

Trojrozměrná echokardiografie v současné praxi

Petr Lupínek, Tomáš Marek

Klinika kardiologie, Institut klinické a experimentální medicíny, Praha, Česká republika

Lupínek P, Marek T. **Trojrozměrná echokardiografie v současné praxi.** *Cor Vasa* 2011;53:34–38.

Článek stručně rekapituluje historii a vývoj trojrozměrné echokardiografie, vysvětluje její principiální výhody a přínos, způsoby snímání obrazu a technická omezení. Současně pojednává o stávajících klinických aplikacích trojrozměrné echokardiografie. V některých indikacích, jako jsou volumetrie levé komory, planimetrie mitrálního ústí u mitrálních stenóz, popis mechanismů mitrální insuficience a morfologie mitrální chlopně, zobrazení paraprotézových dehiscencí a defektů síňového septa, je trojrozměrná echokardiografie jednoznačným přínosem, jednoznačně předčí dvojrozměrnou echokardiografii nebo k ní přidává významnou informaci navíc. Další klinické aplikace jsou zatím ve stadiu výzkumu a vývoje.

Je podán přehled faktorů, které zatím limitují širší klinické využití trojrozměrné echokardiografie. Jsou to technické problémy, které jsou s pokrokem technologie a zdokonalováním softwaru postupně překonávány, a v následujících letech lze proto očekávat postupné rozšiřování klinického použití trojrozměrné echokardiografie.

Klíčová slova: Trojrozměrná echokardiografie – Volumetrie levé komory – Mitrální regurgitace – Paraprotézová dehiscence

Lupínek P, Marek T. **Three-dimensional echocardiography in current practice.** *Cor Vasa* 2011;53:34–38.

The article deals briefly with the history and development of three-dimensional echocardiography (3DE), explains its principal advantages and benefits, modes of image acquisition, and technical limitations. Current clinical applications are reviewed. In some indications such as left ventricular volumetry, planimetry of the stenotic mitral orifice, identification of the mechanisms of mitral regurgitation, and description of mitral valve morphology, depiction of paraprosthetic dehiscences, and atrial septal defects, 3DE outperforms two-dimensional echocardiography or adds new information to it. Other clinical applications are being studied and developed.

In addition, an overview of factors limiting more widespread clinical use of 3DE is provided. These technical problems are expected to be overcome by technological progress and improving software and by gradual spread of clinical use of 3DE in the years to come.

Key words: Three-dimensional echocardiography – Left ventricular volumetry – Mitral regurgitation – Paraprosthetic dehiscence

Adresa: MUDr. Petr Lupínek, CSc., Klinika kardiologie, IKEM, Vídeňská 1958/9, 140 21 Praha 4, e-mail: petr.lupinek@ikem.cz

Úvod

Vývoj echokardiografie od jejích počátků směřuje od jednorozměrné (v 50.–70. letech postupně A-mode, B-mode a M-mode) přes dvojrozměrnou až k trojrozměrné. Trojrozměrná echokardiografie sice nejpřirozeněji odráží skutečnost, ale je nejnáročnější z hlediska technologie. Z toho důvodu nebylo po dlouhou dobu technicky možné dosáhnout trojrozměrného echokardiografického zobrazení v reálném čase. První trojrozměrné ultrazvukové systémy pro vyšetření srdce se začaly objevovat od roku 1974.¹ V tehdejší době vycházely z postupného snímání dvojrozměrných řezů s časováním pomocí EKG a dechové aktivity a následnou počítačovou trojrozměrnou rekonstrukcí. Použití trojrozměrné echokardiografie v této podobě bylo velmi omezené z důvodů časově náročného a složitého snímání a zpracování obrazu. Pokrok v ultrazvukové a počítačové technologii v 90. letech umožnil vznik první generace systémů pro trojrozměrnou echokardiografii

v reálném čase za použití matrixových sond, zatím s malým počtem elementů („sparse array“, 256 elementů).^{2,3} Z tohoto důvodu poskytovaly tehdejší přístroje pouze tenké řezy, blízké dvojrozměrným, s nízkým prostorovým rozlišením. Velkým mezníkem bylo uvedení druhé generace přístrojů pro trojrozměrnou echokardiografii v reálném čase (real time 3D echocardiography – RT3DE) na trh krátce po roce 2000.⁴ Tyto přístroje jsou vybaveny matrixovou sondou s vysokým počtem elementů („fully sampled matrix array“, 2 500 a více elementů). Umožňují snímání menších výseků zobrazení v reálném čase nebo širších výseků v téměř reálném čase složením z několika dílčích objemů za krátkého zadržení dechu a s EKG časováním. V roce 2007 byla uvedena do používání první sonda pro 3D transezofageální echokardiografii v reálném čase (RT3D TEE). V současné době jsou na trhu přístroje pro RT3D TTE od firem Philips Medical Systems, GE Healthcare, Siemens a Toshiba a systém pro RT3D TEE od firmy Philips.

Základní výhody trojrozměrné echokardiografie

Trojrozměrná echokardiografie (3DE) umožňuje prohlížet srdeční struktury z různých stran, jako by byly pozorovány z anatomických řezů, a získat tak lepší prostorovou představu o jednotlivých strukturách a jejich vztazích. Odstraňuje potřebu mentální rekonstrukce z jednotlivých rovin, která je při dvojrozměrné echokardiografii (2DE). Lze získat „chirurgický“ pohled na některé struktury, především na mitrální chlopeň z levé síně, což umožní chirurgovi posouzení z pohledu, který posléze uvidí v operačním poli. Trojrozměrná echokardiografie poskytuje i další, jinak nedosažitelné pohledy – např. na defekt síňového septa nebo subaortální membránu „en face“.

Při volumetrii srdečních dutin není třeba používat geometrické předpoklady, což se jeví perspektivní třeba pro kvantifikaci geometricky tak složitého útvaru, jako je pravá komora. Se zlepšujícím se rozlišením lze očekávat přínos 3DE pro zkrácení doby snímání – různé roviny, řezy a pohledy bude možno prohlížet dodatečně z několika 3D souborů dat nasnímaných během krátkého času.

Technické možnosti a způsoby snímání

Současná RT3DE má zatím podstatně horší časové a prostorové rozlišení, než na jaké jsme zvyklí u dvojrozměrné

echokardiografie. „Volume rate“ se u prostého 3D zobrazení pohybuje kolem 20/min a při barevném dopplerovském mapování (colour flow mode – CFM) zpravidla pod 10/min, běžně 7–8/min. Horší prostorové rozlišení se projevuje zřetelně i výpady ve strukturách, které jsou jemné a méně echogenní (fossa ovalis, normální aortální chlopeň, trikuspidální chlopeň), jsou v méně příznivém úhlu vůči dopadu ultrazvukového paprsku (aortální chlopeň z parasternálního přístupu) nebo vzdálenější od sondy.

Technickými omezeními jsou dány i **způsoby snímání**. Při snímání způsobem „live“ se zobrazuje v reálném čase úzký sektor, obvykle $60^\circ \times 30^\circ$. Při snímání způsobem „zoom“ se zobrazuje výsek blížící se tvarem komolému kuželu, omezený do hloubky. Oba uvedené způsoby poskytují obraz v reálném čase a mnohdy (zejména při TEE) i v přijatelné kvalitě. Nicméně při malém objemu zobrazeného prostoru se ztrácí možnost posouzení prostorových vztahů mezi srdečními strukturami a je ztížena orientace. Tento problém překonává snímání způsobem „full volume“, který zobrazí výseč kolem $90^\circ \times 90^\circ$. V tomto případě je však výseč složena z několika dílčích objemů, které jsou snímány při zadržení dechu (obvykle čtyři cykly při prostém 3DE a sedm cyklů při barevném dopplerovském mapování) a počítačově spojeny na základě časování pomocí EKG. Zobrazení se tak neděje úplně v reálném čase a může být zatíženo artefakty při pohybu vyšetřujícího či pacienta. Podobně mohou vzniknout artefakty při arytmiích. Nepra-

videlný srdeční rytmus znemožní získat kvalitní záznam tímto způsobem.

V současné době pokračuje vývoj přístrojů schopných zachytit v uspokojivé kvalitě širokou výseč během jediného srdečního cyklu („single beat acquisition“) a tyto přístroje již začínají být uváděny na trh. I zde však zůstává zachována možnost snímání skládáním dílčích objemů, protože poskytuje vyšší rozlišení. Matrixovou sondu pro RT3DE lze také s výhodou použít pro současné zobrazení ve dvou či třech rovinách (biplanární či triplanární) bez významnější ztráty kvality oproti 2DE.

Podání trojrozměrného obrazu a jeho zpracování

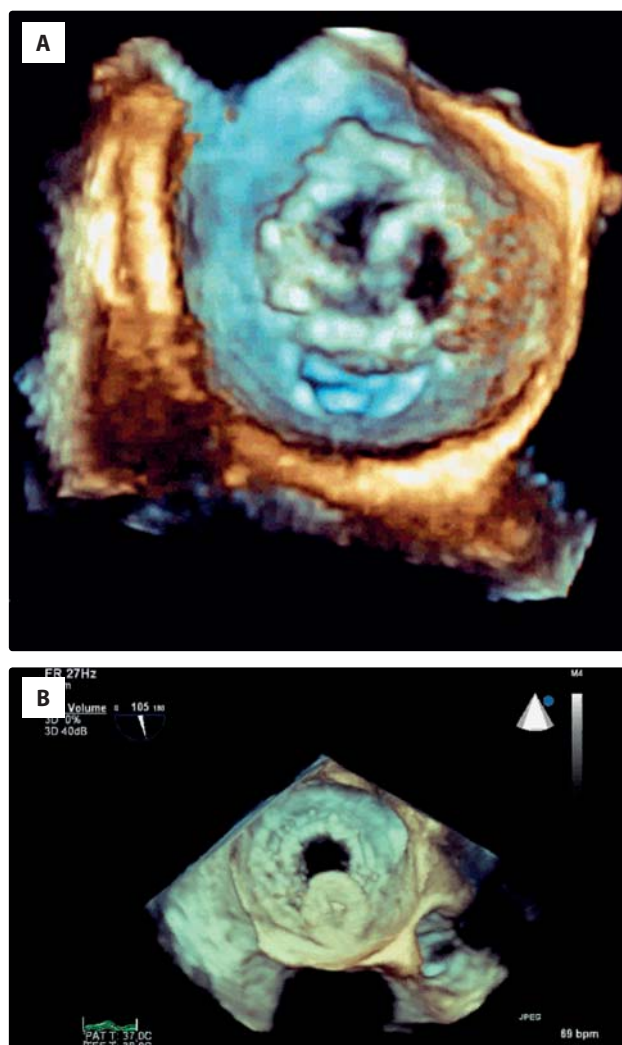
Pro trojrozměrnou echokardiografii je důležité nejen snímání obrazu, ale i jeho zpracování a podání vhodným způsobem na dvojrozměrné obrazovce přístroje („rendering“). Toto zobrazení musí poskytnout příslušnou iluzi pozorování trojrozměrných struktur pomocí stínování a perspektivy a musí umožňovat pozorování z různých směrů a řezů. Nutnou podmínkou hodnocení trojrozměrného echokardiogramu, zejména při použití širokého sektoru, je ořezávání („cropping“). Aby bylo vidět dovnitř do srdce, je nutno při prohlížení „odříznout“ část stěny. Dosáhnout takového pohledu a oříznutí, aby zájmová struktura byla optimálně zobrazena, vyžaduje mnohdy určitou dovednost a zabere čas, zejména u echokardiografů s menší zkušeností s 3DE. Výrobci 3D ultrazvukových systémů proto postupně vyvíjejí uživatelsky přátelštější způsoby pro „cropping“. Standardizované protokoly zobrazení omezující nutnost „croppingu“, které zkrátí vyšetření, jsou jedním z předpokladů pro širší klinické využití 3D echokardiografie.

Zavedené aplikace trojrozměrné echokardiografie

Trojrozměrná echokardiografie se ukázala jako přesnější než 2DE při volumetrii levé komory, planimetrii mitrálního ústí při mitrální stenóze, při morfologickém popisu mit-



Obrázek 1 3D TEE – pohled ze síně na myxomatózní mitrální chlopeň s prolapsem scallopů P1 a P2



Obrázek 2 Trojrozměrný echokardiografický obraz mitrální bioprotézy z jícnového vyšetření. (A) Pohled ze síněové strany na mitrální bioprotézu a paravalvulární dehiscenci. (B) Paravalvulární dehiscence po pokrytí okluderem.

rální chlopně u prolapsu a při přesném popisu a lokalizaci paraprotézových dehiscencí a leaků. Zpřesňuje také popis morfologie defektů síňového septa.

Kvantifikace velikosti levé komory

Trojrozměrná echokardiografie má oproti 2DE zásadní výhodu v tom, že eliminuje zkosení levé komory a nutnost geometrických předpokladů pro výpočet objemů (jsou počítány voxely v prostoru ohraničeném endokardem). Extrapolace endokardu v hůře zobrazených segmentech je mnohdy snadnější v 3DE, protože lze extrapolovat nejen v longitudinálním, ale i v meridionálním směru. Naopak poněkud širší plocha 3D sondy přiléhající k hrudní stěně („footprint“) může ztížit nalezení volného prostoru mezi žebry (což se projeví hlavně u dilatovaných komor) a nižší rozlišení ztěžuje detekci endokardu u hůře vyšetřitelných nemocných.

Ve studiích srovnávajících RT3DE s magnetickou rezonancí jako stávajícím zlatým standardem vyšla 3DE ve srovnání s 2DE jako jednoznačně přesnější metoda s vyšší repro-

dukovatelností.^{5–7} Oproti magnetické rezonanci však i 3DE podhodnocuje objemy levé komory přibližně o 25–30 %. Rozdíl je způsoben nižší rozlišovací schopností 3DE, která tak dobře neodliší trabekuly a zahrnuje je do kontury stěny.⁶ Při použití echok kontrastu je toto podhodnocení objemů z větší části eliminováno.⁷ Ejekční frakce je v průměru shodná při vyšetření oběma metodami. Časová náročnost volumetrie levé komory z 3DE je poněkud větší než z 2DE. V tomto ohledu si lze slibovat zlepšení od dalšího vývoje softwaru pro (polo)automatickou detekci endokardu.

Planimetrie mitrálního ústí

Trojrozměrná echokardiografie umožňuje nalézt správné místo pro řez stenotickým mitrálním ústím v nejužším místě, v okrajích cípů. Vyvaruje se tak nadhodnocení plochy mitrálního ústí při jeho planimetrii u mitrální stenózy. Planimetrie plochy mitrálního ústí pomocí RT3D vykazuje lepší shodu s invazivním stanovením pomocí Gorlinova vzorce než planimetrie z 2DE, která má tendenci plochu ústí nadhodnocovat.^{8,9}

Popis mechanismu mitrální insuficience

Jícnová trojrozměrná echokardiografie předčí 2DE TEE ve správnosti a přesnosti popisu prolabujících segmentů mitrální chlopně a přetržených šlašinek.^{10–12} Poskytuje „chirurgický“ pohled z levé síně na mitrální chlopeň, což má význam pro plánování techniky operace kardiokirurgem (obrázek 1).

Zobrazení paraprotézových dehiscencí

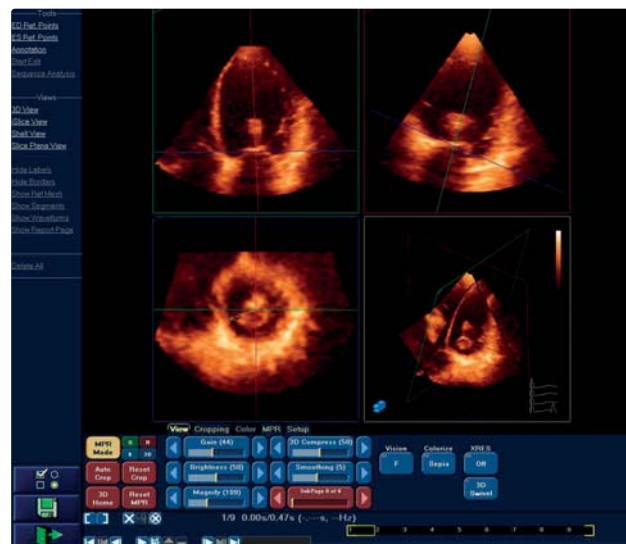
Jícnová trojrozměrná sonda předčí jednoznačně 2DE TEE v přesné lokalizaci a popisu paraprotézových dehiscencí a leaků u chlopněních náhrad (obrázky 2A, 2B). Je proto metodou volby pro monitoraci katetrizačních uzávěrů paraprotézových dehiscencí, kde poskytuje velmi dobrou navigaci v průběhu výkonu.^{13–15}

Zobrazení defektů síňového septa

Trojrozměrná echokardiografie umožňuje pohled na síňové septum z projekce „en face“. Oproti dvojrozměrné echokardiografii dokáže v některých případech správněji určit tvar a počet defektů. Zejména to platí pro jícnové vyšetření. Úskalím mohou být arteficiální výpady obrazu v tenké fossa ovalis, jeví se falešně jako defekty.

Vyvíjející se aplikace trojrozměrné echokardiografie

Vzhledem k tomu, že není potřeba využívat k volumetrii geometrických předpokladů, má 3DE velký potenciál pro volumetrii dalších srdečních dutin. Jde především o volumetrii levé síně^{16,17} a zejména pravé komory,¹⁸ jejíž tvar je složitý a volumetrie pomocí 2DE problematická. Limitem je obtížnější detekce endokardu u těchto srdečních oddílů. V případě levé síně je to kvůli větší vzdálenosti od sondy při transthorakálním vyšetření a u pravé komory je problémem její zvýšená trabekularizace.



Obrázek 3 Standardizované zobrazení levé komory (snímané z apikálního přístupu) ve třech rovinách a ve 3D obraze na přístroji Philips iE33 se softwarem Q-Lab

Trojrozměrná echokardiografie byla použita i pro hodnocení dyssynchronie kontrakce levé komory, ale přesvědčivé potvrzení prediktivní hodnoty pro odpověď na resynchronizační léčbu zatím chybí, stejně jako u ostatních echokardiografických parametrů.¹⁹ Hodnocení dyssynchronie z 3DE je pracné a náchylné k chybám u většiny pacientů, snad s výjimkou velmi dobře vyšetřitelných. Vyžaduje totiž editaci poloautomaticky detekovaných kontur endokardu nejen na konci diastoly a systoly, ale ve všech jednotlivých fázích systoly.

Pomocí 3D lze lépe stanovit průřez výtokového traktu levé komory pro výpočet plochy aortálního ústí rovnici kontinuity. Výtokový trakt levé komory nemá totiž průřez kruhový, ale eliptický a standardní měření z 2D z projekce na dlouhou osu levé komory jej poněkud podhodnocuje.

Trojrozměrná echokardiografie umožňuje také přímé měření průtoků přes chlopnění ústí integrací rychlostí po jednotlivých „voxelech“ (elementárních objemech).²⁰ Tato aplikace může mít v budoucnu zásadní přínos pro vyšetřování nemocných s chlopněními vadami.

Při posuzování mechanismu mitrální insuficience je s pomocí specializovaného softwaru možná trojrozměrná analýza tvaru mitrálního prstence a jeho změn v průběhu srdečního cyklu.

V kvantifikaci mitrální insuficience jsou zkoumány možnosti hodnocení 3D PISA (proximal isovelocity surface area)²¹ a 3D vena contracta.

Trojrozměrné zobrazení lze použít také pro zátěžovou echokardiografii. Kinetiku levé komory je možno sledovat současně ve více rovinách včetně rovin nepřístupných přímo. Kupříkladu u pacienta, který není vyšetřitelný z parasternálních projekcí, lze z hrotového přístupu získat řadu řezů na krátkou osu levé komory. Omezením je zatím horší prostorové a zejména časové rozlišení, které se může projevit při vyšší srdeční frekvenci. Doba akvizice obrazu je sice oproti 2DE výrazně zkrácena, ale na druhé straně je výrazně delší doba analýzy. Přesnost testu zatím není lepší než u zátěžové 2DE.²²

Faktory bránící rutinnímu klinickému využití 3D echokardiografie

V současné době není stále 3D echokardiografie široce klinicky využívána jako součást běžného echokardiografického vyšetření. Má to několik důvodů. Důležitým limitujícím faktorem je prostorové a časové rozlišení, které je podstatně horší než u 2D echokardiografie. Dalším významným omezením je skutečnost, že pro zobrazení většího objemu v relativně dobré kvalitě je nutné složit obraz z několika dílčích objemů, takže se zobrazení neděje úplně v reálném čase a podléhá artefaktům z pohybu nebo z nepravidelného rytmu. Vyžaduje také současný záznam EKG. I když nejnovější přístroje nabízejí zobrazení plného objemu v reálném čase, pro lepší rozlišení se často výše uvedený způsob používá.

V současné době se proto nejčastěji provádí v první fázi kompletní 2D vyšetření a teprve poté v případě potřeby a po výměně sondy cílené 3D vyšetření. Navíc 2D sonda poskytuje lepší 2D zobrazení než 3D sonda. K tomu, aby se 3D vyšetření stalo integrální součástí echokardiografického vyšetřovacího protokolu, by přispěla jediná sonda s kvalitním zobrazením 2D i 3D bez nutnosti její výměny během vyšetření.

Významnou roli v použitelnosti 3D echokardiografie hraje také způsob podání obrazu. Pro široké využití 3D echokardiografie je nutné, aby byly zpracování i analýza 3D dat uživatelsky snadné a časově nenáročné. Tomu napomáhá automatické zobrazení standardních 3D a 2D pohledů pro každé echokardiografické okno (tj. pro parasternální, apikální přístup) (obrázek 3), (semi)automatická kvantifikace a uživatelsky jednoduché rozhraní pro ořezávání („cropping“) 3D obrazu. Tyto způsoby hodnocení jsou v neustálém vývoji a zdokonalují se.

Dalším nezanedbatelným faktorem, který omezuje využití 3D echokardiografie, je ukládání dat z 3DE vyšetření. Zatímco digitální záznam běžného 2DE vyšetření představuje zhruba 300–500 MB, u 3DE vyšetření je to až 1,5 GB. To představuje problém z hlediska přenosu dat i celkové kapacity pro jejich ukládání. Očekává se, že připravovaný standard DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) pro 3DE by měl v otázkách komprese a ukládání dat pomoci.

Závěr

Trojrozměrná echokardiografie již v současné době předchází dvojrozměrnou echokardiografii v některých klinických aplikacích. Limitem jejího širšího klinického využití jsou především horší prostorové a časové rozlišení spolu s náročnějším zpracováním a analýzou dat. S tím, jak jsou tyto překážky odstraňovány, lze v následujících letech očekávat postupné rozšiřování 3D echokardiografie do klinické praxe.

Literatura

1. Dekker DL, Piziali RL, Dong E Jr. A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions. *Comput Biomed Res* 1974;7:544–553.
2. von Ramm OT, Smith SW. Real time volumetric ultrasound imaging system. *J Digit Imaging* 1990;3:261–266.
3. Sheikh K, Smith SW, von Ramm O, Kisslo J. Real-time, three-dimensional echocardiography: feasibility and initial use. *Echocardiography* 1991;8:119–125.
4. Sugeng L, Weinert L, Thiele K, Lang RM. Real-time three-dimensional echocardiography using a novel matrix array transducer. *Echocardiography* 2003;20:623–635.
5. Siu SC, Levine RA, Rivera JM, et al. Three-dimensional echocardiography improves noninvasive assessment of left ventricular volume and performance. *Am Heart J* 1995;130:812–822.
6. Mor-Avi V, Jenkins C, Kuhl HP, et al. Real-time three-dimensional echocardiographic quantification of left ventricular volumes: multicenter study of validation with magnetic resonance imaging and investigation of sources of error. *JACC Cardiovasc Imaging* 2008;1:413–423.
7. Jenkins C, Moir S, Chan J, et al. Left ventricular volume measurement with echocardiography: a comparison of left ventricular opacification, three-dimensional echocardiography, or both with magnetic resonance imaging. *Eur Heart J* 2009;30:98–106.
8. Zamorano J, Cordeiro P, Sugeng L, et al. Real-time three-dimensional echocardiography for rheumatic mitral valve stenosis evaluation: an accurate and novel approach. *J Am Coll Cardiol* 2004;43:2091–2096.
9. Sebag IA, Morgan JG, Handschumacher MD, et al. Usefulness of three-dimensionally guided assessment of mitral stenosis using matrix-array ultrasound. *Am J Cardiol* 2005;96:1151–1156.
10. Sugeng L, Shernan SK, Weinert L, et al. Real-time three-dimensional transesophageal echocardiography in valve disease: comparison with surgical findings and evaluation of prosthetic valves. *J Am Soc Echocardiogr* 2008;21:1347–1354.
11. Manda J, Kesanolla SK, Hsuing MC, et al. Comparison of real-time two-dimensional with live/real-time three-dimensional transesophageal echocardiography in the evaluation of mitral valve prolapse and chordae rupture. *Echocardiography* 2008;25:1131–1137.
12. Grewal J, Mankad S, Freeman WK, et al. Real-time three-dimensional transesophageal echocardiography in the intraoperative assessment of mitral valve disease. *J Am Soc Echocardiogr* 2009;22:34–41.
13. Bavikatti VV, Babaliaros VC, Lerakis S. Utility of three-dimensional echocardiography in percutaneous closure of paravalvular leak. *Echocardiography* 2008;26:852–854.
14. Fischer GW, Adams DH. Real-time three-dimensional TEE-guided repair of a paravalvular leak after mitral valve replacement. *Eur J Echocardiogr* 2008;9:868–869.
15. Kronzon I, Sugeng L, Perk G, et al. Real-time three-dimensional transesophageal echocardiography in the evaluation of post-operative mitral annuloplasty ring and prosthetic valve dehiscence. *J Am Coll Cardiol* 2009;53:1543–1547.
16. Jenkins C, Bricknell K, Marwick TH. Use of real-time three-dimensional echocardiography to measure left atrial volume: comparison with other echocardiographic techniques. *J Am Soc Echocardiogr* 2005;18:991–997.
17. Artang R, Migrino RQ, Harman L, et al. Left atrial volume measurement with automated border detection by 3-dimensional echocardiography: comparison with magnetic resonance imaging. *Cardiovasc Ultrasound* 2009;7:16–23.
18. Tamborini G, Brusoni D, Torres Molina JE, et al. Feasibility of a new generation three-dimensional echocardiography for right ventricular volumetric and functional measurements. *Am J Cardiol* 2008;102:499–505.
19. Miyazaki C, Redfield MM, Powell BD, et al. Dyssynchrony indices to predict response to cardiac resynchronization therapy. A comprehensive prospective single-center study. *Circ Heart Fail* 2010;3:565–573.
20. Poh KK, Levine RA, Solis J, et al. Assessing aortic valve area in aortic stenosis by continuity equation: a novel approach using real-time three-dimensional echocardiography. *Eur Heart J* 2008;29:2526–2535.
21. Matsumura Y, Fukuda S, Tran H, et al. Geometry of the proximal isovelocity surface area in mitral regurgitation by 3-dimensional color Doppler echocardiography: Difference between functional mitral regurgitation and prolapse regurgitation. *Am Heart J* 2008;155:231–238.
22. Sawada SG, Thomaides A. Three-dimensional stress echocardiography: the promise and limitations of volumetric imaging. *Curr Opin Cardiol* 2009;24:426–432.

Došlo do redakce 2. 1. 2011

Přijato 2. 1. 2011