

© И.В. Сливнева, Н.О. Сокольская, 2019

УДК 616.126.422-008.64-073.43

*И.В. Сливнева, Н.О. Сокольская*

## **Трехмерная эхокардиографическая модель функциональной митральной недостаточности**

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева» (директор – академик РАН и РАМН Л.А. Бокерия) Минздрава России, Рублевское ш., 135, Москва, 121552, Российская Федерация

Сливнева Инесса Викторовна, канд. мед. наук, науч. сотр., врач ультразвуковой диагностики, [orcid.org/0000-0001-7935-7093](https://orcid.org/0000-0001-7935-7093);

Сокольская Надежда Олеговна, доктор мед. наук, руководитель группы экстренной ультразвуковой и функциональной диагностики, [orcid.org/0000-0003-0716-0149](https://orcid.org/0000-0003-0716-0149)

Вторичная митральная регургитация является сложным заболеванием, связанным с искажением структур митрального клапана и геометрии левого желудочка в результате ведущей причины. Митральный комплекс представляет собой динамичную структуру с изменением формы и взаимоотношений компонентов клапана на всем протяжении сердечного цикла. Изучение анатомии и движения митрального аппарата необходимо для полного понимания патофизиологии функциональных изменений. В последнее время появилось много информации по оценке вторичной митральной недостаточности, и эхокардиография по-прежнему остается основным неинвазивным методом визуализации клапанной патологии сердца.

Успех реконструктивной операции при функциональной митральной недостаточности зависит от анализа механизма развития митральной регургитации, реконструктивного потенциала клапана, корректной оценки количественных характеристик степени недостаточности. Оценка функциональной митральной регургитации является сложной задачей с анализом большого количества параметров. Наибольшей информативностью в отношении механизма вторичной митральной регургитации, структуры и функции митрального клапана при его дисфункции обладает трехмерная эхокардиография, которая позволяет проводить всесторонний, сложный морфофункциональный анализ митрального клапана, а также более достоверную оценку количественных характеристик митральной регургитации по сравнению с двухмерным эхокардиографическим исследованием.

**Ключевые слова:** функциональная митральная недостаточность; трехмерная эхокардиография.

*Для цитирования:* Сливнева И.В., Сокольская Н.О. Трехмерная эхокардиографическая модель функциональной митральной недостаточности. *Креативная кардиология*. 2019; 13 (3): 229–40. DOI: 10.24022/1997-3187-2019-13-3-229-240

*Для корреспонденции:* Сливнева Инесса Викторовна, e-mail: [slivneva@mail.ru](mailto:slivneva@mail.ru)

*I.V. Slivneva, N.O. Sokol'skaya*

## **Three-dimensional echocardiographic model of functional mitral insufficiency**

Bakoulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery, Ministry of Health of the Russian Federation, Rublevskoe shosse, 135, Moscow, 121552, Russian Federation

Inessa V. Slivneva, Cand. Med. Sc., Researcher, Ultrasound Diagnostician, [orcid.org/0000-0001-7935-7093](https://orcid.org/0000-0001-7935-7093);

Nadezhda O. Sokol'skaya, Dr. Med. Sc., Head of the Group of Emergency Ultrasound and Functional Diagnostics, [orcid.org/0000-0003-0716-0149](https://orcid.org/0000-0003-0716-0149)

Secondary mitral valve regurgitation is a complex disease involving distortion of the mitral valve structures and left ventricular geometry as a result of the leading cause. The mitral complex is a dynamic structure with changes in its shape and relationship of the valve components geometry throughout the cardiac cycle. Study of anatomy and motion of the mitral apparatus is necessary for complete understanding of the pathophysiology of functional changes. Recently, there has been a lot of information about the evaluation of secondary mitral insufficiency. Echocardiography is still the main non-invasive imaging technique for valvular heart disease.

Success of reconstructive surgery for functional mitral insufficiency depends on the analysis of the mitral regurgitation mechanism, the reconstructive potential of the valve, the correct assessment of the quantitative characteristics of insufficiency degree. Echocardiographic assessment of functional mitral regurgitation is a complex purpose with the analysis of a large number of parameters. Three-dimensional echocardiography allows to perform the comprehensive morphofunctional analysis of mitral valve, as well as the most reliable assessment of the quantitative characteristics of the mitral regurgitation degree. It has the greater information content regarding the mechanism of secondary mitral regurgitation, structure and function of the mitral valve compared with two-dimensional echocardiographic study.

**Keywords:** functional mitral regurgitation; three-dimensional echocardiography.

**For citation:** Slivneva I.V., Sokol'skaya N.O. Three-dimensional echocardiographic model of functional mitral insufficiency. *Creative Cardiology*. 2019; 13 (3): 229–40 (in Russ.). DOI: 10.24022/1997-3187-2019-13-3-229-240

**For correspondence:** Inessa V. Slivneva, e-mail: slivneva@mail.ru

**Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

Received July 17, 2019

Accepted July 31, 2019

## Введение

Определяющей задачей эхокардиографического исследования (ЭхоКГ) пациентов с функциональной митральной недостаточностью перед планируемой операцией, особенно реконструктивной, является идентификация приоритетного механизма развития недостаточности клапана. С помощью двухмерной эхокардиографии (2D-ЭхоКГ) было сделано множество предположений относительно механизма вторичной митральной регургитации, часть из них была подтверждена методом трехмерной эхокардиографии (3D-ЭхоКГ). 3D-ЭхоКГ позволяет получать как качественную, так и количественную информацию о морфологии митрального клапана (МК) и актуальна для понимания механизма развития функциональной митральной недостаточности (ФМН) на новом витке ее изучения. Чреспищеводная 3D-ЭхоКГ

обеспечивает несомненно лучшее морфологическое структурирование МК и вносит неоценимый вклад в изучение ФМН, позволяя проводить всесторонний, сложный морфофункциональный анализ МК.

В настоящее время выделяют три основных метода получения 3D-ЭхоКГ-визуализации, которые представлены в таблице 1 [1].

## Анализ морфологии митрального клапана с помощью 3D-эхокардиографии

Первым этапом исследования недостаточности МК функционального генеза при проведении 3D-ЭхоКГ является изучение его морфологии. С помощью «хирургического» вида можно исследовать предсердную поверхность створок, линию коаптации и комиссуральные зоны на протяжении всего сердечного цикла. Несмотря на отсутствие структурных изменений, геометрия клапана в результате тетеринга

Таблица 1

### Методы получения трехмерной визуализации

Метод	Описание
Real-time, или live 3D-визуализация	Визуализация позволяет получить объемное 3D-изображение пирамидальной формы в масштабе реального времени
Multi-beat ЭКГ-синхронизированная визуализация	Осуществляется через последовательное выстраивание малых секторов, полученных в результате синхронизации с ЭКГ за несколько сердечных сокращений (от 2 до 6), которые впоследствии «сшиваются», создавая единый объемный набор данных
Multiplane-изображение	Одновременная визуализация двух изображений в режиме 2D в реальном времени. При необходимости к анализу в обеих плоскостях добавляется цветовое картирование

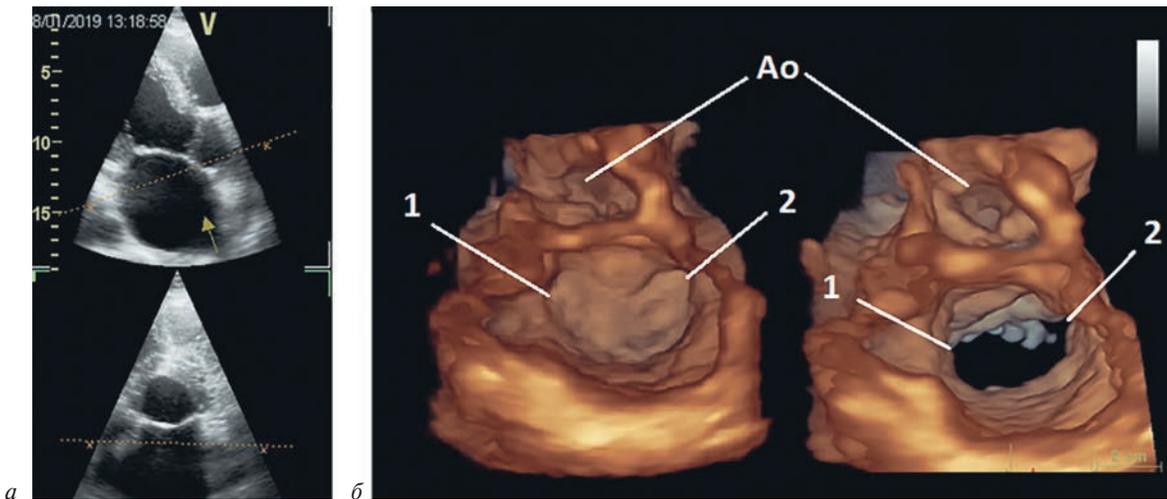


Рис. 1. «Хирургический» вид митрального клапана у пациента с функциональной митральной регургитацией по данным трансторакального 3D-эхокардиографического исследования (слева показано положение датчика при 2D-исследовании):

*а* – воронкообразная форма митрального клапана в систолу; *б* – митральный клапан в диастолу.  
1 – переднелатеральная комиссура; 2 – заднемедиальная комиссура

(втяжения) створок заметно меняется. Клапан начинает вытягиваться со смещением точек коаптации в глубину, принимая воронкообразную форму (рис. 1). Образуется так называемый тент – плоскость между плоскостью фиброзного кольца МК и створками клапана в систолу.

Линия коаптации становится более вогнутой при симметричном тетеринге, а при асимметричном полностью меняет свою форму, смещаясь в сторону левого желудочка (ЛЖ). Объективно оценить геометрию МК с предсердной стороны посред-

вом 3D-ЭхоКГ – значит обеспечить понимание механизма ФМН, а также определить симметричный (рис. 2, *а*) или асимметричный (рис. 2, *б*) вариант тетеринга. Это, в свою очередь, будет обуславливать хирургическую стратегию, возможность и целесообразность выполнения реконструктивной операции.

При более выраженном смещении задней митральной створки может образовываться относительный пролапс передней створки (рис. 3). Необходимо провести различия с истинным пролапсом МК в ре-

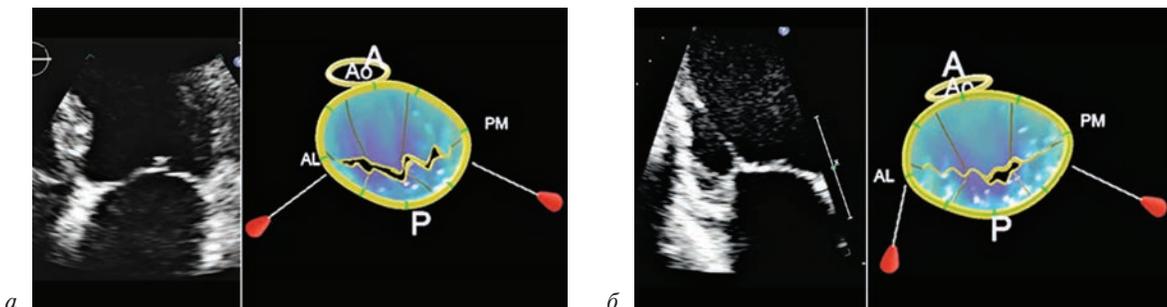


Рис. 2. Оценка митрального клапана с помощью 2D-эхокардиографии (слева) и 3D-реконструкция митрального клапана с помощью программы Mitral Valve Quantification (MVQ) [2]\*:

*а* – симметричный тетеринг створок митрального клапана; *б* – асимметричный тетеринг створок митрального клапана.  
AL (anterolateral) – переднелатеральная комиссура; PM (posteromedial) – заднемедиальная комиссура; Ao – аорта; A (anterior) – передняя створка; P (posterior) – задняя створка

\*Опубликовано с разрешения Dr. Khalil Fattouch.

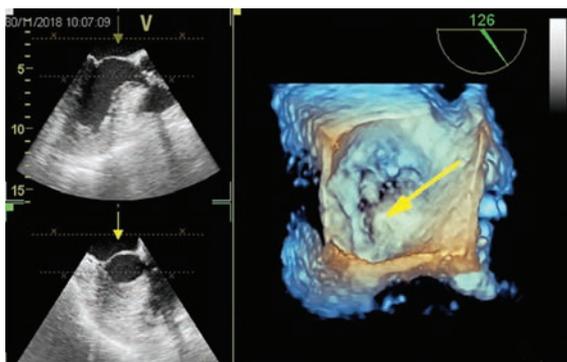


Рис. 3. Чреспищеводное 3D-эхокардиографическое исследование, «хирургический» вид митрального клапана из левого предсердия. Стрелкой показан относительный пролапс передней митральной створки

зультате удлинения или отрыва подклапанных структур. В случае с относительным пролапсом подклапанные структуры интактны, но изменение плоскостей обеих створок в систолу приводит к восприятию этого визуального несоответствия как пролапса передней створки.

В случае ФМН очень важным фактором служит изучение геометрии фиброзного кольца МК. В норме оно представляет собой подвижную структуру седловидной эллиптической формы (рис. 4), в которой межкомиссуральный диаметр преобладает над передне-задним, а высота передней полуокружности — над задней (вогнутой стороной, обращенной к заднему кольцу). Причем следует учесть, что на протяжении всего сердечного цикла размер фиброзного кольца МК изменяется.

Эллиптическая форма фиброзного кольца округляется в фазу поздней диастолы и уплощается в систолу [4]. В наиболее эллиптической конфигурации клапана отношение минимального и максимального диаметров составляет приблизительно 0,75 [5].

При функциональных изменениях для детального морфологического анализа МК осуществляется его автономная (постпроцессинговая) реконструкция. В ходе реконструкции используются 3D-настройки различных коммерческих программных приложений. Измерения допустимо про-

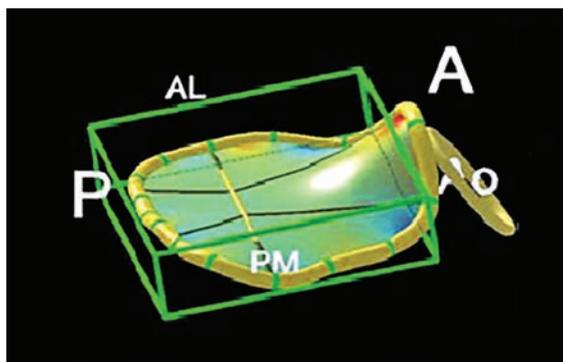


Рис. 4. 3D-реконструкция седловидной формы кольца митрального клапана. Высота фиброзного кольца митрального клапана в норме 7–10 мм [3]\*

\*Опубликовано с разрешения Dr. Francesco F. Faletta.

водить в любой точке сердечного цикла. В учет берутся следующие параметры: размер и форма фиброзного кольца МК, динамичность митрального кольца между систолой и диастолой, геометрия подклапанного аппарата и его положение относительно кольцевой плоскости МК. Рассчитывается площадь поверхности створок МК. В итоге получаем набор данных, которые дают возможность составить достаточно объективное представление не только о морфологических особенностях, но и о динамических свойствах МК.

Исследования, в которых анализировалась плоскость фиброзного кольца МК методом 3D-ЭхоКГ, показали, что периметр и площадь кольца увеличиваются при ФМН, а сама форма кольца уплощается (в норме высота кольца МК 7–10 мм), теряя свою эллиптическую конфигурацию (рис. 5) [6, 7]. Эти исследования также продемонстрировали, что степень деформации митрального кольца при ишемической ФМН более выражена при переднем инфаркте миокарда и реже — при нижнем [8].

Уменьшение замыкательной функции МК, то есть изменение площади кольца в систолу и диастолу, описывают как один из основных механизмов, приводящих к возникновению ФМН [9]. В норме сокращение кольца составляет около 25%, при функциональной митральной

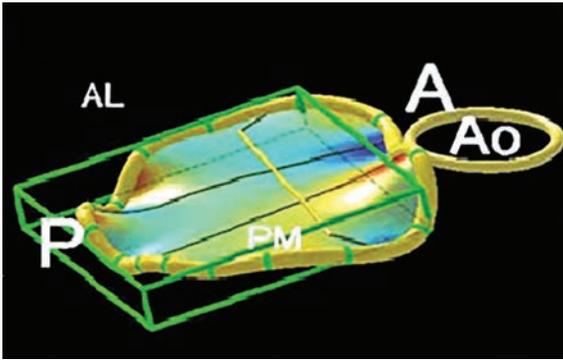


Рис. 5. 3D-реконструкция митрального клапана у пациента с тяжелой степенью митральной недостаточности. Высота кольца митрального клапана уменьшилась в 2 раза (4 мм) по сравнению с нормой [3]\*

\* Опубликовано с разрешения Dr. Francesco F. Faletta.

недостаточности этот диапазон уменьшается [10, 11]. 3D-ЭхоКГ также доказала, что в норме каудальное смещение митрального кольца происходит во время систолы и более выражено в задней области, тогда как при ФМН это смещение уменьшается, особенно в задней области [12].

Кроме того, с помощью 3D-реконструкции МК возможны такие измерения, как площадь поверхности створок, площадь коаптации створок, высота коаптации и индекс коаптации. Вычисление площади поверхности створок помогает нам понять, что створки МК способны динамически адаптироваться для поддержания адекватной коаптации. Впервые это было определено с помощью 3D-эхокардиографических исследований на животных. Было показано динамическое увеличение створок, что, в свою очередь, увеличивает поверхность коаптации МК. Таким образом, появилось понимание, почему при выраженном тетеринге встречается умеренная степень митральной регургитации [13].

Функциональная митральная недостаточность характеризуется субоптимальной или неудовлетворительной коаптацией в результате тетеринга створок МК. В исследовании Y. Otsuji et al. (2002 г.) все показатели коаптации, оцениваемые с помощью чреспищеводной 3D-ЭхоКГ (площадь

коаптации створок, индекс коаптации и длина коаптации), были связаны с выраженностью функциональной митральной недостаточности [14]. Площадь коаптации створок определяли как разницу между общей площадью створок (поверхность створок МК, измеренная в начале закрытия створок) и закрытой площадью поверхности створок, измеренной в середине систолы. Необходимо отметить, что возможна недооценка площади коаптации в связи с отсутствием возможности выбора максимального увеличения поверхности створок во время систолы [15]. Индекс коаптации является более корректным и подходящим параметром для анализа динамического увеличения поверхности створок МК на протяжении всей систолы. Индекс коаптации был определен как отношение площади коаптации к общей площади створок, умноженное на 100. В исследовании Y. Otsuji et al. индекс коаптации также ассоциировался с тяжестью ФМН [14].

С помощью специального программного обеспечения в реконструированной 3D-модели (см. рис. 5) также можно рассчитать объем тента (объем между поверхностью створок и плоскостью фиброзного кольца МК в середине систолы). Ценную информацию о механизме втяжения створок МК дает даже простое изучение формы тента. В частности, асимметричный тетеринг обычно склоняется в сторону наибольшего втяжения, то есть явно определяется наиболее втянутый сегмент. Объем тента напрямую коррелирует со степенью тяжести ФМН и является надежным маркером выраженности тетеринга.

3D-ЭхоКГ позволяет проводить комплексную оценку подклапанного аппарата и его положение относительно плоскости митрального кольца. Для характеристики тетеринга МК и определения степени его выраженности у пациентов с ФМН могут быть использованы следующие показатели: расстояние между каждой головкой папиллярной мышцы и плоскостью МК, межпапиллярное расстояние и расстояние

между каждой головкой папиллярной мышцы и его контралатеральной или ипсилатеральной комиссурой.

Расстояние тетеринга — один из ценных оценочных параметров, получаемых с помощью 3D-ЭхоКГ. Он важен для описания деформации аппарата МК при ФМН. Это расстояние, измеряемое между митрально-аортальным контактом и головкой задне-медиальной папиллярной мышцы в середине систолы. Классически его называют «расстояние медиального тетеринга». Этот параметр оказался надежным маркером выраженности деформации митрального аппарата и сильным (значимым) предиктором прогрессирования митральной регургитации после инфаркта миокарда [16, 17]. Расстояние между головкой переднелатеральной папиллярной мышцы и митрально-аортальным контактом (расстояние латерального тетеринга) также может быть измерено. Преимуществом 3D-ЭхоКГ перед 2D-ЭхоКГ при измерении данного параметра является точная идентификация головок папиллярных мышц, что снижает вариабельность измерения, а значит, повышает точность исследования.

Продолжающееся ремоделирование ЛЖ в ряде случаев приводит к рецидиву ФМН после реконструктивной операции [18–21]. Выделены определенные критерии возможного неудовлетворительного результата кольцевой пластики МК в послеоперационном периоде. Параметры, прогнозирующие рецидив митральной регургитации, включают: конечный диастолический размер ЛЖ  $> 6,5$  см или  $> 3,5$  см/м<sup>2</sup>, глубину коаптации  $> 10$  мм, угол задней створки  $> 45^\circ$ , площадь тента  $> 2,5$  см<sup>2</sup>, межпапиллярную дистанцию в систолу  $> 20$  мм, индекс сферичности ЛЖ  $> 0,7$  и рубцовое поле базального сегмента заднебоковой стенки ЛЖ [22, 23].

Кроме того, следует учитывать другие ориентиры: дооперационную степень митральной регургитации, параметры фиброзного кольца МК, диастолическое давление наполнения ЛЖ и диссинхронию ЛЖ

[24–26]. В таком случае должны быть рассмотрены многокомпонентные варианты реконструктивных операций на МК или протезирование либо интервенционное лечение. А для более глубокого понимания анатомии и механизма развития ФМН необходимо проведение мультимодальной 3D-ЭхоКГ с полноценным анализом возможных параметров оценки митрального аппарата и функциональных особенностей ЛЖ.

### **Оценка выраженности функциональной митральной недостаточности с помощью 3D-эхокардиографии**

После первичной морфологической оценки МК необходимо провести анализ и более детальную количественную оценку клапана у пациентов с ФМН. Получение точных количественных характеристик степени ФМН является особенно сложной задачей из-за динамических характеристик потока. В современных руководствах степень выраженности ФМН по-прежнему оценивают с помощью стандартных количественных показателей, полученных из 3D-ЭхоКГ: ширина *vena contracta* (наиболее узкое место конвергенции потока) и проксимальная зона регургитации (*proximal isovelocity surface area* — PISA) для оценки площади эффективного отверстия регургитации (*effective regurgitant orifice area* — EROA) и объема регургитации (*regurgitant volume* — RVol) [15, 27, 28].

Для определения значений EROA и RVol используют следующие формулы:

$$VFR = 2\pi \times r^2 \times V_r,$$

$$EROA = VFR / V_{\max},$$

$$RVol = EROA \times VTI,$$

где VFR — объемная скорость потока митральной регургитации (мл/с);  $r$  — радиус PISA (см);  $V_r$  — скорость aliasing на уровне радиуса PISA (см/с); EROA — площадь эффективного отверстия регургитации (мм<sup>2</sup>);  $V_{\max}$  — пиковая скорость струи митральной регургитации (м/с); RVol — объем регургитации (мл/уд); VTI — интеграл линейной скорости митральной регургитации во времени (см).

Таблица 2

**Референсные значения EROA по данным 2D-эхокардиографии**

Степень митральной регургитации	EROA, мм <sup>2</sup>	RVol, мл/уд
Умеренная	< 20	< 30
Умеренно-выраженная	20–30	30–45
Выраженно-тяжелая	30–40	45–60
Тяжелая	≥ 40	≥ 60

Эти показатели продемонстрировали важные прогностические взаимосвязи в отсроченном периоде у пациентов с ФМН. Имеются данные о корреляции EROA > 20 мм<sup>2</sup> или RVol > 30 мл с увеличением летальности в 2 раза по сравнению с пациентами без регургитации (табл. 2). Такие пороговые значения существенно отличаются от рекомендованных для больных с дегенеративной митральной недостаточностью, где EROA, превышенная более чем в 2 раза (> 40 мм<sup>2</sup>), прогнозирует неблагоприятный исход [29, 30].

Ширина струи митральной регургитации, так называемый перешеек регургитации (*vena contracta*), – легко воспроизводимый параметр оценки выраженности потока. Ширина *vena contracta* ≤ 3 мм свидетельствует о незначительной степени митральной недостаточности, ширина ≥ 7 мм – о тяжелой степени. Но между этими пороговыми значениями – слепая зона,

сопряженная с умеренной, выраженной и, в некоторых случаях, тяжелой степенью митральной регургитации [31]. Измерение площади *vena contracta* посредством 3D-ЭхоКГ показывает истинное поперечное сечение потока в зоне малькоаптации [32].

Измеренная с помощью планиметрии площадь *vena contracta* в большей степени коррелирует с доплерографическим значением EROA, чем с шириной *vena contracta*, полученной с помощью 2D-ЭхоКГ (рис. 6). F. Grigioni et al. определили площадь *vena contracta* 0,2 см<sup>2</sup> как пороговое значение тяжелой степени митральной недостаточности функционального генеза [33]. X. Zeng et al. предлагают считать 0,41 см<sup>2</sup> границей между умеренной и тяжелой степенью митральной недостаточности независимо от этиологии и формы отверстия [32]. Ограниченное пространственное разрешение реконструированных изображений может сделать измерение площади *vena contracta* особенно непросто у пациентов с ФМН средних градаций.

Выраженное нарушение геометрии митрального кольца приводит к серьезной деформации линии коаптации. Кроме того, сложность может усугубляться неправильной формой отверстия регургитации: при ФМН она становится чаще эллиптической, а не круглой формы либо образуется

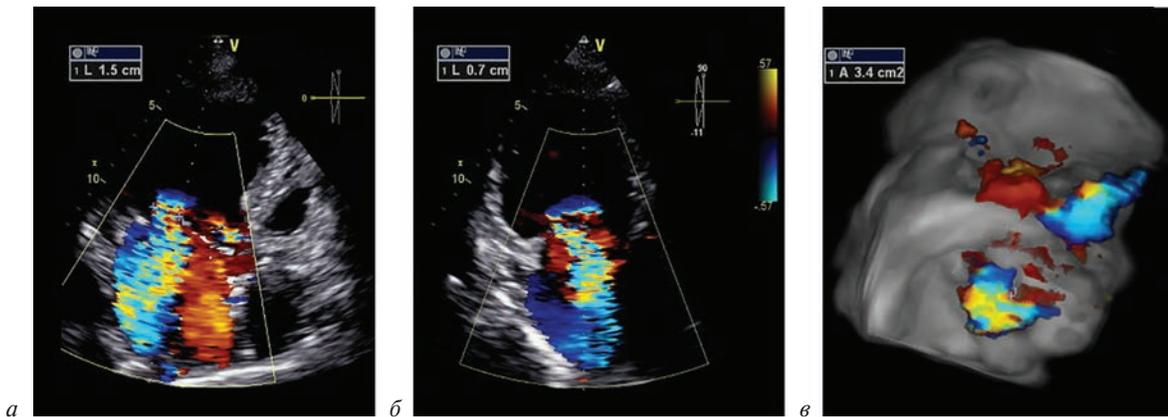


Рис. 6. Трансторакальное мультиплановое измерение ширины *vena contracta*:

а, б – ширина *vena contracta* в двух ортогональных плоскостях; в – определение истинной площади *vena contracta* в режиме en face по данным 3D-эхокардиографии

несколько отверстий. При двухмерном исследовании недооценивается ширина *vena contracta*, EROA и RVol по сравнению с 3D-ЭхоКГ [34, 35]. 3D-ЭхоКГ преодолевает эти ограничения и повышает точность оценки параметров EROA и RVol у пациентов с ФМН [36].

Прямая планиметрия *vena contracta* с использованием 3D-оценки значительно повышает точность определения EROA и демонстрирует сильную взаимосвязь со значением RVol, полученным из EROA, измеренной при помощи 3D-планиметрии. Результаты оказались сопоставимы с данными, полученными посредством магнитно-резонансной томографии [32]. Однако цветовое картирование и кроппирование потока регургитации в неортогональной плоскости могут завышать значения площади *vena contracta* [36].

Другим важным параметром измерения площади *vena contracta* является выбор систолического момента, что может приводить к серьезной межисследовательской разнице, так как степень ФМН очень динамична на протяжении всей систолы и зависит от выбранного кадра, а вычисленные значения могут сильно отличаться между операторами.

Посредством метода определения PISA при 2D-ЭхоКГ оценивают EROA и RVol, при этом предполагается, что зона конвергенции потока представляет собой геми-

сферу (рис. 7). Измеряют радиус полусферы – от плоскости отверстия регургитации до цветовой границы зоны конвергенции. При эксцентричном направлении потока митральной регургитации необходима корректировка на угол с использованием формулы [37]:

$$RVol = Rvol_{PISA} \times (\alpha^\circ / 180^\circ).$$

Как было показано, с внедрением 3D-ЭхоКГ зона конвергенции потока часто имеет форму гемиэллипса или более сложную конфигурацию [17]. По данным компьютерного моделирования наблюдалось значительное отклонение значения PISA, измеренного посредством 2D-ЭхоКГ, от экспериментальной модели. Компьютерная модель представляла собой не геми-сферу, как предполагает расчет 2D-методом, а гемиэллипс с большей площадью поверхности, чем представляет гемисфера, что приводит к выраженной недооценке потока [38, 39].

В большей степени при ФМН поток доминирует в медиальной или латеральной зоне и может располагаться далеко от линии коаптации, что может приводить к недооценке выраженности потока [35, 40]. А при ФМН зона конвергенции потока может быть искажена в плоскости, поэтому 3D-ЭхоКГ позволяет исследователю выбрать необходимую плоскость для правильного анализа и оценки выраженности потока (рис. 8). 3D-ЭхоКГ дает высокую

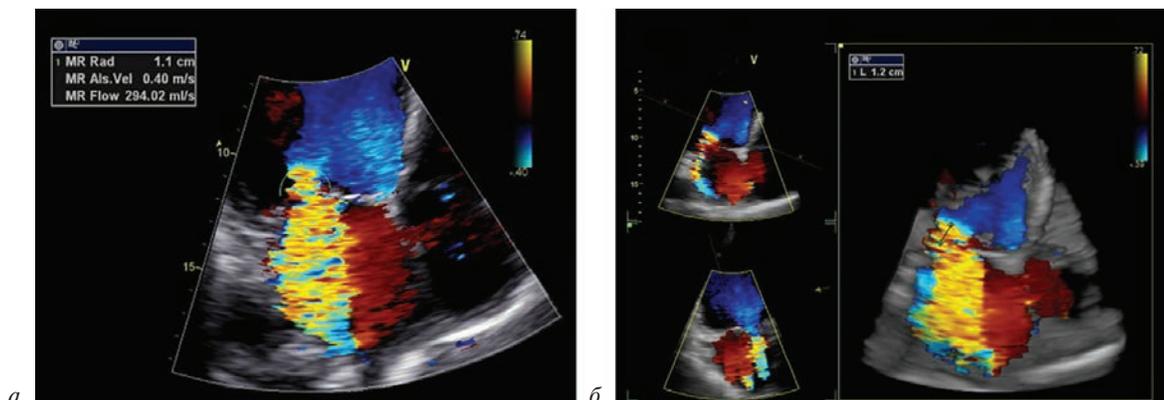


Рис. 7. Измерение радиуса PISA:

а – 11 мм по данным 2D-эхокардиографии; б – 12 мм по данным 3D-эхокардиографии

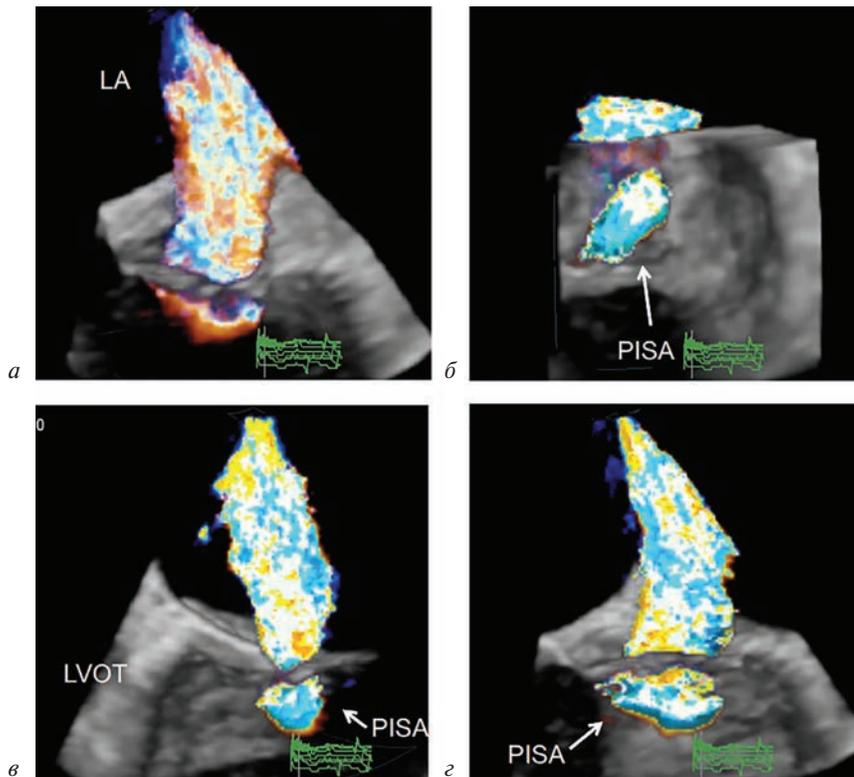


Рис. 8. Реконструкция PISA с помощью цветового 3D-доплеровского картирования у пациента с выражено-тяжелой степенью митральной недостаточности [41]:

*а* – вид из левого предсердия; *б* – вид из левого желудочка, PISA асимметричной формы (предел Найквиста 30,8 см/с); *в* – узкий поток PISA в парастеральном сечении по длинной оси; *г* – широкий поток в 2-камерном сечении.

LA (left atrium) – левое предсердие; LVOT (left ventricular outflow tract) – выводной тракт левого желудочка

точность исследования как при центральных, так и при эксцентричных потоках, а также при отверстиях любых форм.

Традиционно измерения PISA проводятся в середине систолы, где предполагается, что PISA максимальна, поэтому значение EROA будет самым большим и митральная регургитация – самой выраженной. Однако в случае ФМН динамичный характер этой патологии приводит к значительной вариативности EROA и RVol на протяжении всего сердечного цикла [42]. И измерение PISA в разных моментах будет приводить к недооценке истинного сброса либо его переоценке [40]. С помощью 3D-цветовой доплерографии можно вычислить EROA и RVol более корректно у пациентов с ФМН.

Также возможен расчет истинной PISA с помощью трансторакальной 3D-ЭхоКГ.

Полнообъемное (full volume) 3D-цветовое доплеровское картирование с ультразвуковой системой объемной визуализации представляет собой новую технологию, которая позволяет вычислять EROA и RVol, применяя те же уравнения, которые используются в 2D-ЭхоКГ, но с тем преимуществом, что PISA измеряется непосредственно с помощью 3D. Этот подход показал более высокую точность по сравнению с результатами, полученными обычным методом сферической аппроксимации [43]. Одним из ограничений данного метода является то, что измерение PISA проводится в одной фиксированной точке, выбранной оператором, таким образом, что отсутствует динамический характер ФМН по всей систоле. В связи с постоянным совершенствованием 3D-ЭхоКГ в будущем может появиться возможность мгновенно-

го расчета 3D-PISA на протяжении всей систолы [44]. Вычисление усредненных пансистолических значений EROA и RVol, вероятно, даст новое представление о функциональной митральной недостаточности и ее пороговых значениях.

Аортальная вальвулопатия не создает препятствий к применению метода PISA, который мало зависит от вязкости крови и от условий нагрузки, в отличие от максимальной площади потока, регургитирующего в левое предсердие [28]. Тем не менее аортальный поток регургитации в некоторых случаях не позволяет проводить точные измерения радиуса PISA.

Одним из альтернативных методов оценки RVol является волюметрический подход, при котором антеградный ударный объем вычитается из ударного объема, проходящего через МК, что обеспечивает оценку усредненного EROA на протяжении всей систолы, а следовательно, результат не зависит от динамических изменений EROA во время всего сердечного цикла. Однако этот трудоемкий метод также подвержен высокой степени вариабельности, основанной на ряде факторов, включая зависимость от точного измерения выводного тракта ЛЖ и митрального кольца, а также хорошего качества изображения [15, 40, 45]. Помимо всего прочего, аортальный порок не позволяет пользоваться данным методом при оценке митральной регургитации. В таких случаях возможно применение других параметров оценки митральной недостаточности.

### Заключение

Таким образом, необходимо установить пороговые значения параметров 3D-ЭхоКГ для количественной оценки выраженности митральной регургитации функционального генеза, так как значения EROA и RVol, полученные с помощью 2D- и 3D-ЭхоКГ, не являются взаимозаменяемыми [2]. Будущие достижения в автоматизированной оценке трехмерного потока, усредненного по времени, предоставят новые пороговые

значения выраженности митральной недостаточности функционального генеза. А успех реконструктивной операции на функциональном МК зависит от анализа механизма развития митральной регургитации, реконструктивного потенциала клапана, корректной оценки количественных характеристик степени недостаточности.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Литература [References]

1. Lang R.M., Badano L.P., Tsang W., Adams D.H., Agricola E., Buck T. et al. EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using three-dimensional echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2012; 25 (1): 3–46. DOI: 10.1016/j.echo.2011.11.010
2. Fattouch Kh., Lancellotti P., Angelini G.D. (Eds.) Secondary mitral valve regurgitation. Springer London; 2015. DOI: 10.1007/978-1-4471-6488-3
3. Faletta F.F. Echocardiography in mitral valve disease. Springer-Verlag Italia; 2012. DOI: 10.1007/978-88-470-5435-6
4. Ormiston J.A., Shah P.M., Tei C., Wong M. Size and motion of the mitral valve annulus in man. I. A two-dimensional echocardiographic method and findings in normal subjects. *Circulation.* 1981; 64 (1): 113–20. DOI: 10.1161/01.cir.64.1.113
5. Levine R.A., Handschumacher M.D., Sanfilippo A.J., Hagege A.A., Harrigan P., Marshall J.E., Weyman A.E. Three-dimensional echocardiographic reconstruction of the mitral valve, with implications for the diagnosis of mitral valve prolapse. *Circulation.* 1989; 80 (3): 589–98. DOI: 10.1161/01.cir.80.3.589
6. Watanabe N., Ogasawara Y., Yamaura Y., Kawamoto T., Akasaka T., Yoshida K. Geometric deformity of the mitral annulus in patients with ischemic mitral regurgitation: a real-time three-dimensional echocardiographic study. *J. Heart Valve Dis.* 2005; 14 (4): 447–52.
7. Ahmad R.M., Gillinov A.M., McCarthy P.M., Blackstone E.H., Apperson-Hansen C., Qin J.X. et al. Annular geometry and motion in human ischemic mitral regurgitation: novel assessment with three-dimensional echocardiography and computer reconstruction. *Ann. Thorac. Surg.* 2004; 78 (6): 2063–8. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2004.06.016
8. Watanabe N., Ogasawara Y., Yamaura Y., Wada N., Kawamoto T., Toyota E. et al. Mitral annulus flattens in ischemic mitral regurgitation: geometric differences between inferior and anterior myocardial infarction: a real-time 3-dimensional echocardiographic study. *Circulation.* 2005; 112 (9 Suppl.): I458–62. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.524595
9. Daimon M., Gillinov A.M., Liddicoat J.R., Saracino G., Fukuda S., Koyama Y. et al. Dynamic change in mitral annular area and motion during

- percutaneous mitral annuloplasty for ischemic mitral regurgitation: preliminary animal study with real-time 3-dimensional echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2007; 20 (4): 381–8. DOI: 10.1016/j.echo.2006.08.029
10. Flachskampf F., Chandra S., Gaddipatti A., Levine R.A., Weyman A.E., Ameling W. et al. Analysis of shape and motion of the mitral annulus in subjects with and without cardiomyopathy by echocardiographic 3-dimensional reconstruction. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2000; 13 (4): 277–87. DOI: 10.1067/mje.2000.103878
  11. Chaput M., Handschumacher M.D., Guerrero J.L., Holmvang G., Dal-Bianco J.P., Sullivan S. et al. Mitral leaflet adaptation to ventricular remodeling: prospective changes in a model of ischemic mitral regurgitation. *Circulation.* 2009; 120 (11 Suppl.): S99–103. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.109.844019
  12. Saito K., Okura H., Watanabe N., Obase K., Tamada T., Koyama T. et al. Influence of chronic tethering of the mitral valve on mitral leaflet size and coaptation in functional mitral regurgitation. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2012; 5 (4): 337–45. DOI: 10.1016/j.jcmg.2011.10.004
  13. Chen L., McCulloch A., May-Newman K. Nonhomogeneous deformation in the anterior leaflet of the mitral valve. *Ann. Biomed. Eng.* 2004; 32 (12): 1599–606. DOI: 10.1007/s10439-004-7813-6
  14. Otsuji Y., Kumanohoso T., Yoshifuku S., Matsukida K., Koriyama C., Kisanuki A. et al. Isolated annular dilation does not usually cause important functional mitral regurgitation: comparison between patients with lone atrial fibrillation and those with idiopathic or ischemic cardiomyopathy. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2002; 39 (10): 1651–6. DOI: 10.1016/s0735-1097(02)01838-7
  15. Lancellotti P., Moura L., Pierard L.A., Agricola E., Popescu B.A., Tribouilloy C. et al. European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 2: mitral and tricuspid regurgitation (native valve disease). *Eur. J. Echocardiogr.* 2010; 11 (4): 307–32. DOI: 10.1093/ejechocard/jeq031
  16. Otsuji Y., Handschumacher M.D., Liel-Cohen N., Tanabe H., Jiang L., Schwammenthal E. et al. Mechanism of ischemic mitral regurgitation with segmental left ventricular dysfunction: three-dimensional echocardiographic studies in models of acute and chronic progressive regurgitation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2001; 37 (2): 641–8. DOI: 10.1016/s0735-1097(00)01134-7
  17. Marsan N.A., Westenberg J.J., Ypenburg C., Delgado V., van Bommel R.J., Roes S.D. et al. Quantification of functional mitral regurgitation by real-time 3D echocardiography: comparison with 3D velocity-encoded cardiac magnetic resonance. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2009; 2 (11): 1245–52. DOI: 10.1016/j.jcmg.2009.07.006
  18. Smith P.K., Puskas J.D., Ascheim D.D., Voisine P., Gelijns A.C., Moskowitz A.J. et al. Surgical treatment of moderate ischemic mitral regurgitation. *N. Engl. J. Med.* 2014; 371 (23): 2178–88. DOI: 10.1056/NEJMoa1410490
  19. Acker M.A., Daganais F., Goldstein D., Kron I.L., Perrault L.P. Severe ischaemic mitral regurgitation: Repair or replace? *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2015; 150 (6): 1425–7. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2015.09.018
  20. Tolis G. Jr., Sundt T.M. 3rd. Surgical strategies for management of mitral regurgitation: recent evidence from randomized controlled trials. *Curr. Atheroscler. Rep.* 2015; 17 (12): 67. DOI: 10.1007/s11883-015-0549-y
  21. LaPar D.J., Acker M.A., Gelijns A.C., Kron I.L. Repair or replace for severe ischemic mitral regurgitation: prospective randomized multicenter data. *Ann. Cardiothorac. Surg.* 2015; 4 (5): 411–6. DOI: 10.3978/j.issn.2225-319X.2015.04.11
  22. Vahanian A., Alfieri O., Andreotti F., Antunes M.J., Barón-Esquivias G., Baumgartner H. et al. Guidelines on the management of valvular heart disease (version 2012). *Eur. Heart J.* 2012; 33 (19): 2451–96. DOI: 10.1093/eurheartj/ehs109
  23. Flynn M., Curtin R., Nowicki E.R., Rajeswaran J., Flamm S.D., Blackstone E.H., Mihaljevic T. Regional wall motion abnormalities and scarring in severe functional ischemic mitral regurgitation: a pilot cardiovascular magnetic resonance imaging study. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2009; 137 (5): 1063–70. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2008.12.023
  24. Kongsarepong V., Shiota M., Gillinov A.M., Song J.M., Fukuda S., McCarthy P.M. et al. Echocardiographic predictors of successful versus unsuccessful mitral valve repair in ischemic mitral regurgitation. *Am. J. Cardiol.* 2006; 98 (4): 504–8. DOI: 10.1016/j.amjcard.2006.02.056
  25. Van Garsse L., Gelsomino S., Lucà F., Parise O., Lorusso R., Cheriex E. et al. Left ventricular dyssynchrony is associated with recurrence of ischemic mitral regurgitation after restrictive annuloplasty. *Int. J. Cardiol.* 2013; 168 (1): 176–84. DOI: 10.1016/j.ijcard.2012.09.098
  26. Ereminiene E., Vaškelytė J., Benetis R., Stoskute N. Ischemic mitral valve repair: predictive significance of restrictive left ventricular diastolic filling. *Echocardiography.* 2005; 22 (3): 217–24. DOI: 10.1111/j.0742-2822.2005.03108.x
  27. Yosefy C., Hung J., Chua S., Vaturi M., Ton-Nu T.T., Handschumacher M.D., Levine R.A. Direct measurement of vena contracta area by real-time 3-dimensional echocardiography for assessing severity of mitral regurgitation. *Am. J. Cardiol.* 2009; 104 (7): 978–83. DOI: 10.1016/j.amjcard.2009.05.043
  28. Голухова Е.З., Шанаурина Н.В. Роль изучения проксимальной зоны регургитации в количественной оценке недостаточности митрального клапана. *Креативная кардиология.* 2007; 1–2: 243–55. [Golukhova E.Z., Shanaurina N.V. The role of the study of the proximal regurgitation zone in the quantitative assessment of mitral valve insufficiency. *Creative Cardiology.* 2007; 1–2: 243–55 (in Russ.).]
  29. Enriquez-Sarano M., Avierinos J.F., Messika-Zeitoun D., Detaint D., Capps M., Nkomo V. et al. Quantitative determinants of the outcome of asymptomatic mitral regurgitation. *N. Engl. J. Med.* 2005; 352 (9): 875–83. DOI: 10.1056/NEJMoa041451
  30. Rossi A., Dini F.L., Faggiano P., Agricola E., Ciccoira M., Frattini S. et al. Independent prognostic value of functional mitral regurgitation in patients with heart failure. A quantitative analysis

- of 1256 patients with ischaemic and non-ischaemic dilated cardiomyopathy. *Heart*. 2011; 97 (20): 1675–80. DOI: 10.1136/hrt.2011.225789
31. Chan K.M. (Ed.) Functional mitral and tricuspid regurgitation. Pathophysiology, assessment and treatment. Springer International Publishing Switzerland; 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-43510-7
32. Zeng X., Levine R.A., Hua L., Morris E.L., Kang Y., Flaherty M. et al. Diagnostic value of vena contracta area in the quantification of mitral regurgitation severity by color Doppler 3D echocardiography. *Circ. Cardiovasc. Imaging*. 2011; 4 (5): 506–13. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.110.961649
33. Grigioni F., Enriquez-Sarano M., Zehr K.J., Bailey K.R., Tajik A.J. Ischemic mitral regurgitation: long-term outcome and prognostic implications with quantitative Doppler assessment. *Circulation*. 2001; 103 (13): 1759–64. DOI: 10.1161/01.cir.103.13.1759
34. Kahlert P., Plicht B., Schenk I.M., Janosi R.A., Erbel R., Buck T. Direct assessment of size and shape of noncircular vena contracta area in functional versus organic mitral regurgitation using real-time three-dimensional echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2008; 21 (8): 912–21. DOI: 10.1016/j.echo.2008.02.003
35. Song J.M., Kim M.J., Kim Y.J., Kang S.H., Kim J.J., Kang D.H., Song J.K. Three-dimensional characteristics of functional mitral regurgitation in patients with severe left ventricular dysfunction: a real-time three-dimensional color Doppler echocardiography study. *Heart*. 2008; 94 (5): 590–6. DOI: 10.1136/hrt.2007.119123
36. Thavendiranathan P., Phelan D., Thomas J., Flamm S.D., Marwick T.H. Quantitative assessment of mitral regurgitation: validation of new methods. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012; 60 (16): 1470–83. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.05.048
37. Jang J.Y., Kang J.W., Yang D.H., Lee S., Sun B.J., Kim D.H. et al. Impact of a geometric correction for proximal flow constraint on the assessment of mitral regurgitation severity using the proximal flow convergence method. *J. Cardiovasc. Ultrasound*. 2018; 26 (1): 33–9. DOI: 10.4250/jcu.2018.26.1.33
38. Matsumura Y., Fukuda S., Tran H., Greenberg N.L., Agler D.A., Wada N. et al. Geometry of the proximal isovelocity surface area in mitral regurgitation by 3-dimensional color Doppler echocardiography: difference between functional mitral regurgitation and prolapse regurgitation. *Am. Heart J.* 2008; 155 (2): 231–8. DOI: 10.1016/j.ahj.2007.09.002
39. Jamil M., Ahmad O., Poh K.K., Yap C.H. Feasibility of ultrasound-based computational fluid dynamics as a mitral valve regurgitation quantification technique: comparison with 2-D and 3-D proximal isovelocity surface area-based methods. *Ultrasound Med. Biol.* 2017; 43 (7): 1314–30. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.02.012
40. Ray S. The echocardiographic assessment of functional mitral regurgitation. *Eur. J. Echocardiogr.* 2010; 11 (10): i11–7. DOI: 10.1093/ejehocard/jeq121
41. Buck T., Plicht B. Real-time three-dimensional echocardiographic assessment of severity of mitral regurgitation using proximal isovelocity surface area and vena contracta area method. Lessons we learned and clinical implications. *Curr. Cardiovasc. Imaging Rep.* 2015; 8 (10): 38. DOI: 10.1007/s12410-015-9356-7
42. Buck T., Plicht B., Kahlert P., Schenk I.M., Hunold P., Erbel R. Effect of dynamic flow rate and orifice area on mitral regurgitant stroke volume quantification using the proximal isovelocity surface area method. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2008; 52 (9): 767–78. DOI: 10.1016/j.jacc.2008.05.028
43. Grady L., Datta S., Kutter O., Duong C., Wein W., Little S.H. et al. Regurgitation quantification using 3D PISA in volume echocardiography. *Med. Image Comput. Comput. Assist. Interv.* 2011; 14 (Pt. 3): 512–9. DOI: 10.1007/978-3-642-23626-6\_63
44. Thavendiranathan P., Liu S., Datta S., Rajagopalan S., Ryan T., Igo S.R. et al. Quantification of chronic functional mitral regurgitation by automated 3-dimensional peak and integrated proximal isovelocity surface area and stroke volume techniques using real-time 3-dimensional volume color Doppler echocardiography: in vitro and clinical validation. *Circ. Cardiovasc. Imaging*. 2013; 6 (1): 125–33. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.112.980383
45. Zoghbi W.A., Enriquez-Sarano M., Foster E., Grayburn P.A., Kraft C.D., Levine R.A. et al. Recommendations for evaluation of the severity of native valvular regurgitation with two-dimensional and Doppler echocardiography. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 2003; 16 (7): 777–802. DOI: 10.1016/S0894-7317(03)00335-3

Поступила 17.07.2019  
Принята к печати 31.07.2019