

ISSN 2782-3806
ISSN 2782-3814 (Online)
УДК 616-073.756.8:612.17

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИКИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ В КАРДИОЛОГИИ

Шериев С. Р., Сидорина А. С., Баев М. С., Рыжков А. В., Фокин В. А.

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: Sheriev_SR@almazovcentre.ru

Статья поступила в редакцию 25.10.2023
и принята к печати 30.11.2023.

РЕЗЮМЕ

Статья посвящена обзору наиболее перспективных методик МРТ в кардиовизуализации как части персонифицированной медицины.

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

Рассматриваются примеры перспективных методик МР исследований. Обсуждаются вопросы клинической важности и целесообразности использования данных методик.

Обобщаются существующие подходы в диагностике и терапии наиболее значимых кардиологических заболеваний.

В заключение обобщены перспективы и значимость рассмотренных методик в структуре здравоохранения.

Ключевые слова: анализ деформации миокарда, диффузионно-тензорная томография сердца, кардиовизуализация, лучевая диагностика, магнитно-резонансная томография, МРТ сердца, T1 и T2 картирование сердца, фосфорная спектрография сердца.

Для цитирования: Шериев С.Р., Сидорина А.С., Баев М.С., Рыжков А.В., Фокин В.А. Современные методики магнитно-резонансной томографии в кардиологии. Российский журнал персонализированной медицины. 2023; 3(6):61-66. DOI: 10.18705/2782-3806-2023-3-6-61-66. EDN: IUDKXU

MODERN METHODS OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN CARDIOLOGY

Sheriev S. R., Sidorina A. S., Baev M. S., Ryzhkov A. V., Fokin V. A.

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: Sheriev_SR@almazovcentre.ru

Received 25 October 2023; accepted
30 November 2023.

ABSTRACT

The article is devoted to a review of the most promising MRI techniques in cardiac imaging, as part of personalized medicine.

A brief historical and terminological outline is provided, as well as a description of the current state of the problem. The results of promising methods of MR studies are considered. Issues of clinical importance and recommendations for use of the data are discussed.

Various approaches to the diagnosis and treatment of the most significant cardiac diseases are summarized.

In conclusion, the views and innovativeness of best practices in modern healthcare are summarized.

Key words: cardiac diffusion tensor imaging, cardiac imaging, cardiac MRI, cardiac phosphorus spectrography, cardiac strain, magnetic resonance imaging, radiation diagnostics, T1 T2 mapping of the heart.

For citation: Sheriev SR, Sidorina AS, Baev MS, Ryzhkov AV, Fokin VA. Modern methods of magnetic resonance imaging in cardiology. Russian Journal for Personalized Medicine. 2023; 3(6):61-66. (In Russ.) DOI: 10.18705/2782-3806-2023-3-6-61-66. EDN: IUDKXU

Список сокращений: ВОЗ — Всемирная организация здравоохранения, ИКД — измеряемый коэффициент диффузии, МР — магнитно-резонансный, МРТ — магнитно-резонансная томография, сDTI — диффузионно-тензорные изображения сердца.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-резонансная томография сердца (МРТ) является неинвазивным и эффективным методом кардиовизуализации [17, 27]. В недавнем прошлом эта технология имела свои ограничения ввиду отсутствия кардиосинхронизации. Однако с момента внедрения в конце 1980-х годов техника проведения исследований МРТ стала совершеннее. За последние два десятилетия значительно улучшились методики МРТ, ускорился сбор данных, а также отчасти автоматизировалась их постобработка, что позволило расширить спектр применения данных методик при сердечно-сосудистых заболеваниях.

Несмотря на то, что в настоящий момент больше используется методика эхокардиографии, МРТ предоставляет более точные и воспроизводимые данные по функциональному и морфологическому состоянию миокарда и обеспечивает более широкие диагностические данные, что делает МР методики перспективным полем для развития кардиовизуализации.

Сердечно-сосудистые заболевания — это основная неинфекционная причина смертности трудоспособного населения во всем мире. По оценкам ВОЗ, от заболеваний сердечно-сосудистой системы каждый год умирает 17,9 млн человек [29].

В настоящее время множество центров разрабатывают новейшие методы визуализации сердечно-сосудистой системы для оптимизации диагностических возможностей, что может привести к улучшению исходов данных заболеваний.

СТАНДАРТНАЯ МРТ СЕРДЦА С CINE РЕЖИМОМ

Стандартная МРТ сердца позволяет получить изображения по трем основным проекциям (двухкамерная, четырехкамерная и по короткой оси) в режиме cine (кинорежим, позволяющий врачу оценить движение миокарда в ходе сердечного цикла) [9, 20], что дает возможность оценить как структурные изменения миокарда и клапанного аппарата с высоким пространственным и временным разрешением. Также данная методика является золотым стандартом в оценке фракции выбро-

са левого желудочка [9, 17, 27], а кроме того, дает возможность проводить количественную оценку функционального состояния миокарда (масса миокарда, объем камер сердца и их фракция выброса).

Клиническое применение данной методики включает определение наследственных (болезнь Фабри) и приобретенных кардиомиопатий, ишемических изменений миокарда и пороков клапанной системы сердца [1, 20].

С появлением МР томографов с индукцией магнитного поля в 3 Тесла и многоканальной системы сбора данных значительно улучшилось качество получаемого изображения, а с внедрением импульсных последовательностей SSFP (Steady-State Free Precession — состояние свободного прецессирования) сократилось необходимое для исследования время, что делает данную методику одной из основополагающих в кардиологии.

МРТ СЕРДЦА С ГАДОЛИНИЕМ

Исследования позднего накопления гадолиния (Late gadolinium enhancement) ценны для диагностики и оценки тяжести различных заболеваний миокарда, так как дают возможность четко отличить рубцовую ткань от здоровых кардиомиоцитов (здоровые кардиомиоциты не имеют тенденции к накоплению контрастного препарата) [4, 5, 8, 9, 17, 21] и позволяют отчетливо определить участки накопления амилоида, а также другие структурные кардиомиопатии, что делает данную методику практически незаменимой в том случае, когда надо оценить морфологическое состояние миокарда.

Данные исследования назначаются при необходимости оценить структурно-функциональное состояние миокарда и предусматривают использование гадолинийсодержащих препаратов (гадопентетат димеглумин, гадобутрол, гадодамид, гадоксетат динатрий и т. д.).

T1 И T2 КАРТИРОВАНИЕ СЕРДЦА

T1 и T2 картирование сердца — это методики МРТ, используемые для оценки состояния кардиомиоцитов. Они предоставляют важную информацию о состоянии тканей сердца, что особенно полезно для диагностики и мониторинга различных кардиомиопатий, миокардитов и иных заболеваний миокарда [1, 3, 20]. Данные методики предпочтительно выполняются на МР томографах с индукцией магнитного поля 3 Тесла, хотя существует возможность выполнения данных методик и на МР томографах с индукцией магнитного поля 1,5 Тесла, но это требует применения отдельных референтных

шкал значений. Зоны с измененным временем продольной и поперечной релаксации определяются при помощи смены угла наклона или изменения TE (Time to Echo), при изменении этих характеристик импульсных последовательностей можно определить относительную разницу между получаемым сигналом, что в свою очередь позволяет вычислить время поперечной и продольной релаксации в миллисекундах. Полученные данные преобразуются в сегментированную карту миокарда с отмеченными зонами изменения времени T1 или T2.

T1 картирование

T1 картирование представляет из себя методику попиксельного количественного измерения времени восстановления продольной намагниченности тканей миокарда после воздействия радиочастотного импульса [28]. T1 картирование, в отличие от T2 картирования, не имеет общих шкал оценки значений, так как требует корректировки под конкретный МР томограф, что обуславливает менее широкое распространение именно данной методики, в сравнении с T2 картированием.

Клиническое применение данной методики включает: обнаружение фиброза или отложения в миокарде веществ, таких как железо и амилоид (особенно при транстиретиновом амилоидозе). Измененные значения T1 могут указывать на фиброз, воспаление, отек или инфильтрацию, например, при амилоидозе (увеличение) или болезни Андерсена-Фабри (уменьшение).

T1 картирование в большинстве случаев показывает сопоставимые с поздним накоплением гадолиния результаты (также сама методика может выполняться с введением контрастного препарата на основе гадолиния), что позволяет дополнить оценку состояния миокарда точными количественными показателями миокардиального фиброза или отека [1, 17, 21, 29]. Немаловажным аспектом данной методики является возможность оценить все миокардиальные компартменты, в том числе и внеклеточное пространство ECV (Extracellular Volume Fraction) [30]. Параметр ECV рассчитывается на основе изменений T1 времени релаксации ткани миокарда и крови до и после введения контрастного вещества. Это дает представление о пропорции внеклеточного пространства в миокарде, что может свидетельствовать о процессах ремоделирования и других патологических изменениях.

T2 картирование

T2 картирование представляет из себя методику попиксельного количественного измерения времени восстановления поперечной намагниченности

тканей миокарда. T2 картирование, в отличие от T1 картирования, имеет фиксированные шкалы оценки значений и не требует обязательного набора данных (на здоровых добровольцах) для создания оценочных шкал для конкретного МР томографа [7].

Клиническое применение: эта методика часто используется для выявления отека миокарда (является маркером воспаления), повреждения миокарда, а также для выявления накопления в ткани миокарда солей железа при таких заболеваниях, как гемохроматоз, серповидно-клеточная анемия, а также бета-талассемия. Увеличенные значения T2 могут указывать на наличие отека или воспаления в миокарде [13, 22]. Как и T1 картирование, позволяет дополнить количественными данными оценку наличия отека и воспаления в миокарде [21].

ДИФФУЗИОННО-ТЕНЗОРНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Диффузионно-тензорная томография сердца (Cardiac Diffusion Tensor Imaging — cDTI) представляет собой уникальную и единственную МР методику кардиовизуализации, которая позволяет неинвазивным способом оценивать микроструктуру миокарда *in vivo* [10–12]. Эта методика основывается на использовании диффузии воды в миокарде как внутреннего контрастирующего агента.

Техника и принципы cDTI: при проведении cDTI вода диффундирует преимущественно вдоль длинной оси кардиомиоцитов, что позволяет получать информацию о главных векторах ориентации кардиомиоцитов. В ходе исследования аппарат собирает данные об угле вторичного отклонения собственного вектора, что отражает ориентацию волокон миокарда. Изменения вектора ориентации волокон кардиомиоцитов могут свидетельствовать о процессе ремоделирования и иных структурных изменениях в структуре миокарда [11, 12].

Клиническое применение cDTI: данная методика предоставляет возможности для изучения острых тканевых повреждений, а также процесса ремоделирования после инфаркта миокарда. В одном из рассмотренных исследований было показано, что в ишемизированных волокнах миокарда происходит снижение RHM (right-handed orientation of cardiomyocytes), указывающее на потерю организации на уровне субэндокардиальных миоцитов [9, 12], что в совокупности с T1-, T2 картированием и поздним накоплением контраста позволяет достаточно точно описать миокард как со структурной, так и с функциональной стороны, при этом получить не только качественные данные, но и количественную оценку.

Оценка детальных параметров сердечной функции: cDTI может использоваться вместе с CMR feature tracking (CMR-FT) для количественной оценки деформации миокарда и точной оценки глобальной и региональной окружной, радиальной и продольной деформации миокарда. CMR-FT показал свою эффективность как средство оценки функции левого желудочка и прогнозирования исходов после инфаркта миокарда [10–12].

ФОСФОРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СЕРДЦА

Кардиомиоциты наряду с нейронами являются одним из значительных потребителей АТФ. Фосфорная спектроскопия — это методика исследования, которая использует спектроскопические техники для анализа содержания фосфорсодержащих соединений в сердце [23]. Фосфор входит в состав важнейших энергоемких молекул (АТФ), связанных с энергетическими процессами и метаболизмом сердечной мышцы. Таким образом, отслеживание передвижения атомов фосфора (входящих в состав молекул АТФ) позволяет оценить метаболическое состояние тканей миокарда [6, 15, 23].

Клиническое применение: эта методика использует спектроскопию для анализа сигналов и отслеживания траектории передвижения от ядер фосфора. С помощью этой техники можно изучать содержание различных фосфорсодержащих соединений, таких как аденозинтрифосфат (АТФ), фосфокреатин (Фк), фосфаты и др., которые имеют ключевое значение для обеспечения клеточного дыхания и сократимости сердечной мышцы. Указанные выше данные свидетельствуют о том, что данная методика позволяет оценивать метаболическое состояние тканей сердца [6, 23]. Кроме этого, фосфорная спектрография может использоваться для оценки эффективности лечения сердечных заболеваний, в частности реабилитации после инфаркта миокарда [23].

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ МИОКАРДА (CARDIAC STRAIN)

MP Strain сердца — это современная методика, применяемая для оценки функции кардиомиоцитов, особенно их способности сокращаться и расслабляться. Данная методика представляет детализированную карту векторов механической деформации волокон миокарда во время систолы и диастолы, что позволяет более точно, в сравнении со стандартной МРТ сердца, описать функциональное состояние миокарда и определить зоны постишемической гипокинезии [14, 27].

Данное исследование представляет врачу следующие показатели: продольная деформация, радиальная деформация и циркуферентная деформация волокон миокарда. В совокупности данные показатели могут создать детальную карту деформации миокарда, на которой будут отчетливо заметны зоны измененной сократимости.

Область клинического применения: оценка функционального состояния миокарда после ишемических повреждений, а также оценка функции миокарда при кардиомиопатиях [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренные методики МРТ позволяют значительно расширить имеющиеся диагностические возможности, а также представление рентгенолога и клинициста о структурном и функциональном состоянии миокарда. Такое комплексное представление позволяет в свою очередь изменять и персонализировать терапию, что может потенциально привести к улучшению исходов в виде увеличения как продолжительности, так и качества жизни.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Aherne E, Chow K, Carr J. Cardiac T1 mapping: techniques and applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2020 May;51(5):1336–56.
2. Alabed S, Maiter A, Salehi M, et al. Quality of reporting in AI cardiac MRI segmentation studies—A systematic review and recommendations for future studies. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2022 Jul 15;9:956811.
3. Alabed S, Saunders L, Garg P, et al. Myocardial T1-mapping and extracellular volume in pulmonary arterial hypertension: A systematic review and meta-analysis. *Magnetic resonance imaging*. 2021 Jun 1;79:66–75.
4. Amano Y, Omori Y, Ando C, et al. Clinical importance of myocardial T2 mapping and texture analysis. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*. 2021;20(2):139–51.
5. Arcari L, Camastra G, Ciolina F, et al. T1 and T2 mapping in uremic cardiomyopathy: an update. *Cardiac Failure Review*. 2022 Jan;8.
6. Esmaeili M, Vettukattil R. In vivo magnetic resonance spectroscopy methods for investigating

cardiac metabolism. *Metabolites*. 2022 Feb 18;12(2):189.

7. Hanson CA, Kamath A, Gottbrecht M, et al. T2 relaxation times at cardiac MRI in healthy adults: a systematic review and meta-analysis. *Radiology*. 2020 Nov;297(2):344–51.
8. Holtackers RJ, Emrich T, Botnar RM, et al. Late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance imaging: from basic concepts to emerging methods. In *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*. 2022 Feb 23. Georg Thieme Verlag KG.
9. Holtackers RJ, Van De Heyning CM, Chiribiri A, et al. Dark-blood late gadolinium enhancement cardiovascular magnetic resonance for improved detection of subendocardial scar: a review of current techniques. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*. 2021 Dec;23:1–8.
10. Khalique Z, Ferreira PF, Scott AD, et al. Diffusion tensor cardiovascular magnetic resonance imaging: a clinical perspective. *Cardiovascular Imaging*. 2020 May 1;13(5):1235–55.
11. Mazur W, Krzyżak A, Hennel F. Diffusion-weighted imaging and diffusion tensor imaging of the heart in vivo: major developments. *Advances in Interventional Cardiology/Postępy w Kardiologii Interwencyjnej*. 2022;18(1).
12. Nilles-Vallespin S, Scott A, Ferreira P, et al. Cardiac diffusion: technique and practical applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2020 Aug;52(2):348–68.
13. O'Brien AT, Gil KE, Varghese J, et al. T2 mapping in myocardial disease: a comprehensive review. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*. 2022 Dec;24(1):1–25.
14. Opie LH, Hasenfuss G. Mechanisms of cardiac contraction and relaxation. *Braunwald's heart disease: a textbook of cardiovascular medicine*. 2012:459–86.
15. Pan J, Ng SM, Neubauer S, Rider OJ. Phenotyping heart failure by cardiac magnetic resonance imaging of cardiac macro-and microscopic structure: state of the art review. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*. 2023 Jun 2;jead124.
16. Pop M, Stefu N. Diffusion Magnetic Resonance Imaging with Applications to Cardiac Muscle: Short Review. *Annals of West University of Timisoara-Physics*. 2020 Dec;62(1):108–19.
17. Rajiah PS, François CJ, Leiner T. Cardiac MRI: state of the art. *Radiology*. 2023 Apr 11;307(3):e223008.
18. Russo V, Lovato L, Ligabue G. Cardiac MRI: technical basis. *La radiologia medica*. 2020 Nov;125(11):1040–55.
19. Scatteia A, Baritussio A, Bucciarelli-Ducci C. Strain imaging using cardiac magnetic resonance. *Heart failure reviews*. 2017 Jul;22:465–76.

20. Seraphim A, Knott KD, Augusto J, et al. Quantitative cardiac MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2020 Mar;51(3):693–711.
21. Topriceanu CC, Pierce I, Moon JC, Captur G. T2 and T2 mapping and weighted imaging in cardiac MRI. *Magnetic Resonance Imaging*. 2022 Jul 30.
22. Triadyaksa P, Oudkerk M, Sijens PE. Cardiac T2* mapping: Techniques and clinical applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2020 Nov;52(5):1340–51.
23. Tsampasian V, Cameron D, Sobhan R, et al. Phosphorus Magnetic Resonance Spectroscopy (31P MRS) and Cardiovascular Disease: The Importance of Energy. *Medicina*. 2023 Jan 15;59(1):174.
24. Watson WD, Miller JJ, Lewis A, et al. Use of cardiac magnetic resonance to detect changes in metabolism in heart failure. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2020 Jun;10(3):583.
25. Wheen P, Armstrong R, Daly CA. Recent advances in T1 and T2 mapping in the assessment of fulminant myocarditis by cardiac magnetic resonance. *Current Cardiology Reports*. 2020 Jul;22:1–8.
26. Wu Y, Tang Z, Li B, et al. Recent advances in fibrosis and scar segmentation from cardiac MRI: a state-of-the-art review and future perspectives. *Frontiers in Physiology*. 2021 Aug 3;12:709230.
27. Zlibut A, Cojocaru C, Onciul S, Agoston-Coldea L. Cardiac Magnetic Resonance Imaging in Appraising Myocardial Strain and Biomechanics: A Current Overview. *Diagnostics*. 2023 Feb 2;13(3):553.
28. Aherne E, Chow K, Carr J. Cardiac T1 mapping: techniques and applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2020 May;51(5):1336–56.
29. World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs) [Internet]. Geneva: WHO; 2021 Jun.
30. Баев М.С., Труфанов Г.Е., Рыжков А.В., Анпилогова К.С. Т1-картирование миокарда: физические основы и общие вопросы применения // *Современные проблемы науки и образования*. 2021. № 6.

Информация об авторах:

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

Сидорина Анастасия Сергеевна, ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Баев Микаэл Сагитович, врач-рентгенолог отделения магнитно-резонансной томографии 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;

Фокин Владимир Александрович, д.м.н., профессор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой 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;

Sidorina Anastasia S., resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic, Almazov National Medical Research Centre;

Baev Mikael S., radiologist, 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;

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.