

ХИПЕРТРОФИЧНА КАРДИОМИОПАТИЯ – ПРИНОС НА МАГНИТОРЕЗОНАНСНАТА ДИАГНОСТИКА

В. Грудева^{1, 2}, А. Партенова¹

¹Отделение по образна диагностика, УМБАЛ „Св. Екатерина“ – София,

²Катедра по образна диагностика, Медицински университет – София

HYPERTROPHIC CARDIOMYOPATHY – CONTRIBUTION OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING

V. Groudeva^{1, 2}, A. Partenova¹

¹Diagnostic Imaging Department, UMHAT “Sveta Ekaterina” – Sofia

²Diagnostic Imaging Department, Medical University – Sofia

Резюме.

Хипертрофичната кардиомиопатия (ХКМП) е една от най-често срещаните форми на кардиомиопатии. Характеризира се с първична хипертрофия на миокарда, дезорганизация на кардиомиоцитите и фиброза. Тези морфологични характеристики обуславят и приложимостта и значимостта на магнитнорезонансното изследване при оценка на тези пациенти. Магнитният резонанс на сърце допринася в диагностиката чрез идентифициране на сегменти на хипертрофия, които не се визуализират добре чрез ехокардиография, осигурява по-точни измервания на дебелината на миокарда и диференцира ХКМП от други причини за левокамерна хипертрофия. Методът дава възможност освен за качествена и за количествена оценка на фокална и дифузна фиброза, което има важна роля при оценка на прогнозата и проследяване на пациентите. Целта на настоящата статия е да се направи преглед на ролята на сърдечния магнитен резонанс в диагностиката на ХКМП, демонстрирайки различни форми и техните типични морфологични и тъканни промени, както и да се покаже ролята на метода в диференциалната диагноза на хипертрофичния миокард.

Ключови думи:

хипертрофична кардиомиопатия, магнитен резонанс на сърце, образна диагностика

Адрес

за кореспонденция:

д-р Виолета Грудева, УМБАЛ "Св. Екатерина", Отделение по образна диагностика, бул. „Пенчо Славейков“ № 52А, 1431 София, e-mail: violetagroudeva@gmail.com

Abstract.

Hypertrophic cardiomyopathy (HCM) is one of the most common form of cardiomyopathies. It is characterized by primary hypertrophy, disorganization, and fibrosis of the myocardium. These morphological characteristics determine the applicability and significance of magnetic resonance imaging in the evaluation of these patients. Cardiac magnetic resonance helps the diagnostic process by identifying hypertrophic segments, which are less accessible by echocardiography ensures more precise measurements of wall thickness and differentiates HCM from other causes of left ventricular hypertrophy. The method allows for not only qualitative but also quantitative evaluation of focal and diffuse fibrosis which plays an important role in evaluation of patients' prognosis and follow up. The aim of this article is to review the role of cardiac magnetic resonance in the diagnosis of HCM, demonstrating different forms and their typical morphological features, as well as to demonstrate the role of the method in the differential diagnosis of myocardial hypertrophy.

Key words:

hypertrophic cardiomyopathy, cardiac magnetic resonance, diagnostic imaging

Address

for correspondence:

Violeta Groudeva, MD, Diagnostic Imaging Department, UMHAT “Sveta Ekaterina”, 52A Pencho Slaveykov Blvd. Bg – 1431 Sofia, e-mail: violetaggroudeva@gmail.com

ВЪВЕДЕНИЕ

Хипертрофичната кардиомиопатия (ХКМП) се определя като задебеляване на стената на миокарда и увеличаване на миокардната маса при отсъст-

INTRODUCTION

Hypertrophic cardiomyopathy (HCM) is defined as thickening of the left ventricular myocardium wall (with and without right ventricular involvement) and an in-

вие на причини за обемно натоварване, които да обяснят хипертрофията, както и отсъствие на инфилтративни заболявания и болести на натрупването (напр. амилоидоза, болест на Фабри) [1-4].

При възрастни пациенти за ХКМП се приема задебеление на стената на миокарда ≥ 15 mm във всеки сегмент, като стойности от 13-14 mm се считат за гранични, особено при съпътстваща фамилна обремененост [5].

Хипертрофичната кардиомиопатия е една от най-честите форми на кардиомиопатии. Докладваната честота в различни проучвания варира, като средно се приема, че е около 1/500 при възрастната популация [6-9]. Приема се, че заболяването е генетично, като към момента са идентифицирани мутации в различни гени, които обуславят аномалия в саркомерите и се унаследяват най-често автосомно-доминантно [10].

ХКМП се асоциирана с увеличен сърдечен риск. Общата годишна смъртност се явява от 1 до 2%, съответно: внезапната сърдечна смърт – 1%, сърдечна недостатъчност – 0.5%, тромбоемболизъм – 0.1% [11].

ХКМП се характеризира с първична хипертрофия, дезорганизация и фиброза на миокарда [12-14]. Тези морфологични характеристики обуславят и приложимостта и значимостта на магнитнорезонансното изследване при оценка на тези пациенти.

Магнитният резонанс на сърцето е неинвазивен метод без използване на йонизираща радиация, който позволява получаване на образи с висока пространствена, контрастна и времева разделителна способност в различни анатомични равнини.

Предимствата на метода при диагностиката на пациенти с хипертрофичната кардиомиопатия могат да се обобщят както следва:

Анатомична оценка

Магнитнорезонансната диагностика на сърцето е златен стандарт за количествена оценка на сърдечните обеми и функция [15]. Възможността за автоматично или полуавтоматично очертаване на епикардния и ендокардния контур по къса ос с помощта на специализиран софтуер осигурява голяма точност при оценката на камерните обеми, миокардната маса и функция, както и висока възпроизводимост на измерванията. Отличното анатомично изобразяване на миокарда позволява анализ и точно измерване на дебелината на миокарда в засегнатите сегменти и по този начин дава възможност за точно определяне на степента на ангажиране от хипертрофията.

Оценка на ангажирането на дясна камера от хипертрофичната кардиомиопатия

Дясната камера също може да бъде засегната [16]. Такова засягане се наблюдава в 28-44% от случаите [17, 18]. Магнитният резонанс е особено

crease in myocardial mass in the absence of causes of volume overload to explain the hypertrophy, as well as the absence of infiltrative diseases and diseases of the accumulation (eg amyloidosis, Fabry disease) [1-4].

In adult patients, myocardial wall thickening of ≥ 15 mm in each segment is considered to be myocardial thickening, with values of 13-14 mm considered borderline, especially in the presence of concomitant family burden [5].

Hypertrophic cardiomyopathy is one of the most common forms of cardiomyopathy. Its frequency reported in different studies varies, with an average thought to be about 1/500 in the adult population [6-9]. The disease is thought to have a genetic cause, with identified mutations in different genes causing sarcomere abnormalities and is most often inherited in an autosomal dominant manner [10].

HCM is also associated with increased cardiac risk. The total annual mortality is from 1 to 2% and, respectively, sudden cardiac death (1%), heart failure (0.5%), thromboembolism (0.1%) [11].

HCM is characterized by primary hypertrophy, disorganization, and fibrosis of the myocardium [12-14]. These morphological characteristics determine the applicability and significance of magnetic resonance imaging in the evaluation of these patients.

Magnetic resonance imaging of the heart is a non-invasive, non-ionizing imaging method that allows obtaining high-quality images with sufficient spatial and temporal resolution in any desired plane.

The advantages of magnetic resonance imaging of the heart and hypertrophic cardiomyopathy in particular can be summarized as follows:

Anatomical assessment

Magnetic resonance imaging of the heart is the gold standard method for quantitative assessment of cardiac volumes and function [15]. The possibility of automatic or semi-automatic determination, with the help of specialized software, of the epicardial and endocardial contour along the short axis ensures high accuracy of the assessment of ventricular volumes, myocardial mass and function, as well as high reproducibility of measurements. Excellent anatomical imaging of the myocardium allows analysis and accurate measurement of the thickness of the myocardium in the affected segments and thus allowing accurate determination the degree of the hypertrophy.

Evaluation of right ventricular involvement in hypertrophic cardiomyopathy

The right ventricle may also be affected [16]. Such involvement is observed in 28-44% of cases [17, 18]. Magnetic resonance imaging is particularly

подходящ за оценка на деснокамерното ангажиране от хипертрофията. Най-често се засягат зоните в близост до залавното място на септума към дясна камера и по-рядко свободната стена на дясна камера. Нерядко се открива изолирана хипертрофия на криста терминалис и септалния папиларен мускул. В тези случаи трансторакалната ехография често надценява степента на хипертрофия на септума, поради трудността да се отграничи задебеления септум от криста суправентрикуларис. При хипертрофична кардиомиопатия деснокамерното засягане може да е както първично, подобно на това на левокамерния миокард, така и резултат от хемодинамичния ефект от левокамерната дисфункция. Деснокамерното засягане при хипертрофична кардиомиопатия се асоциира с повишен сърдечен риск, главно поради по-голяма честота на ритъмно-проводни нарушения, в това число камерна тахикардия и внезапна смърт [17]. За детайлна оценка на степента на хипертрофия на дясната камера и избягване на надценяването ѝ е важно на магнитнорезонансните образи да се изключват структурите ѝ при измерване на септума по късата ос, по-конкретно на криста суправентрикуларис.

Тъканна характеристика

Основното предимство на магнитния резонанс е способността му да оцени тъканната характеристика на миокарда. Това е единствения неинвазивен метод, който е в състояние да визуализира промените в миокарда.

Основната магнитно-резонансна техника за откриване на фиброза е късното гадолиниев контрастиране, известно още като късно контрастиране, или LGE (late gadolinium enhancement) [19-22]. Това е техника, базирана на контрастно усилване на образа, и изисква интравенозно приложение на гадолиниев контрастно средство. Патолофизиологичният принцип на късното контрастиране при фиброза се състои в комбинация на повишеното акумулиране на контрастното средство в зоните с увеличено екстрацелуларно пространство и по-бавното му отмиване [23]. Натрупването на гадолиниев контраст в зоните с фиброза води до скъсяване на T1 времето за релаксация, на което се дължи по-високият сигнал на миокарда, наблюдаван на LGE секвенциите. Така разграничаването на фиброзата от нормалния миокард се базира на разликите в контрастните им характеристики, като зоните на фиброза се изобразяват с висок сигнал, за разлика от здравия миокард, който остава с хомогенно нисък сигнал [24].

Секвенциите на късно гадолиниев контрастиране са чудесен метод за откриване на заместителната фиброза, но са слабочувствителни по-отношение идентифициране на дифузна интерстициална фиброза. По-новите, т.нар. **техники за параметрично картиране**, позволяват количествена оценка на промене

suitable for evaluating right ventricular involvement from hypertrophy. Most often, the areas near the attachment point of the septum to the right ventricle and less often the free wall of the right ventricle are affected. Isolated hypertrophy of the crista terminalis and right ventricular papillary muscles on the side of the septum is often found. In these cases, transthoracic ultrasound often overestimates the degree of septal hypertrophy due to the difficulty in distinguishing the thickened septum from the crista supraventricularis. In hypertrophic cardiomyopathy, right ventricular involvement can be both primary, similar to that of the left ventricular myocardium, and also result from the hemodynamic effect of left ventricular dysfunction. Right ventricular involvement in hypertrophic cardiomyopathy is associated with increased risk, mainly due to an increased risk of ventricular tachycardia and sudden death [17]. For a detailed assessment of the degree of right ventricular hypertrophy and avoiding its overestimation, it is important, on magnetic resonance images, to exclude its structures when measuring the septum along the short axis, in particular the crista supraventricularis.

Tissue characteristics

The main advantage of magnetic resonance imaging is its ability to evaluate the tissue characteristics of the myocardium. This is the only non-invasive method that is able to visualize changes in the myocardium.

The main magnetic resonance technique for detecting fibrosis is late gadolinium enhancement, also known as late gadolinium enhancement (LGE) [19-22]. As the name suggests, this is a contrast-based image enhancement technique and requires the use of intravenous gadolinium contrast agent. The physiological principle of late contrast in fibrosis consists of a combination of increased distribution of the contrast agent in the extracellular space and its prolonged washout in the myocardial fibrotic tissue [23]. Accumulation of gadolinium contrast agent in the fibrosis results in shortening of T1 relaxation times, hence the strong signal intensity of the fibrosis observed on LGE sequences. Thus, the differentiation between fibrosis and normal myocardium is based on the differences in contrast with areas of fibrosis being with high signal, as opposed to healthy myocardium, which remains with homogeneously low signal [24].

Late gadolinium contrast sequences are an excellent method for detecting replacement fibrosis but have low sensitivity for identifying diffuse interstitial fibrosis. Newer, so-called **mapping techniques** allow quantitative assessment of changes in the myocardium and are particularly suitable for assessing diffuse fibrosis.

ните в миокарда, което ги прави особено подходящи за оценка на дифузна фиброза.

Релаксометрията, включваща нативно и постконтрастно T1 картиране е революционно нов подход в образната диагностика на фиброзата. За разлика от секвенциите за късно контрастиране, които се базират на чисто качествен анализ и сравнение на сигналния интензитет на нормалния спрямо патологично променения миокард, параметричното картиране два възможност на количествена оценка на промените. Всеки воксел от миокарда се представя с числена стойност, съответстваща на времето му за релаксация, и може да бъде цветово кодиран и представен под форма на цветна карта. Чрез стойностите на T1 времето преди и след инжектиране на контрастно средство може да се изчисли екстрацелуларния обем. Параметричното картиране превръща магнитния резонанс на сърце в биомаркер, разкриващ сърдечната патофизиология. Важно е да се отбележи, че тъй като стойностите на времената за релаксация зависят от типа на апарата, силата на магнитното поле и от вида на приложената пулсова секвенция, за да се прилагат в практиката е необходимо всеки център да проведе тестове на здрави доброволци за предварително установяване на диапазона от нормални стойности.

Диференциална диагноза

Магнитнорезонансната диагностика на сърцето може да разграничи хипертрофичната кардиомиопатия от друга генеза на увеличаването на миокардната маса, като хипертензивна хипертрофия, атлетично сърце, клапна генеза или болести на натрупването.

Атлетично сърце се наблюдава при интензивни физически тренировки и е свързано с адаптивни промени в миокарда, включително с увеличаване на мускулната маса. Магнитният резонанс може да разграничи това състояние от кардиомиопатия. Счита се, че съотношение между максималната дебелина на миокарда в крайна диастола към индексирания краен диастолен обем (diastolic wall-to-indexed volume ratio) $< 0.15 \text{ mm/m}^2/\text{ml}$ разграничава атлетичното сърце от други форми на хипертрофия (хипертрофична кардиомиопатия, хипертензивна или клапна генеза) с 99% специфичност [25].

Не трябва да се забравя, че в практиката атлетичното сърце и хипертрофичната кардиомиопатия могат да съществуват едновременно. Добре известен е фактът, че хипертрофичната кардиомиопатия е най-честата причина за внезапна смърт при млади атлети. Това прави разграничаването и търсенето на морфологични белези на двете състояние особено важно.

Хипертрофия на миокарда се наблюдава и в резултат на дългогодишна хипертония. Макар тя да се асоциира с по-слабо задебеление на стената, при разграничаването ѝ от хипертрофичната кардиоми-

Relaxometry, including before and postcontrast assessment of T1 mapping and calculation of extracellular volume (ECV), is a revolutionary new approach in the imaging diagnosis of fibrosis. In contrast to the classical approach by means of late contrast sequences, which are based on a purely qualitative analysis and comparison of normal myocardium against pathological changes, parametric mapping offer possibilities for quantitative assessment of changes. Each voxel of the myocardium is represented by a numerical value corresponding to its relaxation time and can be color-coded and represented as a color map. The extracellular volume can be calculated from T1 values before and after injection of contrast medium. Parametric mapping turns cardiac magnetic resonance into a biomarker revealing cardiac pathophysiology. It is important to note that since the values of the relaxation times depend on the type of machine, the strength of the magnetic field and the type of pulse sequence applied, in order to be applied in practice it is necessary for each center to conduct tests on healthy volunteers in order to establish normal range values.

Differential diagnosis

Magnetic resonance imaging of the heart can differentiate hypertrophic cardiomyopathy from other genesis of myocardial mass increase, such as hypertensive hypertrophy, athletic heart, valvular genesis, or accumulation diseases.

An athletic heart is observed during intense physical training and is associated with adaptive changes in the myocardium, including an increase in muscle mass. Magnetic resonance imaging can differentiate this condition from cardiomyopathy. A diastolic wall-to-indexed volume ratio $< 0.15 \text{ mm/m}^2/\text{ml}$ is considered to differentiate the athletic heart from other forms of hypertrophy (hypertrophic cardiomyopathy, hypertensive or valvular genesis) with 99% specificity [25].

It should not be forgotten that in practice, athletic heart and hypertrophic cardiomyopathy can coexist. It is well known that hypertrophic cardiomyopathy is the most common cause of sudden death in young athletes. This makes distinguishing and looking for morphological signs of the two conditions particularly important.

Hypertrophy of the myocardium is also observed as a result of long-term hypertension. Although it is associated with less thickening of the wall, when distinguishing it from hypertrophic cardiomyopathy,

опатия не може да се разчита единствено на критерия дебелина на миокарда над 15 mm. Хипертоничната хипертрофия най-често е симетрична. Увеличена индексирана миокардна маса, липса на късно гадолиниев контрастиране и липса на обструкция на изходния тракт на лявата камера и патологично систолно движение на предното митрално платно (SAM) са показатели в полза на хипертонична хипертрофия [26].

Оценка на риска при хипертрофична кардиомиопатия

От гледна точка на образната диагностика сърдечният риск е свързан със степента на хипертрофия и с обструкцията на изходния тракт на лявата камера и наличието на фиброза [27]. Ето защо магнитният резонанс играе важна роля в стратификацията на риска от ритъмни нарушения и внезапна сърдечна смърт. Възможността за точна оценка на максималната дебелина на миокарда във всеки един сегмент е важна, тъй като дебелина на миокарда над 30 mm се асоциира с увеличен риск. Ценен маркер е и възможността за прецизна оценка на миокардната маса. Според някои автори индексираната към телесната повърхност миокардна маса е по-точен критерий за оценка на риска в сравнение с дебелината на миокарда [28].

Рискът е свързан и с наличието и степента на разпространение на фиброза в миокарда. В литературата се съобщава за честота на миокардна фиброза при пациенти с ХКПМ открита чрез късно гадолиниев контрастиране в диапазона на 33-86% [27].

Прогностичната стойност на късното гадолиниев контрастиране по отношение на риска е голяма. Редица проучвания асоциират наличие на процентно съдържание на фиброза над 15% от общата маса с увеличен риск от внезапна сърдечна смърт и индикация за имплантиране на кардиовертер дефибрилатор (ICD) и това е отразено и в препоръките за добра практика по отношение на кардиомиопатиите [5].

MPT СПРЯМО ЕХОКАРДИОГРАФИЯ

Трансторакалната ехокардиография – основен метод за оценка на морфологията и функцията на сърцето, е първи метод на избор при начална оценка на пациентите с хипертрофична кардиомиопатия. Ограничения на метода са случаите на лош акустичен прозорец или затруднената оценка на някои сегменти, например на сърдечния връх. При незаключителен резултат от трансторакалната ехокардиография магнитният резонанс преодолява тези ограничения, изобразява детайлно и измерва с голяма точност всички сегменти на миокарда. Магнитният резонанс

one cannot rely solely on the criterion: myocardial thickness over 15 mm. Hypertensive hypertrophy is most often symmetrical. Increased indexed myocardial mass, absence of late gadolinium contrast and absence of left ventricular outflow tract obstruction, and abnormal systolic motion of the anterior mitral valve (SAM) are indicators that tip the scales toward hypertonic hypertrophy [26].

Risk assessment in hypertrophic cardiomyopathy.

From the imaging point of view, cardiac risk is related to the degree of hypertrophy and to the obstruction of the left ventricular outflow tract and the presence of fibrosis [27]. Therefore, magnetic resonance imaging plays an important role in stratifying the risk of arrhythmias and sudden cardiac death. The ability to accurately estimate the maximum thickness of the myocardium in each segment is important, as a thickness of the myocardium greater than 30 mm is associated with an increased risk. A valuable marker is also the possibility of precise assessment of myocardial mass. According to some authors, myocardial mass indexed to body surface area is a more accurate risk assessment criterion than myocardial thickness [28].

The risk is also related to the presence and spread of fibrosis in the myocardium. In the literature, the presence of myocardial fibrosis in patients with HCPM detected by late gadolinium contrast has been reported in 33-86% of cases in different studies [27].

The prognostic value of late gadolinium contrast with respect to risk is high. A number of studies have associated the presence of a percentage of fibrosis above 15% of the total mass with an increased risk of sudden cardiac death and an indication for implantation of a cardioverter defibrillator (ICD), and this is also reflected in good practice guidelines for cardiomyopathies [5].

MRI VS. ECHOCARDIOGRAPHY

Transthoracic echocardiography – the primary method for evaluating the morphology and function of the heart – is the first method of choice in the initial evaluation of patients with hypertrophic cardiomyopathy. The limitations of the method are the cases of a poor acoustic window or the difficult evaluation of some segments, for example the cardiac apex. With an inconclusive result from transthoracic echocardiography, magnetic resonance overcomes this limitation, imaging in detail and measuring with great accuracy all segments of the myocardium. Magnetic

с голяма прецизност оценява разпространението на хипертрофията, открива сегментните зони на хипертрофия, пропуснати при стандартната трансторакална ехокардиография, особено в областта на септума, сърдечния връх и средната anterolateralна стена. Магнитният резонанс превъзхожда трансторакалната ехокардиография по отношение на точността на измерване на хипертрофията на миокарда.

Магнитният резонанс е с предимно спрямо ехокардиографията и в оценката на по-фините морфологични аномалии, като абнормни трабекулации, миокардни крипти и мускулни парасептални бандове, които често съпътстват хипертрофията на миокарда [29, 30].

Основни показания за провеждане на МРТ при хипертрофична кардиомиопатия

Набор от хистопатологични и анатомио-патологични състояния създават различни проявления на хипертрофичната кардиомиопатия. Съвременният подход към кардиомиопатии включва фенотипно описание на находките. Анатомичната информация и характеристика на миокарда при магнитнорезонансното изследване на сърцето способства за правилното групиране според фенотипа на промените. В последните препоръки за добра практика на Европейското дружество по кардиология от 2023 г. магнитният резонанс на сърцето е показан с клас I индикация. Препоръчително е провеждане на магнитнорезонансно изследване при първоначалната оценка на пациент със суспектна хипертрофична кардиомиопатия, особено в случаите на апикална хипертрофия, апикална аневризма или изолирана хипертрофия на латералната стена. Тогава се очаква, че трансторакалната ехокардиография може да не е заключителна. Индикациите включват още детайлна оценка на морфологията на обструкцията на изходния тракт на лявата камера и причината за нея преди планиране на дезобструктивни терапии. Показанията са насочени и към оценка на риска. Добавянето на контрастното изследване позволява оценка на фокална и дифузна фиброза и нейното разпространение – ценен маркер за оценката на риска от внезапна сърдечна смърт. Показанията за магнитнорезонансно изследване включват и състояния, при които трябва да се разграничи хипертрофия на миокарда от друго състояние, като атлетично сърце, хипертония или болести на натрупването (напр. амилоидоза, болест на Фабри), както и за разграничаване на обструкцията на изходния тракт на лявата камера при хипертрофия от наличие на субаортна мембрана.

Магнитният резонанс намира приложение и в проследяването на пациентите и мониториране на ефекта от терапевтичното поведение, например при проследяване на резултата от алкохолна аблация [31]. Макар и да няма пълен консенсус за монитори-

resonance with high precision evaluates the spread of hypertrophy, detects segmental areas of hypertrophy missed by standard transthoracic echocardiography, especially in the region of the septum, cardiac apex, and mid-antrolateral wall. Magnetic resonance imaging is superior to transthoracic echocardiography in terms of accuracy in measuring myocardial hypertrophy.

Magnetic resonance imaging also outperforms echocardiography in the assessment of more subtle morphologic abnormalities, such as abnormal trabeculations, myocardial crypts, and muscle paraseptal bands, which often accompany myocardial hypertrophy [29, 30].

Main indications for MRI in hypertrophic cardiomyopathy

A range of histopathological and anatomical-pathological conditions create different manifestations of hypertrophic cardiomyopathy. The modern approach to cardiomyopathies includes a phenotypic description of the findings. Anatomical information and characterization of the myocardium in magnetic resonance imaging of the heart contributes to the correct grouping according to the phenotype of the changes. In the 2023 good practice recommendations of the European Society of Cardiology, cardiac magnetic resonance is indicated with a class I indication. Magnetic resonance imaging is recommended in the initial evaluation of a patient with suspected hypertrophic cardiomyopathy, especially in cases of apical hypertrophy, apical aneurysm, or isolated lateral wall hypertrophy. Then it is expected that transthoracic echocardiography may not be conclusive. In this sense, the indications include detailed morphological assessment, assessment of obstruction of the left ventricular outflow tract and its cause before therapies for its deobstruction. The indications are also aimed at risk assessment. The addition of the contrast study allows the evaluation of focal and diffuse fibrosis and its distribution, a valuable marker for the assessment of the risk of sudden cardiac death. Indications for magnetic resonance imaging also include conditions in which myocardial hypertrophy must be differentiated from another condition, such as athletic heart, hypertension, or storage diseases such as amyloidosis, Fabry disease, and to differentiate left ventricular outflow tract obstruction. chamber in hypertrophy from the presence of a sub-aortic membrane.

Magnetic resonance is also used in patient follow-up and monitoring the effect of therapeutic behavior, for example in amyloidosis or in monitoring the outcome of alcohol ablation [31]. Although

рането на хипертрофичната кардиомиопатия с магнитен резонанс, препоръките са проследяващото изследване да се провежда 2-3 г. след първоначалното.

ПРОТОКОЛ ЗА МАГНИТНО РЕЗОНАНСНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЪРЦЕ ПРИ ХИПЕРТРОФИЧНАТА КАРДИОМИОПАТИЯ

Магнитният резонанс на сърце изисква сканирането да е синхронизирано с електрокардиограмата за получаване на диагностични образи. Прилага се гадолиниев контрастно средство за оценка на тъканните промени в миокарда.

Класическият магнитнорезонансен протокол за оценка на сърцето при хипертрофична кардиомиопатия включва като задължителни компоненти:

- Динамични (кино) секвенции за морфологична оценка на сърдечните кухини и анализ на глобалната и регионалната кинетика. Тези динамични (кино) образи най-често са получени чрез прилагане на свободната прецесия в равновесно състояние (balanced Steady State Free Precession, bSSFP). Получава се набор от последователни срезове по късата ос на сърцето, които покриват от равнината на митралния клапен пръстен до тази на сърдечния връх. Използват се за оценка на обеми и функцията както на лявата, така и на дясната камера. Необходимо са и образи в другите стандартните сърдечни равнини – четири-, дву- и трикухинен образ.

- Секвенции за релаксометрия – това са т.нар. **картиране**, или **mapping техники**. Включва секвенции на T1 релаксационните времена преди контрастно усилване и 15 min след прилагане на интравенозното гадолиниев контрастно средство.

- Постконтрастни секвенции – при първото преминаване на контрастното средство - за оценка на перфузията в покой.

- Секвенции за късно гадолиниев контрастиране (late gadolinium enhancement, LGE). Провеждат се 10-15 min след приложението на гадолиниевото контрастно средство и целят откриването на фиброза.

При хипертрофична обструктивна кардиомиопатия се прилагат техники за измерване на кръвотока – за изчисляване на градиента през изходния тракт на лявата камера. Обикновено се използват скорост-кодирани образи в равнина, перпендикулярна на равнината на кръвотока.

Според клиничния въпрос протоколът може да включва и някои допълнителни секвенции:

- T2 базирани секвенции и T2 картиране за оценка на едем на миокарда.

- Образи в допълнителни равнини за оценка на подклапен апарат или дясна камера.

there is no complete consensus on the monitoring of hypertrophic cardiomyopathy with magnetic resonance, the recommendations are that the follow-up examination should be carried out 2-3 years after the initial one.

PROTOCOL FOR CARDIAC MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN HYPERTROPHIC CARDIOMYOPATHY

Magnetic resonance imaging of the heart requires that the scan be synchronized with the electrocardiogram to obtain diagnostic images. A gadolinium contrast agent is administered to assess structural changes in the myocardium.

The classic magnetic resonance protocol for evaluating the heart in hypertrophic cardiomyopathy includes as mandatory components:

- Dynamic (cinematic) sequences with morphological assessment of cardiac cavities and analysis of global and regional kinetics. These dynamic (cinematic) sequences are most often of the balanced steady state free precession (bSSFP) type. A series of consecutive slices along the short axis of the heart are obtained, covering from the plane of the mitral valve annulus to that of the cardiac apex. They are used to assess volumes and function of both the left and right ventricles. Images in the other standard cardiac planes are also required – four-chamber, two-chamber, and three-chamber views.

- Sequences for relaxometry – these are the so-called **mapping techniques**. Includes sequences of T1 relaxation times before contrast enhancement and 15 min after administration of intravenous gadolinium contrast agent.

- Post-contrast sequences – at the first pass of the contrast medium – to assess perfusion at rest

- Sequences for late gadolinium enhancement (LGE). They are carried out 10-15 minutes after the application of the gadolinium contrast agent and aim to detect fibrosis.

In hypertrophic obstructive cardiomyopathy, blood flow measurement techniques are applied to calculate the gradient through the left ventricular outflow tract. Typically, velocity-encoded images in a plane perpendicular to the blood flow are used.

According to the clinical question, the protocol may also include some additional sequences:

- T2-based sequences and T2 mapping to assess myocardial edema.

- Images in additional planes for assessment of subvalvular apparatus or right ventricle.

МАГНИТОРЕЗОНАНСИ НАХОДКИ ПРИ ХИПЕРТРОФИЧНАТА КАРДИОМИОПАТИЯ

Хипертрофичната кардиомиопатия със сигмоиден септум – sigmoid septum contour

Това е най-честата морфологична форма на ХКМП, срещаща се в до две трети от случаите [32].

При тази морфологична форма асиметричното засягане на септум в предимно предносептални сегменти придава характерния „S-образен вид“ на последния [33]. В случая се наблюдава и тенденция към формиране на апикална аневризма (фиг. 1). На динамичните образи се визуализира почти пълна систолна облитерация в среден към апикален сегмент в областта на максималната хипертрофия (фиг. 2 а и b). Налице е и ангажиране на криста суправентрикуларис от хипертрофията. Дебелина на септума в диастола е 30 mm, измерена изключвайки хипертрофичната криста суправентрикуларис (фиг. 2с).

При постконтрастните серии се откриват конфлуирани интрамиокардни зони на късно гадолиниев контрастиране с характерен неischemичен тип разпределение. Промените са локализирани в областта на максимална хипертрофия като белег на заместителна фиброза. Наблюдават се увеличени T1 релаксационни времена в зоните на хипертрофия и увеличен екстрацелуларен обем до 38% (фиг. 3 а, b, c).

MAGNETIC RESONANCE IMAGING FINDINGS IN HYPERTROPHIC CARDIOMYOPATHY

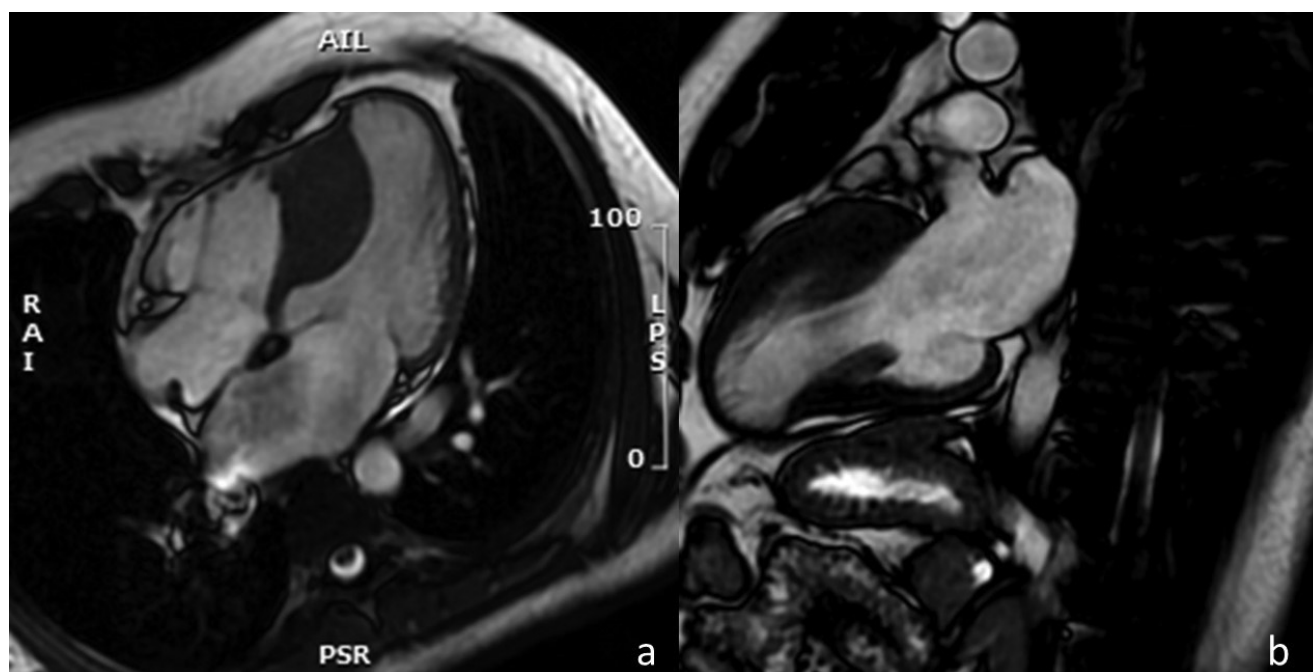
Hypertrophic cardiomyopathy with sigmoid septum contour

This is the most common morphological form of HCM occurring in up to two thirds of cases [32].

In this morphological type, the asymmetric involvement of the septum in predominantly anteroseptal segments gives the latter the characteristic “S-shaped appearance” [33]. In this case, a tendency towards apical aneurysm formation is also observed (Figure 1). Dynamic images visualize almost complete systolic obliteration in the mid-to-apical segment in the area of the maximal hypertrophy (Figure 2 a, b).

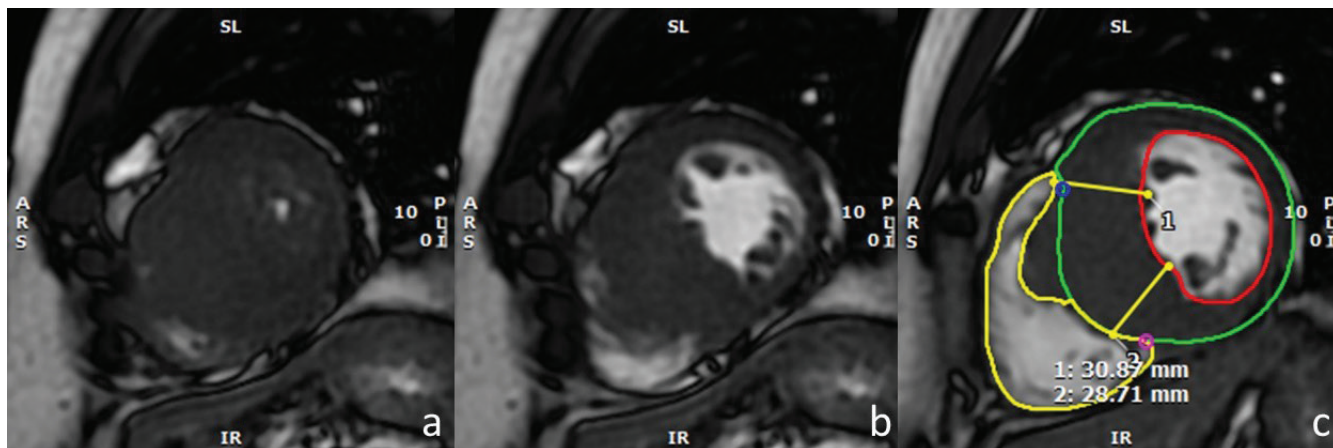
There is also involvement of the crista supraventricularis from the hypertrophy. Septal thickness in diastole was 30 mm, measured excluding the hypertrophic crista supraventricularis (Figure 2c).

Postcontrast series revealed confluent intramyocardial areas of late gadolinium contrast with a characteristic non-ischemic type of distribution. The changes are localized in the area of maximum hypertrophy as a sign of replacement fibrosis. Increased T1 relaxation times in areas of hypertrophy and increased extracellular volume up to 38% (Figure 3 a, b, c).



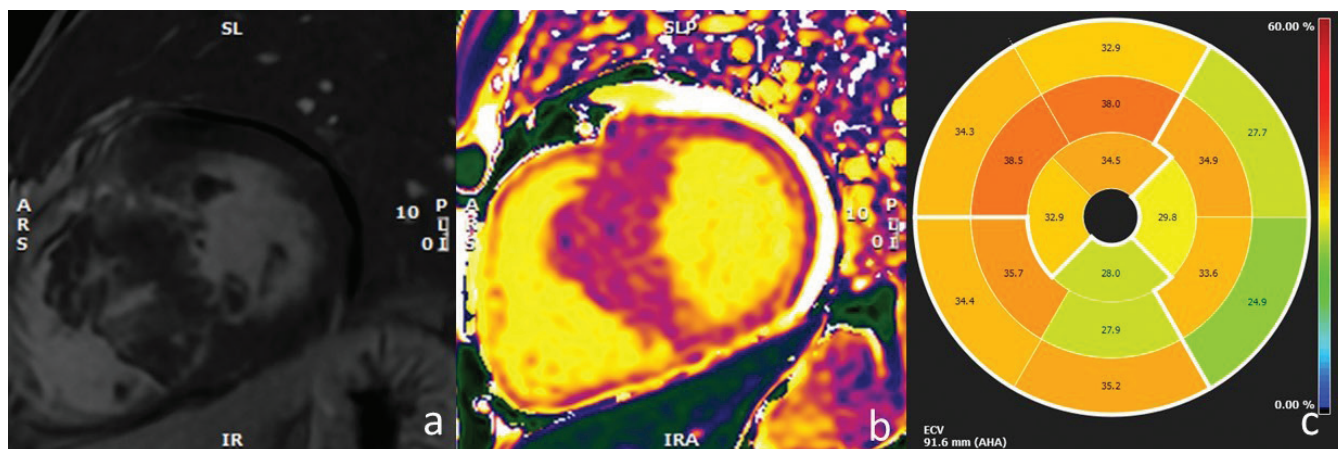
Фиг. 1. Хипертрофична кардиомиопатия със сигмоиден септум. Магнитнорезонансен образ от динамична (bSSFP) секвенция: а) 4-кухилен срез визуализира типичен образ на хипертрофия на септума; б) 2-кухилен срез, показващ хипертрофия на предна стена и тенденция към образуване на апикална аневризма

Fig. 1. Hypertrophic cardiomyopathy with sigmoid septum. Magnetic resonance image, dynamic (bSSFP) sequence: a) Four-chamber view demonstrating a typical appearance of septal hypertrophy; b) Two chamber view showing anterior wall hypertrophy and a tendency towards apical aneurysm formation



Фиг. 2. Хипертрофична кардиомиопатия със сигмоиден септум. Магнитнорезонансни образи от динамична (bSSFP) секвенция: а) по късата ос в систола и б) в диастола; субтотална облитерация на кухината на лява камера в систола; в) маркиран ендокарден контур (в червено) и епикарден контур (в зелено) на лява камера. Хипертрофиралият миокард на криста суправентрикуларис е изключен от измерването на миокарда на септума. Ендокардният контур на дясната камера е маркиран в жълто.

Fig. 2. Hypertrophic cardiomyopathy with sigmoid septum. Dynamic (bSSFP) sequence magnetic resonance images: a) along the short axis in systole and b) in diastole; subtotal systolic left ventricular cavity obliteration; c) marked endocardial contour (in red) and epicardial contour (in green) of the left ventricle. The hypertrophied myocardium of the crista supraventricularis is excluded from the septal myocardium measurement. The endocardial contour of the right ventricle is marked in yellow



Фиг. 3. Хипертрофична кардиомиопатия със сигмоиден септум. Магнитнорезонансни постконтрастни образи: а) късно гадолиниев контрастиране по късата ос; петнисти конфлуирани зони на късно контрастиране с разпределение от интрамиокарден тип в областта на хипертрофията на септума; б) T1 картиране по късата ос на същото ниво демонстрира удължени T1 релаксационни времена в областта на хипертрофията; в) екстрацелуларен обем в 17-сегментна карта, демонстриращ увеличени стойности в хипертрофичните сегменти

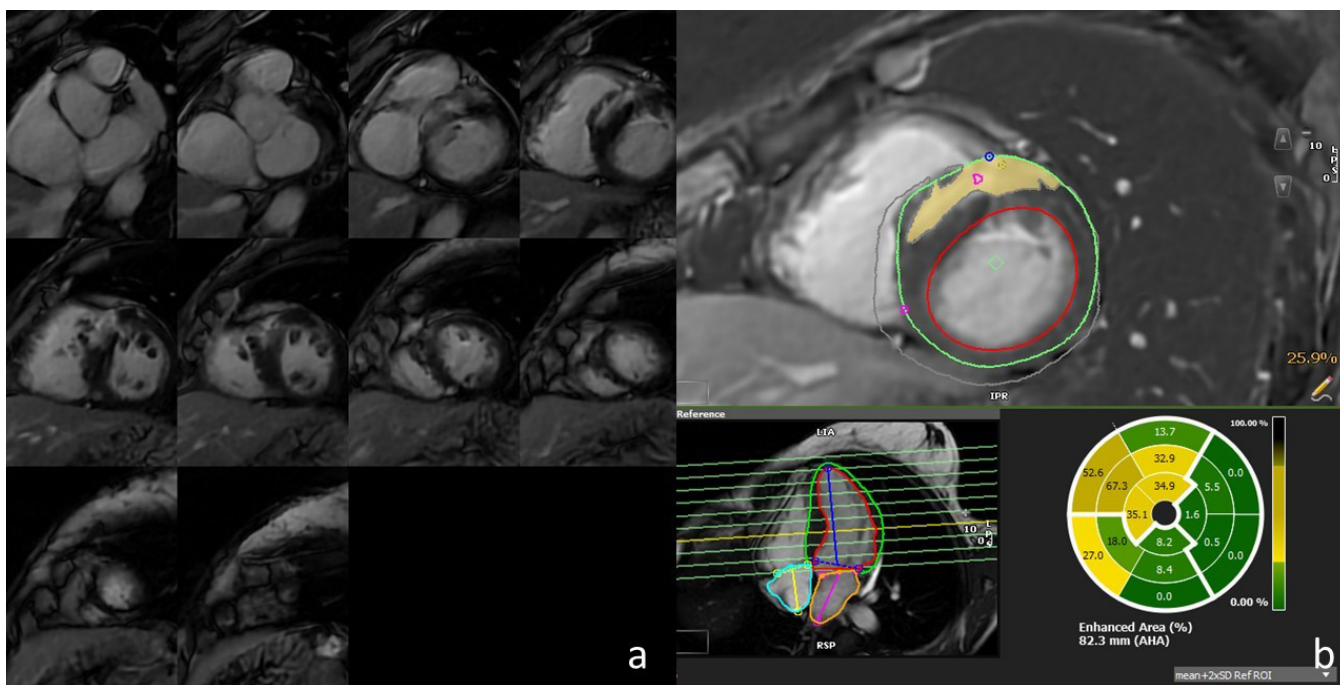
Fig. 3. Hypertrophic cardiomyopathy with sigmoid septum. Magnetic resonance postcontrast images: a) late gadolinium contrast in the short axis; patchy confluent areas of late enhancement with intramyocardial type distribution in the region of septal hypertrophy; b) short-axis T1 mapping at the same level demonstrates prolonged T1 relaxation times in the region of hypertrophy; c) extracellular volume in a 17-segment map demonstrating increased values primarily in the hypertrophied segments

Измерване на заместителна фиброза при асиметрична хипертрофия

Образи по късата ос на сериите на късно гадолиниев контрастиране позволяват визуална оценка на наличието и разпространението на късното контрастиране. С помощта на специализиран софтуер Circle Cardiovascular Imaging Inc е изчислен обем на късното контрастиране 22,69% от общата маса на миокарда при стандартно отклонение $2 \times SD$ (фиг. 4 а и б).

Measurement of replacement fibrosis in asymmetric hypertrophy

Short-axis images of late Gadlow contrast series allow visual assessment of the presence and extent of late contrast. Using Circle Cardiovascular Imaging Inc specialized software, late contrast volume was calculated to be 22.69% of total myocardial mass at a standard deviation of $2 \times SD$ (Figure 4 a, b).



Фиг. 4. Хипертрофична кардиомиопатия със сигмоиден септум: а) серия магнитнорезонансни последователни образи по късата ос, демонстриращи разпространението на хиперинтензни зони на късното гадолиниево контрастиране; б) постобработка на образа чрез специализиран софтуер за изчисляване процента на ангажиране на миокарда от късно контрастиране и представянето на числените стойности на екстрацелуларния обем в 17-сегментна карта

Fig. 4. Hypertrophic cardiomyopathy with sigmoid septum: a) magnetic resonance consecutive short-axis images demonstrating the spread of hyperintense areas of late gadolinium enhancement; b) image post-processing with dedicated software to calculate the percentage of myocardial involvement by late enhancement and the presentation of the extracellular volume values in a 17 segment map

Асиметрична хипертрофия с обструкция на изходния тракт

- Засягането на предимно базален предносептален и преден сегмент често води до обструкция на изходния тракт. При динамичните образи в тези случаи се визуализира патологичен кръвоток в областта на изходния тракт и абнормното движение на предно митрално платно (SAM) (фиг. 5 а и б). Фазово кодирани секвенции за оценка на кръвоток, измерен субаортно, може да изчислят повишения градиент в покой. Митралните платна са удължени при ХКПМ над 26 mm в сравнение със здрави контроли (фиг. 5с).

- Хипертрофичната кардиомиопатия с обратен контур на септум – reversed septal contour – “С” образна форма и едновременно ангажиране на дясна камера от хипертрофията (фиг. 6 а и б).

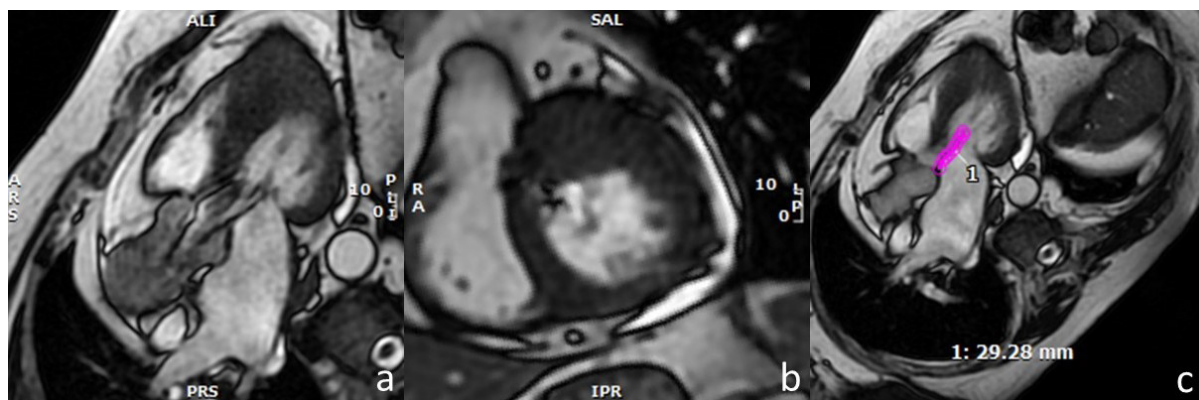
- Късно контрастиране в областта на максимална хипертрофия с интрамиокардно разпределение, с по-висок интензитет и петнист вид и абнормни T1 релаксационни времена в зоните на хипертрофия в лява и дясна камера (фиг. 6 с, d, e, f). Налице е ангажиране на дясната камера с хипертрофията на апикални ѝ сегменти и на предна ѝ стена със систолна облитерация на кухината апикално.

Asymmetric hypertrophy with outflow tract obstruction.

- Predominantly basal prenasal anterior segment involvement often results in outflow tract obstruction. The dynamic images in these cases visualize a pathological jet in the region of the outflow tract and the abnormal movement of the anterior mitral valve (Figure 5 a, b). Phase-encoded sequences for estimating blood flow measured subaortically can calculate the reduced gradient at rest. Mitral leaflets were elongated in HCPM over 26 mm compared with healthy controls (Figure 5c).

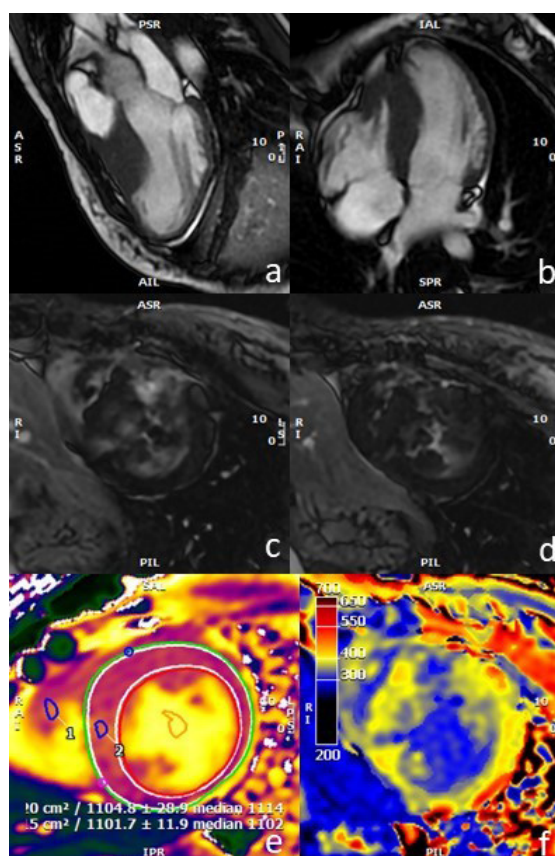
- Hypertrophic cardiomyopathy with reversed septal contour – „C“ shape and simultaneous involvement of the right ventricle by hypertrophy (Figure 6 a and b).

- Late contrast enhancement in the area of maximal hypertrophy with intramyocardial distribution, with high intensity and patchy appearance and abnormal T1 relaxation times in the areas of left and right ventricular hypertrophy (Figure 6 c, d, e, f). Involvement of the right ventricle with the hypertrophy of the apical segments of the right ventricle and anterior wall with systolic obliteration of the cavity apically.



Фиг. 5. Асиметрична хипертрофия с обструкция на изходния тракт на лявата камера: а) магнитнорезонансен 3-кухин срез, показващ ускорения кръвоток (в черен цвят) в областта на изходния тракт на лявата камера; б) образ по късата ос, демонстриращ засягането на базалния преден и предносептален сегмент от хипертрофията; в) 3-кухин образ в диастола – удължено предно митрално платно с дължина 29 mm

Fig. 5. Asymmetric hypertrophy with left ventricular outflow tract obstruction. (a) Magnetic resonance three-chamber view, showing the accelerated blood flow (in black) in the region of the left ventricular outflow tract; b) short-axis image demonstrating the involvement of the basal anterior and anteroseptal segments by hypertrophy; c) three-chamber view in diastole. Elongated anterior mitral valve leaflet measuring 29 mm



Фиг. 6. Хипертрофичната кардиомиопатия с обратен контур на септум: а) магнитнорезонансен 3-кухин срез, хипертрофия на септум с морфология на обратен контур , б) 4-кухин образ – хипертрофия на септум и ангажиране на дясна камера. в) и д) секвенции за късно гадолиниев контрастиране по късата ос – петнисти интрамиокардни зони на късно контрастиране в зоните на хипертрофията в лява и в дясна камера; Т1-картиране преди контрастното усилване; е) и постконтрастно; в) патологични стойности в същите зони.

Fig. 6. Hypertrophic cardiomyopathy with reverse septal contour: a) Magnetic resonance three-chamber section, hypertrophy with reverse septal contour; b) four-chamber view showing septal hypertrophy and right ventricular involvement; c) and d) short-axis late-gadolinium-enhancement sequences – patchy intramyocardial late enhancement in left ventricular and right ventricular hypertrophy areas; T1-mapping before contrast; e) and post-contrast; f) pathological values in the same areas

Симетрична хипертрофична кардиомиопатия

Среща се в около 40% от случаите. Симетрична хипертрофия с белези на интрамиокардно късно гадолиниев контрастиране е типичната морфологична находка (фиг. 7 а и б). Диференциалната диагноза (ДД) включва хипертензивна хипертрофия, атлетично сърце. Обикновено при хипертензивната форма хипертрофията е по-слабо изразена и липсват белези на заместителна фиброза при късното гадолиниев контрастиране (фиг. 7 с и d).

Symmetrical hypertrophic cardiomyopathy

It occurs in about 40% of cases. Symmetrical hypertrophy with signs of intramyocardial late gadolinium contrast is the typical morphologic finding (Figure 7 a, b). DD includes hypertensive hypertrophy, an athletic heart. Usually, in the hypertensive form, the hypertrophy is less pronounced and there are no signs of replacement fibrosis on late gadolinium contrast (Figure 7 c, d).

Хипертрофична кардиомиопатия при апикална хипертрофия

Ангажирането на апикални сегменти от хипертрофия води до облитерация в тази зона и придава форма на “пика” добре видима на четири кухинен срез (фиг. 8 а, б и с). Обикновено липсват белези на обструкция на изходния тракт, тъй като базалните сегменти са със запазена дебелина на миокарда.

Особени форми – инфилтративна кардиомиопатия

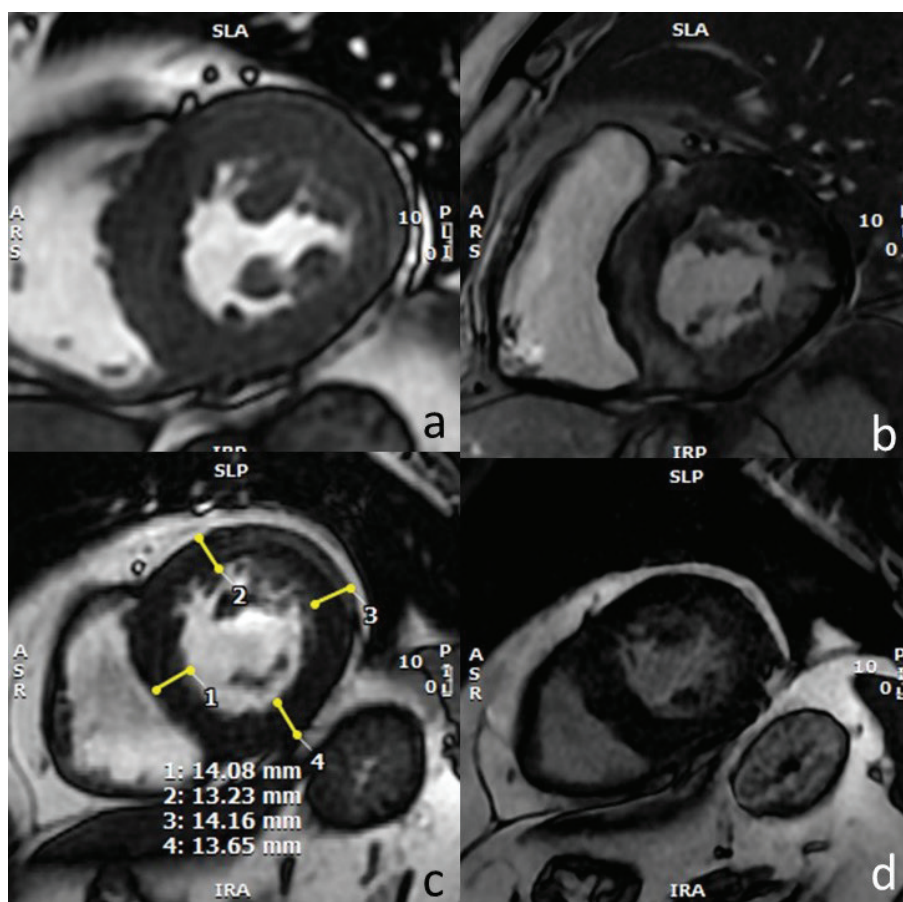
Амилоидозата се включва в спектра на хипертрофичния фенотип. Разграничаването ѝ с магнитнорезонансното изследване на сърцето е лесно, най-вече на базата на промените в тъканните характеристики. Амилоидозата се представя с характерен тип промени на късното гадолиниев контрастиране, а именно дифузно, циркуферентно късно гадолиниев контрастиране с предимно субендокарден тип разпределение. В изразените случаи на амилоидоза е практически невъзможно прилагането на техниката на потискането на миокарда на магнитнорезонансните образи. При T1 картиране се наблюдават силно удължени T1 релаксационни времена и силно увеличен екстрацелуларен обем (фиг. 9 а и б).

Hypertrophic cardiomyopathy in apical hypertrophy

The involvement of an apical segment by hypertrophy leads to obliteration in this area and gives a “peak” shape clearly visible on a four-cavity section (Figure 8 a, b, c). Signs of outflow tract obstruction are usually absent because the basal segments have preserved myocardial thickness.

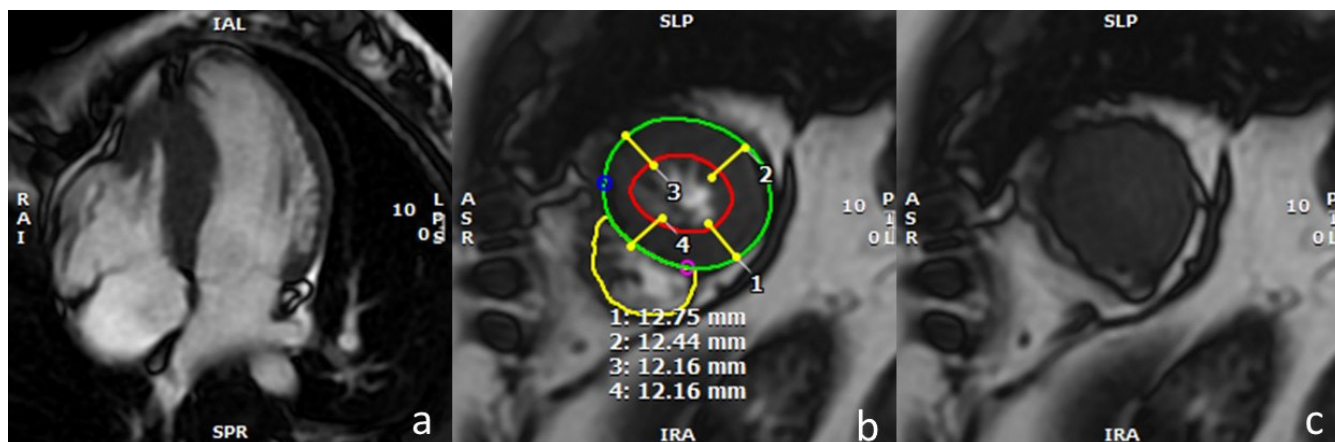
Special forms – infiltrative cardiomyopathy

Amyloidosis is included in the spectrum of the hypertrophic phenotype. Distinguishing it with magnetic resonance imaging of the heart is easy, mostly based on changes in tissue characteristics. Amyloidosis presents with a characteristic type of late gadolinium contrast changes, namely diffuse, circular, late gadolinium contrast with a predominantly sub-endocardial type of distribution. In advanced amyloidosis it is practically impossible to apply nulling technique of the myocardium. In T1 mapping technique pronounced elongation of T1 relaxation times and significant increase in ECV is present (Figure 9 a, b).



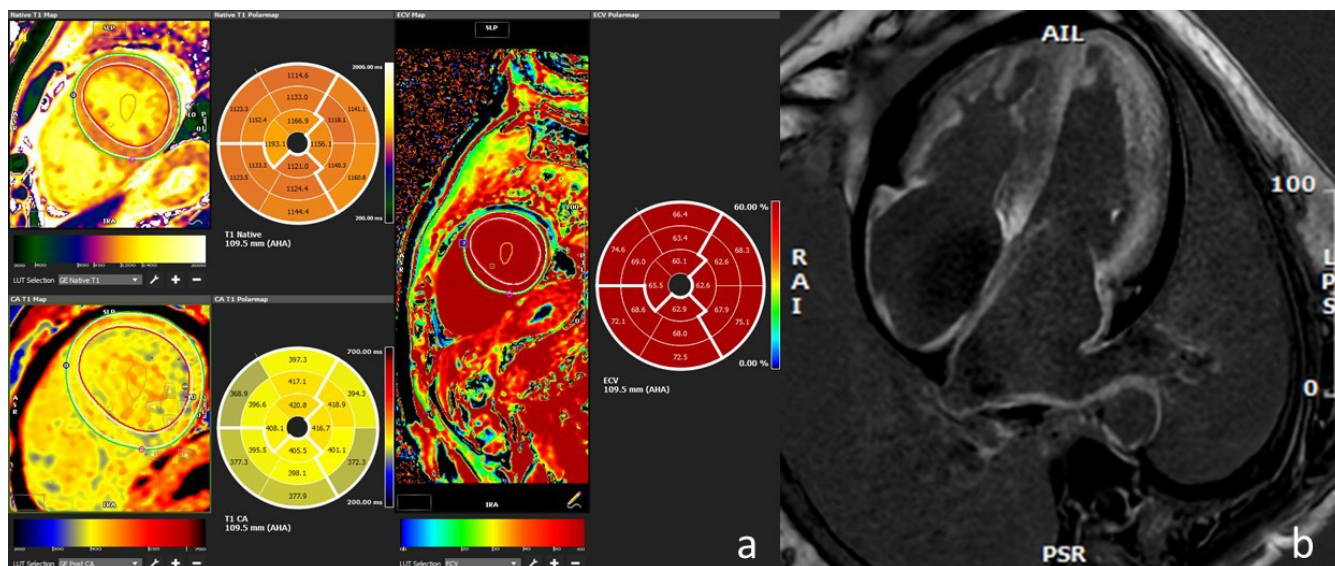
Фиг. 7. Симетрична левокамерна хипертрофия. Магнитно-резонансни образи на: а) и б) симетрична хипертрофична кардиомиопатия със зони на късно контрастиране (б) и с) и д) хипертензивна хипертрофия, равномерно задебелен миокард с дебелина 14 mm и без наличие на зони на късно контрастиране (д)

Fig. 7. Symmetrical left ventricular hypertrophy. Magnetic resonance imaging of а) and б) symmetric hypertrophic cardiomyopathy with late enhancement areas (б), and с) and д) hypertensive hypertrophy, thickened myocardium measuring 14mm and no late enhancement areas (д)



Фиг. 8. Хипертрофична кардиомиопатия при апикална хипертрофия. Магнитно-резонансни образи на: а) 4-кухинен срез, демонстриращ апикално задебелен миокард; б) срез по къса ос на апикални сегменти в диастола, показващ хипертрофия на миокарда; в) систола на срез по късата ос на същото ниво – пълна облитерация на кухината

Fig. 8. Hypertrophic cardiomyopathy in apical hypertrophy. Magnetic resonance images of: a) four-chamber view demonstrating apical thickening of the myocardium; b) short-axis section of apical segments in diastole showing myocardial hypertrophy; c) systolic short-axis view at the same level showing complete obliteration of the cavity



Фиг. 9. Амилоидоза. Магнитно-резонансни образи на: а) T1 картиране преди и след контрастно усилване високостепенно дифузно завишени T1 релаксационни времена и увеличен екстрацелуларен обем, разпределение на стойностите в 17 сегментна цветна карта; б) секвенция на късно контрастиране в 4-кухинен срез – дифузно късно контрастиране с предимно субендокорален тип разпределение

Fig. 9. Amyloidosis. Magnetic resonance images of: a) T1 mapping before and after contrast enhancement and significantly diffusely elevated T1 relaxation times and significantly increased extracellular volume, distribution of values in a 17-segment colour map; b) late contrast sequence in a four-chamber view showing diffuse late enhancement with a predominantly subendocardial type of distribution

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитният резонанс на сърцето има възлова роля в диагностиката и оценката на хипертрофичната кардиомиопатия. Методът визуализира морфологията на промените, оценява на риска и предоставя възможност за проследяването на пациентите.

Не е деклариран конфликт на интереси

CONCLUSION

Magnetic resonance imaging of the heart plays a major role in the diagnosis and evaluation of hypertrophic cardiomyopathy. The method visualizes the morphology of the changes, assesses the risk and provides an opportunity for the follow-up of patients.

No conflict of interest was declared

Библиография/References

1. Elliott P, Andersson B, Arbustini E et al. Classification of the cardiomyopathies: a position statement from the European Society Of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases. *Eur Heart J*. 2008;29(2):270-6. doi: 10.1093/eurheartj/ehm342.
2. Hughes SE. The pathology of hypertrophic cardiomyopathy. *Histopathology*. 2004; 44:412–27. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2559.2004.01835.x>.
3. Hwang J-W, Lee S-C, Kim D et al. Role of cardiovascular magnetic resonance imaging and cardiopulmonary exercise test in predicting composite clinical outcomes in patients with hypertrophic cardiomyopathy. *PLoS ONE*, 2023;18(5): e0285887. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285887>.
4. Hundley WG, Bluemke 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. *Circulation*, 2010;121(22), 2462-2508.
5. Arbelo E, Protonotarios A, Gimeno JR et al; ESC Scientific Document Group. 2023 ESC Guidelines for the management of cardiomyopathies. *Eur Heart J*. 2023;44(37):3503-3626. doi: 10.1093/eurheartj/ehad194.
6. Maron, B.J. Clinical Course and Management of Hypertrophic Cardiomyopathy. *N. Engl. J. Med.* 2018, 379, 655–668.
7. Masarone D, Kaski JP, Pacileo G et al. Epidemiology and Clinical Aspects of Genetic Cardiomyopathies. *Heart Fail Clin*. 2018;14(2):119-128. doi: 10.1016/j.hfc.2017.12.007.
8. Semsarian C, Ingles J, Maron BJ et al. New Perspectives on the Prevalence of Hypertrophic Cardiomyopathy. *J. Am. Coll. Cardiol*. 2015;65:1249-1254.
9. Stankowski, K.; Figliozzi, S.;Lisi et al. Solving the Riddle of Sudden Cardiac Death in Hypertrophic Cardiomyopathy: The Added Role of Cardiac Magnetic Resonance. *J. Cardiovasc. Dev. Dis*. 2023;10:226. <https://doi.org/10.3390/jcdd10060226>.
10. Yao, B., Wu, R., Chen, B. et al. Cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking for the determination of left atrial strain in hypertensive left ventricular hypertrophy and hypertrophic cardiomyopathy. *Clinical Radiology*, 2023;78(5):e409-e416. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2022.12.016>
11. Maron BJ. Clinical Course and Management of Hypertrophic Cardiomyopathy. *N. Engl. J. Med.* 2018;379, 655-668.
12. Fourey D, Care M, Siminovitch KA et al. Prevalence and Clinical Implication of Double Mutations in Hypertrophic Cardiomyopathy: Revisiting the Gene-Dose Effect. *Circ Cardiovasc Genet*. 2017;10(2):e001685. doi: 10.1161/CIRCGENETICS.116.001685. Erratum in: *Circ Cardiovasc Genet*. 2017;10(4):e000038.
13. Masarone D, Kaski JP, Pacileo G et al. Epidemiology and Clinical Aspects of Genetic Cardiomyopathies. *Heart Fail Clin*. 2018;14(2):119-128. doi: 10.1016/j.hfc.2017.12.007.
14. Sen-Chowdhry S, Jacoby D, Moon JC, McKenna WJ. Update on hypertrophic cardiomyopathy and a guide to the guidelines. *Nat Rev Cardiol*. 2016;13(11):651-675. doi: 10.1038/nrcardio.2016.140.
15. Joy G, Lopes LR, Webber M et al. Electrophysiological Characterization of Subclinical and Overt Hypertrophic Cardiomyopathy by Magnetic Resonance Imaging-Guided Electrocardiography. *J Am Coll Cardiol*. 2024;83(11):1042-1055. doi: 10.1016/j.jacc.2024.01.006.
16. Keramida K, Lazaros G, Nihoyannopoulos P. Right ventricular involvement in hypertrophic cardiomyopathy: Patterns and implications. *Hellenic J Cardiol*. 2020;61(1):3-8. doi: 10.1016/j.hjc.2018.11.009.
17. Girmai BS, Sjaastad I, Stokke MK. Right ventricular involvement in hypertrophic cardiomyopathy: evidence and implications from current literature, *Scand Cardiovasc J*, 2021;55(4):195-204.
18. Maron, M. S., Rowin, E. J., Olivotto, I. et al. Contemporary Natural History and Management of Nonobstructive Hypertrophic, 2016.
19. Baxi AJ, Restrepo CS, Vargas D et al. Hypertrophic cardiomyopathy from a to Z: genetics, pathophysiology, imaging, and management. *Radiographics*, 2016;36:335-354.
20. Ommen SR, Mital S, Burke MA et al. 2020 AHA/ACC guideline for the diagnosis and treatment of patients with hypertrophic cardiomyopathy: a report of the American College of Cardiology/ American Heart Association joint committee on clinical practice guidelines. *J Am Coll Cardiol*, 2020;76:e159-e240
21. Pu, C., Hu, X., Lv, S. et al. Identification of fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy: a radiomic study on cardiac magnetic resonance cine imaging. *Eur Radiol*, 2023;33:2301-2311. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-09217-0>
22. Schulz-Menger J, Bluemke DA, Bremerich J et al. Standardized image interpretation and post-processing in cardiovascular magnetic resonance – 2020 update: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR): Board of Trustees Task Force on standardized post-processing. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020;22:19.
23. Mewton N, Liu CY, Croisille P et al. Assessment of myocardial fibrosis with cardiovascular magnetic resonance. *J Am Coll Cardiol*. 2011;57(8):891-903. doi: 10.1016/j.jacc.2010.11.013.
24. Cannavale A, Ordovás KG, Higgins CB. Magnetic resonance imaging of hypertrophic cardiomyopathy. *J Thorac Imaging*. 2013;28(1):W12-8. doi: 10.1097/RTI.0b013e3181e85e8b.
25. Petersen SE, Selvanayagam JB, Francis JM, Myerson SG et al. Differentiation of athlete's heart from pathological forms of cardiac hypertrophy by means of geometric indices derived from cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2005;7(3):551-8. doi: 10.1081/jcmr-200060631.
26. Rodrigues JC, Rohan S, Ghosh Dastidar A et al. Hypertensive heart disease versus hypertrophic cardiomyopathy: multi-parametric cardiovascular magnetic resonance discriminators when end-diastolic wall thickness ≥ 15 mm. *Eur Radiol*. 2017;27(3):1125-1135. doi: 10.1007/s00330-016-4468-2.
27. Noureldin RA, Liu S, Nacif MS et al. The diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy by cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2012;14(1):17. doi: 10.1186/1532-429X-14-17.
28. Olivotto I, Maron MS, Autore C et al. Assessment and significance of left ventricular mass by cardiovascular magnetic resonance in hypertrophic cardiomyopathy. *J Am Coll Cardiol*. 2008;52(7):559-66. doi: 10.1016/j.jacc.2008.04.047.
29. Laissy, J-P, Furber A. SFC, SFR – Imagerie cardiaque. Elsevier Masson, 2021
30. Pons-Lladó G, Carreras F, Borrás X et al. Comparison of morphologic assessment of hypertrophic cardiomyopathy by magnetic resonance versus echocardiographic imaging. *Am J Cardiol*. 1997 Jun 15;79(12):1651-6. doi: 10.1016/s0002-9149(97)00216-6.
31. Partenova A, Kostova-Lefterova D, Genova K. Role of cardiac magnetic resonance imaging in the diagnosis of nonischemic cardiomyopathies. *Bulgarian Cardiology* 2022;28(4):43-58, <https://doi.org/10.3897/bgcardio.28.e97338>.
32. Rickers C, Wilke NM, Jerosch-Herold M et al. Utility of cardiac magnetic resonance imaging in the diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation*. 2005;112(6):855-61. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.104.507723.
33. Maron MS, Maron BJ. Clinical Impact of Contemporary Cardiovascular Magnetic Resonance Imaging in Hypertrophic Cardiomyopathy. *Circulation*. 2015;132(4):292-8. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.114.014283.