

4D МР-визуализация потока: ценность и клинические перспективы у пациентов с патологией сердца и магистральных сосудов (2-я часть)

Л.А. Юрпольская✉

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева» Минздрава России, Москва, Россия

Аннотация

Изучение кровотока становится новым трендом в кардиологии и сердечно-сосудистой хирургии. На основе литературных и собственных данных представлен обзор применения 4D магнитно-резонансной визуализации потока при заболеваниях сердца и сосудов. Подробно изложено основное состояние вопроса об особенностях применения методики при разных патологиях сердечно-сосудистой системы, рассмотрены приоритеты, ограничения и перспективные направления использования методики с учетом целей практической медицины. Обзор состоит из 2 частей: 1-я часть посвящена общим вопросам, ограничениям методики и 4D-картированию потока у пациентов с поражением магистральных сосудов; во 2-й части акцент сделан на использование 4D магнитно-резонансного томографического потока при изучении внутрисердечного кровотока и на применение методики при врожденных пороках сердца и сосудов.

Ключевые слова: 4D-визуализация потока, заболевания сердца и сосудов, гемодинамика, магнитно-резонансная томография

Для цитирования: Юрпольская Л.А. 4D МР-визуализация потока: ценность и клинические перспективы у пациентов с патологией сердца и магистральных сосудов (2-я часть). Терапевтический архив. 2024;96(7):701–705. DOI: 10.26442/00403660.2024.07.202786

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2024 г.

REVIEW

4D flow MRI: value and clinical perspectives in patients with pathology of the heart and great vessels (part 2): A review

Lyudmila A. Yurpolskaya✉

Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery, Moscow, Russia

Abstract

The study of blood flow is becoming a new trend in cardiology and cardiovascular surgery. Based on the literature and our own data, a review is presented on the use of 4D flow in diseases of the heart and blood vessels. The main state of the question about the features of the application of the technique in various pathologies of the cardiovascular system is described in detail, the priorities, limitations and promising directions of the technique application are considered taking into account the goals of practical medicine. The review consists of two parts. The first is devoted to general issues, limitations of the technique, and issues of 4D flow mapping in patients with lesions of the great vessels. In the second part, the emphasis is on the use of 4D flow MRI in the study of intraventricular blood flow and the application of the technique in congenital heart and vascular diseases.

Keywords: 4D Flow, cardiovascular diseases, hemodynamics, magnetic resonance imaging

For citation: Yurpolskaya LA. 4D flow MRI: value and clinical perspectives in patients with pathology of the heart and great vessels (part 2): A review. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2024;96(7):701–705. DOI: 10.26442/00403660.2024.07.202786

Введение

Статья является продолжением 1-й части обзора по применению программы 4D магнитно-резонансного (МР)-картирования кровотока у пациентов с патологией сердца и сосудов [1]. Во 2-й части представлены данные исследований по использованию 4D магнитно-резонансного томографического (МРТ)-потока для изучения внутрисердечного кровотока (ВЖК), а также приоритеты программы для обследования пациентов с врожденными пороками сердца и сосудов (ВПСС).

4D МР-картирование ВЖК

С прогностической точки зрения важную роль играет изучение особенностей кровотока в камерах сердца (КС). Сложные паттерны кровотока в желудочках, особенно в правом (ПЖ), объясняют трудности рутинной количе-

ственной оценки в клинической практике. В связи с этим для широкого использования в клинике предложены упрощенные методики: определение кинетической энергии (КЭ) кровотока внутри левого желудочка (ЛЖ) с помощью 4D-картирования потока. КЭ крови представляет собой работу, необходимую для ускорения определенной массы крови до заданной скорости. Еще до увеличения сердца и нарушения его функции методика 4D-потока помогает оценивать изменения в пропорциях компонентов потока и соответствующих КЭ [2].

Расчет осуществляют по стандартному уравнению КЭ ($KЭ=1/2 mv^2$). Скорость v каждого вокселя в течение всего сердечного цикла (СЦ) можно получить из 4D МРТ-потока, а общую КЭ рассчитывают, суммируя КЭ от каждого вокселя [3]. В результате удалось доказать, что раннее и позднее диастолическое наполнение имеют разные направ-

Информация об авторе / Information about the author

✉Юрпольская Людмила Анатольевна – д-р мед. наук, вед. науч. сотр. рентген-диагностического отд. E-mail: layurpolskaya@bakulev.ru

✉Lyudmila A. Yurpolskaya. E-mail: layurpolskaya@bakulev.ru; ORCID: 0000-0001-7780-2405

ления и местоположения пиковой скорости. В желудочках преобладает диастолический приток с асимметричными, ограниченными по регионам кольцевыми вихрями, берущими свое начало под створками митрального и трикуспидального клапанов. Приток может генерировать дополнительные вихри с переменным размером и положением, которые ускоряются и замедляются со временем [4]. Оценка профилей внутрисердечной энергии, интегрированных по всей КС, может предоставить более полные клинические данные при субклинических изменениях гемодинамики [5]. Учитываются имеющиеся гендерные и возрастные отличия в вихревых потоках ЛЖ [3, 5].

Программа 4D-картирования потока позволяет отслеживать формирование вихрей в желудочках согласно фазам СЦ. Анализ значений вихревой или турбулентной КЭ (ТКЭ) и различных временных кривых КЭ дает возможность рано выявлять и изучать сердечную недостаточность (СН) [2]. Уменьшение с возрастом количества вихрей в ЛЖ влияет на поток энергии, приводя к потере импульса крови и способствуя развитию СН [6].

Соответственно, аномалия формирования вихрей в ЛЖ, снижение диастолической КЭ и увеличение средней систолической КЭ даже при сохраненной фракции выброса ЛЖ могут быть использованы в качестве ранних предикторов прогрессирования дисфункции ЛЖ при различной сердечно-сосудистой патологии [5]. Например, позднедиастолическая ТКЭ ЛЖ значительно выше у пациентов с дилатационной кардиопатией, что обусловлено, вероятно, часто встречающейся неэффективностью потока именно в позднюю диастолу [7]. При остром инфаркте миокарда в результате изменения гемодинамики ЛЖ наблюдается закономерное снижение сердечной функции ЛЖ и общей КЭ ЛЖ, а также в зависимости от локализации острого инфаркта миокарда имеются различия в пиковых скоростях в разные фазы СЦ [8]. Установлено, что уменьшение вихрей в ЛЖ и снижение скорости кровотока в области верхушки ЛЖ у пациентов с дисфункцией ЛЖ напрямую связаны с повышенным тромбообразованием в ЛЖ [9]. По данным 4D МР-картирования потока у пациентов с гипертрофической кардиомиопатией нарушение образования вихрей, увеличение потери энергии (EL) и пиковых градиентов систолического давления в выводном отделе ЛЖ могут быть потенциальным механизмом диастолической дисфункции и одной из причин концентрического ремоделирования ЛЖ [10].

Для поиска субклинических маркеров нарушения функции ЛЖ свою роль может сыграть 4D МР-картирование компонентов внутрижелудочкового потока. Сегментация происходит согласно локализации частиц потока, скорости и траекторий их движения в зависимости от фаз СЦ. В результате проведенного анализа A. Volger и соавт. (2007 г.) предложили 4 компонента кровотока: прямой, задержанный, отсроченный потоки и остаточный объем. Составляющие потока выражают в процентном соотношении к конечно-диастолическому объему [11].

Используя при 4D МР-картировании цветную шкалу скорости прохождения частиц, каждый компонент потока кодируют, получая в результате возможность визуальной и количественной оценки функции желудочков на основе транзита крови. Прямой поток – кровь, поступающая в ЛЖ в диастолу и покидающая его в систолу, который является самым большим компонентом ВЖК с самым высоким запасом конечно-диастолической энергии, а также наиболее постоянным по составу и КЭ из всех 4 компонентов потока [12]. Задержка притока – часть крови, поступающая в диастолу ЛЖ, но не покидающая полость во время

сistolы. Конечно-диастолическая КЭ данного компонента ниже, чем у потока с отсроченным выбросом. Поток отсроченного выброса – кровь, которая начинается и находится внутри ЛЖ в диастолу и уходит к следующей систоле. Остаточный объем – кровь, остающаяся в ЛЖ более 2 СЦ [12]. Его особенность – изменчивость КЭ, которая предполагает его динамическое взаимодействие с входящим и исходящим кровотоками в течение каждого СЦ, что может играть роль в предотвращении застоя крови и образования тромба в здоровом сердце [12].

Диастолическая дисфункция является причиной СН и характеризуется различными морфологическими и гемодинамическими изменениями сердечно-сосудистой системы (ССС). При 4D МР-картировании компонентов ВЖК можно отследить субклиническое ремоделирование как ЛЖ, так и ПЖ [13, 14]. Снижение фракции прямого кровотока ЛЖ, уменьшение диастолической КЭ, увеличение фракции задержанного потока выброса, нарушение формирования вихрей могут быть ранними неблагоприятными субклиническими маркерами дисфункции ЛЖ и ПЖ у больных с патологией сердца [7, 15]. У пациентов с легочной гипертензией степень выраженности диастолической дисфункции ПЖ может стать новым маркером для классификации тяжести легочной гипертензии [16].

В последние годы появились данные о перспективном использовании значений внутрижелудочкового градиента, полученного из данных 4D-картирования потока и уравнения Навье–Стокса для расчета гемодинамических сил (ГС), распределенных в объеме желудочков за СЦ [17]. ГС, зависящие в большей степени от потока внутри КС, имеют фундаментальное значение для функционального состояния желудочков. С помощью МР-карт 4D-потока ГС рассчитывают количественно в 3 направлениях для последующего глубокого изучения физиологии и патофизиологии ССС при различных заболеваниях [17, 18]. Результаты картирования ГС могут быть использованы для расширения знаний об атриовентрикулярных взаимодействиях и взаимодействиях ЛЖ и ПЖ, что позволит понять функциональные различия между ЛЖ и ПЖ.

Однако приведенный метод не лишен недостатков. Ограничения связаны с использованием гидродинамических расчетов для ньютоновского ламинарного течения без моделирования турбулентности и учета неьютоновских эффектов кровотока и мелкомасштабных колебаний, что требует дополнительных программ измерения при стенозах и/или недостаточности клапанов. Кроме того, пока не известна взаимосвязь динамики ГС и возраста [19]. В силу трудоемкого и сложного расчета, отсутствия полной автоматизации процесса в настоящее время методика представляет научный интерес, но выглядит многообещающей для клиники [17, 19].

4D МР-картирование кровотока при ВПСС. Вероятно, наиболее востребовано 4D МР-картирование у пациентов с ВПСС, особенно в педиатрической практике. У пациентов с ВПСС карты часто используют для визуализации и расчета шунтов, градиентов, выявления аномалий геометрии кровотока, что позволяет лучше понять у них сложную гемодинамику, своевременно определить сроки и хирургическую тактику с целью предотвращения прогрессирования заболевания. Нарушения гемодинамики при ВПСС связаны с изменениями WSS – силы сдвига, создаваемой потоком крови, действующей на стенку сосуда, энергии ВЖК, ТКЭ и EL, а также с формированием завихрений.

Наибольшее число мировых публикаций по использованию 4D МР-картирования при ВПСС посвящено

коарктации аорты (КоАо), тетраде Фалло (ТФ) и единственному желудочку, преимущественно после операции Фонтена [20, 21]. Основными маркерами негативного прогноза при КоАо стали увеличение скорости пульсовой волны и WSS, наличие вихрей в аорте, выраженный спиральный поток в нисходящем отделе, что касалось и пациентов после резекции КоАо [22]. Согласно мировым данным даже после восстановления геометрии аорты и нормализации скоростных профилей кровотока в грудной аорте наблюдали элементы аномального потока (спираль и/или вихри) в нисходящей аорте, которые имели тесную взаимосвязь с гипертонией после операции [23]. По нашим собственным данным, у 1/2 больных после пластики КоАо в отдаленные сроки наблюдали спиральный поток в нисходящей аорте и вихри различной локализации [24].

Кинетическая энергия проксимального сужения частично трансформируется в энергию статического давления [23]. Оказалось, что данные 4D-картирования давления тесно коррелировали с измерениями при катетеризации, на основании чего сделан вывод о том, что карты МРТ 4D-потока можно использовать в качестве альтернативы инвазивной диагностической катетеризации для расчета полей давления, особенно у пациентов с пограничными показаниями к лечению [25]. Соответственно, полученные при 4D-картировании данные могут помочь в определении прогноза у рассматриваемых больных.

Пациенты с ТФ также имели измененные паттерны, несмотря на проведенную радикальную коррекцию порока: усиленный поток с различной вариабельностью значений в левом и правом легком, повышенный пик WSS, повышение диастолической пиковой КЭ, наличие вихрей в выходном отделе ПЖ и усиление их в правое предсердие и в ПЖ в диастолу [26, 27]. Аномальный аортальный кровоток у больных с ТФ связан с увеличением потери энергии в грудной аорте [28]. Повышенный пик WSS и EL при ТФ обусловлен изменениями легочной гемодинамики в стволе легочной артерии и правой ветви легочной артерии, которые могут быть ранними маркерами развивающейся гемодинамической неэффективности. В качестве потенциального раннего признака желудочковой дисфункции у пациентов с оперированной ТФ предлагается использовать показатели КЭ [29, 30].

Возможность оценить с помощью 4D МР-картирования количественные параметры и геометрию кровотока имеет, возможно, наибольшее значение у пациентов с единственным желудочком при мониторинге на всех этапах коррекции порока, что связано с ограничениями эхокардиографии в визуализации и расчетах показателей после операции Фонтена. МРТ 4D-потока может оценить эксцентрический кровоток, что трудно сделать посредством эхокардиографии. Возможность оценить кровоток одномоментно во всех крупных сосудах и в любой ориентации делает МРТ 4D-потока идеальным методом для изучения эффективности кровообращения Фонтена и раннего выявления дисфункции желудочков даже при наличии возможных методических издержек программы [31]. У пациентов с Фонтен-циркуляцией наблюдаются низкий пик диастолической КЭ, заметное повышение внутривентрикулярной EL с формированием бивентрикулярного вихревого кольца в областях самой высокой EL [32, 33]. Наличие коллатералей, особенно вено-венозных, у данных больных повышает риск развития осложнений и смертности [34]. I. Valverde и соавт. (2012 г.) показали, что МРТ с методикой 4D-картирования потока позволяет просто и эффективно оценить и рассчитать коллатеральный кровоток [35].

В последние годы появились интересные сообщения об использовании методики МРТ 4D-потока для изучения коронарного кровотока [36, 37]. Представлены данные пациентов с врожденными аномалиями коронарных артерий (КА), в частности с отхождением левой КА от легочного ствола – синдромом Бланда–Уайта–Гарланда – или фистулой КА. Следует отметить, что МР-изучение коронарного кровотока в рутинной практике сильно ограничено, что обусловлено малым диаметром сосудов, недостаточным пространственным разрешением МРТ и высокой частотой сердечного ритма [38]. При синдроме Бланда–Уайта–Гарланда или фистуле КА диаметры КА, как правило, больше нормальных, что позволяет оценить кровоток. Используя МР-методику 4D-картирования потока, авторам удалось визуализировать преобладающий в систолу ретроградный кровоток по левой КА и нормальный антеградный кровоток по правой КА, преобладающий в диастолу. Наблюдалось заметное увеличение абсолютных значений объема кровотока обеих артерий, что свидетельствовало о феномене коронарного обкрадывания [36, 37].

Поскольку МРТ имеет ряд технических ограничений, перспективно получить аналогичные карты потока при КТ. В 2018 г. вышла оригинальная статья, в которой проведено сравнение МРТ и КТ-картирования в изучении кровотока у 12 участников [39]. При КТ-картировании регистрировали движения стенки эндокарда в течение СЦ. Поток рассчитывали с использованием параметров вычислительной гидродинамики. Анализ занимал длительное время – около 6–10 ч. В результате авторам удалось получить 4D КТ-картирование кровотока, аналогичное МРТ [39]. КТ-моделирование кровотока пока остается очень длительным процессом, вычисления затратны и трудоемки, при этом не достоверны при значимой регургитации на клапанах. Однако высокое (субмиллиметровое) пространственное разрешение при КТ, в сравнении с МРТ, позволяет оценить влияние трабекул и папиллярных мышц на количественные характеристики потока. В связи с этим авторы делают вывод о потенциальной пригодности обеих методик для использования в различных целях при патологии ССС, что выглядит весьма перспективно [39].

По мере того как МРТ 4D-потока реализуется в клинической практике, важную роль играет информация о негативных факторах, влияющих на результаты [40]. Широкое клиническое применение тормозит отсутствие долгосрочных масштабных исследований на большом количестве наблюдений. Среди основных ограничений можно назвать исключение пациентов с металлическими имплантатами, спорную локализацию уровня для точного измерения параметров кровотока, отсутствие единой кодировки цветной шкалы, трудоемкость постобработки, отсутствие неинвазивного эталона для верификации показателей. Кроме того, аритмия может искажать количественную оценку, а точность оценки кровотока зависит от опыта врача.

Заключение

Несмотря на ограничения методики преимущество для клиники очевидно. Появилась возможность без применения инвазивных технологий устранить пробелы в понимании физиологии и патофизиологии кровообращения, получить в естественных условиях новые физиологические и патофизиологические гемодинамические параметры, такие как напряжение сдвига, скорость пульсовой волны, кинетическая энергия, оценить влияние гемодинамики на сердце и сосуды при различных состояниях, а также степень восстановления физиологического профиля потока после интервенционных или хирургических процедур.

Раскрытие интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Disclosure of interest. The author declares that she has no competing interests.

Вклад автора. Автор декларирует соответствие своего авторства международным критериям ICMJE.

Author's contribution. The author declares the compliance of her authorship according to the international ICMJE criteria.

Источник финансирования. Автор декларирует отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The author declares that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Список сокращений

ВЖК – внутрижелудочковый кровоток
 ВПСС – врожденные пороки сердца и сосудов
 ГС – гемодинамические силы
 КА – коронарная артерия
 КоАо – коарктация аорты
 КС – камера сердца
 КЭ – кинетическая энергия
 ЛЖ – левый желудочек
 МР-картирование – магнитно-резонансное картирование
 МРТ – магнитно-резонансная томография

ПЖ – правый желудочек
 СН – сердечная недостаточность
 ССС – сердечно-сосудистая система
 СЦ – сердечный цикл
 ТКЭ – турбулентная кинетическая энергия
 ТФ – тетрада Фалло
 4D МРТ-поток – 4D магнитно-резонансный томографический поток
 EL – потеря энергии
 WSS – сила сдвига, создаваемая потоком крови, действующая на стенку сосуда

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Юрпольская Л.А. 4D МР-визуализация потока: ценность и клинические перспективы у пациентов с патологией сердца и магистральных сосудов. *Терапевтический архив*. 2024;96(4):391-5 [Yurpolskaya LA. 4D flow MRI: value and clinical perspectives in patients with pathology of the heart and great vessels. A review. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2024;96(4):391-5 (in Russian)]. DOI:10.26442/00403660.2024.04.202683
2. Svalbring E, Fredriksson A, Eriksson J, et al. Altered Diastolic Flow Patterns and Kinetic Energy in Subtle Left Ventricular Remodeling and Dysfunction Detected by 4D Flow MRI. *PLoS One*. 2016;11(8):e0161391. DOI:10.1371/journal.pone.0161391
3. Rutkowski DR, Barton GB, François CJ, et al. Sex Differences in Cardiac Flow Dynamics of Healthy Volunteers. *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2020;2(1). DOI:10.1148/ryct.2020190058
4. Ashkir Z, Myerson S, Neubauer S, et al. Four-dimensional flow cardiac magnetic resonance assessment of left ventricular diastolic function. *Front Cardiovasc Med*. 2022;9:866131. DOI:10.3389/fcvm.2022.866131
5. Demirkiran A, van Ooij P, Westenberg JJM, et al. Clinical intra-cardiac 4D flow CMR: acquisition, analysis, and clinical applications. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(2):154-65. DOI:10.1093/ehjci/jeab112
6. Kanski M, Arvidsson PM, Töger J, et al. Left ventricular fluid kinetic energy time curves in heart failure from cardiovascular magnetic resonance 4D flow data. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2015;17:111. DOI:10.1186/s12968-015-0211-4
7. Eriksson J, Bolger AF, Ebberts T, Carlhäll CJ. Four-dimensional blood flow-specific markers of LV dysfunction in dilated cardiomyopathy. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2013;14(5):417-24. DOI:10.1093/ehjci/jes159
8. Garg P, Crandon S, Swoboda PP, et al. Left ventricular blood flow kinetic energy after myocardial infarction – insights from 4D flow cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2018;20(1):61. DOI:10.1186/s12968-018-0483-6
9. Sakakibara T, Suwa K, Ushio T, et al. Intra-Left Ventricular Hemodynamics Assessed with 4D Flow Magnetic Resonance Imaging in Patients with Left Ventricular Thrombus. *Int Heart J*. 2021;62(6):1287-96. DOI:10.1536/ihj.20-792
10. van Ooij P, Allen BD, Contaldi C, et al. 4D flow MRI and T1-Mapping: Assessment of altered cardiac hemodynamics and extracellular volume fraction in hypertrophic cardiomyopathy. *J Magn Reson Imaging*. 2016;43(1):107-14. DOI:10.1002/jmri.24962
11. Bolger AF, Heiberg E, Karlsson M, et al. Transit of blood flow through the human left ventricle mapped by cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2007;9(5):741-7. DOI:10.1080/10976640701544530
12. Stoll VM, Loudon M, Eriksson J, et al. Test-retest variability of left ventricular 4D flow cardiovascular magnetic resonance measurements in healthy subjects. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2018;20(1):15. DOI:10.1186/s12968-018-0432-4
13. Zajac J, Eriksson J, Dyverfeldt P, et al. Turbulent kinetic energy in normal and myopathic left ventricles. *J Magn Reson Imaging*. 2015;41(4):1021-9. DOI:10.1002/jmri.24633
14. Browning JR, Hertzberg JR, Schroeder JD, Fenster BE. 4D Flow Assessment of Vorticity in Right Ventricular Diastolic Dysfunction. *Bioengineering (Basel)*. 2017;4(2). DOI:10.3390/bioengineering4020030
15. Kim H, Sheitt H, Wilton SB, et al. Left Ventricular Flow Distribution as a Novel Flow Biomarker in Atrial Fibrillation. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:725121. DOI:10.3389/fbioe.2021.725121
16. Barker N, Fidock B, Johns CS, et al. A Systematic Review of Right Ventricular Diastolic Assessment by 4D Flow CMR. *Biomed Res Int*. 2019;2019:6074984. DOI:10.1155/2019/6074984
17. Pedrizzetti G, Arvidsson PM, Töger J, et al. On estimating intraventricular hemodynamic forces from endocardial dynamics: A comparative study with 4D flow MRI. *J Biomech*. 2017;60:203-10. DOI:10.1016/j.jbiomech.2017.06.046
18. Eriksson J, Bolger AF, Ebberts T, Carlhäll CJ. Assessment of left ventricular hemodynamic forces in healthy subjects and patients with dilated cardiomyopathy using 4D flow MRI. *Physiol Rep*. 2016;4(3). DOI:10.14814/phy2.12685
19. Töger J, Arvidsson PM, Bock J, et al. Hemodynamic forces in the left and right ventricles of the human heart using 4D flow magnetic resonance imaging: Phantom validation, reproducibility, sensitivity to respiratory gating and free analysis software. *PLoS One*. 2018;13(4):e0195597. DOI:10.1371/journal.pone.0195597
20. Warmerdam E, Krings GJ, Leiner T, Grotenhuis HB. Three-dimensional and four-dimensional flow assessment in congenital heart disease. *Heart*. 2020;106(6):421-6. DOI:10.1136/heartjnl-2019-315797
21. Rizk J. 4D flow MRI applications in congenital heart disease. *Eur Radiol*. 2021;31(2):1160-74. DOI:10.1007/s00330-020-07210-z
22. Voges I, Kees J, Jerosch-Herold M, et al. Aortic stiffening and its impact on left atrial volumes and function in patients after successful coarctation repair: a multiparametric cardiovascular magnetic resonance study. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2016;18(1):56. DOI:10.1186/s12968-016-0278-6
23. Catapano F, Pambianchi G, Cundari G, et al. 4D flow imaging of the thoracic aorta: is there an added clinical value? *Cardiovasc Diagn Ther*. 2020;10(4):1068-89. DOI:10.21037/cdt-20-452
24. Юрпольская Л.А., Шляппо М.А., Макаренко В.Н., и др. Методика 4D магнитно-резонансной томографии потока в изучении кровотока у пациентов с коарктацией аорты в отдаленные сроки

- после операции. *Кардиология*. 2020;60(8):54-64 [Yurpolskaya LA, Shlyappo MA, Makarenko VN, et al. 4D FLOW Magnetic Resonance Imaging in the Study of Blood Flow in Patients With Aortic Coarctation in the Long-Term After Surgery. *Kardiologiya*. 2020;60(8):54-64 (in Russian)]. DOI:10.18087/cardio.2020.8.n1094
25. Riesenkampff E, Fernandes JF, Meier S, et al. Pressure fields by flow-sensitive, 4D, velocity-encoded CMR in patients with aortic coarctation. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2014;7(9):920-6. DOI:10.1016/j.jcmg.2014.03.017
26. Shiina Y, Inai K, Miyazaki S, Nagao M. Aortic Vorticity, Helicity, and Aortopathy in Adult Patients with Tetralogy of Fallot: Pilot Study Using Four-Dimensional Flow Magnetic Resonance Images. *Pediatr Cardiol*. 2021;42(1):169-77. DOI:10.1007/s00246-020-02466-0
27. Sjöberg P, Bidhult S, Bock J, et al. Disturbed left and right ventricular kinetic energy in patients with repaired tetralogy of Fallot: pathophysiological insights using 4D-flow MRI. *Eur Radiol*. 2018;28(10):4066-76. DOI:10.1007/s00330-018-5385-3
28. Schäfer M, Barker AJ, Jagers J, et al. Abnormal aortic flow conduction is associated with increased viscous energy loss in patients with repaired tetralogy of Fallot. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2020;57(3):588-95. DOI:10.1093/ejcts/ezz246
29. Hu L, Ouyang R, Sun A, et al. Pulmonary artery hemodynamic assessment of blood flow characteristics in repaired tetralogy of Fallot patients versus healthy child volunteers. *Quant Imaging Med Surg*. 2020;10(5):921-33. DOI:10.21037/qims.2020.03.23
30. Jeong D, Anagnostopoulos PV, Roldan-Alzate A, et al. Ventricular kinetic energy may provide a novel noninvasive way to assess ventricular performance in patients with repaired tetralogy of Fallot. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2015;149(5):1339-47. DOI:10.1016/j.jtcvs.2014.11.085
31. Jarvis K, Schnell S, Barker AJ, et al. Caval to pulmonary 3D flow distribution in patients with Fontan circulation and impact of potential 4D flow MRI error sources. *Magn Reson Med*. 2019;81(2):1205-18. DOI:10.1002/mrm.27455
32. Sjöberg P, Heiberg E, Wingren P, et al. Decreased Diastolic Ventricular Kinetic Energy in Young Patients with Fontan Circulation Demonstrated by Four-Dimensional Cardiac Magnetic Resonance Imaging. *Pediatr Cardiol*. 2017;38(4):669-80. DOI:10.1007/s00246-016-1565-6
33. Kamphuis VP, Elbaz MSM, van den Boogaard PJ, et al. Disproportionate intraventricular viscous energy loss in Fontan patients: analysis by 4D flow MRI. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2019;20(3):323-33. DOI:10.1093/ehjci/je906
34. Raimondi F, Martins D, Coenen R, et al. Prevalence of Venovenous Shunting and High-Output State Quantified with 4D Flow MRI in Patients with Fontan Circulation. *Radiol Cardiothorac Imaging*. 2021;3(6):e210161. DOI:10.1148/ryct.210161
35. Valverde I, Nordmeyer S, Uribe S, et al. Systemic-to-pulmonary collateral flow in patients with palliated univentricular heart physiology: measurement using cardiovascular magnetic resonance 4D velocity acquisition. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2012;14(1):25. DOI:10.1186/1532-429X-14-25
36. Tsuneta S, Oyama-Manabe N, Takeda A, et al. The detection of retrograde flow from the left anterior descending artery into the main pulmonary artery by 4D-flow cardiac magnetic resonance in a patient with Bland-White-Garland syndrome. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2019;20(4):488. DOI:10.1093/ehjci/je922
37. Guirgis L, Gouton M, Hascoet S, Paul JF. Four-dimensional flow cardiac magnetic resonance visualization and quantification of a large coronary fistula. *Eur Heart J*. 2019;40(35):2995. DOI:10.1093/eurheartj/ehz478
38. Oyama-Manabe N, Aikawa T, Tsuneta S, Manabe O. Clinical Applications of 4D Flow MR Imaging in Aortic Valvular and Congenital Heart Disease. *Magn Reson Med Sci*. 2022;21:319-26. DOI:10.2463/mrms.rev.2021-0030
39. Lantz J, Gupta V, Henriksson L, et al. Intracardiac Flow at 4D CT: Comparison with 4D Flow MRI. *Radiology*. 2018;289(1):51-8. DOI:10.1148/radiol.2018173017
40. Wiesemann S, Schmitter S, Demir A, et al. Impact of sequence type and field strength (1.5, 3, and 7T) on 4D flow MRI hemodynamic aortic parameters in healthy volunteers. *Magn Reson Med*. 2021;85(2):721-33. DOI:10.1002/mrm.28450

Статья поступила в редакцию / The article received: 29.09.2023



OMNIDOCTOR.RU