

ISSN 2782-3806
ISSN 2782-3814 (Online)
УДК 616-073.756.8:616.132

МЕТОДИКА 4D FLOW В ОЦЕНКЕ КРОВОТОКА В АОРТЕ

Шериев С. Р., Турчинская И. А., Фокин В. А., Рыжков А. В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Шериев Султан Русланович,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава
России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург;
Россия, 197341.
E-mail: sapiensowl@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16.11.2023
и принята к печати 21.12.2023.

РЕЗЮМЕ

Статья посвящена обзору роли методики 4D FLOW в оценке кровотока восходящего отдела аорты.

Приводится краткий историко-терминологический очерк, а также описание состояния проблемы на данный момент.

Обсуждаются вопросы клинической важности и целесообразности использования данного метода лучевой диагностики. Обобщается процесс сканирования и постпроцессинга изображений.

В заключение обобщены перспективы и значимость рассмотренной методики в структуре здравоохранения.

Ключевые слова: аорта, восходящий отдел аорты, коарктация аорты, кровоток, МРТ, МРТ-ангиография, скорость кровотока, фазово-контрастная МРТ, 4D FLOW.

Для цитирования: Шериев С.Р., Турчинская И.А., Фокин В.А., Рыжков А.В. Методика 4D FLOW в оценке кровотока в аорте. Российский журнал персонализированной медицины. 2024;4(1):19-24. DOI: 10.18705/2782-3806-2024-4-1-19-24. EDN: ZJJHSS

4D FLOW IN ASSESSING BLOOD FLOW IN AORTA

Sheriev S. R., Turchinskaya I. A., Fokin V. A., Ryzhkov A. V.

Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author:

Sheriev Sultan R.,
Almazov National Medical Research Centre,
Akkuratova str., 2, Saint Petersburg, Russia,
197341.
E-mail:sapiensowl@gmail.com

Received 16 November 2023; accepted
21 December 2023.

ABSTRACT

The article is dedicated to reviewing the role of the 4D FLOW technique in assessing blood flow in the aorta. A brief historical and terminological overview is provided, along with a description of the current state of the issue. The clinical relevance and appropriateness of using this radiological diagnostic method are discussed. The scanning and image post-processing process is summarized. Finally, the prospects and significance of the reviewed technique in healthcare are outlined.

Key words: aorta, aortic coarctation, ascending aorta, blood flow, blood flow velocity, MRI, MRI angiography, phase-contrast MRI, 4D FLOW.

For citation: Sheriev SR, Turchinskaya IA, Fokin VA, Ryzhkov AV. 4D FLOW in assessing blood flow in aorta. Russian Journal for Personalized Medicine. 2024;4(1):19-24. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2024-4-1-19-24. EDN: ZJJHSS

Список сокращений: КВ — контрастирующее вещество, МР — магнитно-резонансный, МРТ — магнитно-резонансная томография, T1-ВИ — T1-взвешенное изображение, T2-ВИ — T2-взвешенное изображение.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является неинвазивным и современным методом диагностики. Благодаря сочетанию высокого пространственного и временного разрешений метод МРТ широко используется и в сосудистой хирургии. К преимуществам МРТ исследований относятся: широкая область исследования, возможность оценить анатомическую структуру, а при использовании специальных последовательностей и функциональное состояние тканей. Одной из методик в МРТ являются фазово-контрастные последовательности, позволяющие измерить скорость тока крови [1]. 4D FLOW представляет собой одну из таких методик, которая позволяет оценить не только основные параметры скорости и объема потока крови, но и дополнительные параметры, такие как стресс стенок сосудов, скорость пульсовой волны, перепады давления в сосудах. Это обеспечивает возможность оценить как структурное, так и функциональное состояние аорты [1, 2]. Но, несмотря на свои преимущества, данная методика имеет ряд недостатков: длительное время сканирования, необходимость наличия программного обеспечения, а также операторозависимость [1, 2].

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДИКИ 4D FLOW

Исторически интерес к гемодинамическим свойствам аорты проявлялся еще во времена Леонардо да Винчи (1512 г.), который с помощью опытов доказывал турбулентность тока в аорте [18]. Его предположения оказались на удивление точными, что подтвердилось с началом активного применения фазово-контрастных методик МРТ (PC MRI) в конце 1980-х [4], когда количественная визуализация кровотока с помощью двумерной фазово-контрастной МРТ (2D PC-MRI) стала рутинной частью в визуализации сердца и сосудов, так как позволяет оценить регионарный кровоток в сердце и магистральных сосудах [1, 6, 8].

Со временем, с увеличением вычислительных мощностей на стадии сканирования и постпроцессинга удалось объединить несколько 2D-срезов, в результате чего удалось получить 3D-изображения, которые предполагают введение третьего

измерения: объема, что помогло обеспечить более высокое пространственное разрешение [9, 11]. Дальнейшее свое развитие данная методика получила в виде 4D-FLOW, которая увеличивает временное разрешение и способна обеспечить более детальную визуализацию направления и ламинарности тока крови.

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Основная особенность фазово-контрастных методик МРТ заключается в том, что изменения фазы сигнала МР вдоль градиента магнитного поля прямо связаны со скоростью кровотока. Этот принцип реализуется с помощью специальных биполярных градиентов, которые кодируют скорость [1, 6, 10, 14]. При использовании данных градиентов выполняются два сканирования с разными фазами сигнала, но с одинаковыми параметрами последовательности, из-за чего можно обнаружить изменения фазы сигнала, связанные с потоком. Вычитание полученных фазовых изображений позволяет удалить фоновую фазу и определить скорость тока крови в сосуде (так называемые карты скорости) [7, 10].

Метод МРТ, ввиду длительности сканирования, достаточно сильно подвержен двигательным артефактам, а стандартные МР-последовательности не способны делать поправку на изменения объема и скорости крови, связанные с сокращениями сердца [11, 12]. В связи с этим, для проведения фазово-контрастных методик необходимо выполнение исследования с ЭКГ-синхронизацией, что дает возможность собирать данные на протяжении нескольких сердечных сокращений и получить серию изображений с высоким временным разрешением (CINE — кинорежим), отображающих динамику пульсирующего кровотока в течение сердечного цикла [12, 13].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СКАНИРОВАНИЯ

Для проведения методики 4D FLOW предпочтительнее выполнять сканирование на высокопольных МР-томографах с силой магнитного поля 3 Тл, однако есть возможность производить его и на аппаратах с силой магнитного поля 1,5 Тл. Для выполнения исследования обязательным требованием является наличие ЭКГ-синхронизации [14]. Кроме этого, постпроцессинг изображений требует наличия программного обеспечения. На данный момент единственным одобренным в иностранной практике программным обеспечением для кли-

нического применения является модуль для 4D FLOW фирмы Pie Medical Imaging [15].

Сканирование включает три этапа:

1 этап — получение трех серий локализаторов с ЭКГ-синхронизацией, при помощи 2D последовательностей (например — steady-state free precession) [1, 4, 16, 18] в сагиттальной, аксиальной и корональной плоскостях.

2 этап — получение сагиттально наклоненных изображений грудной аорты, включая отверстие левого желудочка. Немаловажным фактором в проведении данного этапа исследования является ожидаемая скорость кровотока в сосуде: VENC (velocity encoding) [13], установка которой позволяет получать картинки без артефактов от скорости кровотока. Особенно значим данный фактор у пациентов со стенозом аорты [18], так как в регионах сужения резко возрастает линейная скорость кровотока, а следовательно, и количество артефактов.

Контроль дыхания с использованием навигатора или дыхательного датчика применяется для ми-

нимизации артефактов дыхания. Также возможно проведение исследования на задержке дыхания.

3 этап — получение следующих наборов изображений:

- 1) анатомических изображений аорты;
- 2) взвешенных по магнитуде изображений;
- 3) карт векторов скоростей тока крови по осям V_x , V_y и V_z [1, 4, 10].

После этого полученные изображения проходят два этапа постпроцессинга в программном обеспечении, а именно: создание 3D модели сосуда и ее корректировка, обработка данных фазово-контрастных изображений и построение объемных 3D карт траектории частиц (рис. 1), стресса стенки (рис. 2) и перепада давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

4D FLOW — многообещающая методика, позволяющая неинвазивно получить обширный объем данных, всесторонне характеризующих кровотоки

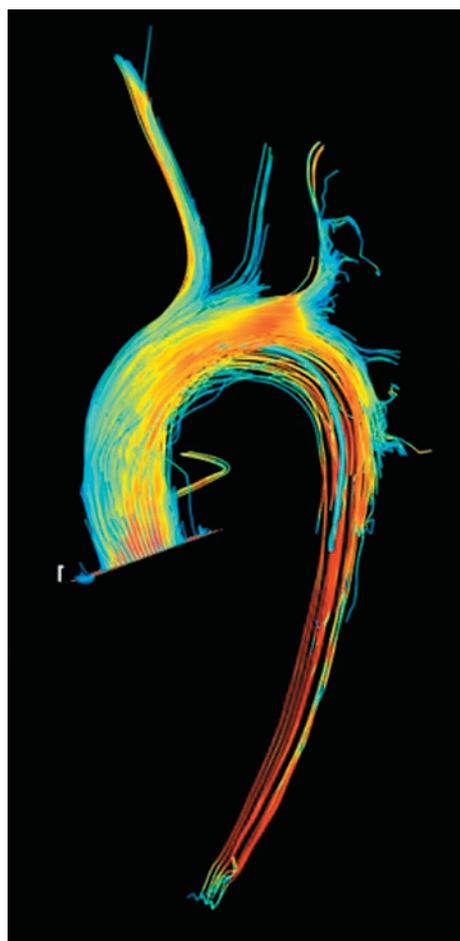


Рис. 1. Траектория частиц

Fig. 1. Particle trajectory

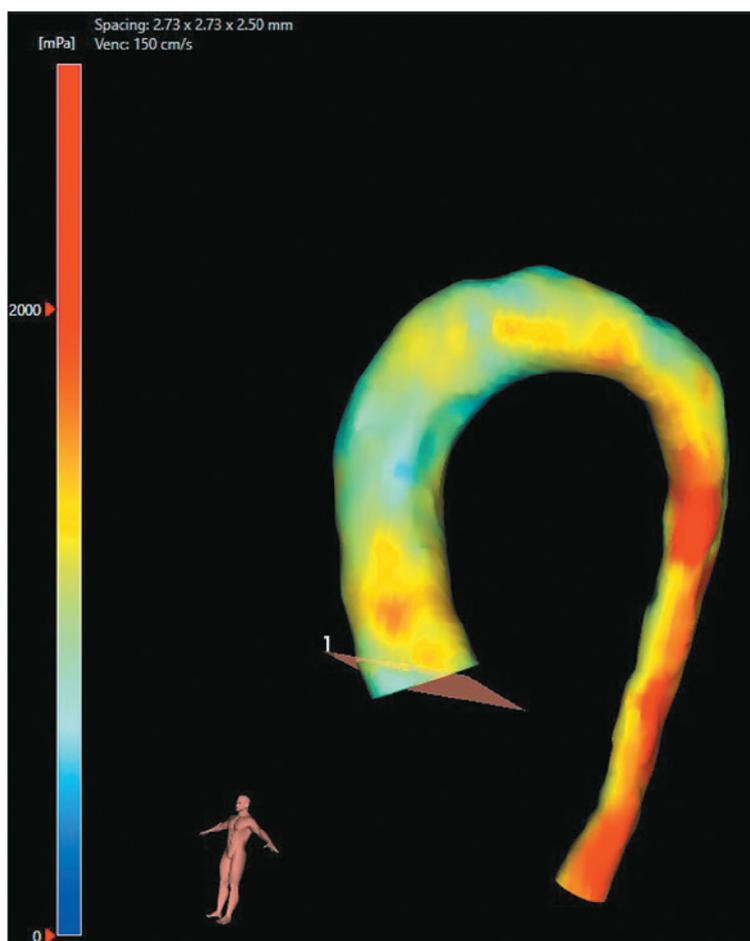


Рис. 2. Аксиальный стресс стенки

Fig. 2. Axial wall stress

в аорте. Полученные данные можно использовать для оценки скорости и ламинарности тока крови, стресса стенки аорты и перепада давления между отделами аорты. Перечисленное, принимая во внимание актуальность проблемы сердечно-сосудистых заболеваний в наше время, позволит более обоснованно подходить к выбору тактики лечения сосудистых заболеваний, а также определять заболевания на ранних этапах и снижать риск преждевременной смертности.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. /The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Markl M, Frydrychowicz A, Kozerke S, et al. 4D flow MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2012 Nov;36(5):1015–36.
2. Soulat G, McCarthy P, Markl M. 4D flow with MRI. *Annual review of biomedical engineering*. 2020 Jun 4;22:103–26.
3. Garcia J, Capoulade R, Le Ven F, et al. The role of imaging of flow patterns by 4D flow MRI in aortic stenosis. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2019;35(3):417–427.
4. Soulat G, McCarthy P, Markl M. 4D flow with MRI. *Annual review of biomedical engineering*. 2020 Jun 4;22:103–26.
5. Frydrychowicz A, Wieben O, Niespodzany E, et al. Quantification of thoracic blood flow using volumetric magnetic resonance imaging with radial velocity encoding: in vivo validation. *Investigative Radiology*. 2013;48(12):819–825.
6. Burriss NS, Hope MD. 4D flow MRI applications for aortic disease. *Magnetic Resonance Imaging Clinics*. 2015 Feb 1;23(1):15–23.
7. Gabbour M, Gatehouse P, Schnell S, et al. Valve-related complications following trans-catheter aortic valve replacement: assessment of aortic flow patterns using 4D flow MRI. *European Radiology*. 2016;26(5):1231–1239.
8. Binter C, Knobloch V, Manka R, et al. Segmental aortic wall shear stress in healthy volunteers and patients after aortic valve-sparing surgery: Quantification by 4D flow-sensitive CMR. *European Radiology*. 2013;23(1):225–234.
9. Delles M, Rengier F, Azad Y, et al. Influence of temporal resolution and k-t BLAST acceleration on MR imaging-based noninvasive coronary artery flow profiling using 4D flow MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2011;34(1):384–395.
10. Frydrychowicz A, Wieben O, Stalder A, et al. Four-dimensional velocity mapping of the hepatic and splanchnic vasculature with radial sampling at 3 tesla: A feasibility study in portal hypertension. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2010;32(3):545–555.
11. Garg P, Westenberg J, van den Boogaard P, et al. Comparison of fast acquisition strategies in whole-heart four-dimensional flow cardiac MR: Two-center, 1.5 tesla, phantom and in vivo validation study. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2019;50(4):1216–1226.
12. Stankovic Z, Csatori Z, Deibert P, et al. Assessment of ascending aortic stiffness in hypertensive patients with 4D flow MRI: A feasibility study compared with echocardiography. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2018;47(1):635–643.
13. Gu T, Korosec F, Block W, et al. PC VIPR: A high-speed 3D phase-contrast method for flow quantification and high-resolution angiography. *American Journal of Neuroradiology*. 2005;26(4):743–749.
14. Bock J, Frydrychowicz A, Stalder A, et al. 4D phase contrast MRI at 3 T: Effect of standard and blood-pool contrast agents on SNR, PC-MRA, and blood flow visualization. *Magnetic Resonance in Medicine*. 2010;63(2):330–338.
15. Meckel S, Leitner L, Bonati L, et al. Intracranial artery velocity measurement using 4D PC MRI at 3 T: Comparison with transcranial ultrasound techniques and 2D PC MRI. *Neuroradiology*. 2012;54(6):607–613.
16. Entezari P, Schnell S, Mahadevia R, et al. From unicuspid to quadricuspid: Influence of aortic valve morphology on aortic three-dimensional hemodynamics. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2014;40(1):134–141.
17. Markl M, Wegent F, Zech T, et al. In vivo wall shear stress distribution in the carotid artery: effect of bifurcation geometry, internal carotid artery stenosis, and recanalization therapy. *Circulation: Cardiovascular Imaging*. 2010;3(6):647–655.
18. Dyverfeldt P, Hope M, Tseng E, et al. Magnetic resonance measurement of turbulent kinetic energy for the estimation of irreversible pressure loss in aortic stenosis. *Journal of the American College of Cardiology*. 2006;48(2):342–352.
19. Малахова М.В., Прохорова Е.А., Куличкин А.С. и др. Диагностика отрыва клапаносодержащего кондуита восходящего отдела аорты и его успешное хирургическое лечение. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2021;102(6):383–9.

Информация об авторах:

Шериев Султан Русланович, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Турчинская Ирина Анатольевна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Фокин Владимир Александрович, д.м.н., профессор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Рыжков Антон Владимирович, заведующий отделением магнитно-резонансной томографии, врач-рентгенолог высшей категории ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

Authors information:

Sheriev Sultan R., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Turchinskaya Irina A., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Fokin Vladimir A., Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Radiation diagnostics and medical imaging with the clinic Almazov National Medical Research Centre;

Ryzhkov Anton V., Head of the Magnetic Resonance Imaging Department, radiologist of the highest category, Almazov National Medical Research Centre.