



REVIEW

Open Access

Visualizing hemodynamics: innovative graphical displays and imaging techniques in anesthesia and critical care



Frederic Michard^{1*} , Adrian Wong² and Vanina Kanoore Edul³ 

Визуализация гемодинамики: инновационные графические дисплеи и методы визуализации в анестезиологии и интенсивной терапии

Перевод А.А. Науменко

Южно-Сахалинск

2025 год



АННОТАЦИЯ

Достижения в области визуализации сердечно-сосудистой системы за последние два десятилетия были значительными. Миниатюризация ультразвуковых устройств в значительной степени способствовала их широкому внедрению в операционных и отделениях интенсивной терапии. Интеграция инструментов с поддержкой искусственного интеллекта еще больше преобразила эту область, упростив ультразвуковое исследование и повысив воспроизводимость гемодинамических измерений даже для в руках менее опытных операторов. Расширенное УЗИ сердца с оценкой деформации миокарда (спекл-трекинг эхокардиография) обеспечивает прямую, визуальную и количественную оценку укорочения миокарда, выступая в качестве убедительной альтернативы традиционным методам оценки систолической функции правого и левого желудочка. У пациентов в критическом состоянии оценка сублингвальной микроциркуляции выявила высокую распространенность микрососудистых изменений, которые являются маркерами тяжести заболевания. Использование портативных витальных микроскопов позволяет количественно определять несколько ключевых параметров, включая плотность сосудов, перфузию, скорость эритроцитов и перфузируемую плотность сосудов. Такие показатели полезны для оценки состояния микроциркуляции. Разработка автоматизированного программного обеспечения знаменует собой значительный прогресс в направлении оценки микрососудистого состояния в режиме реального времени у постели больного. Эти достижения в конечном итоге могут позволить адаптировать реанимацию при шоке на основе реакций со стороны микроциркуляторного кровотока. Параллельно с достижениями в области визуализации значительно эволюционировали мониторы сердечного выброса. Когда-то громоздкие устройства, отображающие основные числовые данные в табличной форме, теперь оснащены гладкими сенсорными интерфейсами, интегрированными с визуальными инструментами поддержки принятия решений. Эти инструменты синтезируют гемодинамические данные в интуитивно понятные графические форматы, позволяя врачам быстро понять детерминанты циркуляторного шока. Эта визуальная ясность способствует более эффективному и точному принятию решений, что в конечном итоге может привести к улучшению лечения и результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Достижения в области визуализации сердечно-сосудистой системы за последние два десятилетия впечатляют. Кинематографическое качество МРТ сердца, которая обеспечивает яркие трехмерные изображения кровотока через сердце и крупные сосуды, подчеркивает поговорку «*Картинка стоит тысячи слов*». К сожалению, МРТ недоступна у постели больного. Однако другие методы визуализации претерпели значительный прогресс и все чаще используются в анестезиологии и интенсивной терапии



[1]. Эхокардиография, например, претерпела существенные усовершенствования в области аппаратного и программного обеспечения. В ожидании доступности ультразвуковых инноваций и соответствующей подготовки эхокардиография может стать краеугольным камнем гемодинамической оценки, позволяя проводить своевременные и точные вмешательства. Между тем, новые методы визуализации, такие как сублингвальная видеомикроскопия, находятся на стадии разработки. Эта технология обеспечивает детальное представление микроциркуляции, предлагая понимание динамики перфузии тканей, что может проложить путь для более индивидуализированного лечения.

Параллельно с достижениями в области визуализации значительно эволюционировали мониторы сердечного выброса. Когда-то громоздкие устройства, отображающие основные числовые данные в табличной форме, теперь оснащены элегантными сенсорными интерфейсами, интегрированными с визуальными инструментами поддержки принятия решений. Эти инструменты синтезируют гемодинамические данные в интуитивно понятные графические форматы, позволяя врачам быстро понять детерминанты циркуляторного шока.

В этом обзоре визуализации гемодинамики мы последовательно обсуждаем эволюцию графических дисплеев на гемодинамических мониторах, ультразвуковых инструментов с поддержкой искусственного интеллекта, спекл-трекинг эхокардиографии и сублингвальной видеомикроскопии.

ГРАФИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ

Графические дисплеи преобразуют гемодинамические данные в интуитивно понятные визуальные форматы, что потенциально облегчает обнаружение физиологических изменений, повышает точность диагностики, позволяет дольше поддерживать терапевтические цели и снижает когнитивную нагрузку на врачей [2,3]. Все мониторы сердечного выброса теперь имеют линии тренда рядом с числовыми значениями, предлагая динамическое представление траекторий пациентов и помогая выявлять постепенные изменения гемодинамических переменных, которые могут быть упущены при однократных измерениях.

Современные интерактивные экраны трендов улучшают эту функциональность, позволяя автоматически количественно оценивать изменения за указанный промежуток времени. Эта функция оказывается особенно полезной во время диагностических тестов, таких как тест пассивного поднятия ног, или терапевтических вмешательств, таких как введение болюса жидкости.

Мониторинг с одного взгляда



Человеческий мозг удивительно искусен в обработке визуальной информации, интерпретируя изображения до 60 000 раз быстрее, чем текст или числа. Эта врожденная способность подчеркивает одно из главных преимуществ графических дисплеев в гемодинамическом мониторинге: они делают сложную информацию сразу понятной. Концепция «мониторинга с одного взгляда» была введена *Ford et al.* [4] в основополагающем исследовании, в котором анализировалось, как анестезиологи взаимодействуют с системами мониторинга во время операций. С помощью видеозаписи в начале, середине и конце оперативных вмешательств исследование показало, что врачи уделяли минимальное время наблюдению за мониторами — примерно 30 секунд на 10-ти минутный интервал мониторинга. Их наблюдения характеризовались частыми, короткими взглядами, длящимися в среднем 1–2 секунды, происходящими 15–20 раз в течение каждого 10-ти минутного периода. Примечательно, что это поведение оставалось неизменным на всех хирургических этапах. Графические дисплеи извлекают выгоду из этой поведенческой модели, объединяя огромный массив гемодинамических данных в один визуально-интуитивный объект. Эта интеграция позволяет врачам понять общее состояние пациента за считанные секунды, оптимизируя принятие решений в критические моменты. Такие дисплеи могут быть особенно полезны в критических ситуациях, когда быстрая ситуационная осведомленность может существенно повлиять на результаты лечения пациента.

Концепция мониторинга с одного взгляда также поддерживает интеграцию всех данных мониторинга в единый унифицированный дисплей [5]. В настоящее время расширенные гемодинамические переменные обычно отображаются на специализированных громоздких автономных мониторах, расположенных рядом со стандартными многопараметрическими мониторами, которые отображают основные показатели жизнедеятельности. Системы, основанные на анализе контура пульса или пульсовой волны, по сути, являются алгоритмами, которые вычисляют ударный объем и производные параметры (например, сердечный выброс и сосудистое сопротивление) из формы волны артериального давления [6]. С технической точки зрения несколько удивительно, что такие алгоритмы еще не интегрированы в стандартные прикроватные мониторы. Это освободило бы ценное пространство вокруг пациента и снизило бы общую стоимость гемодинамического мониторинга [7]. Более того, объединение этих переменных в единый, тщательно продуманный интерфейс может повысить способность врачей быстро выявлять аномальные тенденции или ситуации, одновременно снижая когнитивную нагрузку [5].

Превращение данных в знания

До недавнего времени гемодинамические переменные часто отображались как изолированные показатели, дифференцированные по цвету, но без стандартизации или



четкого определения приоритетов их клинической значимости. Этот подход заставлял врачей мысленно интегрировать и интерпретировать данные, что может быть трудоемким, подверженным ошибкам, особенно в критических ситуациях [8]. Более интуитивная стратегия представления гемодинамических данных включает визуальные средства, такие как циферблаты или цветовое кодирование, чтобы указать, когда переменные выходят за пределы нормальных диапазонов или predeterminedных терапевтических целей. С 2007 года на гемодинамических мониторах все чаще используются экраны «как в кабине самолета» (**Рисунок 1**).



Рисунок 1. Пример мониторинга по аналогии экрана кабины пилота. Этот экран был разработан *F. Michard* и *U.J. Pfeiffer* в 2007 году для монитора Intellegio от UP-MED (Мюнхен, Германия). С тех пор несколько компаний приняли эту концепцию для своих мониторов. С разрешения *U.J. Pfeiffer*, основателя UP-MED

Дальнейшим достижением станет иерархизация гемодинамических переменных на основе их физиологических взаимосвязей. Например, среднее артериальное давление определяется сердечным выбросом и системным сосудистым сопротивлением, в то время как сам сердечный выброс зависит от ударного объема и частоты сердечных сокращений. Визуальное отображение этих взаимосвязей, как показано на **Рисунке 2**, может сделать гемодинамические профили немедленно очевидными



для врача. Хотя недавно были разработаны алгоритмы машинного обучения для автоматического определения гемодинамических фенотипов или профилей [9], визуальное профилирование может обеспечить столь же эффективную и более простую альтернативу [10]. Визуальные инструменты используют способность врачей быстро обрабатывать графические данные и могут улучшить понимание основных механизмов недостаточности кровообращения без необходимости использования сложных алгоритмов. Для подтверждения этого подхода сравнительные исследования, оценивающие эффективность визуального профилирования по сравнению с алгоритмами машинного обучения в клинических условиях, были бы весьма ценными.

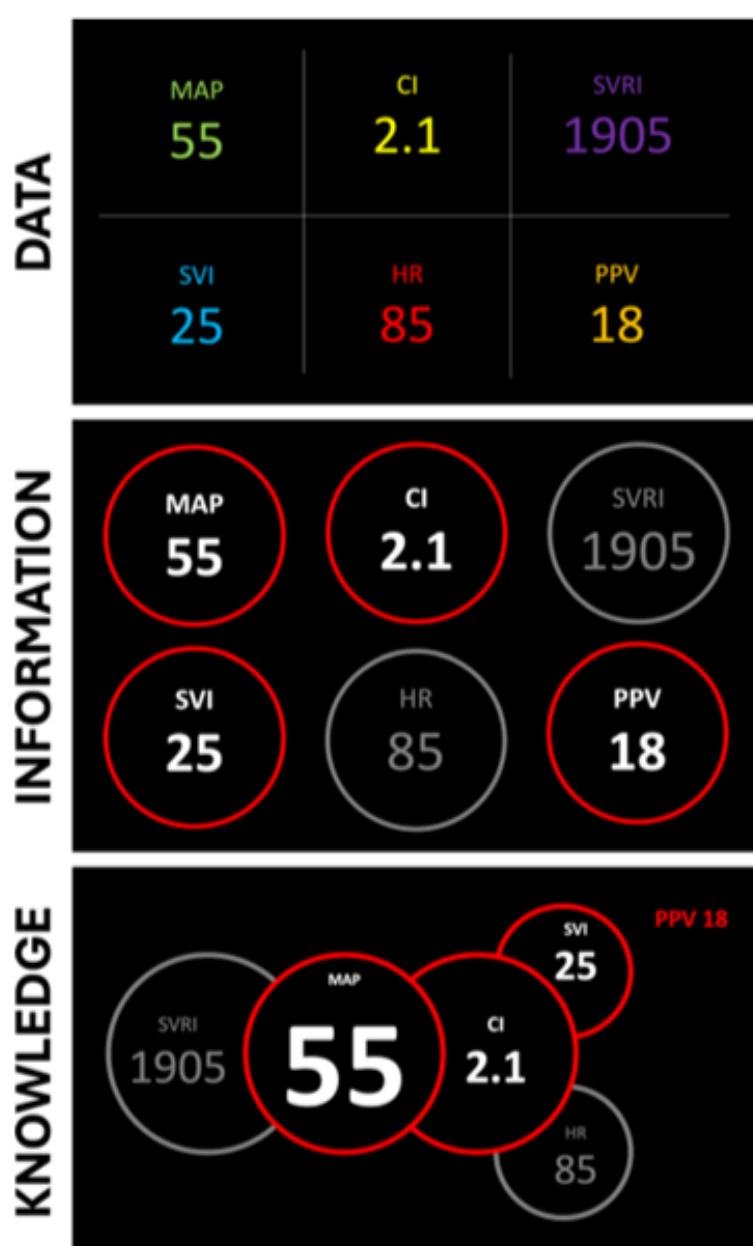


Рисунок 2. Эволюция графических дисплеев: от данных к знаниям.



От данных (числовая таблица с бессмысленной цветовой кодировкой) к информации (гемодинамические переменные, выходящие за пределы нормы, становятся очень заметными) и знаниям (гемодинамические переменные представлены в соответствии с их физиологической взаимосвязью, что позволяет быстро идентифицировать гемодинамические профили — в данном случае гиповолемический шок).

CI – сердечный индекс; HR – частота сердечных сокращений; MAP – среднее АД; PPV – вариабельность пульсового давления; SVI – индекс ударного объема; SVRI – индекс общего сосудистого сопротивления.

Абстрактные дисплеи

В нескольких исследованиях изучалась клиническая полезность абстрактных графических отображений, таких как гистограммы, многоугольники или паутинные цели, по сравнению с традиционными табличными числовыми отображениями. Эти исследования последовательно демонстрировали потенциал графических форматов для улучшения интерпретации физиологических данных. В контролируемых лабораторных условиях *Gurushanthaiah et al.* [11] оценивали работу анестезиологов-резидентов, используя либо стандартное числовое отображение, либо графические форматы (гистограммы и многоугольники) для мониторинга жизненно важных переменных. Их результаты показали, что графические отображения значительно сокращают время отклика и повышают точность выявления острых физиологических изменений. *Blike et al.* [12] исследовали, может ли графический объект — визуальное представление данных со значимыми формами — улучшить способность анестезиологов точно и быстро диагностировать пять распространенных этиологий шока: анафилаксию, брадикардию, ишемию миокарда, гиповолемию и тромбоэмболию легочной артерии. Используя наборы данных, включающие частоту сердечных сокращений, артериальное давление, давление в легочной артерии, центральное венозное давление и сердечный выброс, исследование сравило буквенно-цифровые представления данных с графическими дисплеями. Анестезиологи, использующие графический формат, допустили меньше диагностических ошибок и быстрее выполнили как распознавание шока, так и диагностику. *Vallée et al.* [13] представили визуальный инструмент, похожий на паутину, разработанный для помощи врачам в соблюдении рекомендаций Surviving Sepsis Campaign. Этот инновационный целевой экран одновременно отображал такие переменные, как насыщение кислородом центральной венозной крови, уровни лактата, среднее артериальное давление, артериальное насыщение кислородом и сердечный индекс. Исследование показало, что графический инструмент улучшил соблюдение рекомендаций по сепсису, о чем свидетельствует увеличение показателей насыщения кислородом центральной венозной крови и снижение уровней лактата. Хотя эти исследования не продемонстрировали прямых улучшений результатов лечения пациентов, потенциальные преимущества в дальнейшем являются убедительными. Улучшение соблюдения установленных рекомендаций и



более быстрая, более точная диагностика, вероятно, приведут к улучшению клинических результатов с течением времени.

Анатомические или метафорические представления

Анатомические или метафорические дисплеи обеспечивают визуальное представление органов или человеческого тела, стремясь помочь врачам, особенно с небольшим опытом работы, быстро выявлять и лучше понимать гемодинамические отклонения [14]. *Agutter et al.* [15] оценили эффективность работы анестезиологов при управлении моделируемыми сложными хирургическими случаями с использованием либо традиционных прикроватных мониторов, либо графического представления сердечно-сосудистой системы, предназначенного для визуализации гемодинамических переменных, измеряемых с помощью катетера Сван-Ганца. Исследование показало, что использование графического дисплея привело к более раннему началу лечения, меньшим отклонениям систолического артериального давления и центрального венозного давления от исходного уровня и более высоким уровням насыщения артериальной крови кислородом к концу моделирования. В последующем исследовании [16] тот же метафорический дисплей продемонстрировал свою полезность в сокращении как времени, необходимого для обнаружения неблагоприятных событий, так и времени начала лечения во время моделируемых сценариев. Недавние исследования изучили ценность анимированных «аватаров» пациентов в клинических условиях [17]. Эти аватары динамически представляют физиологическое состояние пациента, визуально изменяя такие элементы, как форма, цвет и анимация полых вен, сердца и аорты, чтобы отразить гемодинамические переменные (например, частоту сердечных сокращений, артериальное давление, центральное венозное давление и сердечный индекс). Исследования показывают, что мониторинг на основе аватара может улучшить ситуационную осведомленность и снизить когнитивную нагрузку [17,18,19]. Эти результаты показывают, что метафорические дисплеи, как статические, так и анимированные, имеют значительные перспективы для улучшения гемодинамического мониторинга.

ЭВОЛЮЦИЯ/РЕВОЛЮЦИЯ ЭХОКАРДИОГРАФИИ В МЕСТЕ ОКАЗАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

Эхокардиография является краеугольным камнем в оценке функции сердца, предлагая визуализацию в реальном времени и гемодинамические данные, необходимые для оценки и лечения пациентов в критическом состоянии [20,21,22]. Она широко рекомендуется в качестве диагностического и терапевтического инструмента первой линии для пациентов с признаками циркуляторного шока [23]. Недавние достижения в технологии эхокардиографии улучшили ее доступность и полезность. Одним из



наиболее заметных нововведений является появление карманных устройств визуализации (**Рисунок 3**). Эти портативные инструменты сделали эхокардиографию более доступной, позволяя врачам эффективно и удобно выполнять ультразвуковые исследования в месте оказания помощи (POCUS) даже в условиях ограниченных ресурсов. Несмотря на свою компактную форму, многие современные устройства обеспечивают визуализацию с высоким разрешением и включают функции, которые когда-то были присущи только более крупным и сложным системам [24,25,26].

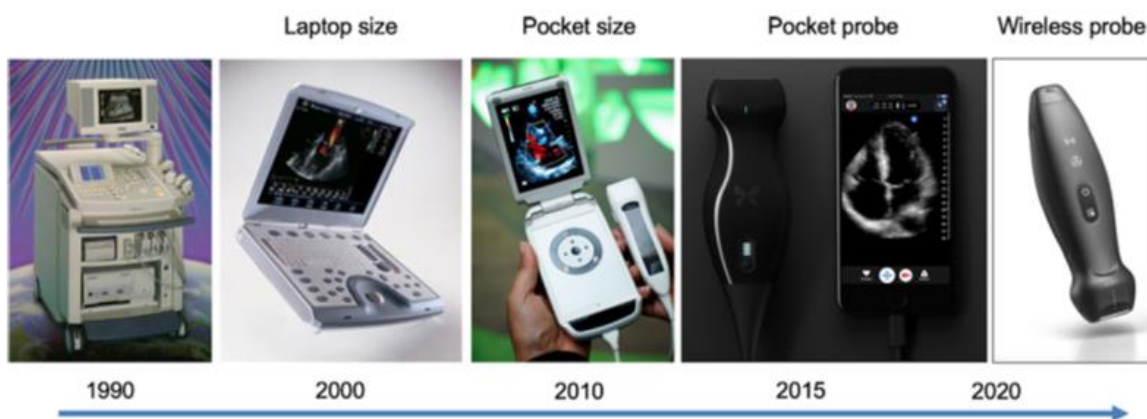


Рисунок 3. Эволюция эхокардиографических устройств. За три десятилетия ультразвуковые устройства прошли путь от громоздких и дорогих машин на тележке до доступных беспроводных карманных датчиков, подключаемых к смартфону или электронному планшету.

Однако эффективность ультразвуковых оценок остается в большой степени зависимой от оператора. Получение точных количественных оценок сердечной функции может быть особенно сложным для менее опытных врачей или стажеров. Для устранения этих ограничений современные ультразвуковые устройства часто включают передовые программные инновации, разработанные для повышения качества и согласованности ультразвукового исследования у постели больного. Эти инструменты направлены на упрощение получения изображений, оптимизацию измерений и снижение зависимости от оператора, тем самым повышая точность диагностики.

Ультразвуковые инструменты с поддержкой искусственного интеллекта

Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в ультразвуковую визуализацию открыла новые возможности для гемодинамической оценки. Алгоритмы машинного обучения на основе большого объема данных эхокардиографических изображений, теперь способны распознавать несколько ультразвуковых проекций, направлять пользователей для оптимизации качества изображения и автоматически измерять



ключевые эхокардиографические переменные. Эти достижения снижают зависимость от оператора, распространенное ограничение традиционного ультразвукового исследования, тем самым повышая диагностическую надежность и последовательность [27,28,29]. Ультразвуковые инструменты с поддержкой ИИ делают сложный эхокардиографический анализ доступным для врачей с разным уровнем знаний. Эти системы могут предоставлять важную информацию и параметры, которые ранее могли быть недоступны без специализированного обучения. Демократизируя доступ к передовым гемодинамическим оценкам, инновации на основе ИИ обладают потенциалом для улучшения результатов лечения пациентов.

Большинство алгоритмов машинного обучения для эхокардиографии были разработаны для оценки фракции выброса левого желудочка (ФВЛЖ) в режиме реального времени и в первую очередь проверены на пациентах с кардиологическими заболеваниями [30,31,32]. У пациентов в критическом состоянии *Varudo et al.* [33] недавно использовали алгоритм нейронной сети, который автоматически идентифицирует апикальную 4-х камерную проекцию, обнаруживает эндокардиальные границы левого желудочка и определяет время конечной диастолы и конечной систолы на основе движения митрального клапана. Используя эти данные, он вычисляет объем левого желудочка и ФВЛЖ. Это исследование показало превосходную специфичность (>95%) для обнаружения систолической дисфункции левого желудочка. Примечательно, что начинающие пользователи достигли более последовательных измерений ФВЛЖ с помощью алгоритма машинного обучения по сравнению с ручными измерениями, выполняемыми опытными операторами. Это подчеркивает потенциал ИИ для повышения надежности, особенно для менее опытных операторов. Следует отметить, что некоторые алгоритмы машинного обучения могут оценивать ФВЛЖ напрямую, без расчета объемов левого желудочка [34].

Алгоритмы машинного обучения теперь способны автоматически оценивать различные гемодинамические переменные, включая временной интеграл скорости субаортального кровотока (VTI). Субаортальный VTI, суррогат ударного объема левого желудочка, играет важную роль при оценке гемодинамики. Он может помочь определить реакцию на инфузию, показывая значительное увеличение VTI во время маневра пассивного поднятия ног или волемиической нагрузки. Кроме того, измерения VTI используются для расчета сердечного выброса [35]. Алгоритмы машинного обучения могут автономно идентифицировать апикальную 5-ти камерную проекцию и определять местонахождение выходного тракта левого желудочка. Затем алгоритм оптимально размещает блок импульсно-волнового доплера в выходном тракте для захвата высококачественного доплеровского сигнала и расчета среднего VTI за несколько секунд (**Рисунок 4**) [36,37]. Этот процесс обеспечивает быструю и надежную оценку VTI, даже если его выполняют стажеры [37]. Кроме того, алгоритмы ма-



шинного обучения расширяют свои возможности на другие гемодинамические маркеры. Они могут автоматически количественно определять респираторные изменения диаметра нижней полой вены, признанный показатель чувствительности к жидкости у пациентов, находящихся на искусственной вентиляции легких [38]. Инструменты машинного обучения также измеряют систолическую экскурсию плоскости митрального кольца (MAPSE), маркер систолической функции левого желудочка [39,40].

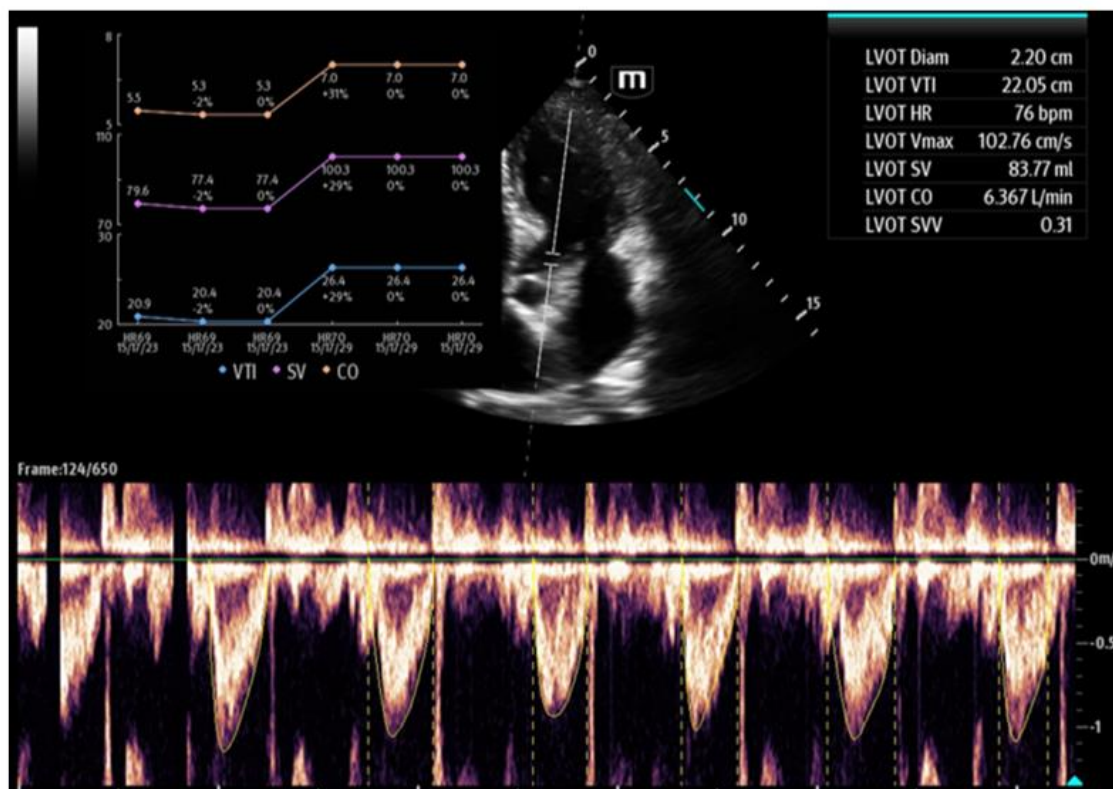


Рисунок 4. Пример инструмента с поддержкой ИИ для автоматического измерения временного интеграла скорости субаортального кровотока (VTI).

Спекл-трекинг эхокардиография

Спекл-трекинг эхокардиография (STE) — это сложная методика, которая улучшает оценку функции миокарда и теперь более доступна для врачей, даже тех, у кого нет обширного опыта в области эхокардиографии. В отличие от традиционных методов, STE отслеживает естественные акустические маркеры, или «спеклы», для визуализации и количественной оценки укорочения миокарда [41,42]. Одним из ключевых достижений является ее доступность для применения в режиме реального времени, в отличие от ее более ранней зависимости от офлайн-анализа после получения изображений. Эта возможность в режиме реального времени предоставляет врачам дей-



ственные идеи во время оценки состояния пациента, что делает ее ценным инструментом в руководстве лечением пациентов. Предоставляя точные данные о деформации миокарда, STE может дополнять традиционные эхокардиографические методики, помогая обнаруживать тонкие изменения в функции сердца, которые в противном случае могли бы быть пропущены.

Глобальная продольная деформация (GLS) является прямым и количественным измерением укорочения миокарда во время систолы, предлагая более точную оценку функции сердца по сравнению с фракцией выброса правого или левого желудочка [41,42]. В отличие от ФВЛЖ, которая выводится из конечно-систолического и конечно-диастолического объемов и опирается на геометрические предположения, такие как те, которые используются в методе диска Симпсона, GLS измеряет деформацию миокарда без таких ограничений, что делает ее потенциально более надежной [41]. Значения GLS выражаются как отрицательный процент, отражающий укорочение миокарда, при этом нормальные значения обычно находятся в диапазоне от -20 до -30% для обоих желудочков. Менее отрицательные значения (например, -15%) указывают на нарушенное укорочение миокарда. Помимо числовых значений, STE в сочетании с цветовым кодированием генерирует динамическую визуализацию деформации миокарда, повышая способность врача оценивать сердечную функцию. Пример оценки систолической функции левого желудочка с использованием STE показан в видео S1 (**Дополнительный файл 1 в оригинальной англоязычной версии данной статьи**). GLS оказался высокочувствительным маркером для выявления субклинической сердечной дисфункции. Мета-анализ подчеркнул превосходную чувствительность по сравнению с традиционными эхокардиографическими параметрами, особенно при раннем выявлении дисфункции левого желудочка [43]. Более того, измерение GLS продемонстрировало меньшую зависимость от оператора, предлагая большую воспроизводимость по сравнению с традиционными оценками функции левого желудочка [44,45].

Спекл-трекинг эхокардиография также является ценным инструментом для оценки функции правого желудочка, предоставляя информацию, выходящую за рамки традиционных эхокардиографических параметров [42,46]. У пациентов с хронической сердечной недостаточностью и у тех, кто переносит операцию на сердце, глобальная продольная деформация правого желудочка продемонстрировала превосходную чувствительность в выявлении дисфункции правого желудочка по сравнению с систолической экскурсией плоскости трикуспидального кольца (TAPSE) [47]. Кроме того, было обнаружено, что глобальная продольная деформация правого желудочка является более точным предиктором клинических результатов в этих группах пациентов [48]. Ограничения TAPSE могут быть связаны с его узкой направленностью на небольшую область правого желудочка, предлагая только региональную оценку систолической функции. Кроме того, TAPSE зависит от угла наклона датчика,



что может вносить изменчивость и снижать чувствительность для выявления глобальной систолической дисфункции [49,50]. Аналогично, сокращение фракционной площади (FAC), другой часто используемый параметр для оценки систолической функции правого желудочка, разделяет косвенную природу ФВЛЖ и зависит от геометрических предположений. Напротив, глобальная продольная деформация правого желудочка обеспечивает прямую меру укорочения миокарда. Однако следует отметить, что на него влияет укорочение межжелудочковой перегородки, на которое может влиять систолическая функция левого желудочка, что потенциально затрудняет его интерпретацию [51]. Несмотря на это ограничение, исследования показывают, что глобальная продольная деформация правого желудочка может превзойти FAC [48] и даже трехмерную фракцию выброса при выявлении систолической дисфункции правого желудочка [42]. Эти преимущества подчеркивают растущую важность глобальной продольной деформации правого желудочка в оценке и лечении пациентов с нарушенной функцией правого желудочка.

Эти аппаратные и программные инновации знаменуют собой только начало преобразующей эры в ультразвуковой технологии. Действительно, носимые доплеровские датчики теперь доступны для мониторинга динамических изменений в кровотоке сонной артерии [52], а инновационные ультразвуковые клейкие пластыри уже на горизонте [53]. С другой стороны, доступность существующих эхокардиографических решений и адекватное обучение потенциальных пользователей остаются проблемой во многих больницах, особенно в странах с низким и средним уровнем дохода. В условиях надежного доступа в Интернет удаленная интерпретация изображений, полученных немедицинскими работниками, может стать практическим решением, гарантируя, что больше пациентов получают пользу от ультразвуковых инноваций.

СУБЛИНГВАЛЬНАЯ ВИДЕОМИКРОСКОПИЯ

Микроциркуляторная визуализация при сепсисе и шоковых состояниях выявила высокую распространенность микрососудистых изменений, которые являются маркерами тяжести заболевания [54]. Когда реанимационные мероприятия, направленные на нормализацию артериального давления и сердечного выброса, не восстанавливают адекватную перфузию тканей (состояние, называемое гемодинамической несогласованностью [*гемодинамическая некогерентность*]), вероятно наличие скрытого шока [55]. В этом контексте микроциркуляторный шок характеризуется постоянной гипоперфузией тканей, несмотря на кажущуюся нормализацию системного и регионального кровотока (Видео S2 **Дополнительный файл 2 в оригинальной англоязычной версии данной статьи**). Это подчеркивает потенциальную ценность мониторинга микроциркуляции во время реанимации для обеспечения эффективного восстановления перфузии тканей и оксигенации [56].



Ручные витальные микроскопы

Двадцать пять лет назад появление ручных витальных микроскопов позволило визуализировать микроциркуляцию у постели больного [57]. Первое новшество пришло с разработкой ортогональной поляризационной спектральной визуализации (OPS), которая позволила проводить неинвазивное наблюдение за микроциркуляцией человека в открытых тканях и органах [58]. Эта техника использовала линейно поляризованный свет на длине волны, соответствующей поглощению гемоглобина, делая эритроциты видимыми как темные структуры, текущие по микрососудам [58]. Впоследствии техника OPS была превзойдена техникой визуализации Sidestream Dark Field (SDF), которая обеспечивала повышенную контрастность и улучшенную визуализацию капилляров [59]. Техника SDF использует шесть импульсных зеленых светодиодных источников света, синхронизированных с частотой кадров камеры, что позволяет проводить интравитальную стробоскопию для превосходной визуализации. Последнее поколение ручных витальных микроскопов, использующих освещение Incident Dark Field (IDF), еще больше продвинуло эту область благодаря оптике с более высоким разрешением и возможностям автофокусировки. Эти нововведения обеспечивают трехкратное увеличение поля зрения, что позволяет проводить более полную и подробную оценку микроциркуляции [60] (**Рисунок 5**).

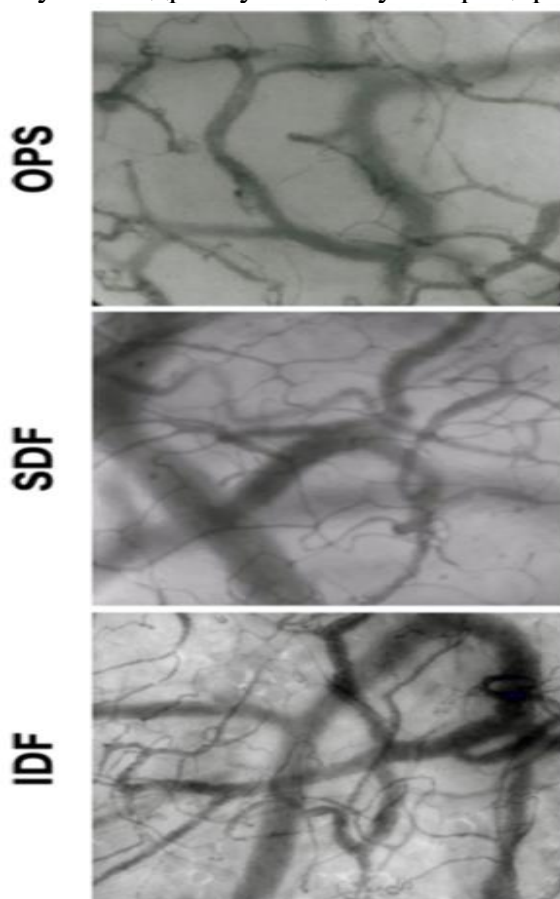


Рисунок 5. Эволюция визуализации подъязычной микроциркуляции. От ортогональной поляризационной спектральной визуализации (OPS) до методов визуализации бокового темного поля (SDF) и непрямого темного поля (IDF).



Поскольку доступ к подъязычной слизистой оболочке относительно прост, она является наиболее изученной областью для оценки микроциркуляции у пациентов в критическом состоянии. Эта богатая сосудами ткань напрямую снабжается язычной артерией, ветвью наружной сонной артерии, и впадает во внутреннюю яремную вену [61]. Были зарегистрированы расхождения между микроциркуляторными состояниями различных органов, что подчеркивает, что снижение подъязычной микроциркуляции не всегда равнозначно гипоперфузии кишечника или почек. Использование ручных витальных микроскопов для оценки подъязычной микроциркуляции позволяет количественно оценить несколько ключевых параметров, включая плотность сосудов, перфузию, скорость эритроцитов и гетерогенность. Среди них перфузируемая сосудистая плотность (PVD) выделяется как ключевое измерение. PVD отражает количество капилляров с непрерывным кровотоком, обеспечивая прямую оценку перфузии и косвенную оценку доставки кислорода к тканям [62,63]. Такие показатели полезны для оценки состояния микроциркуляторного кровотока. Могут ли они также помочь в определении терапевтических вмешательств у пациентов в критическом состоянии и каким образом, еще предстоит изучить.

Практические задачи

Съемка высококачественных видео микроциркуляции требует значительной подготовки для достижения надлежащего освещения, точной фокусировки, стабильной последовательности изображений и избегания артефактов давления. Сжатие сосудов во время визуализации, которое может нарушить нормальные схемы кровотока, является наиболее частой проблемой, с которой сталкиваются и часто неправильно интерпретируется как микроциркуляторная дисфункция [62,64]. Чтобы отличить истинные микроциркуляторные изменения от артефактов визуализации, следует тщательно оценить некоторые признаки. Например, двунаправленный поток или внезапное восстановление потока в ранее остановленных сосудах обычно предполагает внешнюю компрессию, а не патологические изменения. В физиологических условиях микрососудистый поток является непрерывным и однонаправленным [64]. Осознание этих нюансов необходимо для предотвращения неправильной диагностики и обеспечения надежной оценки микроциркуляции.

Еще одной проблемой при интеграции микроциркуляторной оценки в рутинную практику отделения интенсивной терапии является отсутствие автоматизированных мгновенных результатов, что требует офлайн- и трудоемкого анализа. Попытки разработать качественные методы оценки в месте оказания помощи постоянно терпели неудачу из-за проблем с точностью и достоверностью [63,65]. Существую-



щее программное обеспечение для анализа изображений SDF и IDF требует значительного ручного ввода, что делает процесс трудоемким и менее подходящим для принятия решений в реальном времени [66].

Новые рубежи в оценке и анализе микроциркуляции

Разработка автоматизированного программного обеспечения необходима для визуализации микроциркуляции в режиме реального времени у постели больного. Используя передовые алгоритмы компьютерного зрения, новое программное обеспечение анализирует последовательности изображений автономно, устраняя необходимость ручного вмешательства [67]. В дополнение к стандартным переменным оно вводит новые метрики, такие как капиллярный гематокрит (отношение объема эритроцитов к объему микрососудов) и перфузия эритроцитов в тканях, которая количественно определяет смещение эритроцитов в сосудах. Тем не менее, эти метрики существенно различаются между людьми [68], и еще предстоит изучить, могут ли они переопределить целевые показатели для перфузии тканей в будущем [69]. Другое нововведение заключается в интеграции двухволновой оксиметрии с визуализацией SDF, что позволяет измерять коэффициенты экстинкции окси- и дезоксигемоглобина для определения насыщения гемоглобина [70]. Эта технология стремится одновременно измерять перфузию тканей, оксигенацию, воспаление и отек тканей путем оценки глубины фокуса. Кроме того, он отслеживает кинетику лейкоцитов и может дать представление о деградации гликокаликса и микрососудистом воспалении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Миниатюризация и снижение стоимости ультразвуковых устройств сыграли решающую роль в их растущем внедрении в операционных и отделениях интенсивной терапии. В сочетании с инструментами на базе искусственного интеллекта эти устройства теперь облегчают упрощенную эхокардиографическую оценку, обеспечивая воспроизводимые гемодинамические измерения даже для менее опытных врачей. Появилась спекл-трекинг эхокардиография, обеспечивающая прямую, визуальную и количественную оценку укорочения миокарда. Эта методика предлагает убедительную альтернативу традиционным методам оценки систолической функции правого и левого желудочка.

Между тем, визуализация подъязычной микроциркуляции выявила высокую распространенность микрососудистых изменений у пациентов в критическом состоянии. Ручные витальные микроскопы теперь позволяют врачам количественно определять такие параметры, как плотность сосудов, перфузия, скорость эритроцитов и перфузируемую сосудистую плотность, предлагая новые перспективы состояния микроциркуляции. Однако роль этих показателей в руководстве терапевтическими вмешательствами остается областью текущих исследований.



Параллельно с этим мониторы сердечного выброса претерпели существенные изменения, включив в себя усовершенствованные графические дисплеи. Эти инструменты обеспечивают визуальную ясность при обнаружении аномальных гемодинамических состояний и траекторий, помогая врачам понять основные механизмы гемодинамической нестабильности.

**БИБЛИОГРАФИЯ ДОСТУПНА В АНГЛОЯЗЫЧНОЙ ОРИГИНАЛЬНОЙ
ВЕРСИИ ДАННОЙ СТАТЬИ ПО АДРЕСУ:**

Michard et al. Critical Care

<https://doi.org/10.1186/s13054-024-05239-w>