



**М.В.ЧАЩИН**, инженер-программист отдела информационных технологий НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН  
**Т.А.БАХМЕТЬЕВА**, аспирант отделения ишемической болезни сердца, НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН  
**Е.Е.БОРОДИНА**, м.н.с. отделения сердечно-сосудистой хирургии НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН  
**А.В.ЕВТУШЕНКО**, д.м.н., заведующий отделением сердечно-сосудистой хирургии НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН  
**Е.Н.ПАВЛЮКОВА**, ведущий научный сотрудник отделения ишемической болезни сердца НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН  
**В.Ю.УСОВ**, д.м.н., заведующий лабораторией томографических методов исследования НИИ кардиологии ТНЦ СО РАМН

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ МИОКАРДА ГИПЕРТРОФИРОВАННОГО ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА ПО ДАННЫМ ЭКГ-СИНХРОНИЗИРОВАННОЙ МРТ

**Нами был разработан метод визуального топического представления гипертрофии миокарда как карты распределения массы миокарда ЛЖ ( $MM_{лж}$ ) по его поверхности. По контурам левого желудочка, автоматически выделенным на поперечных срезах МРТ, строились поверхности эпикарда и эндокарда. Для каждой точки эпикарда рассчитывалась толщина ЛЖ и в соответствии с принятой цветной шкалой присваивался цвет. Такая оценка на основе трехмерной топометрической МРТ-визуализации позволила оценивать распределение  $MM_{лж}$ , соотношение локальной массы и показателей механического напряжения миокарда при патологии, сопровождающейся перегрузкой и гипертрофией миокарда.**

**С**овременные методики оценки степени гипертрофии миокарда, в частности, левого желудочка (ЛЖ) при его перегрузке различного характера или гипертрофических кардиомиопатиях, как правило, ограничиваются геометрическим расчетом общей массы миокарда ЛЖ ( $MM_{лж}$ ) по данным ультразвукового исследования. Методы расчета массы миокарда, в частности  $MM_{лж}$ , представленные и детально разработанные методически [1, 2], в том числе с применением контрастных препаратов и трехмерной визуализации [3], широко используются в повседневной практике и по сути, являются основополагающими в различных контролируемых кардиологических исследованиях. Методы МР-томографии также обеспечивают высокую точность определения  $MM_{лж}$  [4, 5]. Методы ультразвуковой оценки массы миокарда в целом не уступают методам МРТ в точности определения общей массы миокарда левого желудочка как при гипертрофии, так и при повреждении различного характера [6]. На основе в первую очередь ультразвуковых данных осуществляется и классификация гипертрофии миокарда по биомеханическому типу – концентрическому или эксцентрическому. Эти методы применяются также и для индивидуальной оценки регрессии гипертрофии миокарда в ходе медикаментозной терапии артериальной гипертензии или в результате хирургической коррекции клапанных пороков сердца [7, 8].

Однако, существующие методы оценки гипертрофии миокарда ЛЖ не позволяют оценить ее топически, то есть вплоть



до одиночной точки поверхности эпикарда, ограничиваясь в лучшем случае измерением толщины миокарда по передней или задней стенке или перегородке в одном–двух – трех стандартизированных местоположениях. Для топической оценки распределения массы миокарда ЛЖ пока не предлагались и не разработаны соответствующие программные средства и методология оценки.

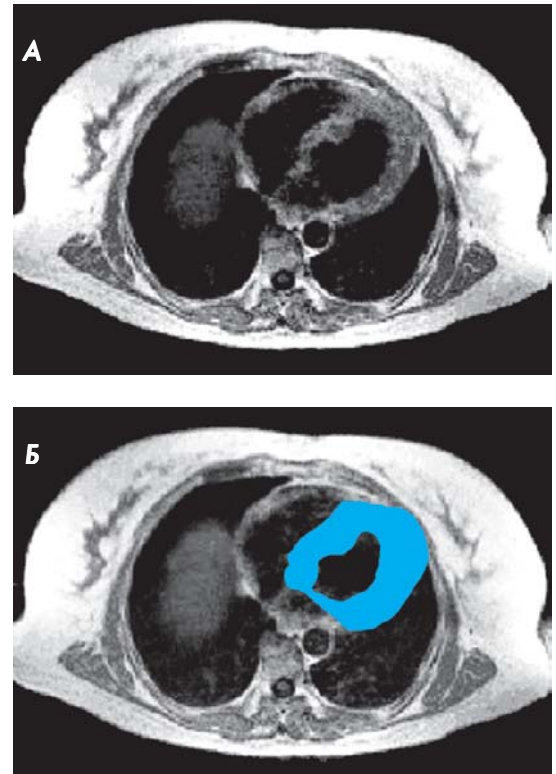
Поэтому нами была сделана попытка разработать метод визуального топического представления распределения массы гипертрофированного миокарда в виде пространственной структуры, отображающей его толщину по всей поверхности ЛЖ. Для этого по данным ЭКГ-синхронизированной МР-томографии сердца был разработан способ построения трехмерных моделей ЛЖ с возможностью расчета величины толщины миокарда.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

**Методика МР-томографического исследования миокарда, обработки и пространственного представления результатов.**

Для решения поставленной задачи было разработано программное обеспечение, с помощью которого первоначальные данные (серии 2Д-изображений, получаемые при МР-томографии) проходили следующие этапы обработки:

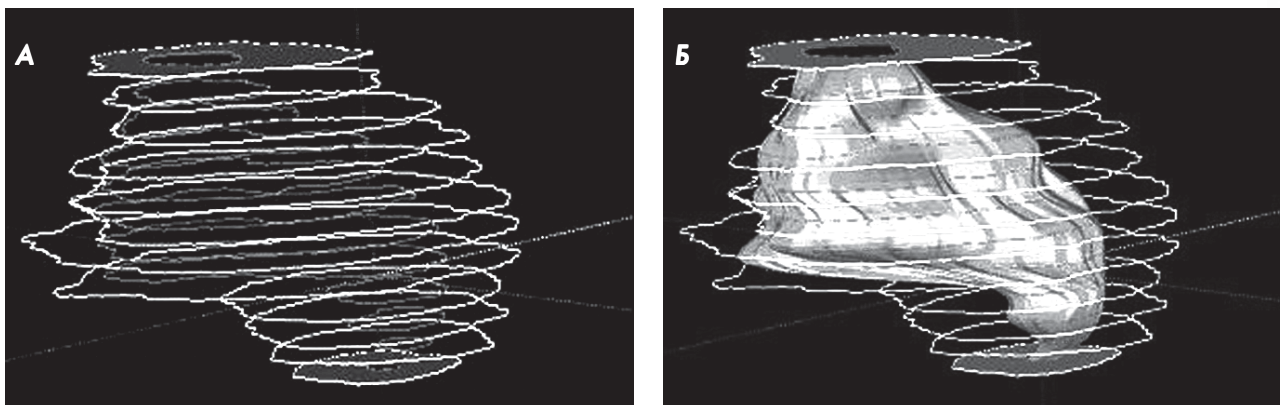
- ♦ на всех изображениях серии выделяются зоны интереса (миокард ЛЖ). Производится это с помощью разработанного специализированного графического редактора. Так как зоны интереса представляют собой, как правило, изоинтенсивные области, то редактор имеет функцию для автоматического выделения таких областей, что значительно ускоряет процесс обработки. Также есть весь необходимый набор для ручного выделения и редактирования исследователем зон интереса (рис. 1А, Б);
- ♦ на основании полученных выделенных областей программа автоматически выделяет опорные границы объекта, уже на основе которых производятся все дальнейшие действия (рис. 2А, Б);
- ♦ данные о полученных границах объекта позволяют программе с использованием интерполяции бикубическими сплайнами рассчитать недостающие межсрезовые поверхности;
- ♦ далее для каждой полученной точки наружной поверхности (эпикард) определяется ближайшая точка эндокарда по декартовому расстоянию:  $l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$  [9], что и является толщиной миокарда в данном месте;



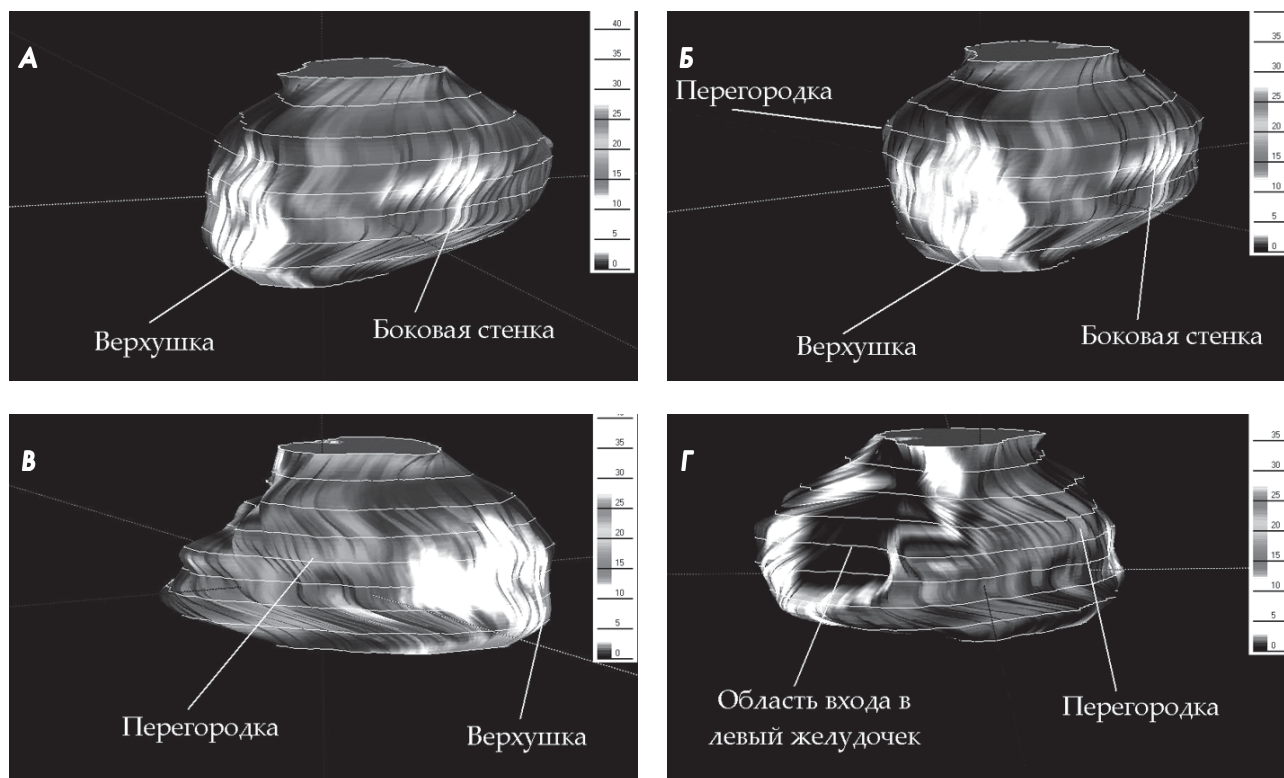
**Рис. 1. Автоматическое выделение на поперечном срезе ЭКГ-синхронизированной Т1-взвешенной МР-томограммы (А) контуров миокарда левого желудочка (Б)**

♦ с использованием цветовой шкалы строится карта толщины миокарда и полученная структура отображается для исследователя (рис. 3А, Б, В, Г).

Интерфейс программы создан с использованием Inprise Delphi 7, графика реализована на OpenGL (пакет GLScene (<http://glscene.sourceforge.net>) для Delphi). Программа рассчитана для работы под ОС Windows 2000/XP, минимальные системные требования: процессор Pentium III – 500 MHz, RAM 128 Mb, video 32 Mb + 3D-accel., HDD 1 Gb. В основном скорость работы программного обеспечения за-



**Рис 2.** Контуры эндокарда и эпикарда левого желудочка, выделенные на срезах ЭКГ-синхронизированной МРТ сердца, пространственно сопоставленные в трехмерную структуру (А); реконструкция всей внутренней поверхности левого желудочка (Б)



**Рис 3.** Визуализация пространственного распределения толщины миокарда по поверхности левого желудочка при трехмерном представлении со стороны боковой стенки (А), верхушки (Б), передней (В) и задней (Г) части перегородки





висит от количества оперативной памяти и качества видеокарты.

Среднее время обработки данных на одного пациента с построением модели составляет 15–25 мин.

Имеющиеся возможности интерфейса позволяют показать или скрыть различные части пространственной модели, наблюдать ее под произвольным углом зрения, строить гистограмму распределения толщины миокарда, а также сохранять все полученные данные.

Все МРТ-исследования выполнялись на низкопольном МР-томографе Magnetom Open (Siemens Medical) с ЭВМ Sun Sparc II (Sun Corp.) в ЭКГ-синхронизированном T1-взвешенном режиме (TR = 750 мс, TE = 20 мс). Интервал задержки при ЭКГ-синхронизации обеспечивал запись изображения миокарда в конце диастолы. Записывались 12–18 поперечных срезов по 7 мм толщиной, полностью охватывавших весь объем сердечной мышцы. Данные исследования с компьютера МР-томографа передавались на специализированный сервер на базе IBM-совместимого компьютера для последующей обработки. В частности по данным срезов МРТ, полностью охватывавших собственно сердце, автоматически по оригинальному градиентному алгоритму выделялись границы миокарда ЛЖ. По всем срезам с выделенными таким образом границами эндокарда и эпикарда восстанавливались внутренняя и наружная поверхности левого желудочка. При этом оси координат X и Y соответствовали по расположению аксиальной плоскости, а Z – оси «ноги-голова». Поскольку толщина среза в нашем случае составляла 5–8 мм, то промежуточные точки поверхности миокарда, расположенные, считая по координате Z, «между» серединами срезов МРТ, получались путем кусочной интерполяции бикубическими сплайнами. Это позволило получить картину поверхности как эпи-, так и эндокарда с разрешением 1–1,5 мм по всем трем пространственным осям.

Затем для каждой точки полученной внешней поверхности ЛЖ рассчитывалась толщина миокарда как расстояние до ближайшей к ней точки эндокарда. Для визуализации полученных величин толщины миокарда ЛЖ каждой точке поверхности в соответствии с принятой цветовой шкалой толщин, присваивался цвет. Таким образом, создавалась возможность оценить распределение

массы по всем отделам миокарда ЛЖ. Суммируя полностью объем ЛЖ, автоматически выделенный нашим методом, определялась и величина  $MM_{ЛЖ}$ , считая плотность ткани  $1,05 \text{ г/см}^3$ .

### Обследованные пациенты

Метод был апробирован на антропоморфных и сферических фантомах, а затем – на данных ЭКГ-синхронизированной МРТ, выполнявшейся у 22 лиц с различными по генезу формами гипертрофии миокарда и у 10 здоровых контрольных лиц. В частности, МР-томография в представленном выше ЭКГ-синхронизированном режиме, была выполнена у 12 пациентов с аортальными пороками (стадия недостаточности кровообращения по NYHA  $\geq$  III,  $MM_{ЛЖ}$  по данным ЭхоКГ  $> 250 \text{ г}$ , в среднем  $340,6 \pm 108,8 \text{ г}$ ), у 3 пациентов с идиопатической гипертрофией миокарда ЛЖ и у 10 пациентов со стойкой артериальной гипертензией без клинических признаков левожелудочковой недостаточности ( $АД_{сисст} > 180 \text{ мм.рт.ст.}$ ,  $MM_{ЛЖ}$  по данным ЭхоКГ  $> 250 \text{ г}$ ). В качестве контрольной группы служили 10 здоровых лиц без признаков перегрузки или гипертрофии миокарда. Всем обследованным выполнялись ультразвуковые исследования сердца в M- и В-режимах, с расчетом  $MM_{ЛЖ'}$  по методу усеченного конуса [1].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

У всех пациентов с аортальным стенозом выявлены признаки значительного патологического ремоделирования миокарда левого желудочка с увеличением индекса  $MM_{ЛЖ}$  более  $134 \text{ г/м}^2$  для мужчин и более  $111 \text{ г/м}^2$  для женщин. У пациентов с гипертрофией миокарда при гипертрофической кардиомиопатии без перегрузки давлением или объемом показатели массы миокарда были несколько выше и составляли более  $157 \text{ г/м}^2$  для мужчин и более  $129 \text{ г/м}^2$  у женщин. При этом показатели массы миокарда левого желудочка, полученные при суммировании объема внутри выделенного контура ЛЖ и при ЭхоКГ по ЛЖ, в целом высокодостоверно коррелировали ( $r = 0,91$ ;  $p < 0,001$ ) между собой. При исследованиях корреляции показателей  $MM_{ЛЖ'}$  полученных с помощью МРТ и с помощью УЗИ в подгруппах лиц с  $MM_{ЛЖ}$  более  $250 \text{ г}$  и меньше, а также с пороками аортального



клапана и без таковых, во всех случаях показатели  $MM_{\text{ЛЖ}}$ , рассчитанные этими двумя, методами сильно и высокодостоверно ( $r > 0,90$ ;  $p < 0,01$ ) коррелировали между собой (рис. 4).

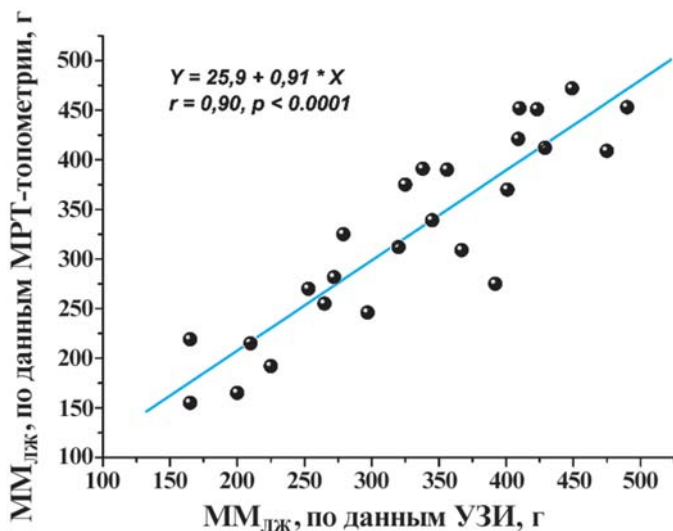
При проверке величин толщины миокарда, автоматически определенных представленным нами методом, по сравнению с величинами, полученными с помощью ручного измерения на срезах МР-томограмм на материале 100 произвольно выбранных точек, оказалось, что расхождения не превысили 1,1 мм и составляли в среднем 0,92 (0,025 мм). Расхождение между величинами толщины миокарда, определенными по данным УЗИ, и автоматически рассчитанными нашим методом, составило во всех случаях также не более 1,15 мм (в среднем 0,99 (0,08 мм). Во всех случаях трехмерное представление гипертрофии миокарда ЛЖ позволило определить распределение массы миокарда по его стенкам и их вклад в совокупную  $MM_{\text{ЛЖ}}$ , тип гипертрофии.

Различий в точности определения толщины миокарда между боковой стенкой ЛЖ, передней стенкой и перегородкой не было. Таким образом можно считать, что ошибка определения толщины миокарда в произвольно

взятой точке поверхности левого желудочка не превышала в нашем случае 1 мм. Учитывая, что исследования проводились на низкопольном МР-томографе, с возможностями получения ЭКГ-синхронизированных срезов сердечной мышцы в клинических условиях не тоньше 6 мм, это следует признать вполне приемлемым показателем.

Однако целью разработки представленной здесь методики оценки было все же не повышение точности измерения толщины миокарда на отдельном срезе, а формирование целостной трехмерной картины представления массы миокарда левого желудочка. При анализе литературы, анализирующей методологию количественной оценки  $MM_{\text{ЛЖ}}$ , в том числе и последнего времени [10, 11], мы не встретили методической постановки вопроса о необходимости автоматически оценивать распределение массы миокарда в пространстве. При этом, однако, неизменно подчеркивается, что процесс прогрессирования и обратного развития гипертрофии ЛЖ биомеханически сложен, вовлекает камеры сердца не одновременно и что для детальной оценки необходима не простая расчетная оценка совокупной массы миокарда ЛЖ, а измерение его толщины в ряде различных отделов миокарда [10]. Типичной патологией, требующей такого подхода, является асимметричная гипертрофия перегородки [10, 12]. Обычно оценка степени утолщения миокарда как раз и производится в нескольких местоположениях, но не на всем протяжении, в первую очередь из-за отсутствия соответствующего инструментария.

Представляется, что сформулированный нами здесь подход к проблеме и программные средства пространственной оценки распределения  $MM_{\text{ЛЖ}}$  как раз отвечают требованиям топической характеристики гипертрофии ЛЖ. В частности, при исследовании гипертрофической кардиомиопатии с формированием внутрижелудочкового градиента давления за счет образования подклапанного утолщения мышечной части перегородки трехмерное представление толщины миокарда в целом и перегородки локально позволило точно и очевидно оценить пространственное расположение области гипертрофии перегородки, а также соотношение ее по степени тяжести с имевшейся у этого же пациента гипертрофией боковой стенки.



**Рис. 4. Корреляция величин массы миокарда левого желудочка, определенных по данным ЭКГ-синхронизированной МР-томографии и референтных по данным УЗИ [1]**





Обоснованно предполагать, что метод впоследствии позволит топически оценивать регресс гипертрофии ЛЖ при протезировании пороков аортального клапана и медикаментозной коррекции артериальной гипертензии.

Однако, очевидно, что представленная здесь методика оценки пространственного распределения массы миокарда ЛЖ не является по своей сути специфичной только для ЭКГ-синхронизированной МРТ. Представленный алгоритм цветного визуального представления распределения массы миокарда может быть использован и на основе данных спиральной ЭКГ-синхронизированной рентгеновской КТ, данных радионуклидных исследований.

Мы проводили свое исследование на относительно не новом низкопольном МР-томографе. Вполне очевидно, что при сочетании представленной методики с данными ЭКГ-синхронизированной МРТ сердца на каком-либо высокопольном МР-томографе, во-первых, легкодостижимо существенно лучшее пространственное разрешение опре-

деления границ – эндокарда и эпикарда. Во-вторых, благодаря толщине среза в 1 мм и менее, достижимой на таких установках, межсрезовая интерполяция контуров эндокарда и эпикарда может и не потребоваться. Наконец, существенно более краткий характер ЭКГ-синхронизированных исследований сердца на высокопольных томографах может позволить строить пространственное распределение толщины стенки ЛЖ не только в конечно-диастолический момент сердечного цикла, но и в любой другой, давая возможность оценить в пространственно-трехмерном представлении также биомеханику ЛЖ.

Однако уже имеющийся аппарат оценки пространственного распределения  $MM_{ЛЖ}$  на основе трехмерной топометрической МРТ-визуализации позволяет упростить количественную оценку гипертрофии миокарда как в одиночных исследованиях, так, по-видимому, и при проспективном наблюдении прогрессирования и обратного развития этого процесса.

## ЛИТЕРАТУРА



1. Devereux R.B., Alonso D.R., Lutas E.M., Gottlieb G.J., Campo E., Sachs I., Reichek N. Echocardiographic assessment of left ventricular hypertrophy: comparison to necropsy findings//Am. J. Cardiol., 1986. – V.57. – С.450–458.
2. Daniels S.R., Meyer R.A., Liang Y.C., Bove K.E. Echocardiographically determined left ventricular mass index in normal children, adolescents and young adults//J. Am. Coll. Cardiol. – 1988. – V.12. – С.703–708.
3. Kasprzak J.D., Vletter W.B., van Meegen J.R. et al. Improved quantification of myocardial mass by three-dimensional echocardiography using a deposit contrast agent//Ultrasound Med. Biol. – 1998. – V.24. – С.647–653.
4. Soler R., Rodriguez E., Marini M. Left ventricular mass in hypertrophic cardiomyopathy: assessment by three-dimensional and geometric MR methods//J. Comput. Assist. Tomogr. – 1999. – V.23. – С.577–582.
5. Myerson S.G., Bellenger N.G., Pennell D.J. Assessment of left ventricular mass by cardiovascular magnetic resonance/Hypertension. – 2002. – V.39. – С.750–755.
6. Kuhl H.P., Bucker A., Franke A. et al. Transesophageal 3-dimensional echocardiography: in vivo determination of left ventricular mass in comparison with magnetic resonance imaging//J. Am. Soc. Echocardiogr. – 2000. – V.13. – С.205–215.
7. de Simone G., Muiesan M.L., Ganau A., Longhini C., Verdecchia P., Palmieri V., Agabiti-Rosei E., Mancía G. Reliability and limitations of echocardiographic measurement of left ventricular mass for risk stratification and follow-up in single patients: the RES trial. Working Group on Heart and Hypertension of the Italian Society of Hypertension. Reliability of M-mode Echocardiographic Studies//J. Hypertens. – 1999. – V.17(pt. 2). – С.1955–1963.
8. Palmieri V., Dahlof B., DeQuattro V., Sharpe N., Bella J.N., e Simone G., Paranicas M., Fishman D., Devereux R.B. Reliability of echocardiographic assessment of left ventricular structure and function: the PRESERVE study. Prospective Randomized Study Evaluating Regression of Ventricular Enlargement//J. Am. Coll. Cardiol. – 1999. – V.34. – С.1625–1632.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А./В справочник по математике. – М., 1980. – С.314–315.
10. Шиллер Н., Осипов М. А. Клиническая эхокардиография. – М.: Практика, 2005. – 871 с.
11. Monaghan M.J. Role of real time 3D echocardiography in evaluating the left ventricle Heart. – 2006. – V.92. – С.131–136.
12. Asin Cardiel E., Moya Mur J.L. Doppler echocardiography in hypertrophic myocardopathy//Rev. Esp. Cardiol. – 1996. – V.49. – №2. – С.136–145.

