ISSN 1607-0763 (Print); ISSN 2408-9516 (Online)
https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-4-42-49

Check for updates

4D FLOW МРТ в оценке диастолического кровотока в левом желудочке у пациентов с гипертрофической кардиомиопатией

©Глазкова Е.Ю.*, Дарий О.Ю., Александрова С.А., Макаренко В.Н., Берсенева М.И., Бокерия Л.А.

ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева" Минздрава России; 121552, Москва, Рублевское шоссе, д. 135, Российская Федерация

Цель исследования: оценить изменения гемодинамики левого желудочка с помощью фазово-контрастной МРТ у пациентов с различными формами гипертрофической кардиомиопатии.

Материал и методы. Обследовано 11 пациентов: без патологии сердечно-сосудистой системы (n = 3), с апикальной (n = 3), диффузно-септальной (n = 2) и фокально-базальной (n = 3) формами гипертрофической кардиомиопатии. Всем пациентам выполнено МРТ-исследование сердца с дополнительной фазово-контрастной последовательностью области левого желудочка. Постпроцессорная обработка проведена в приложении 4D FLOW (Siemens).

Результаты. Получены данные о геометрии и динамике вихревых диастолических потоков в левом желудочке у всех пациентов. У пациентов определяется апикальное смещение вортекса, уменьшение нормализованной площади и пиковой скорости вортекса. Диффузно-септальная форма характеризуется минимальной скоростью вихревого потока, апикальная форма – максимальным индексом сферичности вортекса. Для пациентов с фокально-базальной формой максимальные изменения кровотока определяются в позднюю диастолу (отсутствие вортексов)

Заключение. Метод 4D FLOW фазово-контрастной МРТ позволяет выявить и оценивать изменения диастолических вихревых потоков в левом желудочке. Количественный анализ данных можно использовать для характеристики ремоделирования кровотока в левом желудочке при различных типах гипертрофической кардиомиопатии.

Ключевые слова: фазово-контрастная МРТ, 4D FLOW, гемодинамика левого желудочка, вортексы, гипертрофическая кардиомиопатия

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Глазкова Е.Ю., Дарий О.Ю., Александрова С.А., Макаренко В.Н., Берсенева М.И., Бокерия Л.А. 4D FLOW МРТ в оценке диастолического кровотока в левом желудочке у пациентов с гипертрофической кардиомиопатией. *Медицинская визуализация.* 2019; 23 (4): 42–49.
https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-4-42-49

Поступила в редакцию: 02.07.2019. **Принята к печати:** 26.11.2019. **Опубликована online:** 12.12.2019.

Assessment of left ventricular diastolic flow in hypertrophic cardiomyopathy by 4D FLOW MRI

©Elena Yu. Glazkova*, Ol'ga Yu. Dariy, Svetlana A. Aleksandrova, Vladimir N. Makarenko , Marina I. Berseneva, Leo A. Bockeria

A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery of Ministry of Health of the Russian Federation; 135, Rublevskoye shosse, Moscow, 121552, Russian Federation

Objective. To assess phase-contrast MRI in the evaluation of left ventricular hemodynamics changes in various forms of hypertrophic cardiomyopathy.

Materials and methods. 11 patients were examined: without pathology of the cardiovascular system (n = 3), with apical (n = 3), diffuse-septal (n = 2) and focal-basal (n = 3) types of hypertrophic cardiomyopathy. All patients underwent MRI of the heart with an additional phase-contrast sequence of the left ventricular area. Postprocessing carried out in the 4D FLOW application (Siemens).

Results. Data were obtained on the geometry and dynamics of vortex diastolic flows in the left ventricular of all patients. In patients with hypertrophic cardiomyopathy, an increase in the distance to the center of the vortex and a decrease in the normalized area and peak velocity of the vortex is determined. The diffuse-septal type is characterized by a minimal vortex peak velocity; apical type - by the maximum vortex sphericity index. For patients with a focal-basal type of hypertrophic cardiomyopathy the maximum changes in blood flow are determined in late diastole (absence of vortexes).

Conclusion. 4D FLOW Phase-contrast MRI allows identifying and assessing LV vortical flow. Quantitative analysis can be used to characterize the remodeling of LV blood flow of various types of hypertrophic cardiomyopathy.

Keywords: phase contrast MRI, 4D FLOW, left ventricular hemodynamics, vortexes, hypertrophic cardiomyopathy

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Glazkova E.Yu., Dariy O.Yu., Aleksandrova S.A., Makarenko V.N., Berseneva M.I., Bockeria L.A. Assessment of left ventricular diastolic flow in hypertrophic cardiomyopathy by 4D FLOW MRI. *Medical Visualization.* 2019; 23 (4): 42–49. https://doi.org/10.24835/1607-0763-2019-4-42-49

Received: 02.07.2019. **Accepted for publication:** 26.11.2019. **Published online:** 12.12.2019.

Введение

Сложная геометрия кровотока и ее взаимосвязь со структурой и функцией камер сердца являются важным, но до сих пор малоизученным направлением физиологии кровообращения. A. Pasipoularides и соавт., анализируя многочисленные исследования и проводя собственные экспериментальные наблюдения, пришли к выводу, что структура потока является не только следствием сокращения камер сердца, но и обеспечивает его нормальное функционирование [1]. При патологии доказана важная роль ремоделирования потока крови в развитии атерогенеза и аневризматических изменений сосудистой стенки [2]. Вероятно, изменения структуры кровотока влияют на неблагоприятные исходы после имплантации протезов сосудов и клапанов, вспомогательных искусственных желудочков [3].

Гипертрофическая кардиомиопатия (ГКМП) объединяет группу фенотипически-разнородных генетически-обусловленных заболеваний с утолщением стенки левого желудочка (ЛЖ) без признаков гипертензии и заболеваний клапанов. Геометрия полости камер сердца при ГКМП выраженно модифицирована. Изменения структуры и функции ЛЖ приводят к трансформации потоков в его полости. Мы предполагаем, что типичное для каждой формы ГКМП ремоделирование стенки ЛЖ может быть связано с характерным ремоделированием кровотока в его полости.

Известно, что при ГКМП прежде всего страдает диастолическая функция [4]. Во время диастолы в полости ЛЖ формируются вихревые структуры – вортексы. В ряде работ вихри рассматриваются как инерционные структуры потока, способные перемещать жидкость без дополнительных энергетических затрат системы за счет локального снижения давления в окружающем пространстве [5]. Вихревое движение в ЛЖ обеспечивает плавное перенаправление потока крови к выводному отделу с минимальной генерацией турбулентности и сохранением кинетической энергии [6]. Исследование вихревых потоков может иметь значения в понимании механизма развития заболевания, прогнозе течения заболевания и, возможно, степени реализации генетической программы ГКМП.

В теоретических и прикладных работах предложены единичные модели для описания структуры потоков в камерах сердца и магистральных сосудах и количественные критерии ее оценки в норме. Однако еще не сформирован системный подход для понимания всего комплекса гидродинамических процессов формирования и ремоделирования потоков в норме и при патологии системы кровообращения. Это связано с отсутствием и, практически, невозможностью создания полноценных физических моделей кровотока, недостаточно развитой теоретической базой и ограничениями методик измерения потоков [3].

Инновации в технологии кардиовизуализации дают новый стимул для изучения геометрии кровотока. Появилось сразу несколько доступных неинвазивных методов: цветовая допплерэхокардиография с картированием векторов скорости, контрастная эхокардиография с технологией PIV (particle image velosymetry) и фазово-контрастная МРТ. Важным преимуществом МРТ является возможность полноценного трехмерного измерения векторов скорости движения жидкости в объеме исследования, покрывающем все сердце и магистральные сосуды. Это позволяет ретроспективно

выбирать любую плоскость и проекцию для анализа потока в пределах сканируемой области. Метод не требует дополнительного введения контрастного вещества, так как использует различия в поведении стационарных и движущихся спинов в градиентном поле, т.е. естественные свойства текущей крови.

Цель исследования

Оценить изменения параметров кровотока ЛЖ у пациентов с различными формами ГКМП с помощью метода 4D FLOW фазово-контрастной МРТ.

Материал и методы

В исследование включено 11 пациентов: 3 пациента без патологии сердечно-сосудистой системы и 8 – с ГКМП (3 – с фокально-базальной, 2 – с диффузно-септальной и 3 – с апикальной формой). В группы не включали пациентов с нарушением ритма, признаками аортальной регургитации, выраженной обструкцией выводного отдела ЛЖ, митральной регургитацией выше I степени.

Всем пациентам выполнено МРТ-исследование сердца (1,5 Тл Avanta, Siemens). Протокол включал спин-эхо, градиент-эхо, кино и фазово-контрастные последовательности области ЛЖ. Фазово-контрастное исследование проводили с ЭКГ-синхронизацией на свободном дыхании. Параметры фазово-контрастной МРТ: матрица – 108 × 192 × 5 мм, FA – 15°, размер вокселя – 2,2 × 1,7 × 5,0 мм, TR – 79,95 мс, TE – 3,36 мс, время сканирования – 12–15 мин. В предыдущих исследованиях был подобран оптимальный параметр кодирования скорости VENC для анализа кровотока в ЛЖ, равный 80 см/с [7].

Постпроцессорная обработка проводилась в приложении 4D FLOW с построением трехмерных моделей кровотока с помощью траектории виртуальных частиц (3D-particle traces). Вортексы анализировали в 2D-плоскости с максимальным размером площади закрученного потока, которая обычно соответствовала трехкамерной проекции ЛЖ (рис. 1).

В исследовании оценивали параметры переднемедиального вортекса в две фазы диастолы: после окончания быстрого наполнения – диастазис, когда формируется более стабильный вортекс, и после окончания систолы предсердий. Были измерены абсолютные размеры вортекса, максимальный и минимальный диаметр, площадь, расстояние от середины митрального клапана до центра вортекса и пиковая скорость кровотока в вортексе. В этой же плоскости были измерены длинная ось ЛЖ, конечный диастолический размер (КДР ЛЖ) и площадь ЛЖ.

Для анализа использовали расчетные параметры:

- индекс сферичности вортекса (отношение минимального диаметра к максимальному диаметру);
- индекс сферичности ЛЖ (отношение длинной оси ЛЖ к КДР ЛЖ);
- нормализованная площадь вортекса (отношение площади вортекса к площади ЛЖ на этом же уровне);
- нормализованное расстояние до центра вортекса (отношение расстояния к длинной оси ЛЖ).

Учитывая пилотный характер исследования и малый размер выборки, данные представлены в виде средних значений и стандартного отклонения.

Результаты

У всех пациентов в диастолу в полости ЛЖ формировался закрученный вихревой поток – вортекс. В трехмерном пространстве форму вортекса можно аппроксимировать к сфероиду. После открытия митрального клапана в центральных отделах ЛЖ ближе к межжелудочковой перегородке появлялся и постепенно увеличивался в размерах более крупный переднемедиальный вортекс (рис. 1, 2). В базальных отделах под задней створкой митрального клапана возникал второй небольшой вортекс. Вортексы динамически трансформировались, могли смещаться, распадаться и опять формироваться в фазу систолы предсердий. В диастазис вортексы определялись у всех пациентов. В фазу систолы предсердий переднемедиальный вортекс не определялся у 2 пациентов с ГКМП (фокально-базальная форма), а вортекс задней створки митрального клапана – у 3 пациентов с ГКМП. Вортексы полностью рассеивались при открытии аортального клапана в начале систолы ЛЖ.

В 3D-particle traces моделях кровотока у здоровых добровольцев было показано, что максимальная площадь переднемедиального вортекса обычно наблюдается в трехкамерной проекции [7]. В текущем исследовании у 2 пациентов с ГКМП с выраженной спиральной закрученностью диастолического потока вокруг длинной оси ЛЖ вортекс смещался, и плоскость для анализа отличалась от трехкамерной.

Вортексы у всех пациентов имели эллипсоидную форму, с максимальным индексом сферичности при апикальной форме ГКМП (см. таблицу). Взаимосвязи между индексами сферичности ЛЖ и вортекса в группах пациентов не наблюдалось.

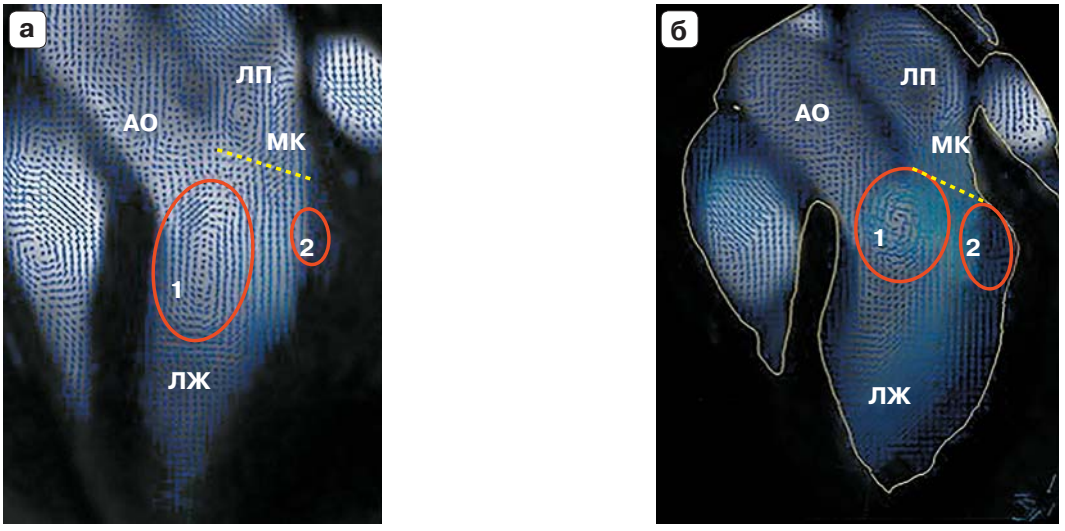

Рис. 1. МР-томограммы, particle traces, трехкамерная проекция сердца здорового добровольца, диастола. Вортексы схематически выделены овалом. а – период быстрого наполнения – диастазис; б – период систолы предсердий. 1 – переднемедиальный вортекс, 2 – заднебоковой вортекс. АО – аорта, ЛЖ – левый желудочек, МК – митральный клапан, ЛП – левое предсердие.

Fig. 1. MRI, particle traces, 3-chamber heart image healthy volunteer, diastole. The vortexes are schematically marked with an oval. a – the period of rapid filling – diastasis; б – the period of atrial systole. 1 – antero-medial vortex, 2 – posterior-lateral vortex. АО – aorta, ЛЖ – left ventricle, МК – mitral valve, ЛП – left atrium.

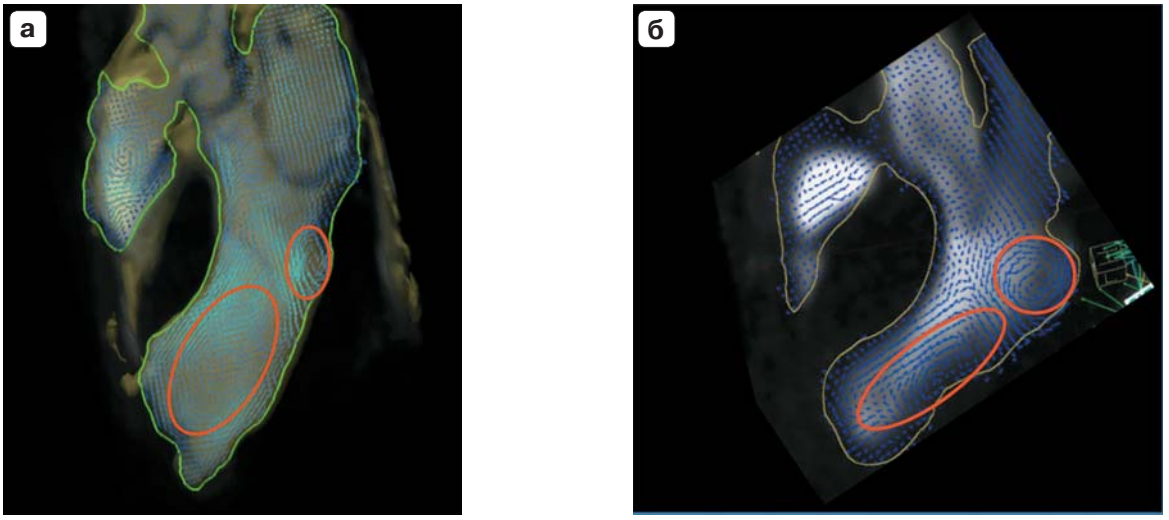

Рис.2. МР-томограммы, particle traces, трехкамерная проекция сердца пациентов с ГКМП, диастазис. Вортексы схематически выделены овалом. а – дифузно-септальная форма ГКМП; б – фокально-базальная форма ГКМП.

Fig. 2. MRI, particle traces, 3-chamber heart image healthy volunteer, diastole. The vortexes are schematically marked with an oval. a – diffuse-septal form HCM; б – focal-basal form HCM.

Таблица. Количественная оценка переднемедиальных вортексов ЛЖ в группах
Table. Quantification of antero-medial LV vortexes in groups

Параметр	Апикальная ГКМП	Септальная ГКМП	Базальная ГКМП	Норма
Площадь вортекса, %:				
в диастазис	29 ± 12	34 ± 18	17 ± 4	62 ± 23
в систолу предсердий	30 ± 16	14 ± 7	*	75 ± 33
Расстояние до центра вортекса, %:				
в диастазис	57 ± 13	64 ± 7	64 ± 5	50 ± 14
в систолу предсердий	26 ± 4	50 ± 28	*	35 ± 20
Пиковая скорость вортекса, см/с:				
в диастазис	19 ± 9	15 ± 8	26 ± 5	28 ± 8
в систолу предсердий	30 ± 13	10 ± 7	*	31 ± 3
Индекс сферичности:				
в диастазис	0,83 ± 0,01	0,47 ± 0,17	0,7 ± 0,03	0,54 ± 0,08
в систолу предсердий	0,89 ± 0,21	0,74 ± 0,02	*	0,56 ± 0,06
ЛЖ	0,53 ± 0,05	0,47 ± 0,07	0,45 ± 0,11	0,62 ± 0,02

* Вортекс наблюдался у одного из трех пациентов.
* Vortex observed one of three patients.

В каждой группе пациентов определялись выраженные изменения гемодинамических параметров, которые позволяют охарактеризовать каждую группу. Между апикальной и септальной формой ГКМП максимальные различия определяются в фазу систолы предсердий. Выявлены трехкратная разница между пиковыми скоростями, более чем двукратная разница в размерах площади вихревого потока и расстояния до центра вортекса. Пациенты с базальной формой ГКМП в диастазис имеют более выраженные различия с септальной формой ГКМП, чем с апикальной формой. В фазу систолы предсердий мы видим отсутствие вортекса у 2 из 3 пациентов с базальной формой ГКМП.

Анализ гемодинамических параметров позволяет выявить несколько общих тенденций у всех пациентов с ГКМП:

• уменьшение нормализованной площади вортекса в обе фазы диастолы;

• уменьшение пиковой скорости вортекса в обе фазы диастолы;

• увеличение расстояния до центра вортекса в раннюю диастолу.

В ходе исследования выявлено, что изменения гемодинамических параметров у пациентов с ГКМП в раннюю и позднюю диастолу не имеют четкой взаимосвязи. Например, пиковая скорость вортекса в группе с септальной формой ГКМП уменьшена в обе фазы диастолы, а в группе с апикальной формой ГКМП уменьшена только в раннюю диастолу. Величина нормализованной площади вортекса уменьшена в обе фазы диастолы, но при этом в группе с септальной формой ГКМП в раннюю диастолу она снижена минимально среди остальных форм ГКМП, а в позднюю диастолу максимально.

Обсуждение

За последнее время отмечается рост количества публикаций, связанных с изучением геометрии кровотока. Это связано с развитием новых технологий визуализации и анализа кровотока, пониманием важной роли структуры кровотока в развитии сердечно сосудистых заболеваний. В данной работе используется новый подход к анализу изменений в ЛЖ при ГКМП через оценку новых гемодинамических параметров – диастолических вихревых потоков.

Несмотря на различные техники визуализации и математический аппарат для оценки закрученного кровотока, в многочисленных работах было показано, что у пациентов с нарушенной систолической и диастолической функцией ЛЖ определяется выраженное изменение структуры внутрижелудочковой гемодинамики [8, 9]. Изменения местоположения, морфологии и динамики вортексов наблюдались в нашем исследовании у всех пациентов с ГКМП по сравнению с контрольной группой. Анализ параметров гемодинамики демонстрирует, что каждая группа пациентов с ГКМП имеет свои уникальные гемодинамические признаки. Так, у пациентов с базальной формой ГКМП не стабильно формируется вортекс в позднюю диастолу. Пациенты с септальной формой ГКМП имеют самую низкую пиковую скорость вортексов. А вортексы у пациентов с апикальной формой ГКМП характеризуются максимальным индексом сферичности и наименьшим смещением в поло-

сти ЛЖ по сравнению с остальными группами. Это позволяет говорить об специфических типах ремоделирования кровотока для каждой формы ГКМП.

В то же время пациенты с ГКМП имеют ряд общих тенденций изменения гемодинамики по сравнению с контрольной группой. У всех пациентов с ГКМП наблюдается значительное уменьшение площади вортекса. Используя метод лагранжевых когерентных структур (Lagrangian Coherent Structures) для анализа кровотока по данным МРТ, J. Toger и соавт. показали, что вихревые кольца имеют дополнительную искривленность и асимметрию, связанную с эндокардиальной трабекулярностью и папиллярными мышцами [10]. Возможно, дополнительные трабекулы и гипертрофия папиллярных мышцы уменьшают свободное локальное пространство полости ЛЖ у пациентов с ГКМП и влияют на снижение размеров вортексов. Данные нашего исследования подтверждаются методом цветовой допплерэхокардиографии. Используя декомпозицию скорости потока, P. Martínez-Legazpi и соавт. показали более чем двукратное падение доли кровотока ЛЖ, перемещенного вихревым потоком [11]. Уменьшение закрученного потока, как одного из звеньев эффективного наполнения ЛЖ, по мнению авторов, побуждает активировать другие более энергозатратные адаптационные механизмы.

Измененный эндокардиальный рельеф может также влиять на форму вортекса. У всех пациентов с ГКМП индекс сферичности вортексов больше индекса сферичности ЛЖ, в основном за счет значительного увеличения индекса сферичности вортексов, особенно в группе с апикальной формой. В группе здоровых добровольцев наблюдается слабая обратная закономерность.

Важным преимуществом метода 4D FLOW МРТ является возможность ретроспективной оценки скорости кровотока в любой плоскости отсканированного объема. Скорость используется для расчета расширенных гемодинамических параметров и построения карт градиента давления, кинетической энергии, турбулентной кинетической энергии, которые, как ожидается, имеют большую чувствительность к степени дисфункции ЛЖ по сравнению со стандартными объемными показателями. В нашем исследовании пиковые скорости в вортексах ранней и поздней диастолы у здоровых пациентов выраженно не отличались. В диастазис в группах с ГКМП скорость была ниже, чем в норме, но данная тенденция не наблюдалась в систолу предсердий. Анализ взаимосвязи скоростей в вортексах с потоками на митральном клапане представляет интерес для дальнейших исследований.

Наши наблюдения о развитии закрученного потока в ЛЖ в диастолу с помощью particle traces МРТ совпадают с данными, полученными при МРТ и эхокардиографии в предыдущих работах [8, 10, 12]. Современные исследования показывают, что вортекс ЛЖ действует как функциональный механизм повышения эффективности наполнения ЛЖ через оптимизацию процессов транспорта кровотока из левого предсердия в апикальные отделы ЛЖ и перенаправление потока от верхушки ЛЖ к выводному тракту. Вероятно, выявленное во всех группах ГКМП смещение вортексов от верхушки в раннюю диастолу к выводному отделу в позднюю диастолу отражает двухфазность этого процесса. Ослабление этой тенденции определяется у пациентов с фокально-базальной и септальной формой ГКМП.

Отмеченное нами у пациентов с ГКМП более выраженное апикальное смещение вортексов в раннюю и позднюю диастолу (кроме систолы предсердий при апикальной ГКМП) не согласуется с результатами P. Martínez-Legazpi и соавт. [11]. Авторы показали уменьшение среднего апикального смещения вортекса в течение всей диастолы в группе 20 пациентов с ГКМП. Эти результаты могут быть связаны с различиями в группах и подходах к выделению вортексов. Накопление обширных сведений о гемодинамике, полученных различными методами, несомненно, требует проведения работы по стандартизации алгоритмов сканирования, анализа и расчета параметров для интерпретации данных. Проведение больших проспективных и мультицентровых исследований необходимо как для развития фундаментальной базы знаний о физиологии и патофизиологии кровотока, так и тестирования расширенных гемодинамических параметров перед внедрением их в клиническую практику.

Заключение

4D FLOW фазово-контрастная МРТ демонстрирует изменения геометрии и динамики кровотока ЛЖ в диастолу у пациентов с ГКМП, которые проявляются в апикальном смещении вортексов, уменьшении площади и скорости вихревого потока в раннюю диастолу. Количественный анализ параметров гемодинамики позволяет оценить ремоделировании кровотока в ЛЖ при различных типах ГКМП. Дальнейшее изучение внутрижелудочковой гемодинамики может обеспечить дополнительную диагностическую и прогностическую информацию о течении заболевания.

Участие авторов

Глазкова Е.Ю. – концепция и дизайн исследования, проведение исследования, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста.

Дарий О.Ю. – проведение исследования, сбор и обработка данных.

Александрова С.А. – участие в научном дизайне, анализ и интерпретация полученных данных.

Макаренко В.Н. – концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных.

Берсенева М.И. – проведение исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Бокерия Л.А. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Glazkova E.Yu. – concept and design of the study, conducting research, analysis and interpretation of the obtained data, writing text.

Dariy O.Yu. – conducting research, collection and analysis of data.

Aleksandrova S.A. – participation in scientific design, analysis and interpretation of the obtained data.

Makarenko V.N. – concept and design of the study, analysis and interpretation of the obtained data.

Berseneva M.I. – conducting research, approval of the final version of the article.

Bockeria L.A. – concept and design of the study, approval of the final version of the article.

Список литературы

1. Pasipoularides A., Shu M., Shah A., Womack M.S., Glower D.D. Diastolic right ventricular filling vortex in normal and volume overload states. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol*. 2003; 284 (4): H1064–H1072. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00804.2002
2. Sforza D., Putman Ch., Cebral J. Hemodynamics of Cerebral Aneurism. *Annu Rev Fluid Mech.* 2009; 1: 41; 91–107. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102126
3. Городков А.Ю. Анализ структуры внутрисердечного закрученного потока крови на основании морфометрии трабекулярного рельефа левого желудочка сердца. *Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН "Сердечно-сосудистые заболевания"*. 2003; 4 (9): 61–66.
4. Дземешкевич С.Л., Фролова Ю.В., Ким С.Ю., Федоров Д.Н., Заклязьминская Е.В., Федулова С.В., Шапиева А.Н., Маликова М.С., Луговой А.Н. Анатомические и морфологические признаки диффузно-генерализованной формы гипертрофической кардиомиопатии. *Российский кардиологический журнал*. 2015; 5: 58–63. https://doi.org/10.15829/1560-4071-2015-5-58-63
5. Dabiri J., Gharib M. The role of optimal vortex formation in biological fluid transport. *Proc. Biol. Sci*. 2005; 272: 1557–60. https://doi.org/10.1017/S0022112007008865
6. Shadden S.C., Katija K., Rosenfeld M., Mardsen J.E., Dabiri J.O. Transport and stirring induced by vortex formation. *J. Fluid. Mech.* 2007; 593: 315–331. https://doi.org/10.1017/S0022112007008865
7. Глазкова Е.Ю., Макаренко В.Н., Александрова С.А., Шляппо М.А. Метод 4D Flow в оценке гемодинамики левого желудочка у пациентов с фибрилляцией предсердий. *Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН "Сердечно-сосудистые заболевания"*. 2017; 19 (6): 207.
8. Hong G.R., Pedrizzetti G., Tonti G., Li P., Wei Z., Kim J.K., Baweja A., Liu S., Chung N., Houle H., Narula J., Vannan M.A. Characterization and quantification of vortex flow in the human left ventricle by contrast echocardiography using vector particle image velocimetry. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2008; 1: 705–717. https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2008.06.008
9. Suwa K., Saitoh T., Takehara Y., Sano M., Saotome M., Urushida T., Katoh H., Satoh H., Sugiyama M., Wakayama T., Alley M., Sakahara H., Hayashi H. Intra-left ventricular flow dynamics in patients with preserved and impaired left ventricular function: analysis with 3D cine phase contrast MRI (4D-flow). *J. Magn. Reson. Imaging*. 2016; 44 (6): 1493–1503. https://doi.org/10.1002/jmri.25315
10. Töger J., Kanski M., Carlsson M., Kovács S.J., Söderlind G., Arheden H., Heiberg E. Vortex ring formation in the left ventricle of the heart: analysis by 4D flow MRI and Lagrangian coherent structures. *Ann. Biomed. Eng*. 2012; 40: 2652–2662. https://doi.org/10.1007/s10439-012-0615-3
11. Martínez-Legazpi P., Bermejo J., Benito Y., Yotti R., Pérez Del Villar C., González-Mansilla A., Barrio A., Villacorta E., Sánchez P.L., Fernández-Avilés F., del Álamo J.C. Contribution of the Diastolic Vortex Ring to Left Ventricular Filling. *JACC*. 2014; 64 (16): 1711–1721. http://dx.doi.org/10.1016/j.jacc.2014.06.1205
12. Bermejo J., Benito Y., Alhama M., Yotti R., Martínez-Legazpi P., Del Villar C.P., Pérez-David E., González-Mansilla A., Santa-Marta C., Barrio A., Fernández-Avilés F., Del Álamo J.C. Intraventricular vortex properties in nonischemic dilated cardiomyopathy. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol*. 2014; 306: 718–729. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00697.2013

References

1. Pasipoularides A., Shu M., Shah A., Womack M.S., Glower D.D. Diastolic right ventricular filling vortex in normal and volume overload states. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol*. 2003; 284 (4): H1064–H1072. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00804.2002
2. Sforza D., Putman Ch., Cebral J. Hemodynamics of Cerebral Aneurism. *Annu Rev Fluid Mech.* 2009; 1: 41; 91–107. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102126
3. Gorodkov A.Yu. Analysis of the structure of intracardiac swirling blood flow based on morphometry of the trabecular heart of the heart. *The Bulletin of Bakoulev Center.* 2003; 4 (9): 61–66. (In Russian)
4. Dzemeshkevich S.L., Frolova Y.V., Kim S.Y., Fedorov D.N., Zaklyazminskaya E.V., Fedulova S.V., Shapiyeva A.N., Malikova M.S., Lugovoy A.N. Anatomic and morphological signs of a diffuse-generalized hypertrophic cardiomyopathy. *Russian Journal of Cardiology.* 2015; 5: 58–63. https://doi.org/10.15829/1560-4071-2015-5-58-63 (In Russian)
5. Dabiri J., Gharib M. The role of optimal vortex formation in biological fluid transport. *Proc. Biol. Sci*. 2005; 272: 1557–60. https://doi.org/10.1017/S0022112007008865
6. Shadden S.C., Katija K., Rosenfeld M., Mardsen J.E., Dabiri J.O. Transport and stirring induced by vortex formation. *J. Fluid. Mech.* 2007; 593: 315–331. https://doi.org/10.1017/S0022112007008865

7. Glazkova E.Yu., Makarenko V.N., Aleksandrova S.A., Shlyappo M.A. The 4D Flow method in assessing left ventricular hemodynamics in patients with atrial fibrillation. *The Bulletin of Bakoulev Center Cardiovascular Diseases.* 2017; 19 (6): 207. (In Russian)
8. Hong G.R., Pedrizzetti G., Tonti G., Li P., Wei Z., Kim J.K., Baweja A., Liu S., Chung N., Houle H., Narula J., Vannan M.A. Characterization and quantification of vortex flow in the human left ventricle by contrast echocardiography using vector particle image velocimetry. *JACC Cardiovasc. Imaging.* 2008; 1: 705–717. https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2008.06.008
9. Suwa K., Saitoh T., Takehara Y., Sano M., Saotome M., Urushida T., Katoh H., Satoh H., Sugiyama M., Wakayama T., Alley M., Sakahara H., Hayashi H. Intra-left ventricular flow dynamics in patients with preserved and impaired left ventricular function: analysis with 3D cine phase contrast MRI (4D-flow). *J. Magn. Reson. Imaging*. 2016; 44 (6): 1493–1503. https://doi.org/10.1002/jmri.25315
10. Töger J., Kanski M., Carlsson M., Kovács S.J., Söderlind G., Arheden H., Heiberg E. Vortex ring formation in the left ventricle of the heart: analysis by 4D flow MRI and Lagrangian coherent structures. *Ann. Biomed. Eng*. 2012; 40: 2652–2662. https://doi.org/10.1007/s10439-012-0615-3
11. Martínez-Legazpi P., Bermejo J., Benito Y., Yotti R., Pérez Del Villar C., González-Mansilla A., Barrio A., Villacorta E., Sánchez P.L., Fernández-Avilés F., del Álamo J.C. Contribution of the Diastolic Vortex Ring to Left Ventricular Filling. *JACC*. 2014; 64 (16): 1711–1721. http://dx.doi.org/10.1016/j.jacc.2014.06.1205
12. Bermejo J., Benito Y., Alhama M., Yotti R., Martínez-Legazpi P., Del Villar C.P., Pérez-David E., González-Mansilla A., Santa-Marta C., Barrio A., Fernández-Avilés F., Del Álamo J.C. Intraventricular vortex properties in nonischemic dilated cardiomyopathy. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol*. 2014; 306: 718–729. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00697.2013

Для корреспонденции*: Глазкова Елена Юрьевна – 121552, Москва, Рублевское шоссе, 135, Российская Федерация. ФГБУ "НМИЦ ССХ имени А.Н. Бакулева". Тел.:+7-985-233-55-09. E-mail: eunik71@mail.ru

Глазкова Елена Юрьевна – канд. мед. наук, научный сотрудник ФГБУ "НМИЦ ССХ имени А.Н. Бакулева" Минздрава России. https://orcid.org/0000-0003-3310-3658

Дарий Ольга Юрьевна – врач-рентгенолог ФГБУ "НМИЦ ССХ имени А.Н. Бакулева" Минздрава России. https://orcid.org/0000-0003-0140-8166.

Александровна Светлана Александровна – канд. мед. наук, старший научный сотрудник ФГБУ "НМИЦ ССХ имени А.Н. Бакулева" Минздрава России. https://orcid.org/0000-0002-7795-9709

Макаренко Владимир Николаевич – доктор мед. наук, профессор, заведующий рентгенодиагностического отдела ФГБУ "НМИЦ ССХ имени А.Н. Бакулева" Минздрава России. http://orcid.org/0000-0002-8700-7592

Берсенева Марина Ивановна – канд. мед. наук, заведующая отделением хирургического лечения кардиомиопатий ФГБУ "НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева" Минздрава России. https://orcid.org/0000-0002-8789-1293

Бокерия Леонид Антонович – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, директор ФГБУ "НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева" Минздрава России. http://orcid.org/0000-0001-6264-8919

Contact*: Elena Yu. Glazkova – 135, Rublevskoe shosse, Moscow, 121552, Russian Federation. A.N. Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. Phone: +7-985-233-55-09. E-mail: eunik71@mail.ru

Elena Yu. Glazkova – Cand. of Sci. (Med.), Researcher, A.N.Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. http://orcid.org/0000-0003-3310-3658

Ol'ga Yu. Dariy – Radiologist A.N.Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. http://orcid.org/0000-0003-0140-8166

Svetlana A. Aleksandrova – Cand. of Sci. (Med.), Senior Researche, A.N.Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. http://orcid.org/0000-0002-7795-9709

Vladimir N. Makarenko – Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of X-ray Diagnostics Department A.N.Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. http://orcid.org/0000-0002-8700-7592

Marina I. Berseneva – Cand. of Sci. (Med.), Head of Cardiomyopathy Department, A.N.Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. http://orcid.org/0000-0002-8789-1293

Leo A. Bockeria – Academician of Russian Academy of Sciences, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Director of A.N.Bakulev National Medical Research Center of Cardiovascular Surgery. http://orcid.org/0000-0001-6264-8919