

PŘEHLEDOVÝ ČLÁNEK

Moderné anatomické zobrazovanie v pediatrickej kardiológii pomocou CT angiokardiografie a 3D virtuálnych modelov srdca

Modern anatomical imaging in pediatric cardiology using CT angiocardiology and 3D virtual heart models

Peter Olejník^{1,2}, Patrícia Srnková^{1,2}, Marek Kardoš²

¹Klinika detskej kardiológie, LFUK a DKC, Bratislava

²Detské kardiocentrum, NÚSCH, a. s., Bratislava

SÚHRN

Olejník P, Srnková P, Kardoš M. Moderné anatomické zobrazovanie v pediatrickej kardiológii pomocou CT angiokardiografie a 3D virtuálnych modelov srdca

Úvod: CT angiokardiografia (CTA) je moderná zobrazovacia metóda využívaná na detailné zobrazovanie kardiovaskulárnych štruktúr u pediatrických pacientov s vrodenými či získanými ochoreniami srdca. Najprehľadnejšou formou zobrazovania v detskej kardiológii v súčasnosti sú 3D virtuálne modely srdca vyrekonštruované z CT dát.

Metódy a ciele práce: Retrospektívna analýza CTA vyšetrení zrealizovaných v období 10 / 2021 – 09 / 2022 u pacientov sledovaných v Detskom kardiocentre, NÚSCH, a. s., Bratislava. Cieľom štúdie bolo získať komplexný prehľad o realizovaných CTA vyšetreniach v období 1 roka. Vyhodnocované boli indikácie CTA ako aj prínos výsledkov CTA pre následný klinický manažment pacientov. Zároveň boli hodnotené vysegmentované 3D virtuálne modely z hľadiska ich počtu, indikácií na ich výrobu ako aj ich klinického prínosu.

Výsledky: Počas 1-ročného obdobia bolo zrealizovaných 313 CTA vyšetrení u 280 pacientov. Iba v 2 / 313 (0,6%) prípadoch bol výsledok CTA vyšetrenia pre obrazové artefakty nedostatočne hodnotiteľný. V ostatných 311 / 313 (99,4%) prípadoch bolo CTA zobrazenie kardiovaskulárnych štruktúr dostatočne kvalitné a vyšetrenie tak bolo prínosné pre optimalizáciu ďalšieho klinického manažmentu pacientov. Výstupy CTA vyšetrení boli nasledovné: kardiochirurgický výkon: 118 / 313 (37,7%), katetrizačný intervenčný výkon: 42 / 313 (13,4%), trombolýza: 5 / 313 (1,6%), zmena antikoagulačnej liečby: 1 / 313 (0,3%), kryoablačná liečba: 1 / 313 (0,3%), paliatívna liečba: 9 / 313 (2,9%), konzervatívny postup bez nutnosti intervencie či zmeny liečby: 134 / 313 (42,8%). 3D virtuálne modely boli vytvorené v 16 prípadoch. Na základe ich analýzy boli rozhodnutia pre následný klinický manažment nasledovné: 14 / 16 (88%) kardiochirurgický výkon: dvojkomorové riešenie, 1 / 16 (6,3%) kardiochirurgický výkon: jednokomorové riešenie, a 1 / 16 (6,3%) paliatívna liečba.

Záver: CTA je v rámci pediatrickej kardiológie stále viac využívaným zobrazovacím vyšetrením zameraným na hodnotenie anatómie kardiovaskulárneho systému najmä u pacientov s vrodenými chybami srdca (VCC). Virtuálne 3D modely srdca sú v súčasnosti najmodernejšou formou anatomického zobrazovania komplexných VCC. Výsledky našej štúdie preukázali, že využívanie CTA ako aj virtuálnych 3D modelov významne prispieva k optimalizácii klinického manažmentu detských pacientov s ochoreniami srdca.

Kľúčové slová: CTA, 3D virtuálne modely srdca, vrodená chyba srdca

SUMMARY

Introduction: CT angiocardiology (CTA) is a modern imaging method used for detailed imaging of cardiovascular structures in pediatric patients with congenital or acquired heart diseases. 3D virtual heart models reconstructed from CT data are currently the most detailed form of anatomical imaging in pediatric cardiology.

Methods and objectives: Retrospective analysis of CTA examinations performed in patients treated at the Pediatric Cardiac Center, Bratislava, between 10 / 2021 – 09 / 2022. The goal of the study was to obtain a comprehensive overview of CTA examinations performed during a 1 year period. CTA indications as well as the contribution of CTA results to the subsequent clinical management of patients were evaluated. At the same time, segmented 3D virtual models were evaluated in terms of their number, indications for their reconstructions, and as well as their clinical benefit.

Results: 313 CTA examinations were performed in 280 patients in 1-year period. Only in 2 out of 313 (0.6%) cases were the results of the CTA examination insufficient due to image artifacts. In the other 311 / 313 (99.4%) cases, the CTA imaging of cardiovascular structures was of sufficient quality, and the examinations were beneficial for

optimization of further clinical management of patients. The results of CTA examinations were as follows: cardiac surgery: 118 / 313 (37.7%), catheterizat intervention: 42 / 313 (13.4%), thrombolysis: 5 / 313 (1.6%), change of anticoagulation therapy: 1 / 313 (0.3%), cryoablation treatment: 1 / 313 (0.3%), palliative treatment: 9 / 313 (2.9%), conservative procedure without the need for intervention or treatment change: 134 / 313 (42.8%). 3D virtual models were created in 16 cases. Based on analysis of the models, the decisions for subsequent clinical management were as follows: 14 / 16 (88%) cardiac surgery: biventricular circulation, 1 / 16 (6.3%) cardiac surgery: single-ventricle circulation, and 1 / 16 (6.3%) palliative treatment.

Conclusion: CTA is an increasingly used imaging method in pediatric cardiology aimed at evaluating of the cardiovascular system anatomy, especially in patients with congenital heart defects (CHD). Virtual 3D heart models are currently the most recent form of anatomical imaging of complex CHDs. The results of our study demonstrated that the use of CTA as well as virtual 3D models significantly contribute to the optimization of the clinical management of pediatric patients with cardiac diseases.

Key words: CTA, 3D virtual heart models, congenital heart defect

Korešpondenčný autor:

doc. MUDr. Peter Olejník, PhD.
Pod Krásnou Hôrkou 37
833 48 Bratislava
petoolejnik@gmail.com

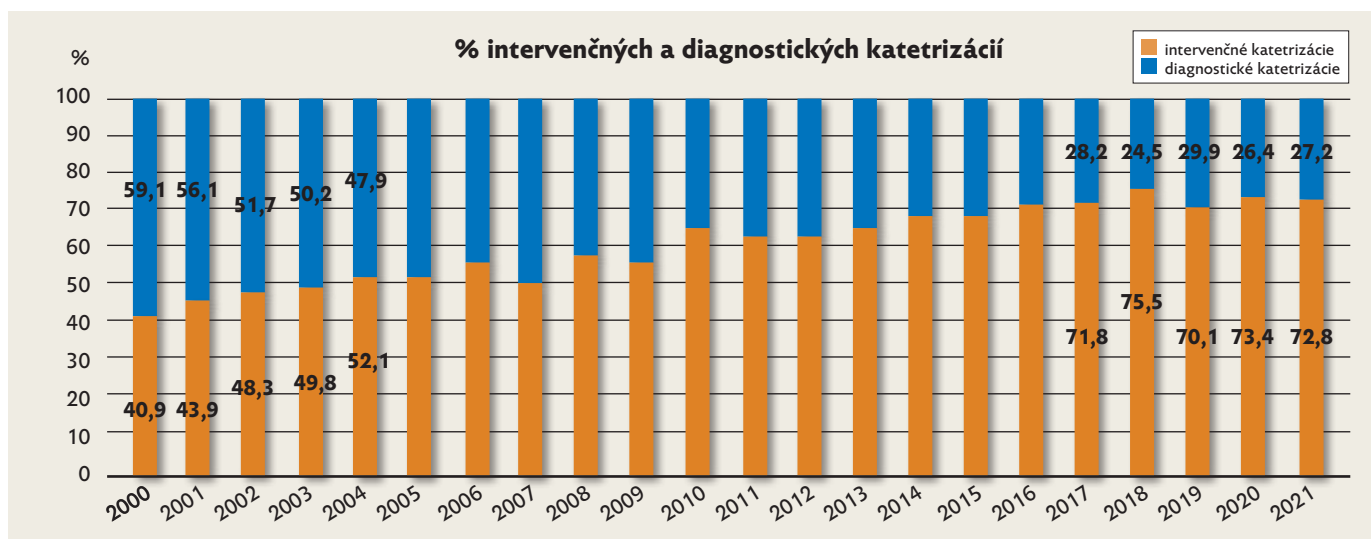
ÚVOD

Presné hodnotenie anatómie kardiovaskulárnych štruktúr je jednou zo základných podmienok pre dosiahnutie optimálneho manažmentu detských pacientov s vrodenými a získanými chorobami srdca a veľkých ciev. Detailné zobrazovanie kardiovaskulárnych štruktúr spolu s výraznými pokrokmi v detskej kardiochirurgii, katetrizačných intervenčných postupoch, kardioanestézii, pooperačnej a intenzívnej starostlivosti, arytmiológii a klinickej kardiológii viedli k rapidnému nárastu miery prežívania detí s vrodenými chybami srdca (VCC) do dospelosti, z pôvodných cca 25% z obdobia pred érou modernej detskej kardiológie a kardiochirurgie na súčasných cca 90%.

HISTÓRIA ZOBRAZOVANIA V PEDIATRICKEJ KARDIOLÓGII

Historicky základnou zobrazovacou metódou v detskej kardiológii je rtg – snímka hrudníka. Vyšetrenie umožňuje hodnotiť tvar a veľkosť srdca ako aj charakter pľúcneho prekrvenia.⁽¹⁾ Z hľadiska presnosti stanovenia diagnózy, keďže len v rámci VCC existuje približne 80 rôznych anatomických variant, má vyšetrenie iba orientačný charakter. V druhej polovici 20. storočia sa k rtg snímkovaniu hrudníka postupne pripája katetrizačná angiokardiografia (KA). Ide o vyšetrenie s významne presnejšou schopnosťou anatomického hodnotenia kardiovaskulárnych štruktúr u detí s ochoreniami srdca. Veľkou výhodou katetrizačného vyšetrenia je aj možnosť stanovovania hemodynamických parametrov t.j. hodnôt krvného tlaku a satO₂ v jednotlivých dutinách srdca a cievach, či vaskulárnej rezistencie systémového a pľúcneho riečiska. Nedostatkou KA, okrem nevyhnutnej radiačnej záťaže a potenciálne toxického účinku rtg-kontrastnej látky na obličky a štítnu žľazu, je jej invazívny charakter podmieňujúci

potenciálne zdravie poškodzujúce komplikácie súvisiace s nutnosťou zavádzania centrálnych vstupov (trombóza, krvácanie, infekcia) či s mechanickým poškodením srdca a ciev pri manipulácii s katétami. V ostatných štyroch dekádach sa k uvedeným zobrazovacím metódam kardiovaskulárneho systému u detí postupne pridáva echokardiografické vyšetrenie. Na rozdiel od KA je transtorakálna echokardiografia (TTE) neinvazívna a dostupná zobrazovacia metóda poskytujúca u veľkej časti detských pacientov dostatok anatomických informácií, vďaka čomu sa postupne stala základnou zobrazovacou metódou v diagnostike ochorení srdca u detí až do súčasného obdobia. Výhodou echokardiografie je aj možnosť realizácie prietokových meraní krvi, metrických hodnotení jednotlivých oddielov srdca či hodnotenia funkcie myokardu. Avšak aj TTE má svoje limitácie. Z klinického pohľadu je najvýznamnejšou limitáciou oslabené akustické okno znemožňujúce dostatočne kvalitné zobrazenie srdcových štruktúr a veľkých ciev u starších detí a adolescentov, u obéznych pacientov či u pacientov s deformitami hrudníka alebo pneumothoraxom. Pooperačné TTE anatomické hodnotenie najmä extrakardiálnych cievnych štruktúr vrátane chirurgicky vytvorených shuntov je taktiež limitované. Príčinou je prítomnosť sternálnych drôtov a pooperačných jaziev, ktoré degradujú kvalitu prenosu ultrazvukového signálu, a tým aj výsledného zobrazenia srdca a veľkých ciev. Limitáciou TTE je aj slabšia schopnosť trojdimezionálneho zobrazenia vzájomných priestorových vzťahov jednotlivých štruktúr srdca u komplexných VCC. Nedostatkou TTE je taktiež nízka schopnosť zobrazenia centrálného dýchacieho stromu vo vzťahu ku kardiovaskulárnym štruktúram.⁽²⁾ Alternatívou k TTE je transezofageálne echokardiografické vyšetrenie (TEE) poskytujúce lepšie priestorové rozlíšenie najmä posteriórnych štruktúr srdca uložených v blízkosti pažeráka, akými sú ľavá predsieň či pľúcne vény. Ide však o semi-invazívnu vyšetrovaciu metódu, ktorá je pacientami bez využitia celkovej anestézie často zle tolerovaná.⁽³⁾



Obr. 1: Vývin poklesu využívania diagnostickej katetrizácie (voči katetrizačným intervenčným zákrokom) v Detskom kardiocentre, NÚSCH, a. s. počas obdobia prvých rokov využívania CT angiokardiografie a zobrazovania kardiovaskulárnych štruktúr pomocou magnetickej rezonancie

Počas 90. rokov 20. storočia vo svete a od roku 2007 na Slovensku sa v rámci zobrazovacej diagnostiky v pediatrickej kardiológii do popredia dostávajú moderné zobrazovacie modality: počítačová tomografia s angiokardiografiou

(CTA) a zobrazovanie srdca pomocou magnetickej rezonancie (CMR), ktoré prekonávajú limitácie a invazivnosť TTE, TEE či KA a stávajú sa komplementárnymi zobrazovacími metódami ku TTE a postupne nahrádzajú využívanie KA

Tab. 1: Porovnanie výhod a nevýhod CTA a CMR

CTA	CMR
ionizujúce žiarenie	žiadne ionizujúce žiarenie
vyšetrenie je kontraindikované u gravidnej pacientky	možnosť realizácie vyšetrenia u gravidnej pacientky
nutnosť podania kontrastnej látky	užitočné štúdie aj bez podania kontrastnej látky
krátky čas vyšetrenia (sekundy)	dlhý čas vyšetrenia (30 – 60 minút)
bez nutnosti sedácie alebo celkovej anestézie u väčšiny pacientov > 5 rokov	nutnosť sedácie alebo celkovej anestézie u väčšiny pacientov < 10 rokov
vysoké priestorové rozlíšenie	nižšie priestorové rozlíšenie
výborné zobrazenie kalcia (kalcifikácie ciev)	slabé zobrazenie kalcia
veľmi dobrá vizualizácia koronárneho riečiska	horšie zobrazenie koronárneho riečiska
možné volumetrické vyšetrenia komôr u moderných prístrojov	možné volumetrické vyšetrenia komôr
bez možnosti merania prietokov	možnosť merania prietokov
bez možnosti hodnotenia viability myokardu	možné hodnotenie viability myokardu, možné hodnotenie ischemických, zápalových a fibrotických ložísk v myokarde
iba statické zobrazovanie	možnosť dynamického zobrazovania
veľmi dobré zobrazenie pľúcneho parenchýmu	obmedzená možnosť zobrazenia pľúcneho parenchýmu
možnosť vyšetrenia pri implantovaných kardiostimulátoroch a kovových implantátoch	nemožnosť vyšetrenia pri väčšine (najmä starších) implantovaných kardiostimulátorov a kardiostimulačných elektród
minimálna prítomnosť artefaktov pri metalických materiáloch	prítomnosť artefaktov pri metalických materiáloch
možné riziko alergickej reakcie na kontrastnú látku	veľmi malé riziko alergickej reakcie na kontrastnú látku
progressívne sa zvyšujúce množstvo kardio CT prístrojov a veľké množstvo tréňovaných laborantov	málo CMR prístrojov a pracovísk schopných hodnotiť VCC a relatívne malé množstvo tréňovaných laborantov
nižšia cena CT prístroja	vyššia cena MR prístroja

CMR – kardio magnetická rezonancia, CTA – angiokardiografické zobrazovanie pomocou počítačovej tomografie, **hrubým fontom zobrazená výhoda daného vyšetrenia.**

ako diagnostickej zobrazovacej metódy (obr. 1). CTA ako aj CMR tak zohrávajú významnú úlohu v rámci optimalizácie manažmentu pediatrických pacientov s VCC či získanými ochoreniami srdca.⁽⁴⁾ Vzájomné porovnanie výhod a nevýhod CTA a CMR v detskej kardiológii je uvedené v tabuľke 1.

CT ANGIOKARDIOGRAFIA (CTA)

Princípom CTA je rtg-kontrastné zobrazenie srdcových dutín, lúmenov veľkých ciev a ich vetiev po podaní jódovej rtg-kontrastnej látky. Na výslednom CTA obraze sa hyperdenzne (bielou farbou) zobrazujú tkanivá, ktoré najviac pohlcujú rtg žiarenie, na druhej strane hypodenzne (šedou až čiernou farbou) sa zobrazujú tkanivá minimálne pohlcujúce rtg žiarenie.⁽⁵⁾

V rámci prevencie tvorby obrazových artefaktov z pohybu srdca a veľkých ciev sa odporúča realizovať skenovanie synchronizované s EKG pacienta. Pomocou moderných prístrojov s 320-multidetektorovým systémom so skenovacím rozsahom 16 cm je možné realizovať tzv. volumetrické skenovanie (bez pohnutia stola) umožňujúce zosnímanie 16 cm hrúbky hrudníka v kraniokaudálnom rozmere počas jednej otáčky gantry prístroja okolo tela pacienta v trvaní 275 ms. Takto je možné získať izotropické zobrazenie kardiovaskulárneho systému počas viacerých fáz srdcového cyklu so submilimetrovou priestorovou rezolúciou. Najdetailnejšie zobrazenie napríklad presnej anatómie koronárnych artérií sa dosahuje pri srdcovej frekvencii < 70 / min. Dostatočná kvalita zobrazenia odstupov koronárnych artérií, ramien pľúcnice či pľúcnych vén sa dosahuje aj pri srdcovej frekvencii < 100–110 / min počas skenovania. Pre dosiahnutie srdcovej frekvencie < 100–110 / min u novorodencov, dojčiat či batoliat postačuje sedácia či celková anestézia. Naproti tomu na dosiahnutie srdcovej frekvencie blížiacej sa k hodnote 70 / min sa využíva intravenózna aplikácia ultrakrátko pôsobiacich betablokátorov. V prípadoch, ak je potrebné u starších detí a adolescentov zobraziť kompletný kardiovaskulárny systém hrudníka (skenovacie okno > 16 cm), sa na zobrazovanie využíva špirálovité skenovanie, počas ktorého sa stôl pacienta posúva v gantry prístroja pri súčasnom rotovaní gantry prístroja okolo tela pacienta. Ak je však v tejto vekovej skupine pacientov postačujúce zobrazenie iba myokardu a proximálnych častí pľúcnice či aorty, volí sa volumetrické skenovanie so skenovacím rozsahom 16 cm, ktorý by mal byť dostačujúci pre zobrazenie týchto štruktúr. Výhodou volumetrického skenovania srdca s EKG synchronizáciou je, podobne ako pri MRI srdca, možnosť kontúrovania endokardu komôr v end-systole a end-diastole, čím sa získajú hodnoty end-diastolických a end-systolických objemov komôr, z ktorých je možné kalkulovať hemodynamické parametre, akými sú ejekčná frakcia komôr, jednorázový vývrhový objem alebo minútový srdcový výdaj.⁽⁶⁾

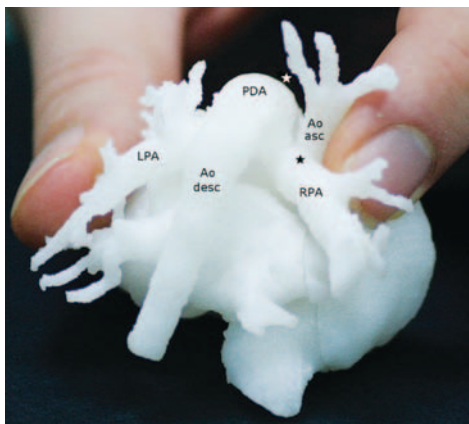
Alternatívou moderných multidetektorových volumetrických prístrojov je využívanie CT prístrojov disponujúcich „dual source energy“ skenovacou technikou, ktorých využívanie taktiež umožňuje detailné anatomické zobrazovanie kardiovaskulárneho systému u detí.⁽⁷⁾

Aby mohli byť zobrazovacie kvality CTA maximálne využité, je zároveň nutné dodržiavať zásadu nulového, resp. minimálneho pohybu pacienta počas skenovania. Akýkoľvek pohyb pacienta (hlboké dýchanie, plač, kašeľ) totiž vytváraním obrazových artefaktov výrazne znižuje kvalitu výsledného zobrazenia. Spolupracujúci pacienti sú preto pred začiatkom skenovania vyzvaní na nadýchnutie a zadržanie dychu. U nespolupracujúcich detí (novorodenci, dojčatá, batoliatá, časť detí v predškolskom veku, úzkostné deti a deti s mentálnou retardáciou) je počas vyšetrenia nevyhnutná krátkodobá sedácia, zvyčajne nazálne podanie dexmedetomidínu, alebo celková anestézia formou intravenózne podaného krátkodobého pôsobiaceho anestetika propofolu. Počítačovou úpravou základných axiálnych skenov je možné získať trojdimenzionálne multiplanárne obrazové rekonštrukcie, či už v základných rovinách (axiálna, frontálna, sagitálna), alebo v ľubovoľných šikmých rovinách. Pred skenovaním sa pacientovi intravenózne aplikuje kontrastná látka v množstve 1–2 ml / kg telesnej hmotnosti pacienta. Odporúča sa rýchlosť podávania 0,5–1,0 ml / s u novorodencov, a 1,0–1,5 ml / s u dojčiat. U starších detí môže rýchlosť aplikácie dosiahnuť až 2–4 ml / s, a to vždy v závislosti od priepustnosti cievného vstupu, cez ktorý sa kontrastná látka podáva. Neodporúča sa aplikácia kontrastnej látky do epikutánného katétra pre jeho príliš tenký lumen.

V rámci načasovania skenovania sa v klinickej praxi najčastejšie využíva technika „bolus tracking“, pri ktorej sledujeme prechod kontrastnej látky srdcovocievny systémom a skenovanie sa spustí po dosiahnutí naplnenia želanej štruktúry srdca kontrastnou látkou. Ak je potrebné zobrazenie pľúcnice a jej vetiev, realizuje sa skorá fáza skenovania tzv. pulmografia. Ak je cieľom CTA zobraziť najmä aortu a jej vetvy, skenuje sa vo fáze, kedy kontrastná látka dominantne vysycuje tieto cievné štruktúry. Pokiaľ je indikáciou CTA zobraziť všetky srdcové dutiny ako aj veľké cievy, skenuje sa vo fáze ich rovnomerného vysýtenia. „Neskorá venózna fáza“ so začiatkom skenovania cca 30–60 sekúnd (časový odstup pritom narastá s vekom dieťaťa) po podaní kontrastnej látky sa využíva na komplexné zobrazenie suponovaných natívnych anomálií systémového venózneho riečiska u pacientov s komplexnými abnormalitami systémových vén, napríklad u pacientov s jednokomorovou cirkuláciou.

Veľkou prednosťou CTA je krátke, väčšinou menej ako sekundové alebo iba niekoľko sekúnd trvajúce skenovanie. Celkový pobyt pacienta na CT lôžku je predĺžený umiestňovaním pacienta na lôžko (časovo náročné najmä u pacientov na ECMO) a prípadnou aplikáciou celkového anestetika. U pacientov na umelej pľúcnej ventilácii, u ktorých je predpoklad externého útlaku centrálnych dýchacích ciest srdcovocievny štruktúrami, sa na dobu skenovania odporúča krátkodobé zníženie alebo vypnutie PEEP (pozitívneho end-expiračného tlaku).

Najzávažnejším nežiaducim účinkom CTA vyšetrenia je vystavenie pacienta ionizačnému žiareniu, ktorého onkogénny potenciál sa môže z dlhodobého hľadiska prejavovať najmä po opakovaných vyšetreniach. V porovnaní s CT prístrojmi používanými v minulosti s radiačnou expozíciou pacienta 5–15 mSv, najmodernejšie volumetrické CT prístroje pacientov exponujú radiačnej dávke nižšej ako 1 mSv.⁽⁸⁾



Obr. 2: 3D tlačný model srdca a veľkých ciev. Pohľad zozadu. Novorodenecké srdce pacienta s interupciou aortálneho oblúka typu A a aortopulmonálnym oknom typu II (spojenie Ao asc a RPA). Výhodou využitia tlačných 3D-modelov je možnosť presného hodnotenia patologickej anatómie srdca a veľkých ciev vytlačených v reálnej veľkosti priamo v rukách kardiochirurga a kardiológa s cieľom naplánovania optimálnej intervencie. V uvedenom prípade bol na základe analýzy 3D modelu zvolený nasledujúci kardiochirurgický zákrok: preťatie širokého PDA, spojenie proximálneho pahýľu ascendentnej aorty s descendentnou aortou, oddelenie ascendentnej aorty od RPA.

Ao asc – ascendentná aorta, Ao desc – descendentná aorta, LPA – ľavé rameno pľúcnice, PDA – perzistujúci arteriálny duktus, RPA – pravé rameno pľúcnice, čierna hviezda – aortopulmonálne okno (spojenie ascendentnej aorty a RPA), biela hviezda – interupcia aortálneho oblúka typu A (chýbajúce spojenie medzi ascendentnou a descendentnou aortou)

Potenciálnym rizikom CTA je alergická reakcia na jódomú kontrastnú látku. Intravenózna aplikácia jódovej kontrastnej látky pri CTA môže u pacientov s obličkovým poškodením viesť k ďalšiemu poškodeniu funkcie obličiek (kontrastná nefropatia) a u pacientov s výrazne zmenenou funkciou štítnej žľazy k poškodeniu štítnej žľazy. U pacientov so závažnou renálnou dysfunkciou je podanie kontrastnej látky kontraindikované. Všeobecny odporúčením v rámci prevencie kontrastnej nefropatie je dôsledná rehydrácia pacienta 24 hodín pred vyšetrením a krátkodobo po vyšetrení.

3D MODELY SRDCA A VEĽKÝCH CIEV

Zdrojové dáta z CTA môžu byť prenesené do 3D tlačiarne, pomocou ktorej je možné vytlačiť reálne priestorové kópie srdca a veľkých ciev.^(9,10) Ide o modernú formu zobrazovania srdcovocievneho systému, ktorú sme na našom pracovisku efektívne využívali v predoperačnom plánovaní u pacientov s komplexnými VCC v rokoch 2014–2018 (obr. 2).⁽¹¹⁾

Alternatívne sa na našom pracovisku od roku 2019 v špecifických indikáciách realizuje výroba 3D virtuálnych modelov srdca a ciev, pričom aj pri tomto type modelov zdrojové dáta pochádzajú z CTA vyšetrenie. V iniciálnej fáze prípravy modelov sa v grafických programoch jednotlivé anatomické štruktúry srdca či cievy separátne segmentujú v rôznych farbách s cieľom získania čo najprehľadnejšieho zobrazenia

komplexných patologických nálezov. Segmentujú sa dva typy modelov. Prvým typom je tzv. odliatkový typ modelov, pri ktorom sa segmentujú dutiny srdcových štruktúr a ciev. Tento typ modelov sa využíva na prehľadné zobrazovanie najmä extrakardiálnych vrodených anomálií. Druhým typom je tzv. reálny typ modelov, pri ktorom sa segmentujú steny srdcových štruktúr a ciev. Tento typ modelov sa využíva na prehľadné zobrazovanie najmä intrakardiálnych anatomických štruktúr. Výhodou využívania virtuálnych 3D modelov je: 1. možnosť nahliadania na štruktúry z ľubovoľného pohľadu pri ľubovoľnom priblížení, 2. možnosť získania tzv. chirurgických pohľadov (ide o pohľad na patologické štruktúry, ktorý kardiochirurg reálne uvidí pri operácii, napríklad pohľad na komorové defekty pohľadom cez trikuspidálnu chlopnú), 3. možnosť realizácie „preletov“ cez jednotlivé srdcové oddiely cez prítomné defekty (získa sa tak pohľad na defekt z oboch strán), a 4. možnosť prechodného odstránenia a následného pridávania jednotlivých srdcovocievnych štruktúr do zobrazovaného 3D virtuálneho modelu, čo výrazne sprehľadňuje anatomickú orientáciu v častokrát neprehľadnom teréne srdcovocievnych štruktúr.⁽¹²⁾

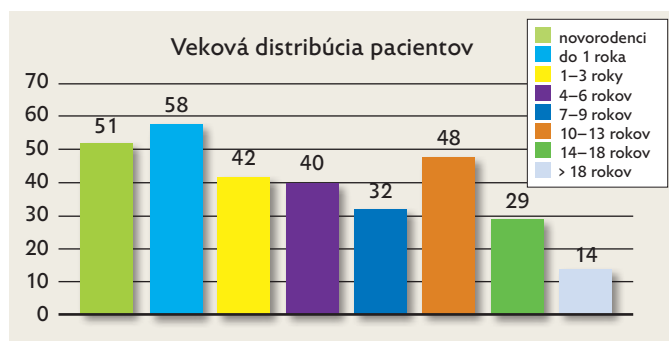
METÓDY A CIELE PRÁCE

Retrospektívna analýza CTA vyšetrení zrealizovaných u pacientov sledovaných v Detskom kardiocentre, NÚSCH, a. s., Bratislava v období 10 / 2021 – 09 / 2022. Vyšetrenia boli realizované na oddelení diagnostickej a intervenčnej rádiológie NÚSCH, a. s., na volumetrickom 320-multidetektorovom CT prístroji Aquilion One / Genesis. Získané dáta boli pomocou zabudovanej umelej inteligencie (advanced intelligent clear-IQ engine) zrekonštruované s cieľom získania čo možno najostrejšieho obrazu. Na vytvorenie virtuálnych 3D modelov boli iniciálne CT dáta v „DICOM“ formáte transportované do grafického programu „3D slicer 4.3“, v ktorom bol zrealizovaný proces segmentácie. S cieľom rekonštrukcie „odliatkových“ typov modelov boli vyznačené dutiny srdcových oddielov a ciev a s cieľom vytvorenia reálnych typov modelov boli vysegmentované steny srdcových dutín, srdcové chlopne a steny ciev. Na čo najprehľadnejšie zobrazenie bola každá štruktúra srdca vysegmentovaná v rozličnej farbe. Výsledné CTA zobrazenia ako aj vytvorené farebné 3D virtuálne modely boli následne prezentované na klinických alebo indikačných seminároch na určenie individuálneho ďalšieho postupu.

Cieľom práce bolo získať komplexný prehľad o realizovaných CTA vyšetreniach v období 1 roka. Vyhodnocovali sme indikácie CTA ako aj prínos výsledkov CTA pre následný klinický manažment pacientov. Zároveň sme hodnotili vysegmentované 3D virtuálne modely z hľadiska ich počtu, indikácií na ich výrobu ako aj ich klinického prínosu.

VÝSLEDKY

Počas 1-ročného obdobia sme vykonali 313 CTA vyšetrení u 280 pacientov manažovaných v našom centre. V 299 prípadoch bolo CTA vyšetrenie realizované u detských pacientov a v 14 prípadoch u dospelých pacientov sledovaných v DKC.



Obr. 3: Veková distribúcia pacientov počas realizácie CTA vyšetrenia

Najstarší pacient v čase CTA vyšetrenia mal 39 rokov. Medián veku pacientov počas CTA vyšetrenia bol 4 roky (1 deň – 39 rokov). V novorodeneckom veku bolo CTA vyšetrenie vykonané u 43 pacientov s mediánom veku 13 dní (1 – 28 dní). Veková charakteristika pacientov v čase realizácie CTA vyšetrenia je uvedená v grafe na obrázku 3.

Opakované CTA vyšetrenia podstúpilo 26 pacientov. Najviac, 4 CTA vyšetrenia u jedného pacienta sme indikovali u pacienta s dvojvýtokovou pravou komorou a u pacienta s Fallotovou tetralógiou s dysplastickou pľúcnou chlopňou.

Bez sedácie či celkovej anestézie sme vykonali 141 / 313 (45%) vyšetrení. 172 / 313 (55%) vyžadovalo sedáciu alebo krátkodobú celkovú anestézu väčšinou u pacientov do 5. roku života, respektíve u starších nespolupracujúcich pacientov. Medián radiačnej expozície pacientov počas 1 vyšetrenia vyjadrený v DLP (dose length product) bol 61 mGy.cm (8,5-5700). V novorodeneckej skupine bol medián DLP 29 mGy.cm (8,5-96), čo pri rádiologickom prepočte DLP na efektívnu dávku u novorodencov ($DLP \times 0,039$) predstavuje efektívnu dávku 1,1 mSv. Vo vekovej skupine 2 mesiace až 4 roky bol medián DLP 29,5 mGy.cm (10-227), čo pri prepočte DLP na efektívnu dávku u tejto vekovej skupiny ($DLP \times 0,026$) predstavuje efektívnu dávku 0,75 mSv. Vo vekovej skupine 5 až 14 rokov bol medián DLP 108 mGy.cm (31-1957), čo pri prepočte DLP na efektívnu dávku u tejto

vekovej skupiny ($DLP \times 0,018$) predstavuje efektívnu dávku 1,94 mSv. Vo vekovej skupine 15 až 39 rokov bol medián DLP 565 mGy.cm (57-5770), čo pri prepočte DLP na efektívnu dávku u tejto vekovej skupiny ($DLP \times 0,014$) predstavuje efektívnu dávku 7,9 mSv. Po žiadnom z 313 (0%) CTA vyšetrení nebola zaznamenaná závažná alergická reakcia, závažné nefrotoxicke poškodenie či poškodenie štítnej žľazy. Jednofázové skenovanie bolo zrealizované u 240 / 313 (77%) a dvojfázové u 63 / 313 (23%) vyšetrení.

Pre ďalší klinický manažment pacientov neboli prínosné iba 2 / 313 (0,6%) CTA vyšetrení. V prvom prípade išlo o nedostatočne zobrazené aortopulmonálne kolaterály a v druhom prípade o nedostatočne zobrazený odstup pravej koronárnej artérie pri podozrení na jej anomálny odstup. V oboch prípadoch mali novorodenci počas skenovania tachykardiu 130–140 / min. V prvom prípade sa na zobrazenie aortopulmonálnych kolaterál odporučila realizácia katetrizačnej angiografie a v druhom prípade na zobrazenie pravej koronárnej artérie kontrolná CTA s prípravou ultrakrátko pôsobiacim betablokátorom na zníženie frekvencie srdca počas skenovania.

CTA bola indikovaná v 9 / 313 (2,9%) prípadoch u pacientov so získaným kardiovaskulárnym ochorením a v 304 / 313 (97,1%) prípadoch u pacientov s VCC.

Získané kardiovaskulárne ochorenia, u ktorých bola CTA indikovaná, ako aj odporúčania pre následný klinický manažment pacientov, stanovené na základe výsledku CTA, uvádza tabuľka 2.

CTA vyšetrenie bolo indikované v 104 / 313 (33,2%) prípadoch u pacientov s natívnymi VCC a v 200 / 313 (63,8%) prípadoch u pacientov s VCC, či už po kardiochirurgickej, alebo katetrizačnej intervencii. Prehľad indikačných skupín CTA u pacientov s natívnou VCC je uvedený na obrázku 4.

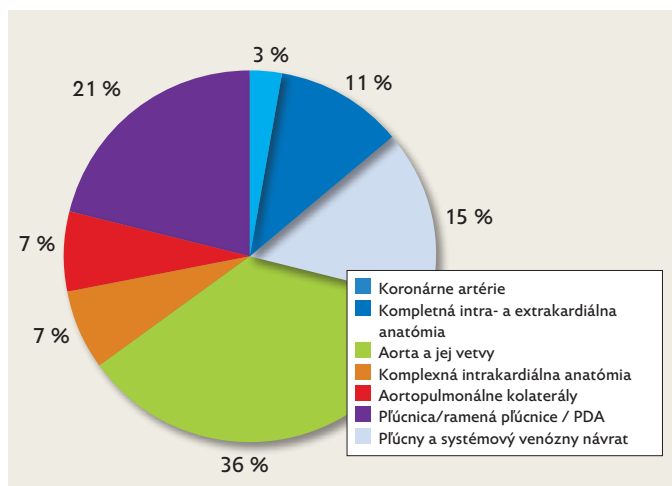
Jednotlivé indikačné skupiny CTA vyšetrení u pacientov s natívnou VCC ako aj odporúčania pre následný klinický manažment pacientov, stanovené na základe výsledku CTA, sú bližšie analyzované v tabuľkách 3–8.

Prehľad indikačných skupín CTA u pacientov s VCC po kardiochirurgickej alebo katetrizačnej intervencii uvádza graf na obrázku 5. Jednotlivé indikačné skupiny CTA vyšetrení u pacientov s VCC po intervencii ako aj odporúčania pre

Tab. 2: Získané kardiovaskulárne ochorenia, u ktorých bolo CTA indikované. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

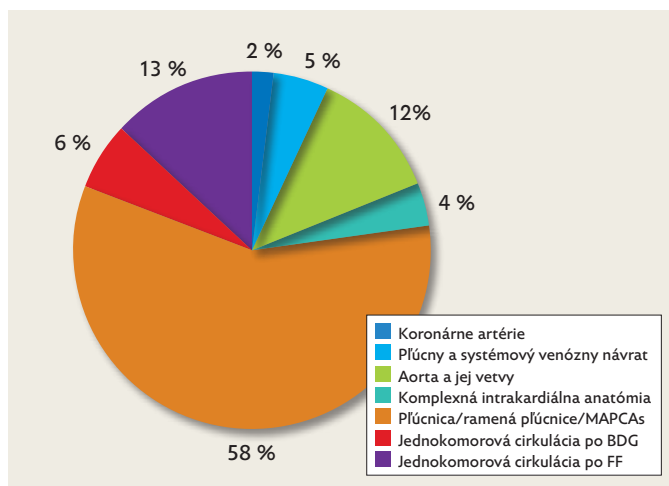
Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Zobrazenie koronárnych artérií u pacientov po prekonanej Kawasakiho chorobe	3	1× aneurizmy 2× bez aneurizmiem	1× zmena antikoagulačnej liečby 2× bez zmeny liečby
Vylúčiť ALCAPA u pacienta s D-KMP	1	ALCAPA vylúčená	Bez intervencie
Vylúčiť koronárne abnormality pri EKG náleze depresii ST segmentu v S4-6 pri námahe	1	Negatívny nález	Bez intervencie
Anatómia koronárnych artérií pri bolestiach na hrudníku	1	Negatívny nález	Bez intervencie
Námahová synkopa so zvýšeným troponinom-T v sére	1	Negatívny nález	Bez intervencie
Zobrazenie anatómie ľavej predsene a pľúcnych vén u pacienta s fibriláciou predsiení	1	Detailné zobrazenie	Cielená kryoblácia
Zobrazenie cievnych vstupov u pacienta s D-KMP na Heartmate 3 pred HTx	1	Detailné zobrazenie	Kardiochirurgický zákrok

(HTx) ALCAPA – anomálny odstup ľavej koronárnej artérie z pľúcnice, D-KMP – dilatačná kardiomyopatia, HTx – transplantácia srdca.



Obr. 4: Prehľad indikačných skupín CTA vyšetrení u pacientov s natívnou VCC

ASD – defekt predsieňového septa, PDA – perzistujúci arteriálny duktus.



Obr. 5: Prehľad indikačných skupín CTA vyšetrení u pacientov s VCC po kardiochirurgickej alebo katetizačnej intervencii

ASD – defekt predsieňového septa, MAPCAs – mnohopočetné aortopulmonálne kolaterály, BDG – bidirekčná Glennova anastomóza, FF – Fontanova operácia s fenestráciou.

Tab. 3: CTA indikované na zobrazenie koronárnych artérií u pacientov s natívnou VCC. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Suspektná ALCAPA	3	1× ALCAPA potvrdená 1× ALCAPA vylúčená 1× pre sínusovú tachykardiu počas skenovania nediagnostické zobrazenie koronárnych artérií	1× kardiochirurgický zákrok 1× bez intervencie 1× opakovať CTA po príprave intravenóznym ultrakrátko pôsobiacim betablokátorom
Suspektná stenóza LCA u pacienta s Williamsovým–Beurenovým syndrómom	1	Nepotvrdená	Bez intervencie
Suspektná koronárna fistula	3	2× malá fistula potvrdená 1× nepotvrdená	3× bez intervencie
Suspektné koronárne fistuly do RV u PA, IVS	2	1× potvrdená 1× nepotvrdená	1× katetizačná intervencia (implantácia stentu do PDA) 1× bez intervencie
Anatómia koronárnych artérií u D-TGA	2	Detailné zobrazenie	2× kardiochirurgický zákrok

ALCAPA – anomálny odstup ľavej koronárnej artérie z plúcnic, LCA – ľavá koronárna artéria, RV – pravá komora, PA – atrézia plúcnic, IVS – intaktné komorové septum, AoV – aortálna chlopňa, PDA – perzistujúci arteriálny duktus.

Tab. 4: CTA indikované na zobrazenie pľúcnych vén a / alebo ASD u pacientov s natívnou VCC. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Suspektný PAPVD / ASD – sinus venosus	10	8× potvrdené 1× nepotvrdené 1× iba ASD II	8× kardiochirurgický zákrok 1× bez intervencie 1× kardiochirurgický zákrok (ASD II s krátkym zadným okrajom)
Suspektný TAPVD	5	5× potvrdený (1× dolný typ 2× horný typ 1× do CS 1× kombinovaný typ)	5× kardiochirurgický zákrok (zároveň 1× pre nález trombozy iliackých artérií indikovaná trombolýza)
Suspektná ASD II a cor triatriatum	1	Potvrdené + nový nález PAPVD	Kardiochirurgický zákrok

PAPVD – parciálny anomálny návrat pľúcnych vén, TAPVD – totálny anomálny návrat pľúcnych vén, ASD – defekt predsieňového septa, CS – koronárny sínus.

Tab. 5: CTA indikované na zobrazenie aorty a jej vetiev u pacientov s natívnou VCC. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
HLHS / HLH-komplex	4	2× potvrdený HLHS 1× HLH komplex s hypopláziou AoA 1× LV kapacitne dostatočná / nález ASD II	2× paliatívna liečba 1× kardiochirurgický zákrok (plastika AoA) 1× kardiochirurgický zákrok (uzáver ASD II)
Suspektná IAA	5	4× potvrdená 1× trombóza AoA	4× kardiochirurgický zákrok 1× trombolýza
Suspektná CoA	17	13× potvrdená CoA 4× vylúčená CoA	12× kardiochirurgický zákrok 1× katetrizačná intervencia (implantácia stentu do CoA) 4× bez intervencie
Suspektný vaskulárny ring	7	6× potvrdený (rôzne varianty) 1× potvrdený + nález hypoplázie AoA	6× kardiochirurgický zákrok 1× paliatívna liečba (multisystémové postihnutie)
Marfanov syndróm	1	Dilatácia ascendentnej aorty	Kardiochirurgický zákrok
Loeysov–Dietzov syndróm	1	Dilatácia ascendentnej aorty	Kardiochirurgický zákrok
Suspektná disekcia AoA	1	Vylúčená	Bez intervencie
Suspektné APW	1	Potvrdené	Kardiochirurgický zákrok

HLHS – syndróm hypoplázie ľavého srdca, HLH-komplex – komplex hypoplázie ľavého srdca, IAA – interupcia aortálneho oblúka, CoA – koarktácia aorty, AoA – aortálny oblúk, APW – aortopulmonálne okno, Ao asc – ascendentná aorta, ASD II – defekt predsieňového septa typu secundum.

Tab. 6: CTA indikované na zobrazenie komplexnej intrakardiálnej komorovej anatómie u pacientov s natívnou VCC. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Multi VSD	2	2× detailný anatomický nález	2× kardiochirurgický zákrok
D-TGA, VSD, LVOTO, susp. straddling MV	2	Straddling MV vylúčený	2× kardiochirurgický zákrok (dvojkomorové riešenie)
DORV, inlet VSD	1	Nový nález straddlingu MV (neumožňuje dvojkomorové riešenie)	Kardiochirurgický zákrok (jednokomorové riešenie)
ccTGA, susp. HRHS, PS	1	HRHS potvrdený	1× kardiochirurgický zákrok (mBT shunt)
ccTGA, susp. LVOTO	1	Presné zobrazenie dostatočného LVOT	Bez intervencie

VSD – defekt komorového septa, D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, LVOTO – obštrukcia výtokového traktu ľavej komory, DORV – dvojitý výtok z pravej komory, ccTGA – kongenitálne korigovaná transpozícia veľkých ciev, MV – mitrálna chlopňa.

Tab. 7: CTA indikované na zobrazenie pľúcnice, jej vetiev, PDA, MAPCAs u pacientov s natívnou VCC. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Anatómia AP, ramien pľúcnice u TOF	12	12× detailná anatómia infundibula RV, AP a ramien a vylúčené MAPCA	12× kardiochirurgický zákrok (kompletná korekcia)
u TOF s dysplastickou APV	3	2× nález dilatácie RPA a LPA 1× extrémna dilatácia RPA a LPA s významnou externou obštrukciou bronchov	2× kardiochirurgický zákrok s rafiou dilatovaných RPA a LPA 1× paliatívna liečba pri závažnej respiračnej insuficiencii
u DORV	2	2× významné stenózy pľúcnic	2× kardiochirurgický zákrok (mBT shunt)
u WBS	2	1× mierna stenóza LPA 1× závažná stenóza LPA	Bez intervencie 1× katetrizačná intervencia: implantácia stentu
u IPAH (vylúčenie PE)	1	Nepotvrdené	Bez intervencie či zmeny liečby
u PS	1	Mierne stenózy ramien AP	Bez intervencie
Zobrazenie MAPCAs a natívnym ramien AP u pacientov s PA, VSD, MAPCAs	7	1× nediagnostické zobrazenie 6× detailné zobrazenie	1× diagnostická katetrizácia s angiokardiografiou 6× kardiochirurgický zákrok (komplexný)
Zobrazenie PDA u DORV, PS	1	Úzky tortuózny PDA	Kardiochirurgický zákrok (mBT shunt)

TOF – Fallotova tetralógia, APV – pľúcna chlopňa, DORV – dvojitý výtok z pravej komory, WBS – Williams–Beurenov syndróm, IPAH – idiopatická pľúcna arteriálna hypertenzia, PS – pľúcna stenóza, MAPCAs – mnohopočetné aortopulmonálne kolaterály, PDA – perzistujúci arteriálny duktus, RPA – pravé rameno pľúcnice, LPA – ľavé rameno pľúcnice, mBT shunt – modifikovaná Blalock Taussigovej spojka.

následný klinický manažment pacientov, stanovené na základe výsledku CTA, sú bližšie analyzované v tabuľkách 9–14.

Prehľad klinických výstupov stanovených na základe výsledkov všetkých zrealizovaných CTA vyšetrení je vyhodnotený v tabuľke 15.

3D virtuálne modely boli z CTA dát vyrekonštruované v 16 / 313 (5,1%) prípadoch u 16 / 280 (5,7%) pacientov. 15 / 16 (93,8%) CTA vyšetrení bolo zrealizovaných v celkovej anes-tézii alebo sedácii, keďže 12 pacientov v čase realizácie CTA malo vek < 1 rok a 4 pacienti boli vo vekovej skupine 2–9 rokov. 10 / 16 (62,5%) modelov bolo vytvorených u pacientov s natívnou VCC a 6 / 16 (37,5%) u pacientov s VCC po operácii. Vysegmentované boli 4 „odliatkové“ modely a 12 „reálnych“ modelov. Prehľad diagnóz, u ktorých boli 3D modely vytvorené ako

aj odporúčania pre následný klinický manažment pacientov, stanovené na základe analýzy 3D modelov uvádza tabuľka 16.

Na obrázkoch 6–11 sú uvedené konkrétne CTA nálezy, respektíve 3D virtuálne modely, aj s odporúčaniami pre následný klinický manažment pacientov, stanovených na základe analýzy, či už CTA náleзов, alebo 3D modelov.

DISKUSIA

Počet 313 CTA vyšetrení zrealizovaných v priebehu 1 roka v rámci nášho centra potvrdzuje, že CTA vyšetrenie sa jednoznačne etablovalo na poli zobrazovacích metód u det-ských pacientov s ochoreniami srdca.

Tab. 8: CTA indikované na zobrazenie komplexnej intra- a extrakardiálnej anatómie u pacientov s natívnou VCC: heterotaxiou. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Susp. pravostranný izomerizmus s komplexnou VCC	2	2x potvrdenie pravostranného izomerizmu a komplexnej VCC (TAPVD vrátane)	2x paliatívna liečba
Susp. ľavostranný izomerizmus s D-TGA, VSD	1	Situs viscerum inversus	Kardiochirurgický zákrok

D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, VSD – defekt komorového septa, TAPVD – totálny anomálny návrat pľúcnych vén.

Tab. 9: CTA indikované na zobrazenie koronárnych artérií u pacientov s VCC po intervencii. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
D-TGA po BASS na vylúčenie intramurálneho priebehu LCA	1	Nepotvrdené	1x kardiochirurgický zákrok
D-TGA po ASO na vylúčenie stenózy LCA	1	Nepotvrdené	Bez intervencie
Suspektná stenóza LCA u pacientov po chirurgickej plastike stenotickej aortálnej chlopne	2	1x potvrdená 1x nepotvrdená	1x kardiochirurgický zákrok s revíziou LCA 1x kardiochirurgický zákrok

D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, ASO – anatomická korekcia, BASS – balóniková átriaseptostómia, LCA – ľavá koronárna artéria.

Tab. 10: CTA indikované na zobrazenie pľúcnych vén, oblasti predsieni či systémových vén u pacientov s VCC po intervencii. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Suspektná stenóza PV po chirurgickom uzávere ASD II	1	1x nepotvrdené	Bez intervencie
Suspektná stenóza PV po operácii TAPVD	3	1x nepotvrdené 2x potvrdené	1x bez intervencie 1x kardiochirurgický zákrok (sutureless operácia) 1x paliatívna liečba po opakovaných neúspešných operáciách na stenotických PV
Suspektná stenóza PV po operácii Scimitar syndrómu	2	1x nepotvrdené 1x potvrdené	1x bez intervencie 1x katetrizačná intervencia
Suspektná stenóza conduitu medzi L-SVC a RAA u L-izomerizmu	1	1x potvrdené	Katetrizačná intervencia
Suspektná stenóza conduitu medzi L-SVC a RAA u L-izomerizmu	1	1x nepotvrdené	Bez intervencie
Vylúčenie trombózy vena anonyma pri chylotoraxe u pacienta s AVSDC po operácii	1	Potvrdené	Trombolýza
Definovať diameter LA u pacienta po implantácii arteficiálnej MV	1	Detailný popis diametra LA	Kardiochirurgický zákrok (implantácia väčšej arteficiálnej MV do supramitrálnej pozície)

PV – pľúcne vény, ASD II – defekt predsieňového septa typu secundum, TAPVD – totálny anomálny návrat pľúcnych vén, L-SVC – ľavostranná horná dutá žila, RAA – uško pravej predsieni, L-izomerizmus – ľavostranný izomerizmus, LA – ľavá predsieň, AVSDC – defekt predsieňovo-komorového septa, MV – mitrálna chlopňa.

Tab. 11: CTA indikované na zobrazenie aorty a jej vetiev u pacientov s VCC po intervencii. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Suspektná ReCoA po operácií	14	13× nepotvrdené 1× potvrdené	13× bez intervencie 1× kardiochirurgický zákrok: plastika AoA a Ao istmu
Suspektná restenóza AoA po operácii IAA	4	2× nepotvrdená 1× potvrdená 1× nález kolapsu ľavého hlavného bronchu pri externom útlaku krátkym AoA	2× bez intervencie 1× kardiochirurgický zákrok (plastika AoA) 1× kardiochirurgický zákrok (aortopexia AoA)
Vaskulárny ring po operácii: susp. stenóza v oblasti AoA	2	2× nepotvrdené	2× bez intervencie
Suspektná stenóza renálnej artérie po implantácii stentu	1	Detailný nález	Katetrizačná intervencia
Suspektná restenóza v subaortálnej oblasti	1	Potvrdené	Kardiochirurgický zákrok
Suspektná restenóza v oblasti SVAS u pacienta s WBS	1	Potvrdené	Kardiochirurgický zákrok
Suspektná stenóza v oblasti Ao asc u pacienta s D-TGA po ASO	1	Potvrdené	Katetrizačná intervencia

ReCoA – rekoarktácia aorty, IAA – interupcia aortálneho oblúka, AoA – aortálny oblúk, SVAS – supraválvarna aortálna stenóza, D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, ASO – anatomická korekcia

Tab. 12: CTA indikované na zobrazenie pľúcnic, jej vetiev u pacientov s VCC s dvojkomorovou cirkuláciou po intervencii v tejto oblasti. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Stenózy AP alebo ramien AP u TOF / DORV / TAC / PA po operácii	54	24× nález stenózy 4× anatomia RVOT vhodná na katetrizačnú implantáciu Edwardsovej chlopne 26× bez nálezu stenóz	12× kardiochirurgický zákrok 12× katetrizačná intervencia (8× balónová angioplastika, 4× implantácia stentov) 4× implantácia Edwardsovej chlopne 26× bez intervenčnej liečby
Suspektné stenózy ramien AP u D-TGA po ASO	27	1× trombus v AP 1× fistula medzi Ao asc a AP 1× reziduálne MAPCAs 24× bez nálezu stenóz	1× kardiochirurgický zákrok (trombektómia) 1× bez intervencie 1× katetrizačná intervencia (uzáver MAPCAs) 24× bez intervencie
Suspektné stenózy ramien AP u D-TGA po Nikaidoh operácii	3	2× významné stenózy pľúcnic 1× nepotvrdené	2× katetrizačná intervencia (balónová angioplastika) 1× bez intervencie
Suspektné zúženie conduitu RV-AP u pacientov s aortálnou chybou po Rossovej operácii	4	2× nepotvrdené 2× potvrdené	2× bez intervencie 1× kardiochirurgický zákrok 1× katetrizačná intervencia
Zobrazenie AP a pľúcnic u IAA / HLHS / HRHS / AVSDC / VSD po BAP	7	2× primeraný anatomický nález 5× stenózy pľúcnic	2× bez intervencie 5× kardiochirurgický zákrok
alebo bilaterálnom BAP u DORV / HRHS / PA po spojkovej operácii (+ zobrazenie spojky)	9	5× spojka bez stenózy 4× stenóza spojky / ramien AP tesne vedľa inzercie spojky	5× bez intervencie 2× katetrizačná intervencia (implantácia stentu pľúcnic) 2× kardiochirurgický zákrok
Zobrazenie MAPCAs a natívnych ramien AP u pacientov s PA, VSD, MAPCAs po operácii	11	1× extrémna kardiomegália podmieňujúca kolaps bronchov 10× detailné zobrazenie uvedených štruktúr	1× paliatívna liečba 4× katetrizačná intervencia 2× kardiochirurgický zákrok 6× bez intervencie

AP – pľúcnica, TOF – Fallotova tetralógia, DORV – dvojitý výtok z pravej komory, TAC – spoločný arteriálny trunkus, PA – atrézia pľúcnice, D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, ASO – anatomická korekcia, LVOTO – obštrukcia výtokového traktu ľavej komory, VSD – defekt komorového septa, RV – pravá komora, HLHS – syndróm hypoplázie ľavého srdca, HRHS – syndróm hypoplázie pravého srdca, AVSDC – defekt predsieňovo-komorového septa, BAP – banding pľúcnic, MAPCAs – mnohočetné aortopulmonálne kolaterály, RVOT – výtokový trakt pravej komory, Ao – aorta.

Tab. 13: CTA indikované na zobrazenie komplexnej intrakardiálnej komorovej anatómie u pacientov s komplexnými VCC po intervencii. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
Anatómia VSD po BAP	2	2x detailné zobrazenie	2x kardiochirurgický zákrok (dvojkomorové riešenie)
Anatómia VSD po BAP u pacienta s DORV	1	Detailné zobrazenie	Kardiochirurgický zákrok (dvojkomorové riešenie)
Anatómia VSD u pacienta s DORV, MGA po mBT shunte	1	Detailné zobrazenie	Kardiochirurgický zákrok (dvojkomorové riešenie)
Suspektný straddling MV u pacienta s D-TGA, VSD po mBT shunte	1	Nález potvrdený	Kardiochirurgický zákrok (jednokomorové riešenie)
Hodnotenie kapacity RV u HRHS po implantácii stentu do PDA / po mBT shunte	2	Dostatočná kapacita RV	2x kardiochirurgický zákrok (dvojkomorové riešenie)

VSD – defekt komorového septa, BAP – banding pľúcnice, DORV – dvojitý výtok z pravej komory, MGA – malpozíčné postavenie veľkých ciev, mBT shunt – modifikovaná Blalock Taussigovej spojka, MV – mitrálna chlopňa, D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, RV – pravá komora, PDA – perzistujúci arteriálny duktus, HRHS – syndróm hypoplázie pravej komory.

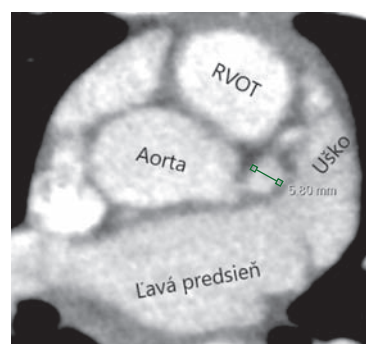
Tab. 14: CTA indikované na zobrazenie anatómie BDG anastomózy a ramien AP u pacientov s VCC s funkčne jednokomorovou cirkuláciou po BDG, a na zobrazenie anatómie systému Fontana u pacientov s VCC s funkčne jednokomorovou cirkuláciou po FF. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku CTA.

Indikácia CTA	n	CTA nález	Výstup CTA
HLHS / PA / DORV so vzdialeným VSD / TA / D-izomerizmus / L-izomerizmus po BDG	14	2x trombólýza vena anonyma 7x bez stenózy systému BDG 3x stenóza systému BDG	1x trombólýza 1x paliatívna liečba 4x bez intervencie 3x kardiochirurgický zákrok (FF) 3x katetrizačná intervencia
HRHS / HLHS / PA / TA / EA, / L-izomerizmus po FF	25	1x stent medzi angulus venosus vľavo a LA trombotizovaný 1x stenóza BDG anastomózy 1x pľúcne AV malformácie / veno-venózne kolaterály 1x stenózy stentov v ramenách AP 1x MAPCAs 20x primeraný anatomický nález	1x trombólýza 1x katetrizačná intervencia (balónová dilatácia) 1x katetrizačná intervencia (uzáver AV malformácií a kolaterál) 1x katetrizačná intervencia (balónová dilatácia stentov) 1x katetrizačná intervencia (uzáver MAPCAs) 20x bez intervencie
D-izomerizmus / PA po FF s hemoptýzou	2	2x stranovo potvrdené zakrvácanie v pľúcach	2x katetrizačná intervencia (selektívny uzáver MAPCAs)

HLHS – syndróm hypoplázie ľavej komory, HRHS – syndróm hypoplázie pravej komory, DORV – dvojitý výtok z pravej komory, PA – atrezia pľúcnice, TA – trikuspidálna atrezia, D-izomerizmus – pravostranný izomerizmus, L-izomerizmus – ľavostranný izomerizmus, BDG – bidirekčná Glennova anastomóza, EA – Ebsteinova anomália, FF – Fontanova operácia s fenestráciou, AV malformácie – arteriovenózne malformácie, MAPCAs – mnohopočetné aortopulmonálne kolaterály.

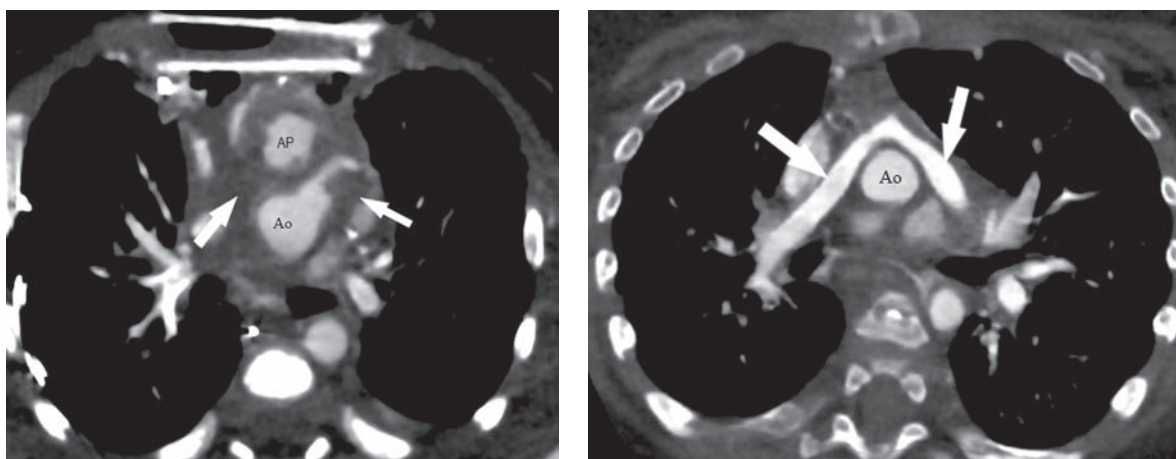
Tab. 15: Klinický výstup u pacientov stanovený na základe výsledkov CTA vyšetrení

Prínos CT vyšetrenia v ďalšom manažmente pacientov	n	%
Bez ďalšej intervencie / konzervatívny postup	134	42,9%
Katetrizačná intervencia	42	13,5%
Kardiochirurgický zákrok	118	37,8%
Trombólýza	5	1,6%
Zmena antikoagulačnej liečby	1	0,3%
Paliatívna liečba	9	2,9%
Kryoablácia	1	0,3%
Nutné doplnenie alternatívneho zobrazovania pri nedostatočnej kvalite CTA zobrazenia	2	0,6%



Obr. 6: CTA 10-ročného pacienta dlhodobu sledovaného po prekonaní Kawasakiho choroby. Axiálna rovina. Zelená úsečka ukazuje diameter aneuryzmaticky dilatovanej ľavej koronárnej artérie. Na základe jej nameraného diametra a jeho zaindexovaní na povrch tela bola u pacienta podľa aktuálnych odporúčaní⁽¹⁴⁾ zmenená antikoagulačná liečba na duálnu antitrombotickú liečbu.

RVOT – výtokový trakt pravej komory.



Obr. 7: CTA u 2-týždňového pacienta s D-transpozíciou veľkých ciev po chirurgickej korekcii (arteriálny switch s LeCompte manévrom) na ECMO (mimotelový obeh) pre závažnú hypoxémiu (pacient s otvoreným hrudníkom). CTA (obrázok vľavo) odhalilo kompletnú trombozu oboch ramien pľúcnice (šípky ukazujú na miesta, kde by mali byť opacifikovné ramená pľúcnice). Pacient prežil iba vďaka alternatívnej perfúzií pľúc prostredníctvom aortopulmonálnych kolaterál. Na základe CTA nálezu bola u pacienta realizovaná chirurgická trombektómia s výborným efektom. Kontrolné CTA už po zatvorení hrudníka bez ECMO (obrázok vpravo). Šípky ukazujú na ramená pľúcnice obsadzajúce aortu po LeCompte manévri. Oba obrázky v axiálnej projekcii.

Ao – aorta, AP – pľúcnicca.

Tab. 16: Prehľad indikácií výroby 3D modelov. Uvedený je aj následný klinický manažment pacientov stanovený na základe výsledku analýzy 3D modelov. Prvé 4 modely sú vysegmentované ako „odliatkové“ modely. Ostatné modely sú vysegmentované ako „reálne“ modely.

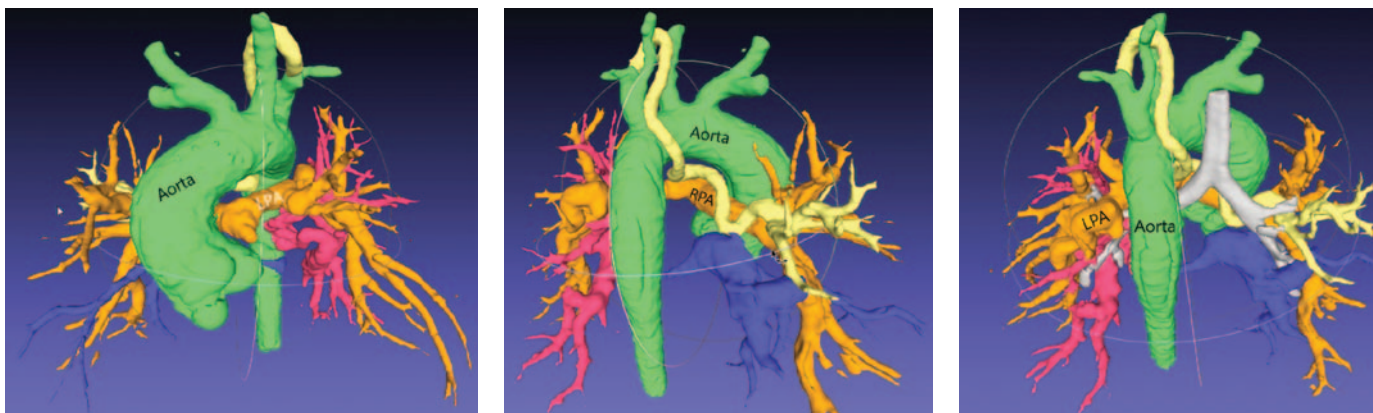
Indikácia 3D modelu	Vek	n	3D model nález	Výstup CTA
Zobrazenie MAPCAs, natívnych ramien AP u PA, VSD, MAPCAs	6m 8m	2	Detailná charakteristika MAPCAs, detailné zobrazenie ramien AP	2× kardiochirurgický zákrok (komplexný)
Suspektný vaskulárny ring	9m	1	R-AoA s Kommerelovým divertiklom	1× kardiochirurgický zákrok
TOF s dysplastickou APV	3d	1	Extrémne dilatované ramená AP s výrazným externým útlakom bronchov	1× paliatívna liečba (pri závažnej respiračnej insuficiencii)
Zobrazenie PV pri podozrení na PAPVD a prehľadná anatómia okrajov ASD II v rámci zvažovania možnosti katetrizačného uzáveru ASD II	4r	1	Normálny návrat pľúcnych vén do LA, krátky okraj ASD II k AV chlopniam	1× kardiochirurgický zákrok
Zobrazenie anatómie pri ASD II a susp. cor triatriatum	8m	1	Detailné zobrazenie ASD II, cor triatriatum ako aj nového nálezu PAPVD	1× kardiochirurgický zákrok (komplexný)
Zobrazenie výtokového traktu RV a koronárnych artérií u TOF	9r	1	Detailné zobrazenie	1× kardiochirurgický zákrok (komplexný)
Priestorový vzťah ústia pľúcnych vén voči predsieňovému septu u kombinovaného typu TAPVD	3d	1	Detailné zobrazenie priestorového vzťahu uvedených štruktúr	1× kardiochirurgický zákrok (komplexný)
Veľkosť, tvar a priestorový vzťah VSD k trabekulám v RV k AV chlopniam a k semilunárnym chlopniam / rozhodovanie medzi dvojkomorovou a jednokomorovou cirkuláciou: VSD po BAP: 2 Multi VSD: 1 DORV: 4 D-TGA, VSD, LVOTO: 1	2m 2m 3d 7m 3m 6m 9m 3r	8	Detailné zobrazenie priestorového vzťahu uvedených štruktúr	8× kardiochirurgický zákrok (7× dvojkomorové riešenie, 1× jednokomorové riešenie)

MAPCAs – mnohočetné aortopulmonálne kolaterály, AP – pľúcnicca, PA – atrezia pľúcnicce, VSD – defekt komorového septa, TOF – Fallotova tetralógia, APV – pľúcna chlopňa, PV – pľúcne veny, PAPVD – parciálny anomálny návrat pľúcnych vén, ASD II – defekt predsieňového septa typu secundum, RV – pravá komora, TAPVD – totálny anomálny návrat pľúcnych vén, AV chlopne – átrioventrikulárne chlopne, BAP – banding pľúcnicce, DORV – dvojitý výtok z pravej komory, D-TGA – D-transpozícia veľkých ciev, LVOTO – obštrukcia výtokového traktu ľavej komory, R-AoA – pravostranný aortálny oblúk, LA – ľavá predsieň, d – deň, m – mesiac, r – rok.

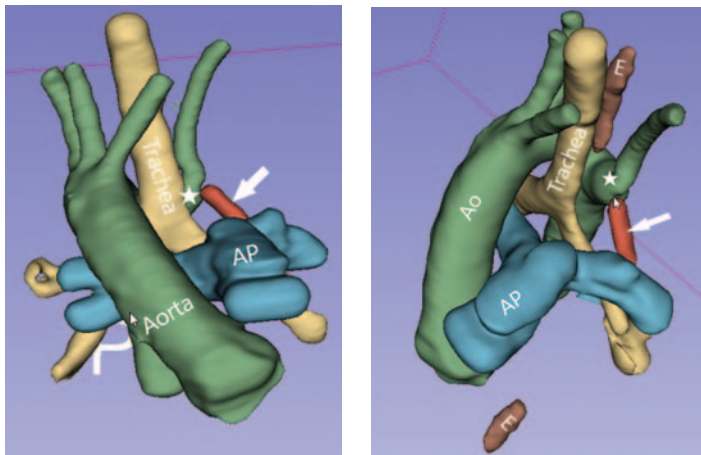
Z kohorty 280 pacientov bolo CTA vyšetrenie vykonané v 39 prípadoch (13,9%) u novorodencov, čo pri odhadovanej ročnej incidencii cca 100–120 novorodencov s kritickými vrodenými chybami srdca na Slovensku predstavuje cca 30–40percentný podiel využívania CTA u tejto skupiny pacientov. Na druhej strane bola CTA zrealizovaná aj u 14 dospelých pacientov s VCC, ktorí sú zatiaľ stále v starostlivosti detských kardiológov.

Väčšina pacientov veku > 5 rokov nevyžadovala sedáciu alebo celkovú anestéziu počas vyšetrenia. Výnimkou bolo iba 10 pacientov s mentálnou retardáciou, úzkosťou či klaustrofóbiou. Efektívne radiačné dávky pacientov

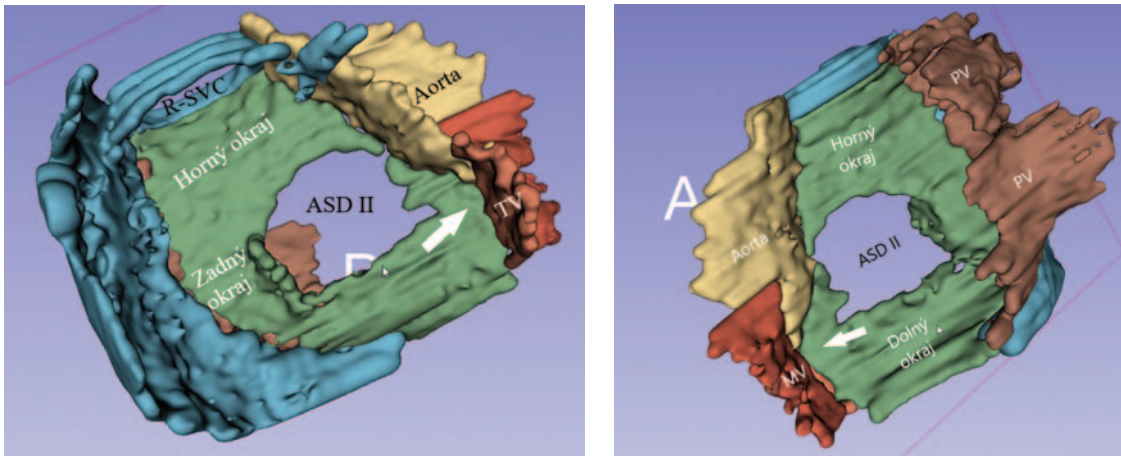
od novorodeneckého veku po štrnásť rok života (mediány 0,75–1,94 mSv) zodpovedali radiačným dávkam uvádzaným pri využívaní najmodernejších CT prístrojov.⁽⁸⁾ Vyšší medián efektívnej radiačnej dávky 7,9 mSv sme zaznamenali vo vekovej skupine pätnásť a viacročných pacientov. V rámci prevencie zníženia onkogénneho potenciálu kumulatívnych radiačných dávok najmä v skupine pacientov s plánovanými opakovanými CTA vyšetreniami bude v budúcnosti nutné zvažovať realizáciu CMR ako alternatívnej zobrazovacej metódy, aj keď za cenu zníženej kvality anatomického zobrazenia kardiovaskulárnych štruktúr.



Obr. 8: 3D virtuálny „odliatkový“ model extrakardiálnych cievnych štruktúr u 8-mesačného pacienta s natívnou VCC: atrézia pľúcnic s defektom komorového septa a mnohopočetnými aortopulmonálnymi kolaterálami (MAPCAs). Oranžové cievy predstavujú natívne ramená pľúcnic s minimálnym atretickým kmeňom. Žltá, modrá a červená cieva predstavuje jednotlivé MAPCAs. Pohľadmi z rôznych perspektív je možné hodnotiť: ich odstuhy z aorty / priebehy / prítomnosť stenóz v ich priebehu / pľúcne segmenty, ktoré jednotlivé MAPCAs zasobujú / či sa spájajú s natívnymi ramenami pľúcnic. Žltá kolaterála nekomunikuje s ramenami pľúcnic. Červená kolaterála komunikuje s natívnym ramenom pľúcnic (LPA). Modrá kolaterála má pri svojom odstupe výraznú stenózu. Na obrázku vpravo je šedou farbou vysegmentovaný aj tracheobronchiálny strom. Takto je možné definovať, ktoré kolaterály prebiehajú pred / za / nad / pod bronchami, čo je dôležitá informácia pre kardiochirurga z hľadiska plánovania unifokalizácie týchto kolaterál v rámci operácie. Na základe analýzy 3D modelu bola naplánovaná kompletná chirurgická korekcia pozostávajúca z uzatvorenia defektu komorového septa, spojenia pravej komory s krátkym kmeňom pľúcnic, ligácie červenej kolaterály a z pokusu o unifokalizáciu (odpojenie kolaterály z aorty a jej našitie na natívne rameno pľúcnic) žltej a modrej kolaterály na RPA (pravé rameno pľúcnic). Obrázok vľavo: anteriórny pohľad. Stredný obrázok a obrázok vpravo: posteriórny pohľad.

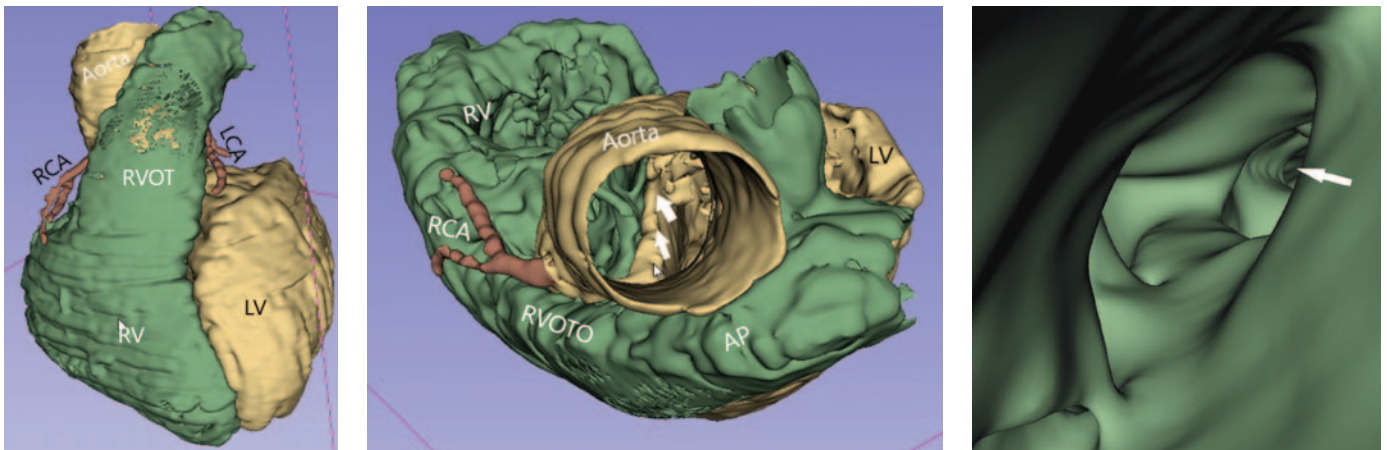


Obr. 9: 3D virtuálny „odliatkový“ model extrakardiálnych cievnych štruktúr u 9-mesačného pacienta so symptómami inspiračného stridoru a dysfágie. 3D model zobrazuje druhú najčastejšiu variantu symptomatického aortálneho ringu: pravostranný aortálny oblúk s Kommerelovým divertiklom s aberantne odstupujúcou ľavostrannou arteriou subclaviou (označené bielou *). V oblasti pred Kommerelovým divertiklom je malý priestor podmieňujúci stenózu distálneho úseku priedušnice a ľavého hlavného bronchu, ako aj významný útlak pažeráka (označený ako „E“). Na obrázku vpravo je vidieť, že lumen pažeráka sa obnovuje až v kaudálnejšej oblasti. Aortálny ring zužujúci priestor pre priedušnicu a pažerák je kompletizovaný prostredníctvom „ligamentum arteriosum“ (pozostatok arteriálneho ductu), ktorý keďže nemá lumen, sa pomocou CTA zobrazí nedá, no pre prehľadnosť je na 3D modeli dokreslený tehlovočervenou farbou (ukazuje naň šípka). Na základe analýzy 3D modelu bola naplánovaná kardiochirurgická operácia s cieľom prečatia ligamentum arteriosum s cieľom otvorenia aortálneho ringu a dosiahnutia tak odstránenia externého útlaku na priedušnicu a pažerák. Obrázok vľavo: anteriórny pohľad. Obrázok vpravo: pohľad zľava a mierne zhora.



Obr. 10: 3D virtuálny „reálny“ model intrakardiálnych štruktúr u 4-ročného pacienta s echokardiografickým nálezom defektu predsieňového septa typu secundum (ASD II) a podozrením na parciálny anomálny návrat pravostranných pľúcnych vén do pravej predsieni. Pre väčšiu prehľadnosť bola vysegmentovaná iba časť srdca v okolí medzipredsieňového septa. Parciálny anomálny návrat pravostranných pľúcnych vén bol vylúčený, keďže je vidieť, že pravostranné pľúcne veny (PV) ústia do ľavej predsieni. Zelenou farbou je vysegmentované medzipredsieňové septum. Obrázok vľavo: pohľad na ASD II z pravej predsieni. Obrázok vpravo: pohľad na ASD II z ľavej predsieni. Zvažovaná možnosť katetrizačného uzáveru ASD II pomocou samoexpanzibilného oklúzora. Na to, aby disky oklúzora neinterferovali s okolitými štruktúrami je nevyhnutné, aby okraje defektu mali aspoň 7mm. Horný, zadný a dolný okraj defektu je dostatočný, avšak okraj k aorte a trikuspidálnej či mitrálnej chlopni je príliš krátky (cca 2-4mm), preto bolo na základe analýzy 3D modelu rozhodnuté, že pre pacienta bude bezpečnejší chirurgický uzáver ASD II.

R-SVC – horná dutá žila, TV – trikuspidálna chlopňa, MV – mitrálna chlopňa.



Obr. 11: 3D virtuálny „reálny“ model extra- aj intrakardiálnych štruktúr u 9-ročného pacienta klinicky sa manifestujúceho centrálnou cyanózou. Išlo o pacienta s echokardiograficky diagnostikovanou Fallotovou tetralógiou. 3D model bol indikovaný na zobrazenie výtokového traktu pravej komory (RVOT) a zobrazenie koronárnych artérií s cieľom vylúčenia priebehu ramus interventricularis anterior pred RVOT (takýto nález kontraindikuje realizáciu transanulárnej záplaty cez pľúcnu chlopňu v rámci kompletnej chirurgickej korekcie chyby). Obrázok vľavo: anteriórny pohľad. Zobrazené normálne odstupy a priebehy koronárnych artérií. Stredný obrázok: pohľad zhora. Cez ascendentnú aortu pri pohľade nadol do srdca je vidieť hornú hranu medzikomorového septa (zobrazená bielymi šípkami), nad ktorou sa nachádza defekt komorového septa, keďže pri pohľade z aorty je vidieť do oboch srdcových komôr. Zároveň sa vizualizuje užší výtokový trakt pravej komory (RVOTO). Obrázok vpravo: detailný pohľad do stenotického RVOTO z pľúcnice (pohľad zhora nadol), v ktorom je vidieť početné svalové trabekuly. Biela šípka ukazuje na vyústenie stenotického RVOTO smerom do pravej komory (RV). Na základe analýzy 3D modelu bola indikovaná kompletná chirurgická korekcia pozostávajúca z uzáveru defektu komorového septa pomocou záplaty, z resekcii svalových trabekúl v RVOT a z realizácie transanulárnej záplaty cez anulus pľúcnej chlopne s cieľom rozšírenia pľúcnice.

RV – pravá komora, LV – ľavá komora, RCA – pravá koronárna artéria, LCA – ľavá koronárna artéria.

Klinicky neprínosné boli iba 2 / 313 vyšetrení pre neostre zobrazenie jemných cievnych štruktúr pri vysokej srdcovej frekvencii počas skenovania (> 130 / min). Z tohto dôvodu pri indikácii zobrazovania detailov koronárnych artérií či aortopulmonálnych kolaterál bude v budúcnosti pred samotným skenovaním požadované prechodné spomalenie frekvencie srdca na hodnoty cca 90–100 / min u detí do 3 rokov a na hodnoty cca 60–80 / min u starších pacientov s vyšpecifikovaním skenovacej fázy počas srdcového cyklu.⁽¹³⁾

CTA bola indikovaná iba minimálne u chorých so získanými chorobami srdca, no napriek tomu má vyšetrenie svoj význam v rámci manažmentu napríklad u pacientov po Kawasakiho chorobe v rámci exaktného hodnotenia diametra potenciálne dilatovaných koronárnych artérií, ktorého hodnota podmieňuje následný manažment antikoagulačnej a antitrombotickej liečby.⁽¹⁴⁾

CTA bola dominantne indikovaná u detí s VCC. V skupinách pacientov s či už natívnymi VCC, alebo VCC po intervencii, podobne ako v literatúre, dominovali indikácie s cieľom zobrazenia aorty, pľúcnice, pľúcnych vén či koronárnych artérií.^(15–18)

Naše skúsenosti s 3D virtuálnymi modelmi pri intervenčnom plánovaní korelovali s literárnymi údajmi deklarujúcimi

fakt, že 3D virtuálne modely sú najvhodnejšou a najprehľadnejšou formou zobrazenia anatomických štruktúr pri komplexných VCC, a preto sú výborne využiteľné v rámci intervenčného plánovania v tejto skupine pacientov.⁽¹²⁾ 3D modely sú zároveň excelentnou edukačnou pomôckou pre výuku pediatrickej kardiológie ako aj pre názorné vysvetľovanie rodičom, akou VCC ich dieťa trpí.⁽¹⁹⁾ Zároveň môže byť na modeli prehľadne ukázané, v čom bude spočívať intervenčný výkon. Oba typy edukácie sme na našom pracovisku už vo viacerých prípadoch využili, a to s výborným ohlasom.

ZÁVER

CTA je v pediatrickej kardiológii stále viac využívaným zobrazovacím vyšetrením zameraným na hodnotenie anatómie kardiovaskulárneho systému najmä u pacientov s vrodenými chybami srdca. Virtuálne 3D modely srdca sú v súčasnosti najmodernejšou formou anatomického zobrazovania komplexných VCC. Výsledky našej štúdie preukázali, že využívanie CTA ako aj virtuálnych 3D modelov významne prispieva k optimalizácii klinického manažmentu detských pacientov s ochoreniami srdca. |

LITERATÚRA

1. **Abdulla R, Luxenberg DM.** Cardiac interpretation of pediatric chest X-ray. In: Abdulla, Ri. (eds). *Heart Diseases in Children*. Boston, MA: Springer 2011: 17–34.
2. **Wyman WL, Geva T, Girish S, et al.** Guidelines and standards for performance of a pediatric echocardiogram: a report from the task force of the Pediatric Council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2006; 19(12): 1413–1430.
3. **Miller-Hance WC, Puchalski MD, Ayers NA, et al.** Indications and guidelines in pediatric and congenital heart disease. In: Wong PC, Miller-Hance WC (eds). *Transesophageal Echocardiography for Pediatric and Congenital Heart Disease*. Cham : Springer 2021: 71–90.
4. **Secinaro A, Ait-Ali L, Curione D, et al.** Recommendations for cardiovascular magnetic resonance and computed tomography in congenital heart disease: a consensus paper from the CMR / CCT working group of the Italian Society of Pediatric Cardiology (SICP) and the Italian College of Cardiac Radiology endorsed by the Italian Society of Medical and Interventional Radiology (SIRM) Part I. *Radiol Med* 2022; 127(7): 788–802.
5. **Olejník P, Berecova Z, Boruta P, Masura J.** Vybrané kapitoly z detskej kardiológie: CT angiografia v detskej kardiológii.(online). 2012. 1. vyd. Bratislava: Univerzita Komenského: 1–156.
6. **Warin-Fresse K, Isorini MA, Dachner JN, et al.** Pediatric cardiac computed tomography angiography: Expert consensus from the Filiale de Cardiologie Pédiatrique et Congénitale (FCPC) and the Société Française d'Imagerie Cardiaque et Vasculaire diagnostique et interventionnelle (SFICV). *Diagn Interv Imaging* 2020; 101(6): 335–345.
7. **Ghasemi Shayan R, Oladghaffari M, Sajjadian F, Fazel Ghazyani M.** Image quality and dose comparison of single-energy CT (SECT) and dual-energy CT (DECT). *Radiol Res Pract* 2020; 1403957. doi: 10.1155 / 2020 / 1403957
8. **Rigsby CK, McKenney SE, Hill KD, et al.** Radiation dose management for pediatric cardiac computed tomography: a report from the Image Gently 'Have-A-Heart' campaign. *Pediatr Radiol* 2018; 48: 5–20.
9. **Schmauss D, Haeberle S, Hagl C, et al.** Three-dimensional printing in cardiac surgery and interventional cardiology: a single-centre experience. *Eur J Cardiothorac Surg* 2015; 47: 1044–1052.
10. **Lau I, Sun Z.** Three-dimensional printing in congenital heart disease: A systematic review. *J Med Radiat Sci* 2018; 65(3): 226–236.
11. **Olejník P, Nosal M, Havran T, et al.** *Kardiol Pol* 2017; 75, 5: 495–501. doi: 10.5603 / KP.a2017.0033
12. **Király L, Shah NC, Abdullah O, et al.** Three-dimensional virtual and printed prototypes in complex congenital and pediatric cardiac surgery—a multidisciplinary team-learning experience. *Biomolecules* 2021; 11(11). doi: 10.3390 / biom11111703
13. **Le Roy J, et al.** Selection of optimal cardiac phases for ECG-triggered coronary CT angiography in pediatrics. *Physica Medica* 2021; 81: 155–161. doi: 10.1016 / j.ejmp.2020.12.002
14. **McCordle BW, Rowley AH, Newburger JW, et al.** Diagnosis, treatment, and long-term management of Kawasaki disease: a scientific statement for health professionals from the American Heart Association. Originally published 29 Mar 2017, Correction 29 Jul 2019. *Circulation* 2019; 140: e181–e184.
15. **Abdel Razek AAK, et al.** Computed tomography angiography and magnetic resonance angiography of congenital anomalies of pulmonary veins. *J Comput Assist Tomogr* 2019; 43(3): 399–405. doi: 10.1097 / RCT.0000000000000857
16. **Abdel Razek AAK, Al-Marsafawy H, Elmansy M.** Imaging of pulmonary atresia with ventricular septal defect. *J Comput Assist Tomogr* 2019; 6: 906–911. doi: 10.1097 / RCT.0000000000000938
17. **Yun G, Nam TH, Chun EJ.** Coronary artery fistulas: pathophysiology, imaging findings, and management. *RadioGraphics* 2018; 3: 688–703. doi: 10.1148 / rg.2018170158
18. **Rose-Felkner K, et al.** Preoperative use of CT angiography in infants with coarctation of the aorta. *World J Pediatr Congenit Heart Surg* 2017; 2: 196–202. doi: 10.1177 / 2150135116683929
19. **Awori, et al.** 3D models improve understanding of congenital heart disease. *3D Print Med* 2021; 7: 26. doi: 10.1186 / s41205-021-00115