

# 4D МР-визуализация потока: ценность и клинические перспективы у пациентов с патологией сердца и магистральных сосудов

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 по применению 4D-магнитно-резонансной визуализации потока (4D flow) при заболеваниях сердца и сосудов. Подробно изложены особенности применения методики при разных патологиях сердечно-сосудистой системы, рассмотрены приоритеты, ограничения и перспективные направления использования методики с учетом целей практической медицины. Обзор состоит из двух частей. Первая посвящена общим вопросам, ограничениям методики и 4D-картированию потока у пациентов с поражением магистральных сосудов. Во второй части акцент сделан на использование 4D магнитно-резонансного томографического потока при изучении внутрисердечного кровотока и 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. Терапевтический архив. 2024;96(4):391–395. DOI: 10.26442/00403660.2024.04.202683  
© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2024 г.

REVIEW

## 4D flow MRI: value and clinical perspectives in patients with pathology of the heart and great vessels. A review

Lyudmila A. Yurpolskaya✉

Bakoulev 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 magnetic resonance imaging 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. A review. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2024;96(4):391–395. DOI: 10.26442/00403660.2024.04.202683

## Введение

Достоверный анализ кровотока имеет определяющее значение в выборе тактики ведения пациентов с сердечно-сосудистой патологией. Поток крови в сердце и сосудах является многомерным, со сложной геометрией, поэтому ограничения в трехмерной его визуализации, свойственные большинству методов неинвазивной диагностики, не позволяют должным образом как рассчитать скоростные параметры в разных направлениях, так и адекватно оценить структуру кровотока при различных патологиях.

**Цель статьи** – представить современные данные исследований по использованию диагностических возможностей программы 4D-MPT потока (4D flow) для всестороннего изучения особенностей кровотока при сердечно-сосудистой патологии.

Сегодня трехмерные фазово-контрастные МР-изображения стали неотъемлемой частью рутинных кардиоторакальных и сосудистых МР-исследований патологических изменений кровотока у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. С появлением в 2000 г. 4D-МР-картирования кровотока стали возможными изучение сложной динамики потока – вихревой, спиральной или ретроградной, расчет различных потенциальных маркеров, связанных с патофизиологией сердечно-сосудистых заболеваний, но ранее недоступных для оценки [1, 2].

4D-MPT кровотока представляет собой ту же флоуметрию на основе 3D-фазово-контрастной МР-томографии, но синхронизированную по ЭКГ в соответствии с сердечным циклом, что обеспечивает большое покрытие зоны интереса, получение большего массива числовых данных при

## Информация об авторе / Information about the author

✉ Юрпольская Людмила Анатольевна – д-р мед. наук, вед. науч. сотр. рентген-диагностического отд. ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева». E-mail: layurpolskaya@bakulev.ru

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

высокой скорости сбора, повышая точность и надежность метода [1]. Существенными преимуществами методики являются выполнение исследования на свободном дыхании, дополнительное цветное кодирование параметров потока на картах и возможность проводить расчеты ретроспективно, что определяет востребованность программы не только в научной, но и практической деятельности, о чем свидетельствует рост публикаций за последние 20 лет согласно данным базы PubMed: с единичных – в начале 2000-х годов до 259 и 248 – в 2021 и 2022 г. соответственно.

Программа содержит два блока для анализа: первый, визуальный, – 3D-ангиография, различные цветные карты с закодированными по цвету показателями скорости, давления, напряжения сдвига, кинетической энергии и т.д., векторные карты направления (velocity vector field), карты движения частиц (particle traces) и потока (streamlines). Это позволяет наглядно отобразить полученные результаты, оценить направление, распределение, структуру и геометрию потока. При визуальной оценке можно различить некоторые компоненты течения [3]. Спиральный поток: региональная циркуляция потока вдоль продольной оси сосуда приводит к движению кровотока по типу спирали, струйное течение в своем начале может быть эксцентричным с высокоскоростными потоками вблизи стенки сосуда. Спиралевидный кровоток играет положительную физиологическую роль в усилении транспорта кровотока. Вихревой поток: частицы вращаются вокруг точки внутри сосуда, отклоняясь более чем на 90° от направления физиологического потока и образуя водоворот. Наличие и тяжесть многих сердечно-сосудистых патологий (аневризмы аорты, вальвулопатии и др.) коррелируют с наличием и интенсивностью вихревых потоков [4].

Второй блок – массив числовых показателей, характеризующих кровоток на ретроспективно выбранных зонах интереса: скорости потока (пиковая, объемная и т.д.), градиент давления, скорость пульсовой волны (PWV), напряжение сдвига, показатели кинетической энергии и т.д. Все показатели можно получить в любой временной точке сердечного цикла. Необходимо отметить, что отрезок времени не является реальным временем, а полученные данные соответствуют средним значениям, полученным из нескольких сердечных циклов, поэтому любой нестабильный или пульсирующий кровоток не имеет выраженного негативного влияния на получение данных [1, 4, 5].

#### **4D-MP-картирование кровотока в магистральных сосудах: аорте и ЛА**

Современное практическое применение 4D-MPT для оценки кровотока охватывает большое число заболеваний и поражений сердечно-сосудистой системы. Активное использование программы для оценки кровотока началось с изучения аортального потока в 2000 г., когда удалось описать нормальную геометрию кровотока в восходящей аорте (AoV) визуализированы две противоположные спирали. Именно они обеспечивают физиологичный спиральный поток, так как подобная геометрия уменьшает колебание между систолической и диастолической скоростями [6].

Из наиболее известных числовых показателей, имеющих прогностическое значение, помимо параметров скорости кровотока широко используется PWV, косвенно характеризующая эластичность и жесткость аорты [7]. PWV определяется как расстояние распространения пульсовой волны между двумя анатомическими точками, деленное на время распространения. PWV значительно выше у мужчин, чем

у женщин, и с возрастом увеличивается [7, 8]. Повышение PWV может быть ранним признаком увеличения жесткости аорты и, следовательно, функциональных изменений артериальной гемодинамики, ремоделирования сосудов и сердечно-сосудистого старения [5, 7].

Для оценки состояния сосудистой гемодинамики важную роль играют напряжение сдвига стенки ( $WSS=4\mu Q/\pi R^3$ ,  $\mu$  – вязкость крови,  $Q$  – объем кровотока,  $R$  – радиус сосуда) и колебательный индекс сдвига (OSI). WSS – сила сдвига, создаваемая потоком крови, действующая на стенку сосуда. При расчетах обязательно учитываются возраст пациентов и форма аорты [2, 4]. Показано, что значения WSS и OSI, полученные при 4D-картировании потока, могут использоваться в качестве неинвазивных клинических показателей отрицательного ремоделирования аорты [5, 9]. Высокий OSI, низкая WSS являются известными маркерами атерогенеза и ремоделирования сосудов, так как их значения и распределение прямо коррелируют с атеросклерозом, нарушением регуляции внеклеточного матрикса и дегенерацией эластических волокон [3]. MP-картирование 4D-потока позволяет дополнительно наглядно представить и оценить эксцентричность и неоднородность распределения WSS.

Суммарно основными ранними признаками аортопатии, возникающими даже при нормальном диаметре аорты и определяющими риск расслоения аорты, помимо высоких пиковых скоростей являются: более высокая спираль, наличие и усиление силы вихрей, низкое пиковое систолическое напряжение сдвига, повышенная эксцентричность с неоднородным распределением WSS [6, 10].

4D потока позволяет наглядно оценить нормализацию геометрии потока, физиологичность позиции протеза в отдаленные сроки после операции. Так, показано, что у пациентов с расслоением аорты 1-го типа после протезирования появление вихрей в AoV дистальнее протеза является негативным прогностическим признаком [6]. Благодаря отсутствию потребности во введении контрастного вещества методика 4D-картирования потока может стать альтернативой компьютерной томографической ангиографии у пациентов с почечной недостаточностью, а также помочь в отборе всех пациентов с расслоением аорты, нуждающихся в повторном вмешательстве.

Сохранение естественной кривизны и физиологических условий кровотока является целью реконструктивной хирургии грудной аорты у пациентов с расслоением. 4D MP-потока может предоставить полезную информацию о количественных параметрах кровотока, определяющих развитие поздних осложнений, и способствовать лучшему пониманию взаимосвязи между гидродинамикой и механическими нагрузками, действующими на стенку аорты и сосудистых протезов [10].

Помимо типичных параметров для описания кровотока при 4D MP-картировании потока можно получить и другие ценные, но менее распространенные показатели. Так, завихренность и циркуляция указывают на силу вращающегося потока или мощность двухмерных вихревых потоков, спиральность (число перекрестных связей вихревых путей) – на силу трехмерного спирального потока, она характеризует турбулентный поток в аорте при сложной анатомии [2].

Для количественной оценки патологической турбулентности имеется два типа параметров, основанных на разных физиологических концепциях: потеря энергии (EL) и турбулентная кинетическая энергия. EL представляет собой рассеянную энергию, определяемую вязкостью кро-

ви, характеризует нагрузку на сердце, ввиду чего может использоваться для прогноза сердечной недостаточности. Турбулентная кинетическая энергия отображает потерю кинетической энергии, возникающей за счет турбулентности при физиологичном струйном течении кровотока, поэтому косвенно свидетельствует о степени тяжести нарушений гемодинамики [2]. Согласно мировым исследованиям значения WSS и EL в AoB могут стать в будущем важными показателями, характеризующими постнагрузку левого желудочка (ЛЖ), нарушения которой приводят к неблагоприятному ремоделированию ЛЖ [4].

При увеличении EL для сохранения адекватного сердечного выброса повышается нагрузка на ЛЖ. Поэтому маркером гемодинамической значимости стеноза, например аортального клапана (АК), является величина необратимой потери давления в постстенотическом кровотоке. Учитывая, что турбулентная кинетическая энергия характеризует энергию, рассеиваемую при стенозе, этот показатель как альтернативный неинвазивный маркер необратимой потери давления может использоваться для дополнительной информации, имеющей прогностическое значение у бессимптомных пациентов со стенозом АК [11]. По данным литературы, у пациентов со стенозом АК величина пиковой скорости, рассчитанная по данным трансторакальной эхокардиографии, меньше по сравнению с таковой при 4D МР-потока. Отчасти это обусловлено эксцентричностью и множеством струй при стенозах [12].

Методика 4D МР-картирования потока позволяет проводить разнонаправленное кодирование скорости и, следовательно, получать количественные значения скоростей вне зависимости от пространственной ориентации струи, что повышает достоверность результатов [1, 2]. По данным 4D-MPT высокая степень эксцентричности струи (смещение потока) коррелирует со скоростью расширения аорты и является маркером риска у пациентов, предрасположенных к дилатации аорты [4].

Таким образом, 4D МР-потока может быть предпочтительной при несогласованности данных с эхокардиографией при эксцентричных и множественных потоках, особенно при стенозах АК с низким градиентом и/или у бессимптомных пациентов, а также у пациентов с двустворчатым АК (ДАК) [13]. По данным мировой литературы, ДАК может иметь асимметричное устье и, следовательно, увеличенный эксцентрический угол потока, что повышает WSS и приводит к дилатации AoB [14]. Причем в отличие от пациентов с трехстворчатым АК и расширением AoB повышенный эксцентричный и вращательный поток при ДАК сохраняется в проксимальном и среднем отделах дуги [14, 15].

J. Rodríguez-Palmares и соавт. показали, что геометрия кровотока зависит от фенотипа ДАК [16]. Фенотип зависит от варианта слияния створок [17]. При право-левом (ПЛ) типе сращены правая и левая коронарные створки АК, при право-некоронарном (ПН) типе – правая и некоронарная створки. ПЛ-тип характеризовался передним и право-передним выводным потоком, высоким значением средней WSS в проксимальном и среднем восходящем отделе аорты. ПН-тип отличался преобладающим задним потоком, который становился право-передним только в дистальном сегменте AoB, высоким вращательным компонентом, большим углом струи, переменным течением и высоким значением периферического WSS в среднем и дистальном отделе восходящего отдела аорты. ПЛ-тип связан с аневризмой корня и AoB, а ПН-тип – с дилатацией AoB и дуги, но, как правило, без вовлечения корня аорты [5, 16]. По-

лученные данные могут свидетельствовать о полезности 4D-MPT для прогнозирования риска аортопатии при ДАК, лечения заболеваний АК и стратегиях своевременного принятия решения о замене клапана [11].

Методика МР-картирования позволяет проследить эффект после операции как наглядно, так и в положительной динамике абсолютных значений скорости, градиента, напряжения сдвига и его распределения в грудной аорте [18]. После эндоваскулярного протезирования АК наблюдались заметное уменьшение спирального потока и улучшение региональной неоднородности WSS, значительное снижение пиков EL в AoB [19]. После хирургической пластики АК у пациентов с ДАК обнаружено достоверное уменьшение спирального и вихревого потока, аортальной регургитации, снижение пиковой систолической скорости и WSS в AoB [18].

Изучение аортального кровотока, которому посвящено наибольшее количество работ, представляет собой модель для успешного использования знаний гидродинамики в клинической практике при анализе кровотока. Поэтому в последние годы появляется все больше результатов мировых исследований по 4D МР-картированию кровотока в камерах сердца и других сосудах по принципу, аналогичному оценке кровотока в аорте. Так, при легочной гипертензии (ЛГ) наблюдается усиление кровотока в выводном отделе правого желудочка и стволе легочной артерии (ЛА) с последующим формированием вихря в ЛА, площадь которого коррелирует со средним давлением в ЛА [20].

Предварительные данные исследований свидетельствуют, что при 4D-картировании потока можно идентифицировать ЛГ и отслеживать динамику легочного сосудистого сопротивления [21, 22]. Диастолическое и среднее значения WSS отрицательно коррелировали со средним давлением в ЛА, т.е. низкая WSS в стволе ЛА может потенциально стать характерным признаком ЛГ [20, 21]. Пиковая систолическая скорость и ударный объем в ЛА также значительно ниже у пациентов с ЛГ [20, 21]. Для количественной оценки ЛГ предложено дополнительно использовать показатель продолжительности вихревого потока – процент фаз сердечного цикла, в которых визуализируется вихрь (Tvortex). При значениях Tvortex=14,3% чувствительность и специфичность диагностики ЛГ составляла 97 и 96% соответственно [23].

Нами изучены показатели кровотока в коронарном синусе (КС) у лиц без коронарной патологии и у пациентов с приобретенными пороками и ЛГ. У пациентов с пороками клапанов объем притока через КС в правое предсердие оказался достоверно выше, а скорость в КС – достоверно ниже, чем у здоровых, отмечен ретроградный заброс крови в КС, обусловленный повышенным давлением в правом предсердии [24].

Таким образом, сегодня мы имеем программу, которая поможет приоткрыть завесу в патофизиологию большинства заболеваний сердечно-сосудистой системы. Однако есть ряд принципиальных ограничений методики, которые необходимо учитывать при ее использовании.

### Ограничения 4D-картирования

Прежде всего необходимо отметить, что каждое изображение имеет набор кадров в разные моменты сердечного цикла, поэтому временное разрешение – один из важных параметров выбора при МР-протоколах сканирования кровотока. Если используется низкое временное разрешение, пиковая скорость и кровотоки в магистральных артериях могут являться недооцененными [25]. Еще один нема-

ловажный факт: МР-исследование проходит на свободном дыхании, учитываются трехмерное пространственное кодирование и синхронизация с сердечным циклом, при этом влияние дыхания на гемодинамику игнорируется. Недавно разработана новая 5D-MPT, при которой учитываются дыхательные движения, что должно повысить точность и достоверность результатов оценки кровотока [25]. Точность и достоверность результатов повышает автоматическая сегментация изображений, для чего предложено использовать машинное обучение. Подразумевается, что это сократит время, затрачиваемое на 4D-измерения кровотока, и снизит влияние субъективного фактора при анализе [25].

Самая распространенная ошибка при МРТ кровотока – неправильный выбор расчетной скорости (VENC). Слишком высокая скорость кодирования приводит к шуму, слишком низкая – к выпадению МР-сигнала. Шум мешает оценке пиковой скорости, поскольку он может быть замаскирован шумовыми пиками. При высокой VENC может происходить недооценка медленных потоков во время диастолы [26]. В последние годы предложены модификации программы с возможностью подбора двух VENC, что позволяет отчасти нивелировать негативное влияние одной VENC [27]. Необходимо также помнить об относительно низком пространственном разрешении при МРТ. В результате эффекты парциального объема вызывают недооценку потока и пиковой скорости [26].

Негативно сказывается на полученных результатах отсутствие единой цветной шкалы параметров кровотока и стандартизации программ анализа у разных разработчиков. Также величина напряженности магнитного поля влияет на значение параметров кровотока, что заставляет

искать референтные показатели для соответствующих МР-томографов (1,5, 3Т и т.д.) [25]. В связи с этим предложено каждому диагностическому центру проводить собственную проверку качества метода 4D МР-потока перед использованием в клинической практике для принятия решений [28].

### Заключение

Несмотря на имеющиеся ограничения, МР-методика 4D-картирования потока выглядит весьма перспективно для практической деятельности. С учетом возможностей методики представляется интересной в изучении внутрижелудочкового кровотока и использовании у пациентов с врожденными пороками сердца и сосудов. В следующей части обзора будут представлены подробные мировые данные по этим вопросам.

**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

АоВ – восходящая аорта  
АК – аортальный клапан  
ДАК – двустворчатый аортальный клапан  
КС – коронарный синус  
ЛА – легочная артерия  
ЛГ – легочная гипертензия  
ЛЖ – левый желудочек  
ПЛ – право-левый тип слияния створок

ПН – право-некоронарный тип слияния створок  
EL – потеря энергии  
OSI – колебательный индекс сдвига  
PWV – скорость пульсовой волны  
VENC – расчетная скорость  
WSS – сила сдвига, создаваемая потоком крови, действующая на стенку сосуда

### ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Takehara Y. 4D Flow when and how? *Radiol Med.* 2020;125(9):838-50. DOI:10.1007/s11547-020-01249-0
- Itatani K, Sekine T, Yamagishi M, et al. Hemodynamic Parameters for Cardiovascular System in 4D Flow MRI: Mathematical Definition and Clinical Applications. *Magn Res Med Sci.* 2022;21(2):380-99. DOI:10.2463/mrms.rev.2021-0097
- 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
- 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
- Zhuang B, Sirajuddin A, Zhao S, Lu M. The role of 4D flow MRI for clinical applications in cardiovascular disease: current status and future perspectives. *Quant Imaging Med Surg.* 2021;11(9):4193-210. DOI:10.21037/qims-20-1234
- Takahashi K, Sekine T, Ando T, et al. Utility of 4D Flow MRI in Thoracic Aortic Diseases: A Literature Review of Clinical Applications and Current Evidence. *Magn Res Med Sci.* 2022;21:327-39. DOI:10.2463/mrms.rev.2021-0046
- Harloff A, Mirzaee H, Lodemann T, et al. Determination of aortic stiffness using 4D flow cardiovascular magnetic resonance – a population-based study. *J Cardiovasc Magn Res.* 2018;20(1):43. DOI:10.1186/s12968-018-0461-z
- Scott MB, Huh H, van Ooij P, et al. Impact of age, sex, and global function on normal aortic hemodynamics. *Magn Reson Med.* 2020;84(4):2088-102. DOI:10.1002/mrm.28250
- Takehara Y, Isoda H, Takahashi M, et al. Abnormal Flow Dynamics Result in Low Wall Shear Stress and High Oscillatory Shear Index in Abdominal Aortic Dilatation: Initial in vivo Assessment with 4D-flow MRI. *Magn Reson Med Sci.* 2020;19:235-46. DOI:10.2463/mrms.mp.2019-0188
- Condemi F, Campisi S, Viallon M, et al. Relationship Between Ascending Thoracic Aortic Aneurysms Hemodynamics and Biomechanical Properties. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2020;67:949-56. DOI:10.1109/TBME.2019.2924955
- Garcia J, Barker AJ, Markl M. The Role of Imaging of Flow Patterns by 4D flow MRI in Aortic Stenosis. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2019;12:252-66. DOI:10.1016/j.jcmg.2018.10.034
- Demirkiran Ah, van Ooij P, Westenberg JJM, et al. Clinical intra-cardiac 4D flow CMR: acquisition, analysis, and clinical applications. *Eur Heart J Cardiovasc Imag.* 2022;23:154-65. DOI:10.1093/ehjci/jeab112

13. Blanken CPS, Farag ES, Boekholdt SM, et al. Advanced cardiac MRI techniques for evaluation of left-sided valvular heart disease. *J Magn Reson Imaging*. 2018;48:318-29. DOI:10.1002/jmri.26204
14. Youssefi P, Sharma R, Figueroa CA, Jahangiri M. Functional assessment of thoracic aortic aneurysms – the future of risk prediction? *Br Med Bull*. 2017;121:61-71. DOI:10.1093/bmb/ldw049
15. Dux-Santoy L, Guala A, Teixido-Tura G, et al. Increased rotational flow in the proximal aortic arch is associated with its dilation in bicuspid aortic valve disease. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2019;20:1407-17. DOI:10.1093/ehjci/jez046
16. Rodríguez-Palomares JF, Dux-Santoy L, Guala A, et al. Aortic flow patterns and wall shear stress maps by 4D-flow flow patterns and wall shear stress maps by 4D-flow cardiovascular magnetic resonance in the assessment of aortic dilatation in bicuspid aortic valve disease. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2018;20:28. DOI:10.1186/s12968-018-0451-1
17. Ridley CH, Vallabhajosyula P, Bavaria JE, et al. The Sievers Classification of the Bicuspid Aortic Valve for the Perioperative Echocardiographer: The Importance of Valve Phenotype for Aortic Valve Repair in the Era of the Functional Aortic Annulus. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2016;30:1142-51. DOI:10.1053/j.jvca.2016.02.009
18. Hattori K, Nakama N, Takada J, et al. Bicuspid aortic valve morphology and aortic valvular outflow jets: an experimental analysis using an MRI-compatible pulsatile flow circulation system. *Sci Rep*. 2021;11(1):2066. DOI:10.1038/s41598-021-81845-w
19. Komoriyama H, Tsuneta S, Oyama-Manabe N, et al. Four-dimensional flow magnetic resonance imaging visualizes significant changes in flow pattern and wall shear stress in the ascending aorta after transcatheter aortic valve implantation in a patient with severe aortic stenosis. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2020;21(1):21. DOI:10.1093/ehjci/jez192
20. Odagiri K, Inui N, Hakamata A, et al. Non-invasive evaluation of pulmonary arterial blood flow and wall shear stress in pulmonary arterial hypertension with 3D phase contrast magnetic resonance imaging. *Springerplus*. 2016;5(1):1071. DOI:10.1186/s40064-016-2755-7
21. Cerne JW, Pathrose A, Gordon DZ, et al. Evaluation of Pulmonary Hypertension Using 4D Flow MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2022;56(1):234-45. DOI:10.1002/jmri.27967
22. Reiter U, Kovacs G, Reiter C, et al. MR 4D flow-based mean pulmonary arterial pressure tracking in pulmonary hypertension. *Eur Radiol*. 2021;31:1883-93. DOI:10.1007/s00330-020-07287-6
23. Reiter G, Reiter U, Kovacs G, et al. Blood flow vortices along the main pulmonary artery measured with MR imaging for diagnosis of pulmonary hypertension. *Radiology*. 2015;275:71-9. DOI:10.1148/radiol.14140849
24. Шляппо М.А., Глазкова Е.Ю., Александрова С.А., и др. Методика 4D-flow магнитно-резонансной томографии в оценке кровотока в коронарном синусе. *Клиническая физиология кровообращения*. 2019;16(1):30-5 [Shlyappo MA, Glazkova EYu, Aleksandrova SA, et al. Assessment of blood flow in the coronary sinus by the method of MR 4D-flow. *Clinical Physiology of Circulation*. 2019;16(1):30-5 (in Russian)]. DOI:10.24022/1814-6910-2019-16-1-30-35
25. Wiesemann St, 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;5(2):721-33. DOI:10.1002/mrm.28450
26. Corrias G, Cocco D, Suri JS, et al. Heart applications of 4D flow. *Cardiovasc Diagn Ther*. 2020;10(4):1140-9. DOI:10.21037/cdt.2020.02.08
27. Nakaza M, Matsumoto M, Sekine T, et al. Dual-VENC 4Dflow MRI can detect abnormal blood flow in the left atrium that potentially causes thrombosis formation after left upper lobectomy. *Magn Reson Med Sci*. 2021;21(3):433-43. DOI:10.2463/mrms.mp.2020-0170
28. Doyle CM, Orr J, Greenwood JP, et al. Four-Dimensional Flow Magnetic Resonance Imaging in the Assessment of Blood Flow in the Heart and Great Vessels: A Systematic Review. *J Magn Reson Imaging*. 2022;55(5):1301-21. DOI:10.1002/jmri.27874

Статья поступила в редакцию / The article received: 29.09.2023



OMNIDOCTOR.RU