

Значення магнітно-резонансної візуалізації в діагностиці ішемічної хвороби серця

В.М. Коваленко, О.Г. Несукай, О.О. Даниленко, Н.С. Поленова, Є.Ю. Тітов

ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології ім. акад. М.Д. Стражеска» НАМН України», Київ

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ішемічна хвороба серця, магнітно-резонансна томографія, ішемія міокарда, життєздатність міокарда

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) за останні роки стала одним із провідних методів неінвазивної діагностики. Історія МРТ бере початок з 1946 р., коли групи дослідників Стенфордського та Гарвардського університетів незалежно одна від одної відкрили явище, яке назвали ядерно-магнітним резонансом, – можливість поглинати або випромінювати енергію під впливом радіочастотних (РЧ) імпульсів ядрами деяких атомів, розташованими в магнітному полі при збігу частоти імпульсів з частотою обертання ядра, за що вони були удостоєні Нобелівської премії в 1952 р.

Сучасні магнітно-резонансні (МР) томографи налаштовані на ядра водню, що складаються з одного протона. Протон постійно крутиться. Тому навколо нього утворюється магнітне поле, що має магнітний момент – спін. Внутрішнє магнітне поле, що продукується тканинами після змін, викликаних РЧ-імпульсами, поступово реорієнтується і вибудовується відповідно до зовнішнього поля, що позначають як його «релаксацію». Існує два види релаксації: T1 – поздовжня спін-решіткова релаксація, визначається як повернення вектора поздовжньої намагніченості в рівноважний стан відповідно до основного магнітного поля, і T2 – поперечна спін-спінова релаксація, описує процес повернення вектора поперечної намагніченості в рівноважний стан [18]. Концентрація ядер (щільність спінів) та тривалість релаксації T1 і T2 визначають інтенсивність МР-зображення.

З метою діагностики некротичних та фіброзних змін міокарда будь-якого генезу як контрастний засіб (КЗ) активно використовують сполуки

гадолінію [50], які підвищують інтенсивність сигналу за рахунок скорочення часу T1-релаксації. За умови використання КЗ можна аналізувати два види МР-зображень: ранні T1-зважені зображення (T1-33), отримані через 1 хв після введення КЗ, та пізні T1-33, які отримують через 10–15 хв після введення КЗ.

Перевагами МРТ є неінвазивність, відсутність променевого навантаження, тривимірний характер отриманого зображення, можливість використання крові як природного контрасту та виконання МР-спектроскопії для прижиттєвого вивчення метаболізму *in vivo*. Недоліки методу – значні затрати часу для отримання зображень, висока собівартість обстеження, складність обстеження хворих з клаустрофобією, штучними водіями ритму, великими металічними імплантатами [1]. Електронні пристрої на зразок пейсмерів, дефібриляторів вважають абсолютним протипоказанням до проведення МРТ. Загалом імплантовані пристрої, такі як штучні клапани, кільця для анулопластики, оклюдери, стенти (зокрема з лікарським покриттям) сумісні з МР-дослідженням, і більшість їх входить до категорії безпечних для МРТ-дослідження [43]. Клаустрофобія трапляється близько у 5 % пацієнтів, і призначення у цієї категорії хворих транквілізатора досить ефективно.

Нині МРТ широко використовують у кардіології для оцінки перфузії й життєздатності міокарда [59], а також візуалізації вінцевих артерій [12] у пацієнтів з ішемічною хворобою серця (ІХС), для проведення кількісних розрахунків об'ємних показників лівого шлуночка (ЛШ), фракції викиду (ФВ) ЛШ та маси міокарда ЛШ

Даниленко Олександр Олександрович, мол. наук. співр.
03151, м. Київ, вул. Народного Ополчення, 5.
E-mail: danil-med@yandex.ru

[58], для діагностики кардіоміопатій [47] і запальних захворювань міокарда [24], при клапанних хворобах серця [7], пухлинах серця [55] тощо.

Необхідність ранньої діагностики ІХС обумовлена високою смертністю у догоспітальний період гострого інфаркту міокарда (ГІМ) [29]. Електрокардіографічні проби з дозованим фізичним навантаженням рекомендовані як стартові для діагностики стабільної ІХС у пацієнтів із симптомами стенокардії. Відповідно до рекомендацій Європейського товариства кардіологів щодо ведення пацієнтів з ІХС у пацієнтів з передтестовою ймовірністю ІХС 66–85 % показано проведення стрес-тестів з візуалізацією міокарда (табл. 1), до яких відносять однофотонну емісійну комп'ютерну томографію (ОФЕКТ), позитронну емісійну томографію, стрес-ехокардіографію, перфузійну МРТ або стрес-МРТ тест з добутаміном.

При діагностуванні ІХС за допомогою МРТ можна проводити візуалізацію вінцевих артерій, а також оцінювати ішемію міокарда шляхом виконання стрес-тестів з візуалізацією міокарда.

МРТ-коронарографія – це методика візуалізації судин, що дозволяє виявити функціональні особливості кровотоку, його швидкість та об'єм, стенотичне ураження вінцевих артерій і морфологічні особливості атеросклеротичних бляшок [12]. Імпульсні послідовності для МРТ-коронарографії дозволяють отримати зображення, чутливі до потоків крові з різною швидкістю і напрямками, турбулентності, розміру судин. Методики МРТ-коронарографії дозволяють отримати яскраве зображення крові, що рухається, на тлі темних нерухомих тканин (рис. 1).

При цьому на МР-зображеннях відображається не просвіт судин, а лише кров, що циркулює по них. Оцінка вінцевих артерій за допомогою МРТ зазвичай проводиться без введення КЗ, однак їх застосування дає можливість підвищити діагностичну цінність методики [61].

Нещодавно проведене невелике багатоцентрове дослідження показало високу чутливість та помірну специфічність МРТ-коронарографії для діагностики стабільної ІХС [36]. За результатами іншого багатоцентрового дослідження за участю 109 пацієнтів показано, що чутливість та специфічність МРТ-коронарографії становила відповідно 93 та 58 % для визначення звуження просвіту вінцевих артерій на ≥ 50 % [39]. Автори також виявили, що проведення МРТ-коронарографії може бути корисним у пацієнтів з дилатаційною

Таблиця 1

Використання стрес-тестів з навантаженням або фармакологічними агентами у комбінації з методами візуалізації [48]

| Рекомендації | Клас рекомендацій | Рівень доказів |
|---|-------------------|----------------|
| У пацієнтів для встановлення діагнозу ІХС як стартові рекомендовані тести з візуалізацією міокарда, коли передтестова ймовірність захворювання становить 66–85 % або ФВ ЛШ < 50 % у пацієнтів без типової стенокардії | I | B |
| Проби з візуалізацією міокарда рекомендовані пацієнтам зі змінами на ЕКГ спокою. Вони дозволяють правильно оцінити динаміку ЕКГ під час стрес-тесту | I | B |
| Тестування з використанням фізичного навантаження має переваги перед використанням фармакологічних проб, і тому рекомендоване у випадках, коли можливе його проведення | I | C |
| Стрес-тести з візуалізацією міокарда доцільні у симптомних пацієнтів після попередньої реваскуляризації міокарда (ЧКВ або АКШ) | Ila | B |
| Стрес-тести з візуалізацією міокарда доцільні при визначенні функціональної значущості помірно виражених уражень судин на коронарних ангіограмах | Ila | B |

Примітка. ЧКВ – черезшкірне коронарне втручання; АКШ – аортокоронарне шунтування.

кардіоміопатією / застійною серцевою недостатністю для заперечення ішемічного генезу серцевої недостатності. Крім того, застосування фазово-контрастної МРТ-коронарографії для оцінки об'єму кровотоку в пацієнтів після ЧКВ, у яких виникла стенокардія, дає можливість встановити факт звуження діаметра артерії (рестеноз) > 50 % у місці стентування [35].

Для поліпшення якості зображення та скорочення часу на їх отримання перспективним може бути застосування візуалізації в реальному часі зі стаціонарною процесією (steady-state free precession, SSFP) [42] і МР-томографів з більшим магнітним полем (3 Тл) та сучасним програмним забезпеченням (паралельне сканування, система навігації) [11, 17].

Методики «паралельної» візуалізації дозволяють звільнити МРТ-зображення від певного

обсягу несуттєвої діагностичної інформації в ділянці інтересу [14, 60]. Основна ідея «паралельної» візуалізації полягає в одночасній та одноразовій обробці як корисного сигналу, так і шуму з необхідної ділянки інтересу, тому «корисний» сигнал виступає у ролі чинника порівняння із сигналом «шум». Перспективний напрямок МРТ-коронарографії – методика одночасної візуалізації всього вінцевого русла шляхом використання постпроцесингової обробки тривимірних зображень [54]. Водночас фазово-контрастна МРТ-коронарографія завдяки можливості одночасного визначення швидкості кровотоку та діаметра просвіту вінцевої артерії дозволяє кількісно визначити об'єм кровотоку, який можна розрахувати як у спокої, так і в умовах стресового навантаження для оцінки коронарного резерву [22].

Проведення МРТ під час введення високих доз добутаміну й оцінка локальної скоротливості (стрес-МРТ тест) дає можливість отримати інформацію про наявність і функціональну значущість атеросклеротичного ураження вінцевих артерій та проводити стратифікацію ризику. Так, нові порушення локальної скоротливості в 3 сегментах ЛШ і більше свідчать про високий серцево-судинний ризик, і щорічна серцево-судинна смертність у такого пацієнта становить $> 3\%$ [44]. E. Nagel та співавтори [49], порівнявши результати фармакологічного стрес-МРТ тесту з добутаміном і стрес-ехокардіографії з добутаміном у 172 пацієнтів для діагностики ІХС (звуження просвіту артерії $> 50\%$), дійшли висновку, що

МРТ переважала ехокардіографію як за чутливістю (88,7 проти 74,3 %), так і за специфічністю (85,7 проти 69,8 %). Автори відзначили, що ця перевага була обумовлена кращою якістю зображень (висока якість зображення була у 82 % пацієнтів при проведенні МРТ та лише у 51 % пацієнтів за даними ехокардіографії). Схожі результати були отримані у дослідженні W.G. Hundley та співавторів [34] за участю 153 чоловіків, у яких проведення стрес-ехокардіографії з добутаміном не було можливим через «погане» акустичне вікно, і чутливість МРТ для діагностики звуження просвіту вінцевих артерій більше 50 % у цієї групи хворих становила 83 %. Таким чином, за результатами фармакологічного стрес-МРТ тесту з добутаміном можна виявити атеросклеротичне ураження вінцевих артерій шляхом аналізу локальної скоротливості сегментів міокарда, що може бути корисним з клінічної точки зору для пацієнтів, у яких проведення фармакологічної стрес-ехокардіографії утруднене через «погане» акустичне вікно. В цілому, стрес-МРТ тест з добутаміном для діагностики ішемії міокарда – відносно безпечна методика, якій властива достатньо висока чутливість, специфічність і відтворюваність.

Одна з актуальних задач у кардіології – оцінка перфузії та стрес-перфузії міокарда, що великою мірою визначає тактику лікування, ефективність реваскуляризації міокарда і впливає на віддалений прогноз [2]. Золотим стандартом оцінки перфузії є ОФЕКТ. Однак ця методика має низку недоліків: низьку просторову роздільну

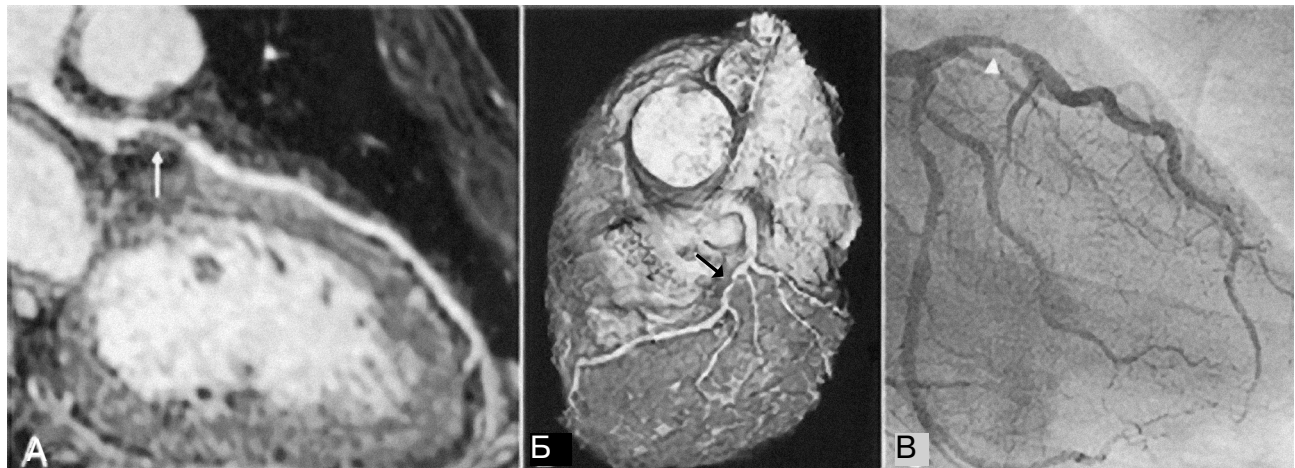


Рис. 1. Візуалізація стенозу в передній міжшлуночковій артерії при проведенні коронарної магнітно-резонансної ангіографії (стрілка) (А); тривимірна реконструкція зображення з ознаками стенозу в передній міжшлуночковій артерії (стрілка) (Б); рентгеновська коронарна ангіографія підтверджує стеноз проксимального відділу передньої міжшлуночкової артерії (стрілка) (В).

здатність, тривалий час дослідження, значне променеве навантаження, низьку чутливість при субендокардіальних змінах [4]. Принцип перфузійної МРТ базується на оцінці кінетики КЗ у міокарді під час фази гіперемії, обумовленої введенням стресового агента аденозину, що має короткий період напіввиведення і високу безпечність [16]. В ішемізованому міокарді затримується надходження КЗ, при цьому на кривих «інтенсивність – час», записаних від ішемізованих ділянок міокарда, можна спостерігати менший кут підняття і менші значення пікової інтенсивності порівняно з інтактним міокардом, що на ранніх T1-33 обумовлює формування темних зон (рис. 2) [56, 57].

Результати перфузійної МРТ показали достатньо високу кореляцію з показниками фракційного резерву кровотоку [45]. Порівняно з результатами позитронно-емісійної томографії з використанням радіофармпрепарату $^{13}\text{NH}_3$ чутливість та специфічність перфузійної МРТ становить відповідно 91 і 94 % для діагностики наявності зон ішемії, а виявити атеросклеротичне ураження вінцевих артерій зі стенозом просвіту ≥ 50 % можливо з чутливістю 87 % і специфічністю 85 % порівняно з коронарорентрикулографією [57]. Для оцінки ішемії міокарда інформаційна цінність перфузійної МРТ виявилася вищою порівняно з ОФЕКТ [30]. Вважають, що поява дефектів перфузії у двох сегментах ЛШ та більше відповідає площі ішемії понад 10 %, що свідчить про високий серцево-судинний ризик [48].

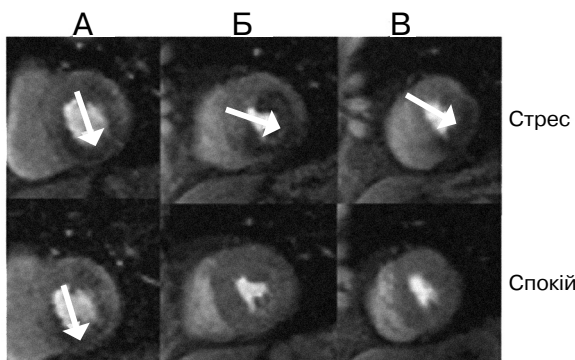


Рис. 2. Оцінка перфузії міокарда з використанням гадолінію в спокої та після інфузії аденозину (стрес, фаза гіперемії). А – порушення перфузії міокарда нижньої стінки базальних відділів серця в спокої та в умовах стресу в зоні локалізації інфаркту міокарда (стрілка); Б – середні відділи ЛШ і великий дефект перфузії лише в умовах стресу в передньо-бічній і нижній стінках (стрілка); В – верхівковий відділ ЛШ з ознаками порушення перфузії нижньо-бічної стінки в умовах стресу (стрілка).

Виникнення ГІМ можливе навіть за відсутності значущого стенотичного звуження вінцевих артерій, що асоціюється з так званими «уразливими» атеросклеротичними бляшками, які мають тонку фіброзну капсулу та значних розмірів ліпідне ядро з наявністю клітин запалення [3]. МРТ може бути перспективним методом їх візуалізації: при нестабільній бляшці КЗ інтенсивно забарвлює її покривку і не накопичується чи накопичується у значно меншій кількості в її некротизованому ядрі [20]. Деякі автори вважають, що більш виражене контрастування фіброзної капсули зумовлено її інфільтрацією запальними клітинами [27]. Як відомо, запальний процес призводить до локального накопичення рідини, котра значною мірою затримує КЗ. За даними С. Yuan та співавторів [62], атеросклеротична бляшка, що має ознаки запалення, може бути запідозрена при порозі контрастування 80 % (чутливість – 76 %, специфічність – 79 %).

При ГІМ важливу роль відіграє МРТ для оцінки об'єму ураженого міокарда, скоротливої функції та перфузії міокарда, що дозволяє робити висновки про життєздатність міокарда, прогнозувати ефективність ревазуляризаційних процедур, проводити диференційну діагностику з кардіоміопатією Такоцубо, периміокардитом, розшаруванням аорти [33]. Подовження T1-релаксації ділянок гострого ураження міокарда порівняно з інтактним міокардом обумовлює появу на T1-33 регіонів зниженої щільності та інтенсивності [53]. На T2-зважених зображеннях у пацієнтів з ГІМ некротизований міокард за рахунок набряку візуалізується як регіон підвищеної щільності. Застосування методики відстроченого контрастування значно розширило можливості МРТ для діагностики ГІМ, особливо в діагностиці невеликих субендокардіальних інфарктів міокарда (можна візуалізувати некротичну тканину масою менше 1 г) [52]. За даними R.J. Kim та співавторів в експериментальному дослідженні на тваринах було показано високу відповідність результатів МРТ з відстроченим контрастуванням даним аутопсії при виявленні ГІМ [38]. Кілька досліджень підтвердили зв'язок результатів пізнього накопичення гадолінію з вивільненням таких біомаркерів, як креатинфосфокіназа і MB-креатинфосфокіназа, у пацієнтів з ГІМ [52].

Характерна ознака центральної зони некротичного регіону – інтракапілярний застій крові. Закупорка капілярів призводить до гіперперфузії

тканин, яка пов'язана більшою мірою зі зниженням функціональної щільності капілярів, ніж зі зниженням об'єму кровотоку. Відсутність реперфузії центральної зони інфаркту незважаючи на відновлення кровотоку в епікардіальних артеріях відома як феномен *no reflow* [21, 37]. МРТ дозволяє виявляти мікрovasкулярну обструкцію та зону незворотного пошкодження міокарда, що накопичує КЗ [5].

У працях зарубіжних авторів показано, що наявність крововиливу в центрі інфарктної зони впливає на процес загоєння зони пошкодження міокарда і може обумовлювати несприятливе ремоделювання ЛШ навіть за умови своєчасного проведення ЧКВ [25, 51]. У пацієнтів без мікрovasкулярної обструкції частота появи несприятливих серцево-судинних подій становила 8,4 % та збільшувалася до 21,6 % за її наявності [31]. Крім того, є дані що наявність мікрovasкулярної обструкції більшою мірою впливає на виживаність пацієнтів, ніж розмір інфаркту міокарда [13]. А за результатами дослідження V. Nombach та співавторів встановлено, що у пацієнтів без мікрovasкулярної обструкції спостерігається більш швидке відновлення функції міокарда і ФВ ЛШ, ніж за її наявності [32].

МРТ увійшла до переліку основних діагностичних методик оцінки життєздатності міокарда більше 10 років тому, проте й нині залишається новітньою технологією в цьому напрямку кардіології. Існує кілька способів оцінки життєздатності міокарда за допомогою МРТ, зокрема фармакологічний стрес-МРТ тест з добутаміном для оцін-

ки інотропного резерву, оцінка пізнього накопичення сполук гадолінію для визначення трансмуральності ураження стінки, визначення кінцево-діастолічної товщини стінки ЛШ [8]. Добре відомо, що проведення ревазуляризації у пацієнтів з гібернованим міокардом значно поліпшує їх прогноз. Найбільш переконливі дані представлено в метааналізі, який охопив 3088 пацієнтів із 24 досліджень [6]. Ревазуляризація гібернованого міокарда була пов'язана зі зменшенням смертності на 79,6 %: при оптимальній медикаментозній терапії смертність становила 16 % проти 3,2 % у пацієнтів, яким провели ревазуляризацію [10]. Водночас за відсутності гібернованого міокарда не виявлено різниці щодо смертності, яка у пацієнтів після ревазуляризації становила 7,7 %, а при медикаментозній терапії – 6,2 %. Справді, відбір пацієнтів із залишковою ішемією чи гібернацією за допомогою неінвазивного тестування – це важливе завдання, якщо не обов'язкова умова проведення ревазуляризації.

Фармакологічний стрес-МРТ тест з добутаміном аналогічний тому, що проводиться з використанням ультразвукових сканерів, тому більш детально варто зупинитися на питанні трансмурального ураження стінки серця. Оскільки колагеновий рубець має відносно малий вміст клітинного прошарку і значну кількість позаклітинного матриксу, об'єм розподілу хелатів гадолінію значно більший, ніж у здоровому міокарді, й рубцева тканина на пізніх T1-33 має світлий колір, при цьому життєздатний міокард є «нульовим» або темного кольору (рис. 3).

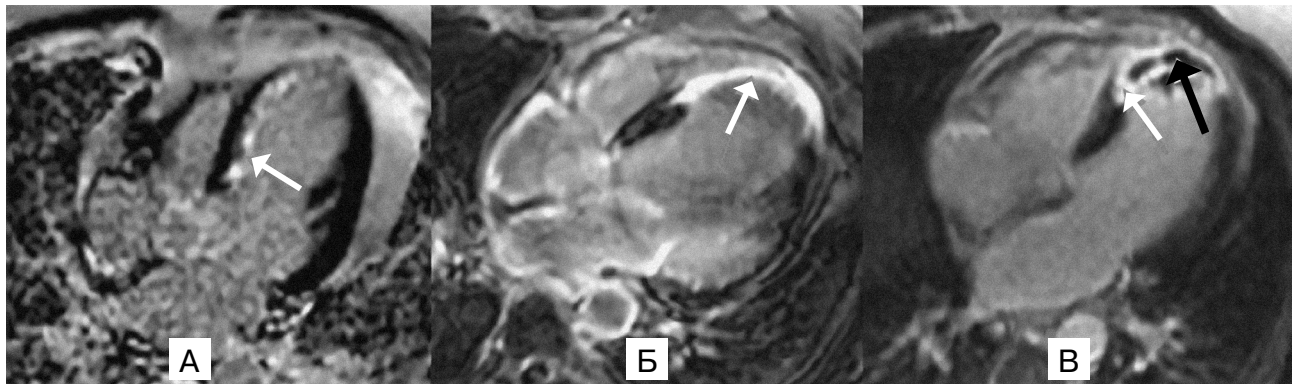


Рис. 3. Оцінка глибини ураження стінки (трансмуральність) при використанні сполук гадолінію як контрастного засобу в пацієнтів після інфаркту міокарда. А – субендокардіальне ураження міжшлуночкової перегородки (біла стрілка); Б – трансмуральне ураження середнього та верхівкового сегмента міжшлуночкової перегородки та апікального сегмента бічної стінки (біла стрілка); В – трансмуральне ураження верхніх відділів міжшлуночкової перегородки (біла стрілка) з ознаками мікрovasкулярної обструкції (чорна стрілка).

Важливою ознакою, що дозволяє диференціювати трансмуральне ураження від субендокардіального, є різна глибина накопичення КЗ [28], яка оцінюється за 5-бальною шкалою: 0 – контрастування немає, 1 – контраст заповнює 1–25 % товщини стінки міокарда, 2 – 26–50 %, 3 – 51–75 % і 4 – 76–100 % [15]. У своїй роботі R.J. Kim та співавтори продемонстрували можливості МРТ для передбачення відновлення сегментарної скоротливості після ревазуляризації шляхом аналізу шару рубцевої тканини в межах стінки ЛШ (трансмуральність ураження). Зокрема, визначена в сегментах поширеність шару рубцевої тканини < 25 чи > 50 % товщини стінки ЛШ асоціювалася з поліпшенням сегментарної скоротливості у 80 та < 10 % сегментів відповідно після проведення планової ревазуляризації міокарда [38]. С. Klein та співавтори показали, що чутливість і специфічність пізнього накопичення гадолінію для оцінки трансмурального та нетрансмурального рубця становить відповідно 83 і 88 % [40]. У цілому вважають, що ділянка міокарда з порушенням локальної скоротливості є життєздатною за умови, якщо поширеність шару рубцевої тканини не перевищує 50 % товщини стінки ЛШ [59]. В іншій роботі було показано, що шар рубцевої тканини 4 мм та більше асоціювався з дуже низькою ймовірністю функціонального відновлення міокарда в цій зоні після ревазуляризації [41]. У порівняльному дослідженні F.M. Baer та співавторів виявлено, що кінцеводіастолічна товщина власне міокарда ЛШ < 5,5 мм за даними МРТ асоціюється зі зниженням поглинання флуорорезоксиглюкози при проведенні позитронно-емісійної томографії та є виявом нежиттєздатності міокарда з чутливістю 72 % і специфічністю 89 % [9].

За допомогою МРТ останнім часом стало можливим виявлення міокарда у зоні ризику (наприклад, виявити зону набряку міокарда) у пацієнтів з ГІМ [26, 46]. При цьому стало можливим розрахувати індекс маси міокарда, який був врятований внаслідок проведення ЧКВ, шляхом вирахування маси некротичної тканини з маси тканини, що перебуває в зоні ризику [23]. Авторами виявлено зворотний взаємозв'язок між величиною індексу маси врятованого міокарда та затримкою часу від початку больового синдрому до проведення ЧКВ. Крім того, індекс дозволяє спрогнозувати великі серцево-судинні події в пацієнтів після ГІМ [19].

Таким чином, велика кількість методик МРТ нині дозволяє оцінити структуру і функцію міокарда, його перфузію та життєздатність, виявити наявність атеросклеротичних бляшок і розміри ішемічного пошкодження у пацієнтів з ІХС. Крім того, достатньо висока якість просторової роздільної здатності, відсутність іонізуючого опромінення обумовлюють важливу роль МРТ у сучасній кардіології й визначають необхідність її застосування для диференційної діагностики, вибору напрямку лікувальних заходів та визначення прогнозу захворювання.

Література

1. Беленков Ю.Н., Терновой С.К., Сеницын В.Е. Магнитно-резонансная томография сердца и сосудов.– М.: Видар, 1997.– 142 с.
2. Бокерия Л.А., Бершвили И.И., Сигаев И.Ю. Ревазуляризация миокарда, меняющиеся подходы и пути развития // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия.– 1999.– № 6.– С. 102–120.
3. Губарькова Е.В., Кириллин М.Ю., Сергеева Е.А. и др. Кросс-поляризованная оптическая когерентная томография в оценке структуры атеросклеротической бляшки // Современные технологии в медицине.– 2013.– № 4.– С. 44–55.
4. Шумаков В.И., Остроумов Е.Н. Радионуклидные методы диагностики в клинике ишемической болезни и трансплантации сердца.– М.: Дрофа, 2003.– 224 с.
5. Abdel-Aty H., Zagrosek A., Schulz-Menger J. et al. Delayed enhancement and T2-weighted cardiovascular magnetic resonance imaging differentiate acute from chronic myocardial infarction // Circulation.– 2004.– Vol. 109.– P. 2411–2416.
6. Allman K.C., Shaw L.J., Hachamovitch R. et al. Myocardial viability testing and impact of revascularization on prognosis in patients with coronary artery disease and left ventricular dysfunction: a meta-analysis // J. Am. Coll. Cardiol.– 2002.– Vol. 39.– P. 1151–1158.
7. Andrew M.T., Bogaert J., Dymarkowski S. et al. Clinical cardiac MRI. Medical radiology. Diagnostic imaging.– SpringerVerlag, 2005.– 707 p.
8. Arai A.E. The cardiac magnetic resonance (CMR) approach to assessing myocardial viability // J. Nucl. Cardiol.– 2011.– Vol. 18.– P. 1095–1102.
9. Baer F.M., Voth E., Schneider C.A. et al. Comparison of low-dose dobutamine gradient-echo magnetic resonance imaging and positron emission tomography with [18F] fluorodeoxyglucose in patients with chronic coronary artery disease. A functional and morphological approach to the detection of residual myocardial viability // Circulation.– 1995.– Vol. 91.– P. 1006–1015.
10. Bax J.J., Poldermans D., Elhendy A. et al. Improvement of left ventricular ejection fraction, heart failure symptoms and prognosis after revascularization in patients with chronic coronary artery disease and viable myocardium detected by dobutamine stress echocardiography // J. Am. Coll. Cardiol.– 1999.– Vol. 34.– P. 163–169.
11. Bernhardt P., Walcher T., Rottbauer W. et al. Quantification of myocardial perfusion reserve at 1.5 and 3.0 Tesla: a comparison to fractional flow reserve // Int. J. Cardiovasc. Imaging.– 2012.– Vol. 28.– P. 2049–2056.
12. Bluemke D.A., Achenbach S., Budoff M. et al. Noninvasive coronary artery imaging: magnetic resonance angiography and multidetector computed tomography angiography: a scientific

- statement from the American Heart Association committee on cardiovascular imaging and intervention of the council on cardiovascular radiology and intervention, and the councils on clinical cardiology and cardiovascular disease in the young // *Circulation*. – 2008. – Vol. 118 (5). – P. 586–606.
13. Bogaert J., Kalantzi M., Rademakers F.E. et al. Determinants and impact of microvascular obstruction in successfully reperfused ST-segment elevation myocardial infarction. Assessment by magnetic resonance imaging // *Eur. Radiol.* – 2007. – Vol. 17. – P. 2572–2580.
14. Bydder M., Atkison D., Larkman D.J. et al. SMASH navigators // *Magn. Reson. Med.* – 2003. – Vol. 49. – P. 493–500.
15. Catalano O., Moro G., Perotti M. et al. Late gadolinium enhancement by cardiovascular magnetic resonance is complementary to left ventricle ejection fraction in predicting prognosis of patients with stable coronary artery disease // *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* – 2012. – Vol. 14. – P. 1–8.
16. Cerqueira M., Verani M., Schwaiger M. et al. Safety profile of adenosine stress perfusion imaging: results from the Adenoscan Multicenter Trial Registry // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 1994. – Vol. 23. – P. 384–389.
17. Cheng A.S., Pegg T.J., Karamitsos T.D. et al. Cardiovascular magnetic resonance perfusion imaging at 3-tesla for the detection of coronary artery disease: a comparison with 1.5-tesla // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2007. – Vol. 49. – P. 2440–2449.
18. Clive Rosendorff. *Essential Cardiology: Principles and practice*. Second edition. – Springer, 2007. – 888 p.
19. Eitel I., Desch S., Fuernau G. et al. Prognostic significance and determinants of myocardial salvage assessed by cardiovascular magnetic resonance in acute reperfused myocardial infarction // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2010. – Vol. 55. – P. 2470–2479.
20. Falk E., Shah P.K., Fuster V. Coronary plaque disruption // *Circulation*. – 1995. – Vol. 92. – P. 657–671.
21. Fieno D.S., Kim R.J., Chen E.L. et al. Contrast-enhanced magnetic resonance imaging of myocardium at risk: distinction between reversible and irreversible injury throughout infarct healing // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2000. – Vol. 36. – P. 1985–1991.
22. Firmin D.N., Naylor G.L., Kilner P.J. et al. The application of phase shifts in NMR for flow measurement // *Magn. Reson. Med.* – 1990. – Vol. 14. – P. 230–241.
23. Francone M., Bucciarelli-Ducci C., Carbone I. et al. Impact of primary coronary angioplasty delay on myocardial salvage, infarct size, and microvascular damage in patients with ST-segment elevation myocardial infarction // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2009. – Vol. 54. – P. 2145–2153.
24. Friedrich M.G., Sechtem U., Schulz-Menger J. et al. International consensus group on cardiovascular magnetic resonance in myocarditis. Cardiovascular magnetic resonance in myocarditis: A JACC white paper // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2009. – Vol. 53. – P. 1475–1487.
25. Ganame J., Messalli G., Dymarkowski S. et al. Impact of myocardial haemorrhage on left ventricular function and remodelling in patients with reperfused acute myocardial infarction // *Eur. Heart. J.* – 2009. – Vol. 30. – P. 1440–1449.
26. Giri S., Chung Y., Merchant A. et al. T2 quantification for improved detection of myocardial edema // *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* – 2009. – Vol. 11. – P. 1–13.
27. Gutberlet M., Fröhlich M., Mehl S. et al. Myocardial viability assessment in patients with highly impaired left ventricular function: comparison of delayed enhancement, dobutamine stress MRI, end-diastolic wall thickness, and T1201-SPECT with functional recovery after revascularization // *Eur. Radiol.* – 2005. – Vol. 15. – P. 872–880.
28. Hayat D., Kloeckner M., Nahum J. et al. Comparison of real-time three-dimensional speckle tracking to magnetic resonance imaging in patients with coronary heart disease // *Am. J. Cardiol.* – 2012. – Vol. 109. – P. 180–186.
29. Heart disease and stroke statistics: update 2009 // *Circulation*. – 2009. – Vol. 119. – P. 1–161.
30. Hendel R.C., Berman D.S., Cullom S.J. et al. Multicenter clinical trial to evaluate the efficacy of correction for photon attenuation and scatter in SPECT myocardial perfusion imaging // *Circulation*. – 1999. – Vol. 99. – P. 2742–2749.
31. Hombach V., Grebe O., Merkle N. et al. Sequelae of acute myocardial infarction regarding cardiac structure and function and their prognostic significance as assessed by magnetic resonance imaging // *Eur. Heart J.* – 2005. – Vol. 26. – P. 549–557.
32. Hombach V., Merkle N., Rasche V. et al. The role of cardiovascular magnetic resonance imaging in the diagnosis and prognosis of patients with heart failure // *Herz*. – 2011. – Vol. 36. – P. 84–93.
33. Hundley W.G., Bluemke D.A., Finn J.P. et al. ACCF/ACR/AHA/NASCI/SCMR 2010 Expert consensus document on cardiovascular magnetic resonance: a report of the American College of Cardiology foundation task force on expert consensus documents // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2010. – Vol. 55. – P. 2614–2662.
34. Hundley W.G., Hamilton C.A., Thomas M.S. et al. Utility of fast cine magnetic resonance imaging and display for the detection of myocardial ischemia in patients not well suited for second harmonic stress echocardiography // *Circulation*. – 1999. – Vol. 100. – P. 1676–1679.
35. Hundley W.G., Hillis L.D., Hamilton C.A. et al. Assessment of coronary arterial restenosis with phase-contrast magnetic resonance imaging measurements of coronary flow reserve // *Circulation*. – 2000. – Vol. 101. – P. 2375–2381.
36. Kato S., Kitagawa K., Ishida N. Assessment of coronary artery disease using magnetic resonance coronary angiography: a national multi-center trial // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2010. – Vol. 56. – P. 983–991.
37. Kim R.J., Fieno D.S., Parrish T.B. et al. Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function // *Circulation*. – 1999. – Vol. 100. – P. 1992–2002.
38. Kim R.J., Wu E., Rafael A. et al. The use of contrast enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction // *New Engl. J. Med.* – 2000. – Vol. 343. – P. 1445–1453.
39. Kim W.Y., Danias P.G., Stuber M. et al. Coronary magnetic resonance angiography for the detection of coronary stenoses // *New Engl. J. Med.* – 2001. – Vol. 345. – P. 1863–1869.
40. Klein C., Nekolla S.G., Bengel F.M. et al. Assessment of myocardial viability with contrast-enhanced magnetic resonance imaging: comparison with positron emission tomography // *Circulation*. – 2002. – Vol. 105. – P. 162–167.
41. Knuesel P.R., Nanz D., Wyss C. et al. Characterization of dysfunctional myocardium by positron emission tomography and magnetic resonance: relation to functional outcome after revascularization // *Circulation*. – 2003. – Vol. 108. – P. 1095–1100.
42. Krishnam M.S., Tomasian A., Deshpande V. et al. Noncontrast 3D steady-state free-precession magnetic resonance angiography of the whole chest using nonselective radiofrequency excitation over a large field of view: comparison with single-phase 3D contrast-enhanced magnetic resonance angiography // *Invest. Radiol.* – 2008. – Vol. 43 (6). – P. 411–420.
43. Levine G.N., Gomes A.S., Arai A.E. et al. Safety of magnetic resonance imaging in patients with cardiovascular devices: an American heart association scientific statement from the committee on diagnostic and interventional cardiac catheterization, council on clinical cardiology, and the council on cardiovascular radiology and Intervention: endorsed by the American college of cardiology foundation, the North American society for cardiac imaging, and the Society for cardiovascular magnetic resonance // *Circulation*. – 2007. – Vol. 116 (24). – P. 2878–2891.
44. Lin F.Y., Dunning A.M., Narula J. et al. Impact of an automated multimodality point-of-order decision support tool on rate of appropriate testing and clinical decision making for individuals with suspected coronary artery disease: A prospective multi-center study // *Am. Coll. Cardiol.* – 2013. – Vol. 62 (4). – P. 308–316.

45. Lockie T., Ishida M., Perera D. et al. High-resolution magnetic resonance myocardial perfusion imaging at 3.0-Tesla to detect hemodynamically significant coronary stenoses as determined by fractional flow reserve // *J. Am. Coll. Cardiol.*– 2011.– Vol. 57.– P. 70–75.
46. Masci P.G., Ganame J., Strata E. et al. Myocardial salvage by CMR correlates with left ventricle remodeling and early ST-segment resolution in acute myocardial infarction // *JACC Cardiovasc Imaging.*– 2010.– Vol. 3 (1).– P. 45–51.
47. McCrohon J.A., Moon J.C., Prasad S.K. et al. Differentiation of heart failure related to dilated cardiomyopathy and coronary artery disease using gadolinium-enhanced cardiovascular magnetic resonance // *Circulation.*– 2003.– Vol. 108.– P. 54–59.
48. Montalescot G., Sechtem U., Achenbach S. et al. ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease: the Task Force on the management of stable coronary artery disease of the European Society of Cardiology // *Eur. Heart J.*– 2013.– Vol. 34 (38).– P. 2949–3003.
49. Nagel E., Lehmkühl H.B., Bocksch W. et al. Diagnosis of ischemia-induced wall motion abnormalities with the use of high-dose dobutamine stress MRI: comparison with dobutamine stress echocardiography // *Circulation.*– 1999.– Vol. 99.– P. 763–770.
50. Nassenstein K., Breuckmann F., Bucher C. et al. How much myocardial damage is necessary to enable detection of focal late gadolinium enhancement at cardiac MR imaging // *Radiology.*– 2008.– Vol. 249.– P. 829–835.
51. Nijveldt R., Hofman M.B., Hirsch A. et al. Assessment of microvascular obstruction and prediction of short-term remodeling after acute myocardial infarction: Cardiac MR imaging study // *Radiology.*– 2009.– Vol. 250.– P. 363–370.
52. Ricciardi M., Wu E., Davidson C. et al. Visualization of discrete microinfarction after percutaneous coronary intervention associated with mild creatine kinase-MB elevation // *Circulation.*– 2001.– Vol. 103.– P. 2780–2783.
53. Ryan T., Tarver R.D., Duerk J.L. et al. Distinguishing viable from infarcted myocardium after experimental ischemia and reperfusion by using nuclear magnetic resonance imaging // *J. Am. Coll. Cardiol.*– 1990.– Vol. 15.– P. 1355–1364.
54. Sakuma H., Ichikawa Y., Suzawa N. et al. Assessment of coronary arteries with total study time of less than 30 minutes by using whole-heart coronary MR angiography // *Radiology.*– 2005.– Vol. 237.– P. 316–321.
55. Sironi A.M., Lombardi M., Pepe A. et al. Study of heart function. In Lombardi M., Bartolozzi C. editors. MRI of the heart and vessels.– Milan: Springer, 2004.– P. 154–159.
56. Schwitler J. Myocardial perfusion // *J. Magn. Reson. Imaging.*– 2006.– Vol. 24.– P. 953–963.
57. Schwitler J., Nanz D., Kneifel S. et al. Assessment of myocardial perfusion in coronary artery disease by magnetic resonance: a comparison with positron emission tomography and coronary angiography // *Circulation.*– 2001.– Vol. 103.– P. 2230–2235.
58. The clinical role of magnetic resonance in cardiovascular disease. Task Force of the European Society of Cardiology, in collaboration with the Association of European Paediatric Cardiologists // *Eur. Heart J.*– 1998.– Vol. 19.– P. 19–39.
59. Wagner A., Mahrholdt H., Sechtem U. et al. MR imaging of myocardial perfusion and viability // *Magn. Reson. Imaging Clin. N. Am.*– 2003.– Vol. 11 (1).– P. 49–66.
60. Weiger M., Preussmann K.P., Boesiger P. 2D SENSE for faster 3D MRI // *MAGMA.*– 2002.– Vol. 14.– № 1.– P. 10–19.
61. Yang Q., Li K., Liu X. et al. Contrast-enhanced whole-heart coronary magnetic resonance angiography at 3.0-T: a comparative study with X-ray angiography in a single center // *J. Am. Coll. Cardiol.*– 2009.– Vol. 54 (1).– P. 69–76.
62. Yuan C., Kerwin W. S., Ferguson M. S. et al. Contrast-enhanced high resolution MRI for atherosclerotic carotid artery tissue characterization // *J. Magn. Reson. Imaging.*– 2002.– Vol. 15.– P. 62–67.

Надійшла 20.12.2013 р.

Значение магнитно-резонансной визуализации в диагностике ишемической болезни сердца

В.Н. Коваленко, Е.Г. Несукай, А.А. Даниленко, Н.С. Поленова, Е.Ю. Титов

ГУ «Национальный научный центр “Институт кардиологии им. акад. Н.Д. Стражеско” НАМН Украины», Киев

Обзор литературы посвящен роли магнитно-резонансной томографии (МРТ) в диагностике ишемической болезни сердца. Проанализированы физические основы МРТ, описаны принципы построения изображения при использовании различных методик МРТ: T1- и T2-взвешенных изображений, МРТ с фармакологической нагрузкой, контрастной МРТ, магнитно-резонансной коронароангиографии. Особые акценты сделаны на значении отдельных методик МРТ в диагностике атеросклеротического поражения венечных артерий и ишемии миокарда, острого инфаркта миокарда и его осложнений, постинфарктного кардиосклероза, гибернированного миокарда.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, магнитно-резонансная томография, ишемия миокарда, жизнеспособность миокарда.

The value of magnetic resonance imaging in the diagnosis of ischemic heart disease

V.M. Kovalenko, E.G. Nesukay, O.O. Danylenko, N.S. Polenova, E.Yu. Titov

National Scientific Center «M.D. Strazhesko Institute of Cardiology NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

The role of the magnetic resonance imaging (MRI) in the diagnosis of ischemic heart disease is reviewed. A physical basis of MRI is depicted, as well as principles of forming MRI images using various techniques: T1- and T2-weighted images, stress-MRI, contrast-enhanced cardiac MRI, magnetic resonance coronary angiography. Special emphasis is paid to the importance of certain techniques of MRI in the diagnosis of coronary atherosclerosis and myocardial ischemia, acute myocardial infarction and its complications, postinfarction cardiosclerosis, hibernating myocardium.

Key words: ischemic heart disease, magnetic resonance imaging, myocardial ischemia, myocardial viability.