное измерение напряжения кислорода ($TcPO_2$), капилляроскопию и спектроскопию ближнего инфракрасного диапазона (NIRS). Рассматриваются их диагностические возможности, преимущества и ограничения в условиях реанимации. Особое внимание уделено клиническому применению данных методов при сепсисе, шоке различной этиологии, синдроме диабетической стопы и острой церебральной недостаточности. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что интеграция показателей микроциркуляции в протоколы интенсивной терапии позволяет более точно стратифицировать риск неблагоприятных исходов, оптимизировать инфузионную терапию, вазоактивную поддержку и оценивать эффективность проводимого лечения. Однако широкое внедрение данных технологий ограничено отсутствием стандартизированных протоколов, вариабельностью интерпретации результатов и техническими сложностями. Таким образом, мониторинг микроциркуляции является перспективным инструментом персонализированной интенсивной терапии, способным повысить эффективность лечения критических пациентов. Дальнейшие исследования направлены на стандартизацию методов, разработку клинических алгоритмов и интеграцию микроциркуляторных показателей в существующие системы мониторинга.

Ключевые слова: микроциркуляция, отделение интенсивной терапии, критические состояния, тканевая перфузия, оксигенация тканей, сепсис, шок, полиорганная недостаточность, SDF-видеомикроскопия, IDF-технология, лазерная доплеровская флоуметрия, TcPO₂, NIRS, капилляроскопия, гемодинамика, персонализированная терапия

Microcirculation Monitoring in the Intensive Care Unit: Current Methods and Clinical Prospects

Zokir Burkhanovich Urunov
Tashkent State Medical University

Abstract: Microcirculation monitoring in the intensive care unit is a key area of modern critical care medicine, as impaired tissue perfusion and oxygenation underlie the development of multiple organ failure in critical illness. Despite achieving target macrohemodynamic parameters, a significant proportion of patients still experience so-called "hemodynamic mismatch" between macro- and microcirculation, necessitating the implementation of methods for direct microcirculatory assessment. This paper presents an overview of current microcirculation monitoring methods, including videomicroscopic technologies (SDF, IDF), laser Doppler flowmetry, transcutaneous oxygen tension (TcPO₂) measurement, capillaroscopy, and near-infrared spectroscopy (NIRS). Their diagnostic capabilities, advantages, and limitations in intensive care settings are discussed. Particular attention is paid to the clinical application of these methods in sepsis, shock of various etiologies, diabetic foot syndrome, and acute cerebral insufficiency. An analysis of the literature suggests that integrating microcirculation parameters into intensive care protocols allows for more accurate risk stratification of adverse outcomes, optimization of infusion therapy and vasoactive support, and assessment of treatment effectiveness. However, widespread adoption of these technologies is limited by the lack of standardized protocols, variability in result interpretation, and technical difficulties. Thus, microcirculation monitoring is a promising tool for personalized intensive care, capable of improving the effectiveness of treatment for critically ill patients. Further research is aimed at standardizing methods, developing clinical algorithms, and integrating microcirculation parameters into existing monitoring systems.

Keywords: microcirculation, intensive care unit, critical conditions, tissue perfusion, tissue oxygenation, sepsis, shock, multiple organ failure, SDF videomicroscopy, IDF technology, laser Doppler flowmetry, TcPO₂, NIRS, capillaroscopy, hemodynamics, personalized therapy

Введение: Современная интенсивная терапия ориентирована на своевременное выявление и коррекцию нарушений системной и тканевой перфузии, являющихся ключевыми звеньями патогенеза критических состояний. Традиционно мониторинг гемодинамики в отделениях интенсивной терапии основывается на оценке макроциркуляторных параметров - артериального давления, сердечного выброса, центрального венозного давления и уровня лактата. Однако накопленные данные свидетельствуют о том, что нормализация этих показателей не всегда сопровождается восстановлением адекватной микроциркуляции, что приводит к феномену «гемодинамической несогласованности» и сохраняющемуся риску тканевой гипоксии.

Микроциркуляция представляет собой сложную сеть артериол, капилляров и венул, обеспечивающих доставку кислорода и питательных веществ к клеткам, а также удаление метаболитов. При таких состояниях, как сепсис, шок различной этиологии, тяжелая травма, острая церебральная недостаточность и синдром диабетической стопы, происходят выраженные структурно-функциональные изменения микроциркуляторного русла: эндотелиальная дисфункция, нарушение реологических свойств крови, активация воспалительных каскадов и микротромбозы. Эти процессы приводят к снижению капиллярной плотности, ухудшению тканевой перфузии и развитию органной дисфункции.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в разработке и внедрении методов прямой визуализации и количественной оценки микроциркуляции. Технологии видеомикроскопии (SDF, IDF), лазерная доплеровская флоуметрия, транскутанное измерение напряжения кислорода ($TcPO_2$), а также спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (NIRS) позволяют получать объективную информацию о состоянии микроциркуляторного кровотока в реальном времени. Эти методы открывают новые возможности для ранней диагностики нарушений перфузии, оценки тяжести состояния пациента и контроля эффективности проводимой терапии.

Тем не менее, несмотря на высокий потенциал, использование микроциркуляторного мониторинга в клинической практике остается ограниченным. Это связано с отсутствием унифицированных стандартов измерения и интерпретации данных, высокой стоимостью оборудования, а также недостаточной интеграцией полученных показателей в существующие алгоритмы интенсивной терапии.

Целью настоящей работы является анализ современных методов мониторинга микроциркуляции в отделении интенсивной терапии, оценка их диагностической и прогностической значимости, а также определение перспектив их внедрения в клиническую практику с позиций персонализированной медицины.

Материалы и методы исследования

Данное исследование выполнено в виде аналитического обзора современной научной литературы, посвящённой мониторингу микроциркуляции у пациентов в отделении интенсивной терапии. В анализ были включены публикации за период 2015–2025 гг., представленные в международных базах данных (PubMed, Scopus, Web of Science, eLIBRARY), а также актуальные клинические рекомендации и метаанализы, посвящённые проблемам тканевой перфузии и критических состояний.

Критериями включения являлись: оригинальные исследования, рандомизированные клинические испытания, систематические обзоры и метаанализы, в которых рассматривались методы оценки микроциркуляции у взрослых пациентов с сепсисом, различными формами шока, тяжёлой травмой, острой церебральной недостаточностью и синдромом диабетической стопы. Исключались публикации с недостаточной методологической базой, исследования на животных, а также работы без чётко представленных количественных показателей микроциркуляции.

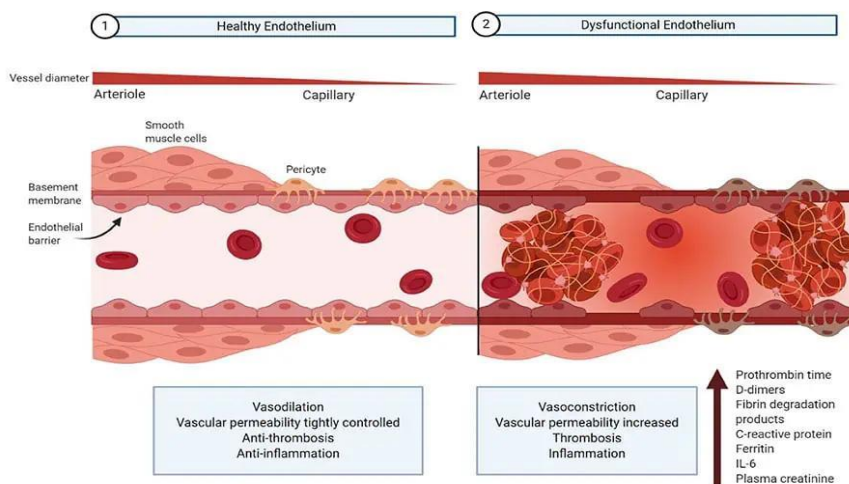


Рисунок 1. Патогенез нарушения микроциркуляции

В рамках анализа рассматривались следующие методы мониторинга микроциркуляции:

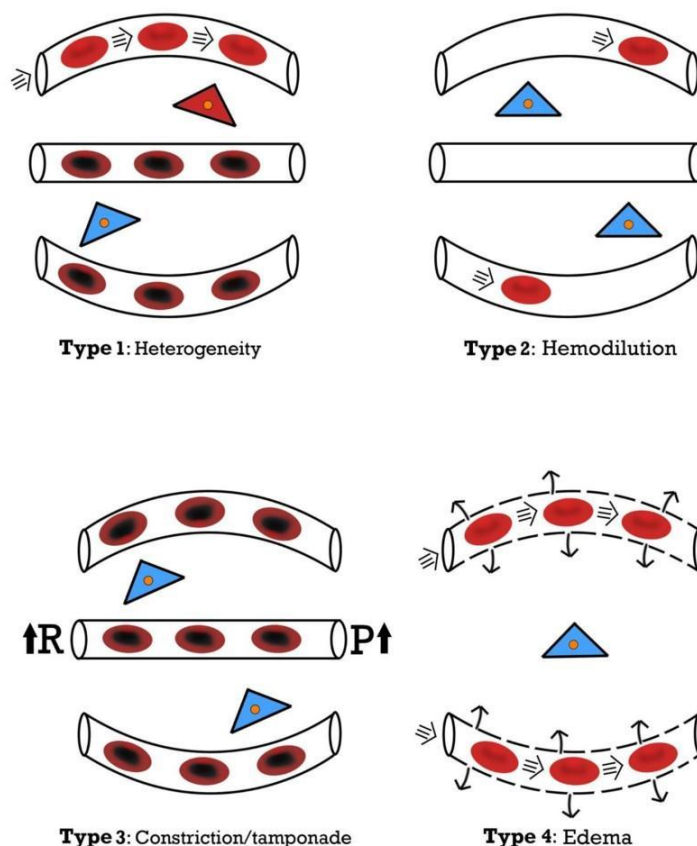
- видеомикроскопические технологии (Sidestream Dark Field - SDF, Incident Dark Field - IDF);
- лазерная доплеровская флоуметрия;
- транскутанное измерение напряжения кислорода ($TcPO_2$);
- спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (NIRS);
- капиллярскопия.

Для оценки клинической значимости методов анализировались такие показатели, как плотность функционирующих капилляров (PVD), индекс микроциркуляторного кровотока (MFI), гетерогенность перфузии, уровень

тканевой оксигенации (StO₂), а также динамика показателей в ответ на проводимую терапию.

Статистическая обработка данных литературных источников носила описательный характер. Для интерпретации результатов использовались методы сравнительного анализа, синтеза и обобщения данных. При необходимости учитывались показатели достоверности ($p < 0,05$), указанные в оригинальных исследованиях.

Microcirculatory alterations associated with loss of hemodynamic coherence.



Таким образом, применённый методологический подход позволил комплексно оценить современные технологии мониторинга микроциркуляции, их диагностическую ценность и перспективы внедрения в клиническую практику интенсивной терапии.

Результаты исследования

Анализ современных литературных данных показал, что нарушения микроциркуляции являются одним из ключевых патогенетических механизмов при критических состояниях и тесно связаны с неблагоприятными клиническими исходами. Установлено, что у пациентов с сепсисом, шоком и тяжёлой травмой сохраняется выраженная дисфункция микроциркуляции даже при нормализации макрогемодинамических показателей, что подтверждает наличие феномена «гемодинамической несогласованности».

Применение видеомикроскопических методов (SDF, IDF) позволило выявить значительное снижение плотности функционирующих капилляров (PVD), уменьшение индекса микроциркуляторного кровотока (MFI) и увеличение гетерогенности перфузии у пациентов с сепсисом. Доказано, что снижение MFI менее 2,6 и выраженная неоднородность кровотока ассоциированы с повышенной летальностью. В динамике лечения улучшение этих показателей коррелирует с клиническим восстановлением и снижением риска полиорганной недостаточности.

Таблица 1.

Основные методы мониторинга микроциркуляции

Метод	Принцип	Основные показатели	Преимущества	Ограничения
SDF / IDF видеомикроскопия	Визуализация капилляров	PVD, MFI, гетерогенность	Прямая оценка микроциркуляции	Требует опыта, дорого
Лазерная доплеровская флоуметрия	Отражение лазера от эритроцитов	Перфузионный индекс	Высокая чувствительность	Низкая воспроизводимость
TcPO ₂	Измерение напряжения O ₂ в тканях	мм рт. ст.	Прогностическая ценность	Зависит от кожи/температуры
NIRS	Инфракрасная спектроскопия	StO ₂ (%)	Неинвазивно, динамика	Ограниченная глубина
Капилляроскопия	Визуализация капилляров	Плотность, структура	Простота	Ограничена зонами

Лазерная доплеровская флоуметрия показала высокую чувствительность в оценке изменений кожной микроциркуляции, однако её информативность ограничена вариабельностью результатов и влиянием внешних факторов. В то же время транскутанное измерение напряжения кислорода (TcPO₂) продемонстрировало высокую прогностическую ценность: значения ниже 30 мм рт. ст. ассоциированы с выраженной тканевой гипоксией и неблагоприятным прогнозом, особенно у пациентов с синдромом диабетической стопы.

Таблица 2.

Критические пороговые значения микроциркуляции

Показатель	Норма	Критическое значение	Клиническое значение
MFI	≥ 2.9	< 2.6	Высокий риск летальности
PVD	Высокая	Снижение	Гипоперфузия
TcPO ₂	> 40 мм рт. ст.	< 30 мм рт. ст.	Тканевая гипоксия
StO ₂	75–85%	< 70%	Нарушение оксигенации
Лактат	< 2 ммоль/л	> 4 ммоль/л	Тяжёлый шок

Таблица 3.

Изменения микроциркуляции при различных состояниях

Состояние	Основные нарушения	Особенности
Сепсис	Гетерогенность потока, ↓ MFI	Микротромбоз
Гиповолемический шок	↓ капиллярная плотность	Централизация кровообращения
Кардиогенный шок	↓ перфузия	Застой

Диабетическая стопа	↓ TcPO ₂ , эндотелиальная дисфункция	Хроническая ишемия
ОЦН	↓ церебральная микроциркуляция	Гипоксия мозга

Методы NIRS позволили оценивать регионарную тканевую оксигенацию (StO₂) в реальном времени. Снижение StO₂ ниже 70% было связано с ухудшением перфузии и повышенным риском развития органной дисфункции. Кроме того, динамика показателей StO₂ при проведении проб с окклюзией (vascular occlusion test) показала высокую чувствительность к изменениям микроциркуляции и эффективности терапии.

Капилляроскопия продемонстрировала свою ценность в выявлении структурных изменений микроциркуляторного русла, включая снижение капиллярной плотности и признаки эндотелиальной дисфункции, однако её применение в условиях реанимации ограничено техническими особенностями.

В целом установлено, что интеграция показателей микроциркуляции (PVD, MFI, TcPO₂, StO₂) с традиционными макрогемодинамическими параметрами позволяет более точно оценивать тяжесть состояния пациентов, своевременно выявлять тканевую гипоперфузию и оптимизировать тактику интенсивной терапии. Наиболее информативными оказались комбинированные подходы, включающие одновременное использование нескольких методов мониторинга.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую клиническую значимость мониторинга микроциркуляции как инструмента ранней диагностики, прогностической оценки и контроля эффективности лечения в отделении интенсивной терапии.

Выводы

1. Нарушения микроциркуляции являются ключевым патогенетическим звеном при критических состояниях (сепсис, шок, острая церебральная недостаточность, синдром диабетической стопы) и напрямую связаны с развитием тканевой гипоксии и полиорганной недостаточности.

2. Установлено, что нормализация показателей макрогемодинамики не гарантирует восстановления микроциркуляции, что подтверждает существование феномена «гемодинамической несогласованности» и необходимость прямого мониторинга тканевой перфузии.

3. Современные методы оценки микроциркуляции (SDF/IDF-видеомикроскопия, TcPO₂, NIRS, лазерная доплеровская флоуметрия) обладают высокой диагностической и прогностической значимостью, позволяя выявлять ранние нарушения перфузии и оценивать эффективность проводимой терапии.

4. Наиболее информативными показателями микроциркуляции являются индекс микроциркуляторного кровотока (MFI), плотность функционирующих капилляров (PVD), уровень тканевой оксигенации (StO₂) и транскутанное

напряжение кислорода ($TcPO_2$), изменения которых достоверно коррелируют с исходами заболевания.

5. Комплексный подход, включающий одновременную оценку макро- и микроциркуляторных параметров, позволяет повысить точность стратификации риска, оптимизировать инфузионную и вазоактивную терапию, а также улучшить клинические исходы у пациентов отделения интенсивной терапии.

6. Несмотря на высокий потенциал, широкое внедрение микроциркуляторного мониторинга ограничено отсутствием стандартизированных протоколов, сложностью интерпретации данных и техническими аспектами применения методов.

Перспективы развития данного направления связаны с разработкой унифицированных алгоритмов мониторинга, интеграцией микроциркуляторных показателей в клинические протоколы и внедрением принципов персонализированной интенсивной терапии.

Использованная литература

1. Ince C, Voerma EC, Cecconi M, De Backer D, Shapiro NI. Second consensus on the assessment of sublingual microcirculation in critically ill patients: results from a task force of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intensive Care Med.* 2018;44(3):281–299.
2. De Backer D, Donadello K, Taccone FS, Ospina-Tascón GA, Salgado D, Vincent JL. Microcirculatory alterations: potential mechanisms and implications for therapy. *Ann Intensive Care.* 2011;1(1):27.
3. Ince C. Hemodynamic coherence and the rationale for monitoring the microcirculation. *Crit Care.* 2015;19(Suppl 3):S8.
4. Ospina-Tascón GA, Hernández G, Cecconi M. Understanding the microcirculation in sepsis. *Intensive Care Med.* 2020;46(10):1964–1966.
5. Dubin A, Kanoore Edul VS. Microcirculatory alterations in severe sepsis and septic shock. *Curr Opin Crit Care.* 2021;27(3):267–272.
6. Sakr Y, Dubois MJ, De Backer D, Creteur J, Vincent JL. Persistent microcirculatory alterations are associated with organ failure and death in septic shock. *Crit Care Med.* 2004;32(9):1825–1831.
7. Lima A, Bakker J. Noninvasive monitoring of peripheral perfusion. *Intensive Care Med.* 2005;31(10):1316–1326.
8. Donati A, Damiani E, Domizi R, et al. Near-infrared spectroscopy for assessing tissue oxygenation and microvascular reactivity in critically ill patients: a systematic review. *Crit Care.* 2019;23(1):342.

9. Shapiro NI, Arnold R, Sherwin R, et al. The association of near-infrared spectroscopy-derived tissue oxygenation measurements with sepsis outcomes. *Crit Care*. 2011;15(5):R223.

10. Hinshaw DB. Sepsis/septic shock: participation of the microcirculation: an abbreviated review. *Crit Care Med*. 1996;24(6):1072–1078.

11. Boerma EC, Ince C. The role of vasoactive agents in the resuscitation of microcirculation in critically ill patients. *Intensive Care Med*. 2010;36(12):2004–2018.

12. Kara A, Akin S, Ince C. Monitoring microcirculation in critical illness. *Curr Opin Crit Care*. 2016;22(5):444–452