

Новые возможности трехмерной эхокардиографии при оценке состояния левого желудочка

С.Т. Мацкеплишвили, Ю.И. Бузиашвили

Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН. Москва, Россия

New perspectives of three-dimensional echocardiography in left ventricular assessment

S.T. Matskeplishvili, Yu.I. Buziashvili

A.N. Bakoulev Research Center for Cardiovascular Surgery, Russian Academy of Medical Sciences. Moscow, Russia.

Оценка функционального состояния левого желудочка (ЛЖ) является основным показанием к выполнению эхокардиографии (ЭхоКГ) у взрослых пациентов. Однако, поскольку сердце имеет сложную анатомическую структуру и является динамическим, постоянно движущимся органом, М-режим и двухмерная ЭхоКГ предполагают определенные геометрические допущения относительно формы и функции ЛЖ, которые приводят к погрешностям при измерениях. В ситуации, когда на основании данных ЭхоКГ принимаются очень важные и часто дорогостоящие решения, совершенно необходимы точные и воспроизводимые методы ультразвуковой диагностики. Трехмерная (3Д) ЭхоКГ была доступна в течение многих лет, однако она использовала трудоемкие и сложные методы реконструкции (часто с применением чреспищеводного исследования). Недавние успехи в области компьютерной обработки изображений и технологии производства датчиков привели к тому, что трансторакальная 3Д ЭхоКГ в реальном времени стала приемлемой методикой для клинического использования. Одновременно стали доступными программы анализа 3Д наборов данных, и это сочетание нового оборудования и программного обеспечения предлагает настолько точный анализ морфологии и функции ЛЖ, что гарантирует ЭхоКГ статус «метода выбора» при неинвазивной оценке состояния ЛЖ.

Ключевые слова: трехмерная эхокардиография, ремоделирование левого желудочка, сердечная ресинхронизационная терапия, ультразвуковая диагностика.

Left ventricular (LV) functional status assessment is the main indication for echocardiography (EchoCG) in adult patients. Due to complicated heart anatomy and its dynamic function, M-regimen and two-dimensional EchoCG ask for some geometry assumptions on LV form and function, resulting in measurement bias. When EchoCG data are necessary for making important and costly health decisions, more precise and reproducible methods of ultrasound diagnostics are requested. Three-dimensional (3D) EchoCG has been available for years, but demanding complicated reconstructive methods (trans-esophageal EchoCG included). Recent advances in computer image processing and sensor production have made real-time transthoracic 3D EchoCG a clinically available method. At the same time, 3D data set analyzing programs become available. This combination of modern equipment and software facilitates precise analysis of LV morphology and function. Therefore, EchoCG is a method of choice in non-invasive LV assessment.

Key words: Three-dimensional echocardiography, left ventricular remodeling, cardiac resynchronization therapy, ultrasound diagnostics.

Оценка функционального состояния левого желудочка (ЛЖ) является основным показанием к выполнению эхокардиографии (ЭхоКГ) у взрослых пациентов. Важные диагностические, прогностические и терапевтические выводы основаны на анализе анатомии ЛЖ, при этом широкая распростра-

ненность, мобильность, низкая стоимость и безопасность ЭхоКГ привели к тому, что она стала методом выбора в большинстве ситуаций, требующих подобного анализа. Однако, поскольку сердце имеет сложную анатомическую структуру и находится в постоянном, динамическом движении, М-режим и

© Коллектив авторов, 2006
Тел.: 414-77-55, 414-77-66
Факс: 414-77-68
E-mail: simonmats@yahoo.com

двухмерная ЭхоКГ предполагают определенные геометрические допущения относительно формы и функции ЛЖ, которые приводят к погрешностям при измерениях. Во многих случаях анализ общей и региональной функции ЛЖ проводится визуально, поскольку существующие методы количественного определения являются довольно трудоемкими и трудно выполнимыми. В ситуации, когда на основании этих данных принимаются очень важные и часто дорогостоящие решения, совершенно необходимы точные и воспроизводимые методы ультразвуковой диагностики, тем более что метод «золотого стандарта» — магнитно-резонансная томография (МРТ), не столь широко доступен, является более дорогостоящим, не может использоваться у пациентов с имплантированными кардиостимуляторами или дефибрилляторами, и плохо переносится многими пациентами.

Трехмерная (3Д) ЭхоКГ была доступна в течение многих лет, однако она использовала трудоемкие и сложные методы реконструкции, часто с применением чреспищеводного исследования. В то же время, недавние успехи в области компьютерной обработки изображений и технологии производства датчиков привели к тому, что трансторакальная 3Д ЭхоКГ в реальном времени стала приемлемым методом для клинического использования. Одновременно стали доступными программы анализа 3Д наборов данных; это сочетание нового оборудования и программного обеспечения предлагает настолько точный, по сравнению с МРТ, анализ морфологии и функции ЛЖ, что это гарантирует ЭхоКГ статус «метода выбора» при неинвазивной оценке состояния ЛЖ.

3Д ЭхоКГ в реальном времени

Первые 3Д методы ЭхоКГ основывались на получении множества отдельных двухмерных изображений с использованием трансторакального или чреспищеводного доступа. Одновременно было необходимо определение пространственных и временных параметров каждой проекции для их соответствия сердечным и дыхательным циклам [1,2]. Все это занимало много времени и зачастую сопровождалось нежелательным для пациентов дискомфортом, особенно при длительном (> 10 минут) чреспищеводном сканировании.

Подобной трудоемкой реконструкции 3Д набора результатов можно избежать, используя методику получения 3Д наборов данных в режиме реального времени, что может быть достигнуто при использовании матричного датчика, содержащего, помимо электронных компонентов, от 3 до 4000 индивидуальных сканирующих элементов, позволяющих получать 3Д набор данных в секторе 30° x 60° (30 на 60), что дает возможность 3Д визуализации клапанных структур или части ЛЖ в режиме реального времени [3,4]. Для получения большего набора данных, необходимых для визуализации всего ЛЖ, датчик рас-

полагается в области верхушки ЛЖ и производится набор нескольких, обычно четырех, подобных секторов в течение 4 сердечных циклов при кратковременной задержке дыхания, с их последующим наложением друг на друга. В результате получается пирамидальный 3Д набор в секторе 90° x 90° (90 на 90) с частотой кадров 20-25 Гц, достаточный для быстрого и полного анализа состояния ЛЖ.

Однако для подобного анализа полученный 3Д набор данных должен быть соответствующим образом обработан и интерпретирован ультразвуковой системой. В рамках этого процесса внутрисердечные структуры воспроизводятся в оперативной памяти аппарата таким образом, чтобы полученный набор данных мог быть представлен в любой плоскости или сечении, обеспечивая визуализацию любой структуры сердца с любых позиций. Производя подобные срезы, возможно детальное изучение анатомического строения и движения внутрисердечных структур, включая миокард ЛЖ (рисунок 1).

Важной возможностью при анализе морфологии или функции ЛЖ является использование 3Д набора данных для вычисления объемов ЛЖ и/или миокарда во множестве срезов в течение всего сердечного цикла. Это достигается делением воксельного набора данных на несколько двухмерных плоскостей и полуколичественным определением границ эндокарда в каждой плоскости. Дополнительно указываются некоторые анатомические опорные точки, такие как фиброзное кольцо митрального клапана и верхушка ЛЖ, затем программное обеспечение производит расчет с последующим представлением «слепок» полости ЛЖ, на основании которого возможно количественное определение объемов в каждом сердечном цикле (рисунок 2). Получение набора данных производится в течение 4-5 секунд и в случае адекватного определения эндокардиальной поверхности все исследование на этом этапе занимает < 1 минуты.

Качество 3Д ЭхоКГ изображения может ухудшаться, как и в случае с двухмерной ЭхоКГ. Для улучшения визуализации и определения границ эндокарда могут применяться ультразвуковые контрастные препараты, что позволяет добиваться получения 3Д наборов данных практически у всех пациентов [6].

Измерение объемов и ФВ ЛЖ

Вычисление объемов ЛЖ с использованием М-режима предполагает, что он имеет форму вытянутого эллипса и что, измеряя конечный диастолический размер (КДР) можно рассчитать его объем. Несмотря на то, что этот подход имеет многочисленные недостатки и даже незначительные ошибки при измерении КДР становятся намного значимей при возведении в 3 степень, удивительно, как часто подобное вычисление все еще используется в клинической практике. Более того, большинство ульт-



Рис. 1 Пример 3Д изображения сердца. Полный 3Д набор данных получен из апикального доступа. Передняя стенка ЛЖ удалена для визуализации его полости и большой апикальной тромбированной аневризмы, при этом возможна оценка размера, формы и морфологии тромба. В режиме реального времени оценивается его подвижность, а также общая функция ЛЖ.

развучковых аппаратов предлагают данный метод для определения объема сердца при ЭхоКГ. Вычисление объемов ЛЖ на основании двухмерной ЭхоКГ с использованием метода дисков (по Симпсону) приводит к значительно меньшему количеству геометрических ошибок, особенно когда используется в двухпроекционном формате. Однако все еще остается допущение, что ЛЖ может быть представлен рядом сложных дисков с переменными диаметрами. У больных с региональными нарушениями систолической функции или аневризмами ЛЖ такой подход неверен.

3Д ЭхоКГ не делает никаких допущений относительно формы ЛЖ. Более того, граница эндокарда измеряется во многих сотнях точек, поэтому вычисление объема более точно и воспроизводимо чем в случае, когда используются всего 1 или 2 проекции. На сегодняшний день существует большое количество публикаций, в которых показана

высокая корреляция между 3Д вычислениями объемов ЛЖ и его фракции выброса (ФВ) по сравнению с «золотым стандартом» — МРТ [5,10,13,16,27]. Большинство этих исследований показало значительное увеличение точности и воспроизводимости по сравнению с обычной двухмерной ЭхоКГ. Немаловажно, что при этом также возможно и точное определение объемов правого желудочка [7,21]. На рисунке 2 приведен пример математической производной модели «слепок» ЛЖ, при этом в режиме реального времени он подвижен, моделируя сокращение и расслабление ЛЖ. Изображение может ротироваться на экране для визуальной оценки региональной функции во всех 18 сегментах, выделенных в соответствии с рекомендациями Американского Общества Эхокардиографии (АОЭ), при этом все сегменты могут кодироваться разным цветом. Объем ЛЖ рассчитывается в каждом кадре в 3Д наборе

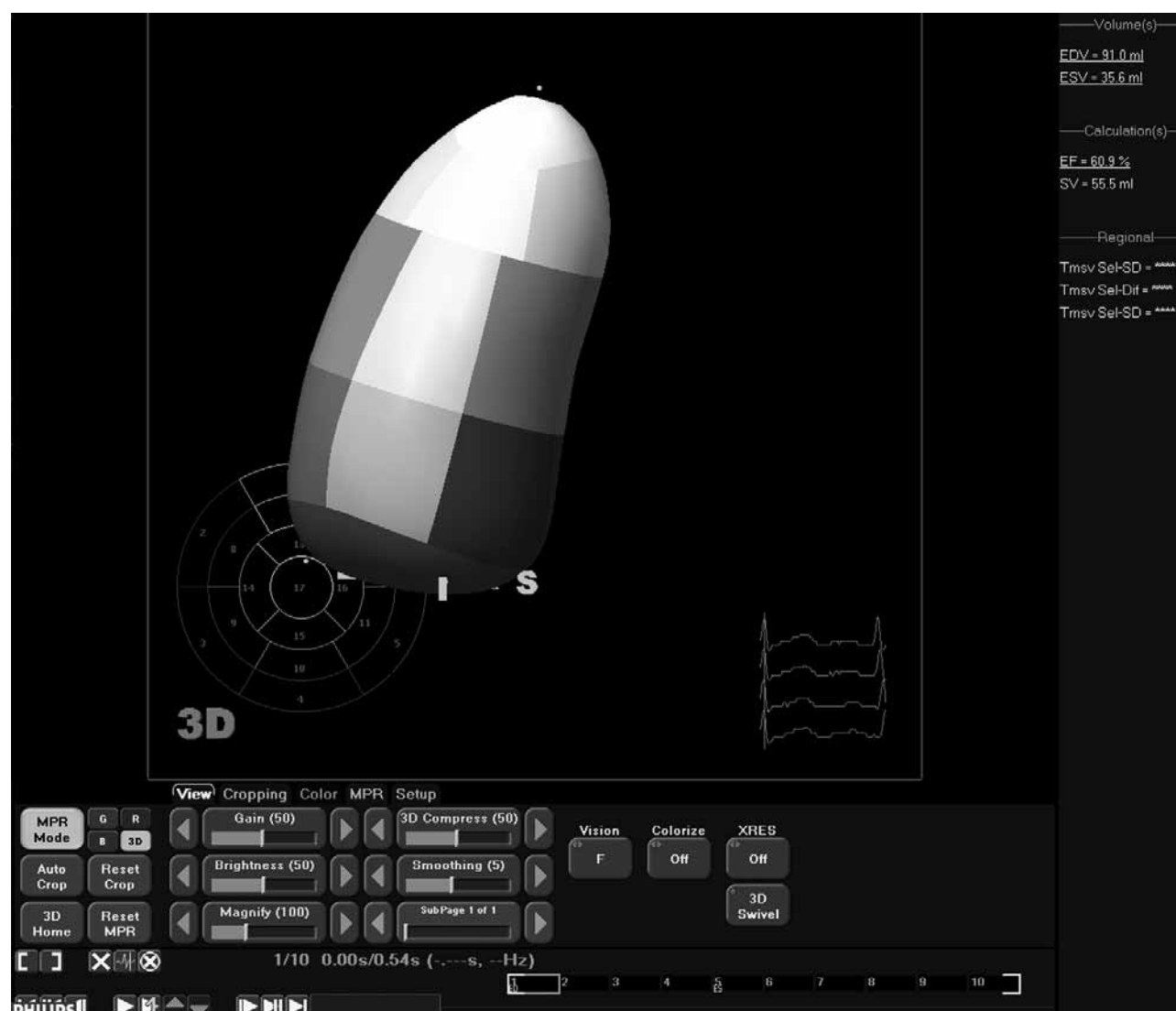


Рис. 2 Математическая модель, или «слепок», ЛЖ, полученный при полуавтоматическом определении эндокардиальной границы в 3Д наборе данных. После идентификации нескольких анатомических ориентиров «слепок» ЛЖ автоматически делится на 18 сегментов. Объем каждого сегмента (относительно центра тяжести ЛЖ) или объем всего ЛЖ может быть вычислен для каждой фазы сердечного цикла (рисунок 3).

данных и представляется в виде графика зависимости объема от времени. Конечный диастолический объем (КДО), конечный систолический объем (КСО) и ФВ рассчитываются автоматически (рисунок 3).

Форма ЛЖ

Известно, что форма и геометрические индексы ЛЖ служат дополнительными важными параметрами оценки состояния сердца у больных с дисфункцией миокарда. С постепенным ухудшением функции ЛЖ происходит увеличение его размера, ЛЖ принимает сферическую, а не эллиптическую форму. Двухмерная ЭхоКГ позволяет определять индекс сферичности (ИС) ЛЖ на основании отношения его длинной оси к коротким осям на разных уровнях ЛЖ в диастолу. Чем больше нарушается форма ЛЖ, тем ближе значение ИС к 1. Естественно, что ИС, полученный из 3Д объемов ЛЖ, будет

точнее соответствовать истинной его форме [15,22].

Современное программное обеспечение позволяет быстрое вычисление ИС, используя 3Д данные об объемах ЛЖ, полученные с использованием матричного датчика. 3Д ИС рассчитывается путем деления КДО (вычисленного в трехмерном наборе данных) на объем сферы, диаметр которой принимается равным наибольшему размеру длинной оси ЛЖ в диастолу. ИС, определенный таким методом, является более ранним и точным предиктором ремоделирования ЛЖ у больных после острого инфаркта миокарда по сравнению с другими клиническими, электрокардиографическими (ЭКГ) и ЭхоКГ данными [17].

Масса ЛЖ

Определение массы ЛЖ на основании М-режима или двухмерной ЭхоКГ имеет аналогичные

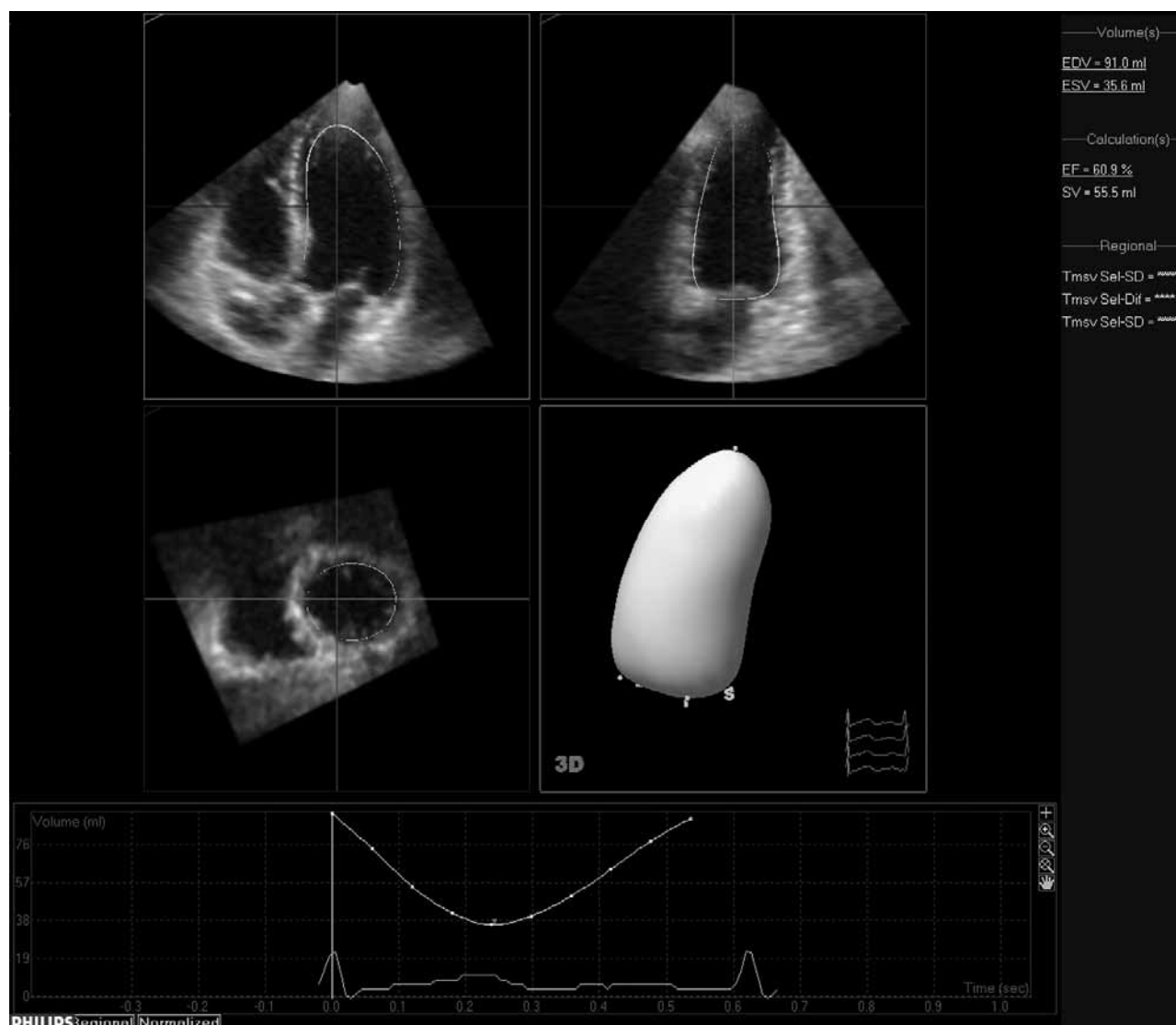


Рис. 3 Апикальный полный 3Д набор данных, представленный в виде стандартных двухмерных апикальной 4-камерной и 2-камерной проекций, а также изображения по короткой оси ЛЖ. Полуавтоматическое прослеживание границы эндокарда (желтая линия) в каждой проекции может быть при необходимости скорректировано вручную. В дальнейшем создается математическая модель или «слепок» ЛЖ с использованием всех 3Д данных. В нижней части выводится график зависимости вычисленного объема ЛЖ (объема «слепок») в зависимости от фазы сердечного цикла. Также автоматически рассчитываются КДО и КСО, ФВ и ИС ЛЖ.

допущения и неточности, как вычисление объемов ЛЖ [9,19]. Удивительно, что с учетом невысокой воспроизводимости этих методов, они все еще широко используются в клинической практике и научных исследованиях, касающихся пациентов с артериальной гипертензией, у которых изучается регресс массы ЛЖ под влиянием антигипертензивной терапии. Применяя тот же самый полный 3Д набор данных, возможна точная идентификация границы эпикарда ЛЖ. Это используется программным обеспечением для вычисления эпикардального «слепок» ЛЖ. После вычитания из полученного объема величины эндокардиального «слепок», можно определить объем миокарда ЛЖ и, умножая его на приблизительный удельный вес миокарда, рассчитывается его масса (рисунок 4). Было показано, что данный подход позволяет произво-

дить быстрые и очень точные вычисления по сравнению с МРТ [18]. Более того, подобное определение массы ЛЖ имело достоверно большую корреляцию с результатами МРТ, чем стандартные методы ЭхоКГ [4].

Низкая воспроизводимость определения массы миокарда с помощью двухмерной ЭхоКГ позволяла сделать заключение, что, несмотря на большую стоимость, использование МРТ требует участия в исследованиях по регрессу гипертрофии ЛЖ значительно меньшего количества пациентов, и поэтому общая стоимость использования МРТ ниже, чем ЭхоКГ. Однако теперь, когда 3Д ЭхоКГ показала высокую точность и воспроизводимость по сравнению с МРТ, данное исследование может быть методом выбора в будущих работах подобного рода [8,20].



Рис. 4 Пример вычисления массы ЛЖ, где апикальные 4-х и 2-камерные проекции были воссозданы из полного 3Д набора данных. В полуавтоматическом режиме идентифицируются эндокардиальная и эпикардиальная/правожелудочковая септальная границы миокарда ЛЖ с последующим вычислением объемов ЛЖ и миокарда по формуле Симпсона для 2 проекций. Последний умножается на удельный вес сердечной мышцы с получением массы миокарда ЛЖ (в данном случае 143 грамма).

Анализ региональной функции ЛЖ и диссинхронии

Наряду с точной неинвазивной оценкой глобальной функции ЛЖ крайне важен достоверный анализ региональной функции ЛЖ, особенно в контексте пациентов с сердечной недостаточностью (СН) и потенциальным наличием диссинхронии ЛЖ. Несколько методов ЭхоКГ, включая тканевую доплер-ЭхоКГ, показали возможность определения внутрижелудочковой диссинхронии, и эти методы используются при отборе пациентов для сердечной ресинхронизационной терапии (СРТ). 3Д ЭхоКГ в реальном времени является многообещающим точным и воспроизводимым инструментом для выявления и количественного анализа выраженности внутрижелудочковой диссинхронии. Она предоставляет возможность отбора пациентов, у которых положительный результат лечения будет более опре-

деленным, а также предсказать обратное ремоделирование ЛЖ [14]. С этой целью используется «слепок» ЛЖ, полученный из полного 3Д набора данных, в котором идентифицируются некоторые анатомические ориентиры, и затем он автоматически делится на 18 сегментов в соответствии с рекомендациями АОЭ. Далее вычисляется относительный центр тяжести каждого «слепок» с последующим расчетом объема каждого сегмента. Любой из этих сегментарных объемов имеет пирамидальную форму, объем такой пирамиды определяется для всякого «слепок»/набора данных в каждой фазе сердечного цикла. В результате достигается ряд данных, характеризующих изменение объема каждого сегмента в систолу и диастолу (рисунок 5 А, Б, В).

В желудочке с синхронным сокращением всех сегментов можно ожидать, что минимальный объем в любом из них будет достигнут в почти одно и то же

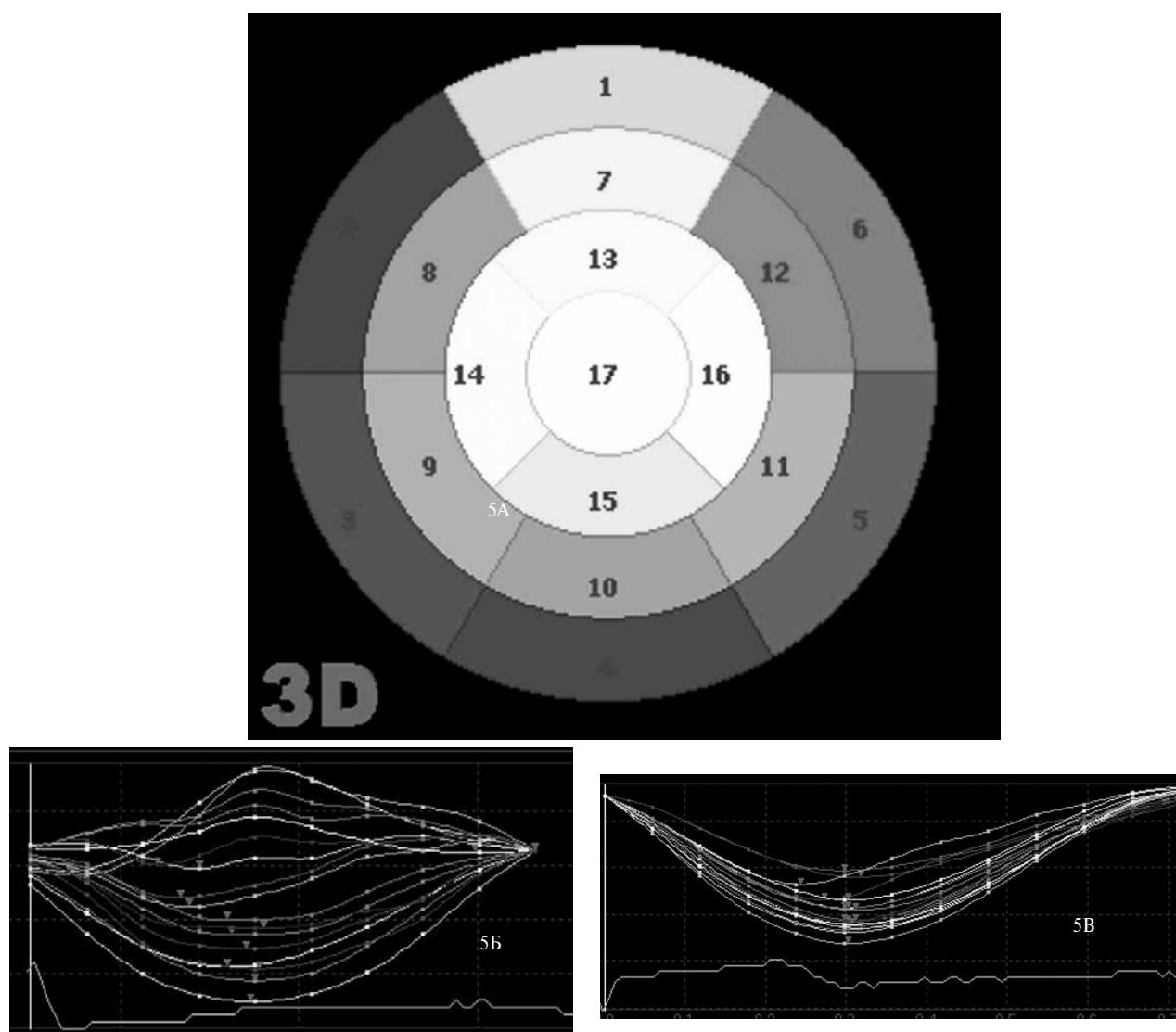


Рис. 5 Сегментарные объемы ЛЖ в зависимости от фазы сердечного цикла у пациента с бивентрикулярным кардиостимулятором в отключенном режиме (5 Б). Те же кривые сегментарных объемов после активизации режима стимуляции (5 В). В первом случае заметно, что каждый из 18 сегментов ЛЖ (5 А) достигает минимального объема в различное время в пределах сердечного цикла, что указывает на наличие выраженной внутрижелудочковой диссинхронии. Однако после включения бивентрикулярной стимуляции кривые сегментарных объемов ЛЖ выравниваются во времени, указывая на более синхронное сокращение всех сегментов.

время, тогда как при наличии диссинхронии сокращения желудочка будет определяться дисперсия во времени наступления минимального объема для каждого из 18 сегментов. Степень дисперсии может быть вычислена путем измерения стандартного отклонения времени достижения минимального объема и затем скорректирована по интервалу R-R. Такой подход позволяет получить индекс систолической диссинхронии (ИСД), который может использоваться с целью количественного определения степени нарушения функции ЛЖ во всех сегментах, тогда как такие методики В-режима, как тканевая доплер-ЭхоКГ, дают возможность одновременного сравнения сегментов только в пределах сканируемой плоскости. Показано, что существует умеренная корреляция между некоторыми показателями тканевой доплер-ЭхоКГ и 3Д ИСД у пациентов с

сохранной и сниженной функцией ЛЖ. Тем не менее, показатели тканевой доплер-ЭхоКГ в настоящее время рассматривают как «золотой стандарт» при оценке степени диссинхронии, поэтому необходимо дальнейшее изучение возможностей 3Д ЭхоКГ в данном направлении.

Теоретически можно было бы ожидать, что положительный эффект от СРТ будет более значительным у больных с признаками выраженной диссинхронии, тогда как пациенты с низким ИСД и относительно синхронной работой ЛЖ не нуждаются в ресинхронизации. ИСД у больных с СН, в основном, не зависит от этиологии дисфункций ЛЖ, более того, продемонстрирована его обратная корреляция с ФВ, т.е. пациенты с более высоким ИСД имеют более низкую сократительную функцию ЛЖ. Однако большего интереса заслуживает факт,

Таблица 1

Трехмерная ЭхоКГ для анализа диссинхронии ЛЖ

- Позволяет проводить сравнение времени максимального сокращения всех сегментов ЛЖ
- Измерение региональных объемов обеспечивает оценку всех векторов движения ЛЖ
- Превосходное пространственное решение
- Быстрое получение и анализ
- ИСД является простым, интуитивным, воспроизводимым и прогностически важным параметром при отборе на ресинхронизационную терапию
- Графическое «параметрическое» отображение диссинхронных сегментов ЛЖ является указанием на предпочтительную локализацию ЛЖ электрода

Таблица 2

Возможности трехмерной ЭхоКГ при оценке состояния ЛЖ

- Определение морфологии и функции ЛЖ является основной задачей при проведении ЭхоКГ
- Исследование М-режима и двухмерная ЭхоКГ предполагают неправильные геометрические допущения о форме ЛЖ, обладают низкой воспроизводимостью
- Трехмерная (3D) ЭхоКГ не имеет никаких геометрических искажений, показывает истинную форму ЛЖ
- 3D ЭхоКГ определяет границу эндокарда в 700 точках
- 3D ЭхоКГ имеет превосходную корреляцию с МРТ при определении объема, массы и ФВ ЛЖ
- Воспроизводимость 3D ЭхоКГ сопоставима с МРТ

что отношение между ИСД и ФВ сохраняется независимо от продолжительности комплекса QRS. Это означает, что существуют пациенты с СН, низкой ФВ ЛЖ, узким комплексом QRS и наличием диссинхронии согласно результатам 3D ЭхоКГ. Они могут составлять новую группу больных для проведения бивентрикулярной стимуляции, которым в настоящее время отказывают в этом виде лечения, потому что они имеют нормальную или незначительно увеличенную продолжительность QRS. Другие ЭхоКГ методы оценки диссинхронии ЛЖ также продемонстрировали, что механическая диссинхрония может наблюдаться при нормальной продолжительности QRS. Таким образом, остается открытым вопрос, какой из ЭхоКГ методов будет более эффективен в идентификации пациентов с положительным результатом от СРТ.

С другой стороны, можно выделить группу пациентов, удовлетворяющих текущим критериям для проведения СРТ, которые имеют низкую ФВ и широкий комплекс QRS; однако, у этих пациентов отсутствуют признаки выраженной диссинхронии ЛЖ, и ИСД у них низкий. Эта группа может составлять до 20-30% пациентов, не реагирующих на СРТ.

Продолжительность анализа на наличие и выраженность диссинхронии с использованием автоматического программного обеспечения ~ 5 минут, что позволяет считать этот метод удобным и пригодным для отбора пациентов на СРТ и оценки результатов процедуры. Однако интервал в 5 минут слишком велик для оптимизации работы кардиостимулятора, когда необходимо выполнение множества измерений для выявления наиболее благоприятного режима стимуляции. Возможно, будущие версии программного обеспечения позволят выполнять быстрое вычисление ИСД в реальном времени после каждого изменения параметров работы кардиостимулятора. При этом цель оптимизации СРТ сос-

тояла бы в том, чтобы достигнуть самого низкого индекса внутрижелудочковой диссинхронии.

Также возможно параметрическое представление данных в виде «бычьего глаза» [25]. Эта технология основана на определении степени регионального сокращения в 700-800 точках по эндокардиальной поверхности ЛЖ в трехмерном наборе данных в отличие от 18 стандартных сегментов. В дальнейшем используется цветовое кодирование для визуального отображения сегментов, сокращающихся в последнюю очередь, что может использоваться электрофизиологами для выбора оптимального положения электродов для стимуляции ЛЖ. Параметрические изображения могут быть сопоставлены с ангиографической анатомией коронарного синуса для более точного позиционирования электрода.

Использование 3D ЭхоКГ для оценки состояния пациентов, направляемых на СРТ, находится все еще на ранней стадии. Однако предварительные данные позволяют предположить, что она может стать мощным и удобным инструментом для выявления, количественной оценки и визуального представления диссинхронии сердечной деятельности. 3D анализ диссинхронии ЛЖ поможет определить группу больных с СН, у которых будет или не будет эффект от проведения СРТ (таблица 1). Она имеет потенциал определять оптимальную локализацию ЛЖ электрода, который используют в лабораториях электрофизиологии, может также оптимизировать параметры кардиостимулятора. Однако, вероятно, наиболее привлекательной особенностью этого метода в данном контексте является то, что он обладает интуитивным и понятным графическим отображением состояния сердца, понятным кардиологам и электрофизиологам, занимающимся отбором пациентов на СРТ.

Получение полного набора данных при 3D сканировании, как указано выше, занимает несколько секунд и может быть выполнено даже у

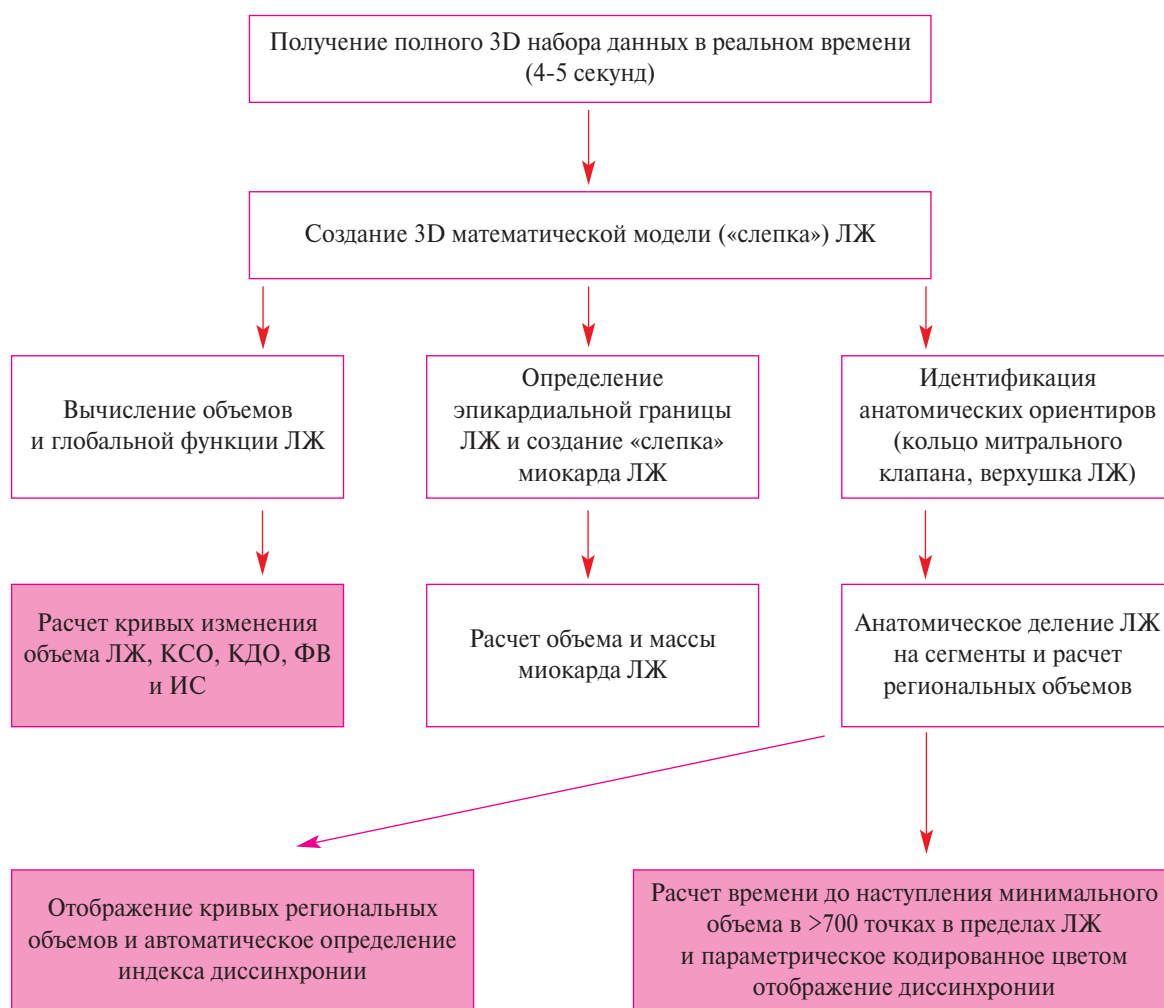


Рис. 6 Стадии получения 3D набора данных и анализа ЛЖ.

постели больного (рисунок 6). Последующее создание математической модели ЛЖ позволяет вычислять все стандартные параметры его анатомии и функции. Из того же самого набора данных могут быть получены более подробные характеристики региональной функции и синхронности работы ЛЖ.

Заключение

Достижения в технологиях получения ультразвуковых изображений и программном обеспечении по их обработке позволили 3Д ЭхоКГ стать из трудоемкого и сложного метода исследования простым, удобным и клинически применимым способом, который может дать достоверные ответы на основной вопрос, касающийся применения всех визуализирующих процедур для обследования в кардио-

логии состояния функции ЛЖ (таблица 2). Несомненными приоритетами такой технологии служат возможность и большие перспективы ее использования в кардиохирургии. Новые области ее применения включают детальную визуализацию врожденных пороков сердца [12,26], достоверную оценку состояния клапанного аппарата и внутрисердечной гемодинамики при приобретенных пороках сердца [11,23], обнаружение опухолей сердца и внутрисердечных образований [24].

3Д визуализация сердца, по-видимому, станет стандартной процедурой на всех новых ЭхоКГ системах. В будущем УЗИ сердца без применения 3Д режима для анализа глобальной и региональной функции ЛЖ будет также нецелесообразно, как выполнение стандартной двухмерной ЭхоКГ без использования доплеровского сканирования.

Литература

1. Бокерия Л.А., Голухова Е.З., Кулямин А.И. и др. Первый опыт применения трехмерной эхокардиографии в кардиохирургической клинике. Груд и серд-сосуд хир 2000; 1: 46-50.
2. Бокерия Л.А., Машина Т.В., Голухова Е.З. Трехмерная эхокардиография. Москва, НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН 2002; 90 с.
3. Саидова М.А., Рогоза А.Н., Беленков Ю.Н. Первый опыт применения «живой» трехмерной эхокардиографии в России. Кардиология 2004; 5: 100-4.
4. Саидова М.А., Стукалова О.В., Сеницын В.Е. и др. Трехмерная эхокардиография в оценке массы миокарда левого желудочка: сопоставление с результатами одно-, двухмерной эхокардиографии и магнитно-резонансной томографии. Тер архив 2005; 1: 11-4.
5. Bu L, Munns S, Zhang H, et al. Rapid full volume data acquisition by real-time 3-dimensional echocardiography for assessment of left ventricular indexes in children: a validation study compared with magnetic resonance imaging. J Am Soc Echocardiogr 2005; 18: 299-305.
6. Corsi C, Borsari M, Consegna F, et al. Left ventricular endocardial surface detection based on real-time 3D echocardiographic data. Eur J Ultrasound 2001; 13: 41-51.
7. Fei HW, Wang XF, Xie MX, et al. Validation of real-time three-dimensional echocardiography for quantifying left and right ventricular volumes: an experimental study. Chin Med J (Engl) 2004; 117: 695-9.
8. Gopal AS, Schnellbaecher MJ, Shen Z, et al. Freehand three-dimensional echocardiography for determination of left ventricular volume and mass in patients with abnormal ventricles: comparison with magnetic resonance imaging. J Am Soc Echocardiogr 1997; 10: 853-61.
9. Gottdiener JS, Livengood SV, Meyer PS, et al. Should echocardiography be used to assess effects of antihypertensive therapy? Test-retest reliability of echocardiography for measurement of left ventricular mass and function. JACC 1995; 25: 424-30.
10. Gutierrez-Chico JL, Zamorano JL, Perez de Isla L, et al. Comparison of left ventricular volumes and ejection fractions measured by three-dimensional echocardiography versus by two-dimensional echocardiography and cardiac magnetic resonance in patients with various cardiomyopathies. Am J Cardiol 2005; 95: 809-13.
11. Haugen BO, Berg S, Brecke KM, et al. Blood flow velocity profiles in the aortic annulus: a 3-dimensional freehand color flow Doppler imaging study. J Am Soc Echocardiogr 2002; 15: 328-33.
12. Hofmann T, Franzen O, Koschik DH, et al. Three-dimensional color Doppler echocardiography for assessing shunt volume in atrial septal defects. J Am Soc Echocardiogr 2004; 17: 1173-8.
13. Jenkins C, Bricknell K, Hanekom L, et al. Reproducibility and accuracy of echocardiographic measurements of left ventricular parameters using real-time three-dimensional echocardiography. JACC 2004; 44: 878-86.
14. Kapetanakis S, Kearney MT, Siva A, et al. Real-time three-dimensional echocardiography. A novel technique to quantify global left ventricular mechanical dyssynchrony. Circulation 2005; 112: 992-1000.
15. Kawai J, Tanabe K, Morioka S, Shiotani H. Rapid freehand scanning three-dimensional echocardiography: accurate measurement of left ventricular volumes and ejection fraction compared with quantitative gated scintigraphy. J Am Soc Echocardiogr 2003; 16: 110-5.
16. Kuhl HP, Schreckenber M, Rulands D, et al. High-resolution transthoracic real-time three-dimensional echocardiography: quantitation of cardiac volumes and function using semi-automatic border detection and comparison with cardiac magnetic resonance imaging. JACC 2004; 43: 2083-90.
17. Mannearts HFJ, Van Der Heide JA, Kamp O, et al. Early identification of left ventricular remodelling after myocardial infarction, assessed by transthoracic 3D echocardiography. Eur Heart J 2004; 28: 680.
18. Mor-Avi V, Sugeng L, Weinart L, et al. Fast measurement of left ventricular mass with real-time three-dimensional echocardiography: comparison with magnetic resonance imaging. Circulation 2004; 110: 1814-8.
19. Myerson SG, Montgomery HE, World MJ, et al. Left ventricular mass: reliability of M-mode and 2-dimensional echocardiographic formulas. Hypertension 2002; 40: 673-8.
20. Rusk RA, Mori Y, Davies CH, et al. Comparison of ventricular volume and mass measurements from B- and C-scan images with the use of real-time 3-dimensional echocardiography: studies in an in vitro model. J Am Soc Echocardiogr 2000; 13: 910-7.
21. Schindera ST, Mehwald PS, Sahn DJ, et al. Accuracy of real-time three-dimensional echocardiography for quantifying right ventricular volume. J Ultrasound Med 2002; 21: 1069-75.
22. Schmidt S, Ohazama C, Agyeman K, et al. Real-time three-dimensional echocardiography for the measurement of left ventricular volumes. Am J Cardiol 1999; 84: 1434-9.
23. Tsujino H, Jones M, Shiota T, et al. Impact of temporal resolution on flow quantification by real-time 3D color Doppler echocardiography: numerical modeling and animal validation study. Comput Cardiol 2000; 27: 761-4.
24. Weissman NJ, Asch FM, Panza JA. Real-time 3D echocardiography in evaluation of intracardiac masses. Jap J Echocardiography 2006; 23: 218-24.
25. Wisch PJ, Hockins PR, Muran C, et al. Developments in cardiovascular ultrasound: signal processing and instrumentation. Med Biol Eng Comput 2005; 35: 561-9.
26. Zavad DA, Crawford FA Jr, Chessa KS, Shirali GS. Real-time three-dimensional echocardiography for evaluation of patients with congenital heart defects. Portuguese J Ped Cardiol 2006; 3: 22-8.
27. Zeidan Z, Erbel R, Barkhausen J, et al. Analysis of global systolic and diastolic left ventricular performance using volume-time curves by real-time three-dimensional echocardiography. J Am Soc Echocardiogr 2003; 16: 29-37.

Поступила 05/04-2006