ZOBRAZENÍ SRDCE VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIÍ S DUÁLNÍ ENERGIÍ ZÁŘENÍ X

CARDIAC IMAGING WITH DUAL-ENERGY COMPUTED TOMOGRAPHY

původní práce

Jiří Ferda[1]
Jan Baxa[1]
Thomas Flohr[2]
Bernhard Schmidt[2]
Boris Kreuzberg[1]

[1]Radiodiagnostická klinika LF UK a FN, Plzeň

[2]Siemens Medical Solutions, CT division, Department of Research and Development, Forchheim, Deutschland

Přijato: 15. 2. 2009.

Korespondenční adresa:

doc. MUDr. Jiří Ferda, PhD.
Radiodiagnostická klinika
LF UK a FN
Alej Svobody 80, 306 40 Plzeň
e-mail: ferda@fnplzen.cz

Podpořeno výzkumným záměrem MSM 0021620819.

ABSTRAKT

Ferda J, Baxa J, Flohr T, Schmidt B, Kreuzberg B. Zobrazení srdce výpočetní tomografií s duální energií záření X

Cíl. Zhodnotit zkušenosti s CT vyšetřením srdce duální energií záření X (DECT).
Materiál a metoda. Bylo provedeno 40 CT srdce (29 mužů, 11 žen) s použitím dvouzdrojového CT přístroje v režimu expozice dvojí energie záření X (systém A – 140 a systém B – 100 kV). Průměrný věk v souboru byl 58,3 v rozpětí 48–81 let. CCTA byla indikována z důvodu podezření na koronární nemoc (27×) nebo se jednalo o kontrolní vyšetření u nemocných po operaci aortokoronárních bypassů (13×). Pro perfuzní analýzu byl využit algoritmus dekompozice tří materiálů s generováním map distribuce jódu z obrazů 140 a 100 kV s časovým rozlišením 330 ms a s šíří obrazu 1,5 mm. U 20 nemocných byla porovnána perfuzní analýza DECTs perfuzním zobrazením myokardu magnetickou rezonancí a zobrazením pozdního sycení myokardu.
Výsledky. Dostatečné zobrazení perfuze bylo získáno u 88 % nemocných, hodnotitelný angiogram u všech nemocných. Při porovnání s perfuzním zobrazením myokardu magneticku rezonancí bylo dosaženo shody v nálezu u 85 % nemocných.
Závěr. DECT je slibnou metodou ke zhodnocení stavu koronárních tepen a perfuzního objemu myokardu z dat jediného vyšetření.
Klíčová slova: výpočetní tomografie, duální energie záření X, CT srdce, myokardiální perfuze.

ABSTRACT

Ferda J, Baxa J, Flohr T, Schmidt B, Kreuzberg B. Cardiac imaging with dual-energy computed tomography

Aim. To evaluate the experience with the dual-energy cardiac CT (DECT).
Material and method. Forty examinations (29 males, 11 females, mean age 58.3 ranging 48– 81 year) using dual-energy CT on dual-source system operating in dual energy mode were performed in suspected coronary arterial disease (27×) and in patients who underwent aortocoronary bypass graft surgery (13×). Based on the two sets of images (140 kV and 100 kV) images of 1.5 mm thickness, 330 ms of temporal, the three-material-decomposition algorithm was used to create maps of iodine distribution and these maps were used in myocardial perfusion analysis. Perfusion analysis using DECT was compared with perfusion and delayed enhancement magnetic resonance imaging in 20 patients.
Results. Sufficient perfusion imaging was obtained in 88% of patients; assessable angiogram of coronaries was reconstructed in all patients. Comparing the perfusion analyses, the same finding was found both on DECT and MRI in 85% of patients.
Conclusion. DECT of the heart is the promising imaging method including the imaging of coronary anatomy and myocardial perfusion obtained from a single data acquisition.
Key words: computed tomography, dual-energy imaging, cardiac CT, myocardial perfusion.

ÚVOD

Největším nedostatkem CT-angiografie věnčitých tepen (CCTA) zůstává v současnosti nemožnost posouzení myokardiální perfuze. Pouze nevýraznější změny u akutního či chronického infarktu myokardu bývají dobře patrné. Pro posouzení relevantního hemodynamického vlivu stenózy věnčité tepny však pouhá analýza obrazů získaných při obvyklé akvizici dat pro CTA věnčitých tepen nestačí.

Běžná akvizice dat pro CCTA je prováděna 100 nebo 120 kV. Zobrazení tkání s využitím CT s duální energií záření (DECT) se v klinické praxi začalo využívat od roku 2008 s rozvojem nové akviziční techniky pomocí početního tomografu se dvěma zdroji záření. Jednou z posledních aplikací, které jsou k dispozici, je DECT srdce. Pomocí rozdílné absorpce tkání a jódu při rozdílné energii záření X je možné vypočítat obsah jódu ve tkáni, a zobrazit tak virtuální perfuze orgánu. Při CT-angiografii jsou získána data v době, kdy prochází poprvé kontrastní látka myokardem. Jak zobrazit perfuzi analýzou distribuce jódu v módu duální energie záření X a jak tuto analýzu využít v zobrazení srdce, je cílem našeho sdělení.

MATERIÁL A METODA

V průběhu čtyř měsíců jsme provedli celkem 40 CCTA srdce (29 mužů, 11 žen) s použitím dvouzdrojového CT přístroje (Definition, Siemens, Forchheim, Německo) v režimu expozice dvojí energie záření X u nemocných se sinusovým rytmem a srdeční frekvencí do 75 úderů za minutu, vždy na základě informovaného souhlasu. Průměrný věk v souboru byl 58,3 v rozpětí 48–81 let. CCTA byla inidikována z důvodu podezření na koronární nemoc (27×) nebo se jednalo o kontrolní vyšetření u nemocných po operaci aortokoronárních bypassů (13×).

Data byla získána v režimu dvojí energie záření X tak, že systém A používal expozici 140 kV/100 mAs a systém B 100 kV/165 mAs. Oba systémy využívaly kolimaci 2 × 32 × 0,6 mm, periodu rotace gantry 330 ms a faktor stoupání v závislosti na srdeční frekvenci 0,2 (50/min) – 0,35 (75/min). Pro zobrazení srdce byla data oběma systémy získávána v poli o poloměru 260 mm.

Všechna vyšetření byla provedena po intravenózní aplikaci neiontové kontrastní látky iomeprol (Bracco, Milano, Itálie) s koncentrací 400 mgI/ml. Kontrastní látka byla aplikována v objemu 100 ml průtokem 5 ml/s s proplachem 50 ml fyziologického roztoku také průtokem 5 ml/s.

Obrazová data byla rekonstruována pro zobrazení věnčitých tepen se šíří axiálního obrazu 0,6 mm s rekonstrukčním incrementem 0,4 mm v kvalitě 140 kV, 100 kV a v kvalitě ekvivalentní 120 kV. Použito bylo rekonstrukčního algoritmu (kernelu) rutinně využívaného pro CCTA – B26f) Pro CT-angiografii bylo využito algoritmu segmentace s časovým rozlišením 165 ms pro každou z akvizičních detektorových soustav. Pro CCTA byla využita funkce nalezení optimálního diastolického zobrazení.

Druhá sada obrazů šíře 1,5 mm byla rekonstruována s rekonstrukčním incrementem 1 mm, využitý algoritmus dosahoval časového rozlišení „jen" 330 ms z důvodu potlačení šumu. Obrazy byly rovněž rekonstruovány v kvalitě 140 kV, 100 kV a v kvalitě ekvivalentní 120 kV a byly využity k analýze myokardiální distribuce jódu. Pro rekonstrukci dat byla zvolena pevně fáze 60% R-R intervalu, aby se předešlo artefaktům z nesprávné koregistrace.

Při hodnocení zobrazení byla nejprve rekonstruována CCTA v prostřední softwaru Syngo Circulation (Siemens, Forchheim, Německo) a byla provedena cévní analýza všech tří základních povodí – pravá věnčitá tepna, kmen levé věnčité tepny s ramus interventricularis anterior a nakonec kmen levé věnčité tepny a ramus circumflexus. Po hodnocení stavu koronárního řečiště bylo provedeno vyhodnocení distribuce jódu v myokardu pomocí softwarového prostředí DualEnergy (Siemens, Forcheim, Německo). Použitím algoritmu „heart perfusion blood volume" byla rozložena denzita myokardu na denzitu příslušnou vlastní tkáni (bez přidání hodnoty obsaženým jódem) a na denzitu příslušnou distribuci jódu. Pomocí barevných map (s nastavením barevné škály typu „micro delta hot metal"), které představují virtuální perfuzní objem, byla zhodnocena jednak kvalita zobrazení, jednak přítomnost perfuzních defektů.

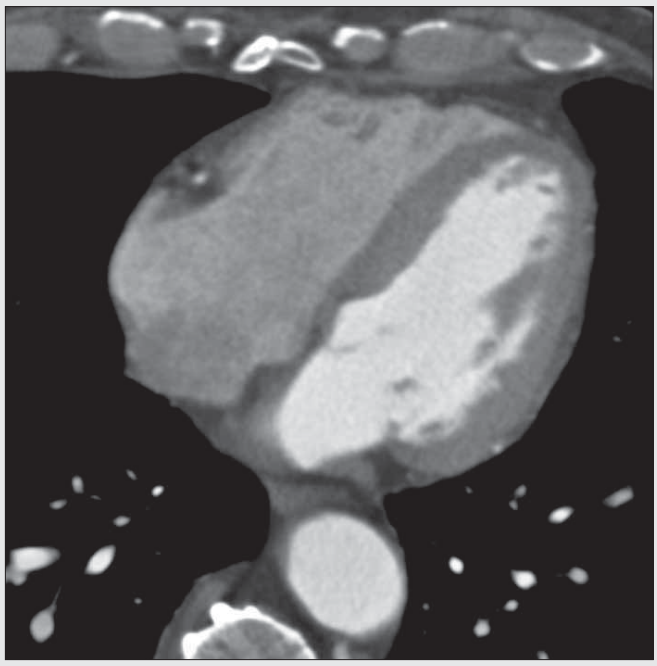
U celkem 20 subjektů (průměrný věk 54,6 let, rozpětí 45–81 let; 11 mužů, 9 žen) bylo pro porovnání provedeno perfuzní zobrazení magnetickou rezonancí (subpopulace byla vyšetřena na základě souhlasu lokální etické komise). Porovnávali jsme perfuzní studii myokardu provedenou pomocí T1 vážené SR turboFLASH sekvence (TR 173,75 ms, TE 1,22 ms, FA 15 st.) s dynamickou vícenásobnou s EKG synchronizovanou akvizicí po podání 7,5 ml gadobutrolu (Bayer Schering Pharma, Berlin, Německo) s aplikační rychlostí 2 ml/s. Dynamické perfuzní zobrazení bylo provedeno ve třech rovinách v krátké ose srdeční a v rovině ideální čtyřdutinové projekce. Dále jsme doplnili zobrazení pozdního sycení myokardu pomocí T1 vážené inversion recovery 3D-FLASH sekvence (TR 3,41 ms, TE 1,21 ms a FA 10 st.), hodnota TI byla zvolena dle předem provedené sekvence s různým spektrem TI (60–360 ms).

Nálezy perfuzních map získaných pomocí analýzy DECT byly porovnány s perfuzními MR obrazy v době maximálního nasycení myokardu a také s MR obrazy pozdního sycení myokardu kontrastní látkou.

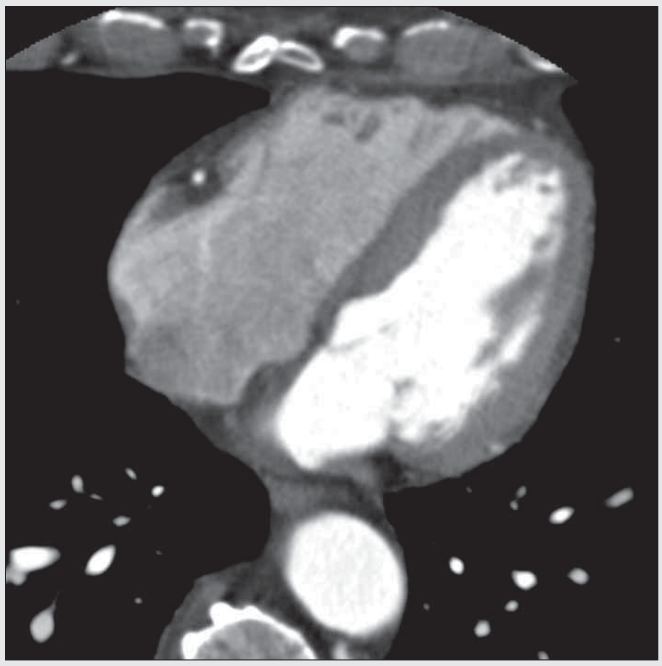
VÝSLEDKY

Celkem u 36 zobrazení byly získány obrazy pro CCTA s excelentní kvalitou rekonstrukce věnčitých tepen, u čtyř (10 %) vyšetření byly obrazy zatíženy pohybovými artefakty, nicméně bylo možno hodnotit stav koronárního řečiště. Perfuzní obrazy DECT byly rekonstruovány s minimem artefaktů u 35 nemocných, u čtyř (10 %) nemocných byly výraznější artefakty z pulzací, u jediného (2,5 %) se výrazně uplatnil Hounsfieldův artefakt z vysoce denzního obsahu pravého srdce. U dalších šesti nemocných byly přítomny minimální artefakty pulzačního charakteru bez vlivu na možnost hodnocení perfuze. U pěti (12,5 %) nemocných bylo přítomno nehomogenní nasycení myokardu v kraniokaudálním směru, které však neovlivnilo možnost hodnocení perfuzního defektů.

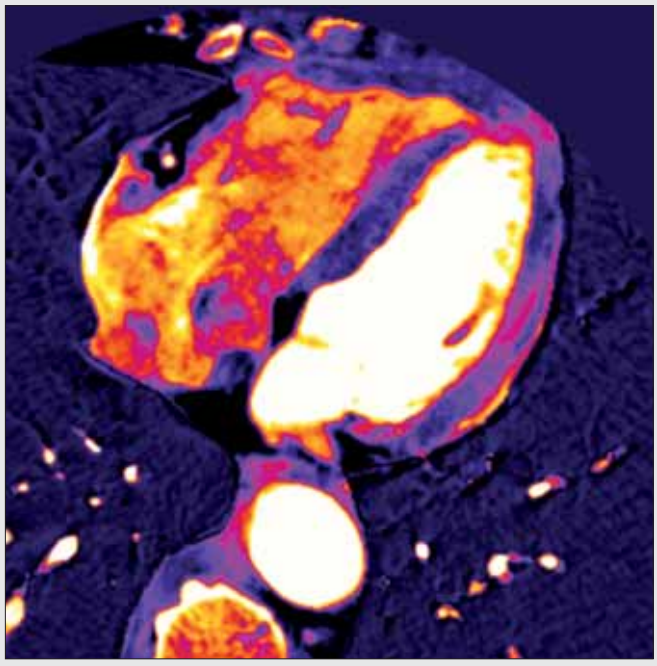
Při analýze 20 nemocných vyšetřených pomocí DECT a MRI bylo shledáno, že ve čtyřech případech nebyl přítomen perfuzní defekt ani při MRI ani na DECT, u jediného nemocného byl defekt pozorován pouze na MRI, nikoliv na DECT, u dvou nemocných byl perfuzní defekt nalezen na DECT, ale



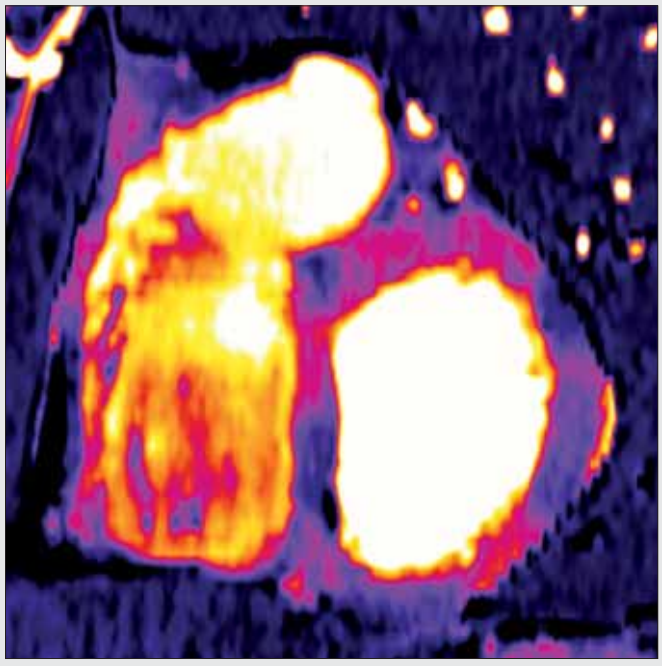
▲ Obr. 1A



▲ Obr. 1B

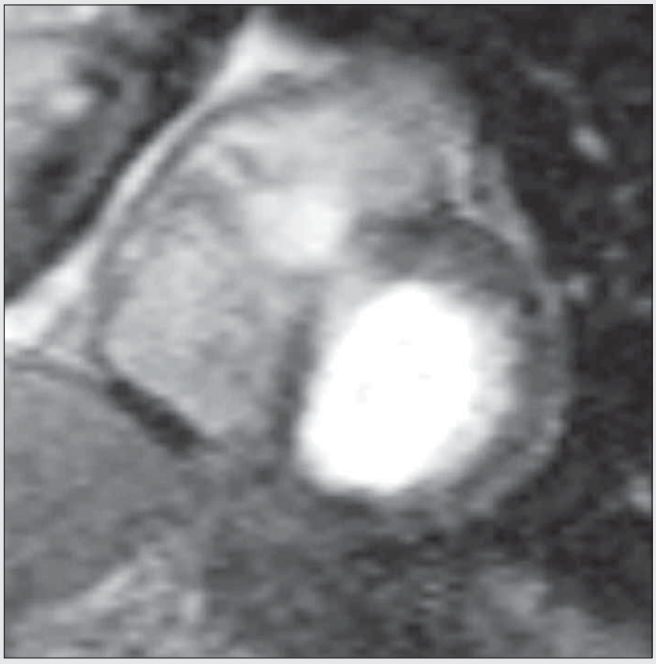


▲ Obr. 1C

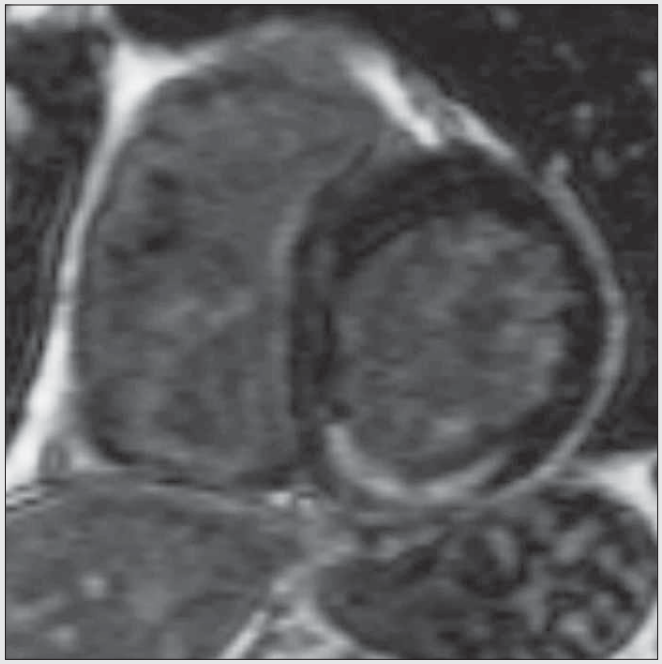


▲ Obr. 1D

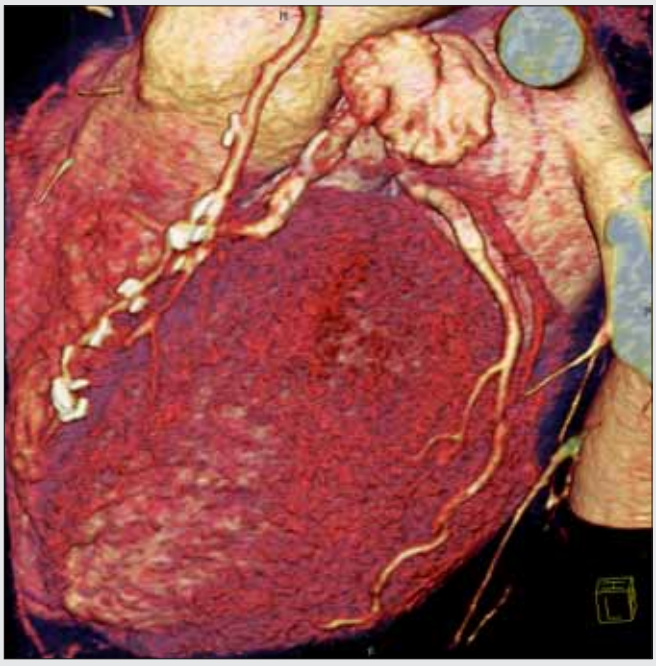
Obr. 1. ***Zobrazení perfuze myokardu pomocí DECT u nemocného po založení mammárního monobypassu na ramus interventricularis anterior***
A – obraz 140 kV; B – obraz 100 kV; C, D – mapy distribuce jódu ukazují hypoperfuze septa, laterální stěny a spodní stěny; E – perfuzní obraz MRI zobrazující stejný rozsah hypoperfuze; F – MRI obraz pozdního sycení ukazuje rozsah prodělaného infarktu zadní stěny; G, H – CCTA ukazující těžké postižení povodí ramus interventricularis anterior a stent v průchodné pravé věnčité tepně
Fig. 1. ***Perfusion imaging of the myocardium using DECT in patient after mammarian mono-bypass to LAD***
A – 140 kV image; B – 100 kV image; C, D – iodine distribution maps showing hypoperfused septum, inferior wall and free lateral wall of the left ventricle; E – MRI perfusion image showed the same extent of hypoperfused zone; F – MRI image of delayed enhancement detect the scar of the myocardial infarction of posterior wall; G, H – coronary CTA detected severe impairment of the LAD territory ant stent implanted in the RCA



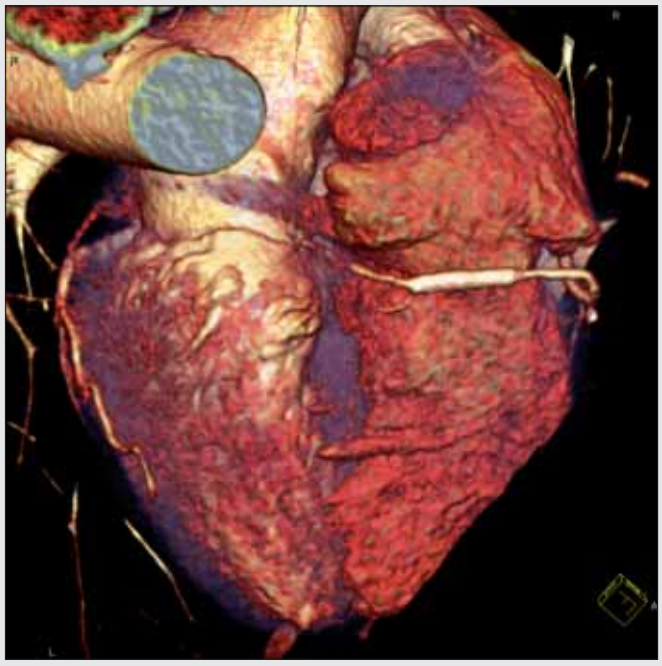
▲ Obr. 1E



▲ Obr. 1F



▲ Obr. 1G



▲ Obr. 1H

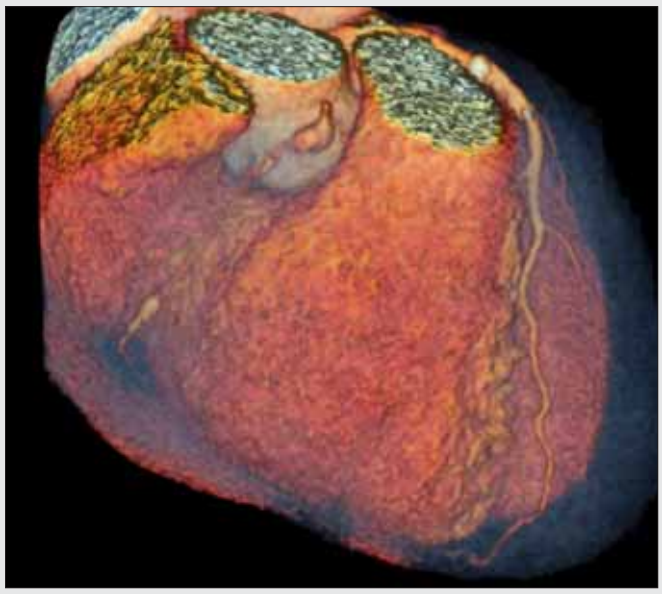
nebyl přítomen na MRI, konečně u 13 nemocných byla nalezena shodná lokalizace na MRI i DECT. Porovnáním nálezů per patient byla zjištěna senzitivita 93%, specificita 83%, pozitivní prediktivní hodnota 93% a negativní prediktivní hodnota 83%.

Pokud jsme porovnávali obrazy pozdního sycení myokardu na MR s perfuzními obrazy DECT, zjistili jsme u šesti nemocných jizevnatou tkáň v infarktu myokardu, u jedné nemocné akutní infarkt a u dvou nemocných disperzní myofibrózy v oblasti defektů perfuze na DECT.

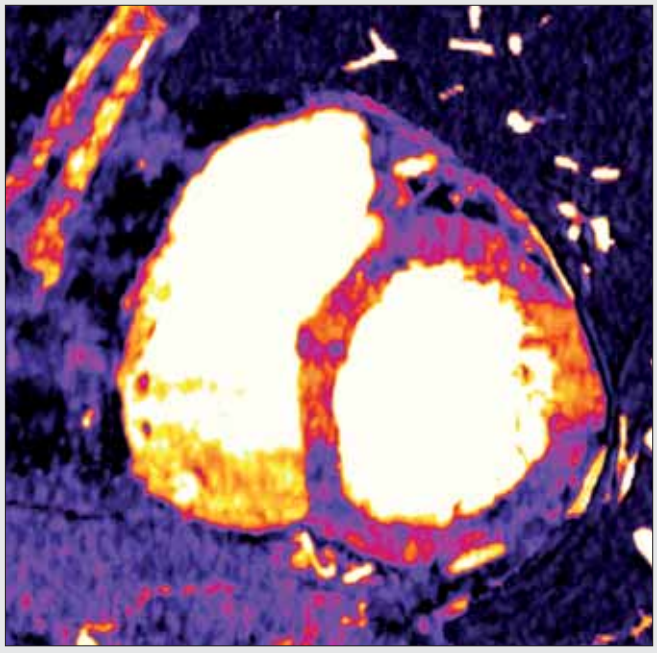
DISKUSE

Zobrazení myokardu pomocí duální energie záření je aplikací, která v mnohém navazuje na zobrazení statických tkání duální energií záření (1, 2). Nejvýraznějším problémem při zobrazení srdce je nestejnoměrnost pohybu srdce. Nestejnoměrná pohyblivost srdce je dokázána mezi jednotlivými stahy i u pravidelného rytmu srdečního, nepravidelnost pohybu se umocňuje u nemocných s extrasystolami nebo u nemocných s fibrilací síní s nestejnoměrnou odpovědí komor. Zatímco u CCTA na dvouzdrojovém CT jsou problémy nestejnoměrného srdečního rytmu kompenzovány komplementací dat z obou de-

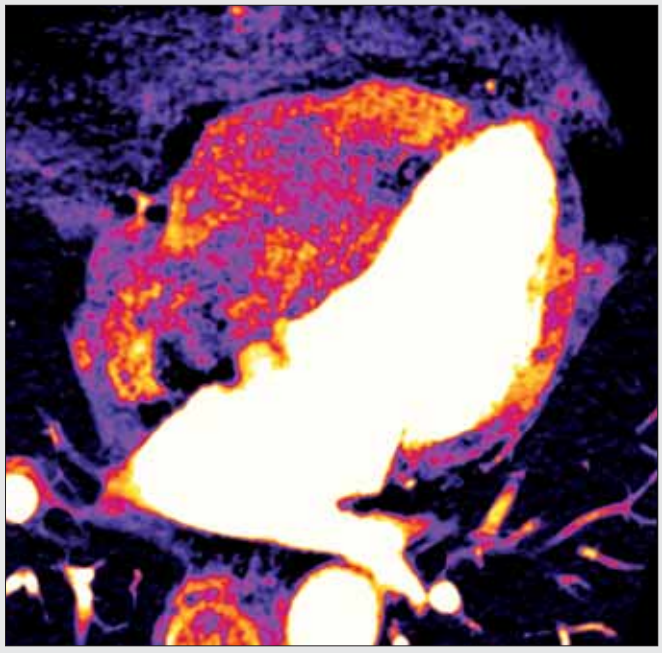
▲ Obr. 2A



▲ Obr. 2B



▲ Obr. 2C



▲ Obr. 2D

Obr. 2. ***Hypoperfuze myokardu následkem kombinace makro- a mikroangiopatie u diabetika 2. typu***
A, B – CT-angiografie ukazující chronický kolateralizovaný uzávěr pravé věnčité tepny a postižení periferní části diagonálních větví; C, D – mapy distribuce jódu ukazující snížení perfuze v oblasti zásobené povodím uzavřené pravé věnčité tepny a hypoperfuzi volné laterální stěny levé komory zásobené diagonálními větvemi postiženými mikroangiopatií
Fig. 2. ***Hypoperfusion of the myocardium caused by the combination of the macro- and micro-circulation impairment in diabetic type 2 patient***
A, B – CT-angipgraphy showed chronic collaterized occlusion of RCA and involved peripheral diagonal branches of LAD due microangipathy; C, D – iodine distribution maps showing the decrease of perfusion in the territories of RCA and diagonal branches of LAD

tektorových soustav, při nespojité rekonstrukci dat z každého jediného detektorového systému se u zobrazení DECT násobí artefakty díky fázovému posunu akvizice dat oběma detektorovými soustavami o 90 úhlových stupňů. Pokud vznikají pohybové artefakty, způsobují nedokonalou fúzi informace o denzitě při expozici 140 resp. 100 kV. Výsledné nedokonalé splynutí struktur při analýze má za následek nepřesné hodnocení podílu jódu na výsledné denzitě tkání. Nepřesná kalkulace distribuce jódu může vést k chybné interpretaci perfuzního defektu. Podobný efekt mají pulzační artefakty i na kvalitu CCTA, nicméně díky časovému rozlišení 165 ms je jejich efekt poněkud menší. Abychom minimalizovali pravděpodobnost nedostatečné kvality vyšetření CCTA v našem souboru, bylo provedeno DECT pouze u nemocných se srdeční frekvencí do 75/min se sinusovým rytmem. Maximální časové rozlišení u DECT je tedy sníženo na 165 ms ve srovnání s vyšetřením jedinou energií záření X, kdy je dosaženo dvouzdrojovým systémem rozlišení 82 ms. Další zlepšení časového rozlišení mohou být dosažena pomocí nových rekonstrukčních algoritmů (spaciotemporální filtr, kompenzace artefaktů z „half-scan" rekonstrukce hrubých dat a podobně) (3, 4).

Druhým problémem, se kterým je možné se setkat při analýze distribuce jódu ve tkáni, je přítomnost artefaktu Hounsfieldova, tedy artefaktu z utvrzení paprsku záření. Vliv tohoto artefaktu popsaný Thiemem (5) je výrazný, pokud je v pravostranných srdečních oddílech přítomna vysoce koncentrovaná kontrastní látka, nebo se objevuje jako důsledek uložení většího objemu kostní tkáně v některém ze směrů prozáření tkáně. V poslední řadě jde o artefakty způsobené cerkláží sterna po srdečních operacích. V našem souboru tento artefakt nepředstavoval kromě jediného nemocného podstatný problém.

Třetím nejméně závažným problémem je nestejnoměrné nasycení myokardu v kraniokaudálním směru zapříčiněné dlouhou akvizicí dat. Pokud je akvizice dat pomalejší (v našem případě u pomalejších srdečních frekvencí), projevuje se výrazně vliv prodloužení doby, kterou má kontrastní látka na pronikání do extracelulárního prostoru. Tento vliv je však jen minimální a na kvalitu map distribuce jódu a od nich odvozených perfuzních zobrazení nemá podstatnější vliv.

DECT srdce pro perfuzní zobrazení představuje metody statického perfuzního zobrazení s využitím distribuce extracelulární kontrastní látky zčásti v intravaskulárním mikrovaskulárním objemu (6), zčásti v extracelulárním objemu. Nejde o metodiku dynamické perfuze. DECT myokardu trpí všemi problémy statických perfuzních metod – není možné derivovat z vyšetření funkční ukazatele myokardiální perfuze, především perfuze v ml/100mg/min. Z tohoto důvodu jde především o doplňkovou metodu postprocessing, která může ukázat na klidové důsledky postižení koronárního řečiště. Zátěžové vyšetření myokardu bylo ojediněle referováno také pomocí DECT. Stejně jako ostatní perfuzní metody bylo využito adenosinu jako přirozeného mediátoru maximální vazodilatace věnčitých tepen.

Při porovnání s magnetickou rezonancí jde o porovnání metod statické a dynamické perfuze. Při zobrazení maximálního nasycení myokardu při prvním průchodu kontrastní látky při magnetické rezonanci je možné získat zobrazení tzv. peak perfusion, které přibližně odpovídá distribuci jódové kontrastní látky při DECT. V našem souboru jsme porovnáním perfuzního zobrazení pomocí MRI a pomocí DECT dosáhli uspokojivých hodnot senzitivity a pozitivní prediktivní hodnoty. Dosáhli jsme podobných výsledků jako Ruszicz (7) při porovnání DECT a SPECT. Ve srovnání s jinými perfuzními metodami je DECT svoji metodikou nejblíže SPECT s použitím ^{99m}Tc-sestaMIBI, nicméně zde jde o zobrazení pasivního intracelulárního transportu radiofarmaka (8).

V dalším vývoji metodiky je nutné další snížení radiační dávky, která v současnosti dosahuje při použití EKG pulzingu hodnot kolem 15 mSv, i když hodnot srovnatelných s CCTA na šedesátičtyřřadých systémech. Na snížení dávky se může podílet využití sekvenční skenovaní techniky (step-and-shoot) a dále lepší filtrace spekter záření X při použití speciálních filtrů na emisním okénku rentgenky.

ZÁVĚR

Z našich vlastních zkušeností vyplývá, že budoucím potenciálem DECT myokardu by mohlo být hodnocení perfuzních důsledků postižených koronárních tepen a také hodnocení fibrózních změn v myokardu pomocí virtuálního non-kontrastního zobrazení myokardu.

LITERATURA

1. **Johnson TRC, Krauss B, Sedlmair M, et al.** Material differentiation by dual energy CT: initial experience. Eur Radiol 2007; 17: 1510–1517.
2. **Ruzsics B, Chiaramida SA, Schoepf UJ.** Images in cardiology: Dual-energy computed tomography imaging of myocardial infarction. Heart 2009; 95(3): 180.
3. **Stenner P, Schmidt B, Raupach R, Bruder H, Flohr T, Kachelriess M.** A partial scan artifact reduction (PSAR) algorithm to improve the accuracy of cardiac perfusion measurements in dynamic phase-correlated cardiac CT. Eur Radiol 2009; Suppl 1: S321.
4. **Raupach R, Bruder H, Schmidt B, Klotz E, Flohr T.** A novel spatiotemporal filter for artifact and noise reduction in CT. Eur Radiol 2009; Suppl 1: S258.
5. **Thieme SF, Becker CR, Hacker M, et al.** Dual energy CT for the assessment of lung perfusion – Correlation to scintigraphy. Eur J Radiol 2008; 68: 369–374.
6. **Ferda J, Baxa J, Pešek J, Flohr T, Schmidt B, Kreuzberg B.** MDCT srdce: diagnostika akutní bolesti na hrudi a zobrazení kriticky nemocných. Ces Radiol 2008; Suppl 1: 11–17.
7. **Ruzsics B, Lee H, Zwerner PL, Gebregziabher M, Costello P, Schoepf UJ.** Dual-energy CT of the heart for diagnosing coronary artery stenosis and myocardial ischemia – initial experience. Eur Radiol 2008; 18(11): 2414–2424.
8. **Schwarz F, Ruzsics B, Schoepf UJ, Bastarrika G, Chiaramida SA, Abro JA, Brothers RL, Vogt S, Schmidt B, Costello P, Zwerner PL.** Dual-energy CT of the heart-principles and protocols. Eur J Radiol 2008; 68(3): 423–433. Epub 2008 Nov 12.