

Dvoenergijska računalniško-tomografska preiskava pri obravnavi bolnikov s kamni v sečilih

Dual energy CT for evaluation of patients with urinary stones

Marija Šantl - Letonja, Tine Hajdinjak

General Hospital Murska Sobota

Korespondenca/ Correspondence:

dr. Marija Šantl Letonja,
e: marija.santl@sb-ms.si

Glavne besede:

litijaza; diagnostično slikanje; računalniška tomografija (CT); ledvična kolika

Key words:

lithiasis; calculi; diagnostic imaging; tomography; computed tomography; renal colic

Citirajte kot/Cite as:

Zdrav Vestn 2014;
83 supl: 1-30-8

Prispelo: 15. jul. 2013,
Sprejeto: 26. avg. 2013

Izveček

Velikost, umeščenost in ocena sestave kamna v sečilih narekujejo terapevtske ukrepe. Nativna nizkoenergijska računalniško-tomografska preiskava (CT) je nadomestila intravensko urografijo pri opredelitvi velikosti in položaja kamnov. V zadnjem času pa lahko vse bolj natančno s pomočjo CT preiskave ocenimo tudi sestavo kamna. Z dvoizvornim računalniškim tomografom z dvoenergijskimi algoritmi z visoko natančnostjo ločimo med uratnimi in neuratnimi kamni, kar je lahko odločilno za načrtovanje terapevtskih ukrepov.

Abstract

Size, location and estimation of urinary stone composition dictate treatment decisions. Non-contrast low-dose CT has replaced i.v.urography for the evaluation of size and position of stone. Recently, CT has also improved its ability to, in certain cases, estimate urinary stone composition. Dual source CT with dual energy algorithms can distinguish urate from non-urate stones with high precision, which can be crucial in treatment planning.

Uvod

Kamni v sečilih (urolitiaz) so pogost vzrok akutne in kronične bolečine v trebuhu. Klinična slika je različna. Lahko poteka nemo ali s hudimi bolečinami, septičnim šokom, v 3 % pa je lahko posledica odpoved ledvic.^{1,2} Kamne v predelu sečil najdemo pri 5–12 % prebivalstva, pojavnost pa narašča, predvsem pri ženskah.³ Po zdravljenju se kamni, ki so sestavljeni iz kalcijevega oksalata, ponovijo čez leto dni pri 10 % bolnikov, čez 10 let pa pri 50 % bolnikov.³ Številni dejavniki, ki vplivajo na nastanek kamnov v predelu sečil so: dieta (povečan vnos živalskih proteinov, sladkorja in soli), spol (bolezen je pogostejša pri moških kot pri ženskah), sta-

rost (nekoč pri starostni skupini 20–40 let, danes pa vse bolj pri starejših), nizek vnos tekočin, genetski in geografski dejavniki.⁴ Kamni v sečilih nastanejo zaradi kristalizacije in agregacije koncentriranih sestavin urina. Kemično so glavne sestavine kalcijev oksalat v 40–60 %, v 5–15 % urična kislina, v 20–40 % hidroksiapatit in v 1–3 % cistin.³

Poznavanje sestave kamnov je v pomoč pri načrtovanju terapevtskih postopkov. Kamni, ki so sestavljeni iz cistina ali kalcijevega oksalata monohidrata, so manj primerni za zunajtelesno drobljenje (ESWL). Te večinoma poskušamo odstraniti z operacijo, na primer s perkutano nefrolitotomijo. Uratni

kamni ali kamni iz kalcijevega oksalata dihidrata se zelo dobro odzivajo na zunajtelesno drobljenje. Velik del uratnih kamnov pa je mogoče raztopiti z uporabo ustrezne prehrane in zdravljenj.⁵ Na osnovi poznavanja sestave kamna lahko postavimo sum na sistemsko presnovno motnjo. Posebni dietni režimi in zdravljenje z zdravili lahko zmanjšajo možnost napredovanja ali ponovitve bolezni, vendar le, če poznamo sestavo kamnov.⁶ *In vitro* določimo sestavo kamnov z rentgensko difrakcijo, z infrardečo spektroskopijo ali s polarizacijsko mikroskopijo. Te metode so zamudne, sorazmerno drage, analizo kamna pa lahko opravimo šele po izločitvi/odstranitvi kamna iz telesa.⁷ Pri tem pa ne moremo nikoli zagotovo vedeti, da je kamen ali del kamna, ki ga je bolnik izločil, po sestavi enak kamnu, ki je še v sečilih bolnika. Poročali so tudi o pogostih napakah pri laboratorijski analizi kamnov.⁸

Uporaba računalniške tomografije (CT) v vsakodnevni obravnavi bolnikov s sumom na kamne v sečilih je v zadnjih letih prinesla pomembne spremembe v klinično prakso. Prikazujemo jih skupaj z najnovejšo nadgradnjo, preiskavo z dvocevnim dvoenergijskim CT aparatom (*angl.* dual source CT, DSCT), ki nam omogoča oceniti sestavo kamnov. Tako lahko bistveno prispevamo k načrtovanju zdravljenja.⁹

Nativna nizkoenergijska CT preiskava

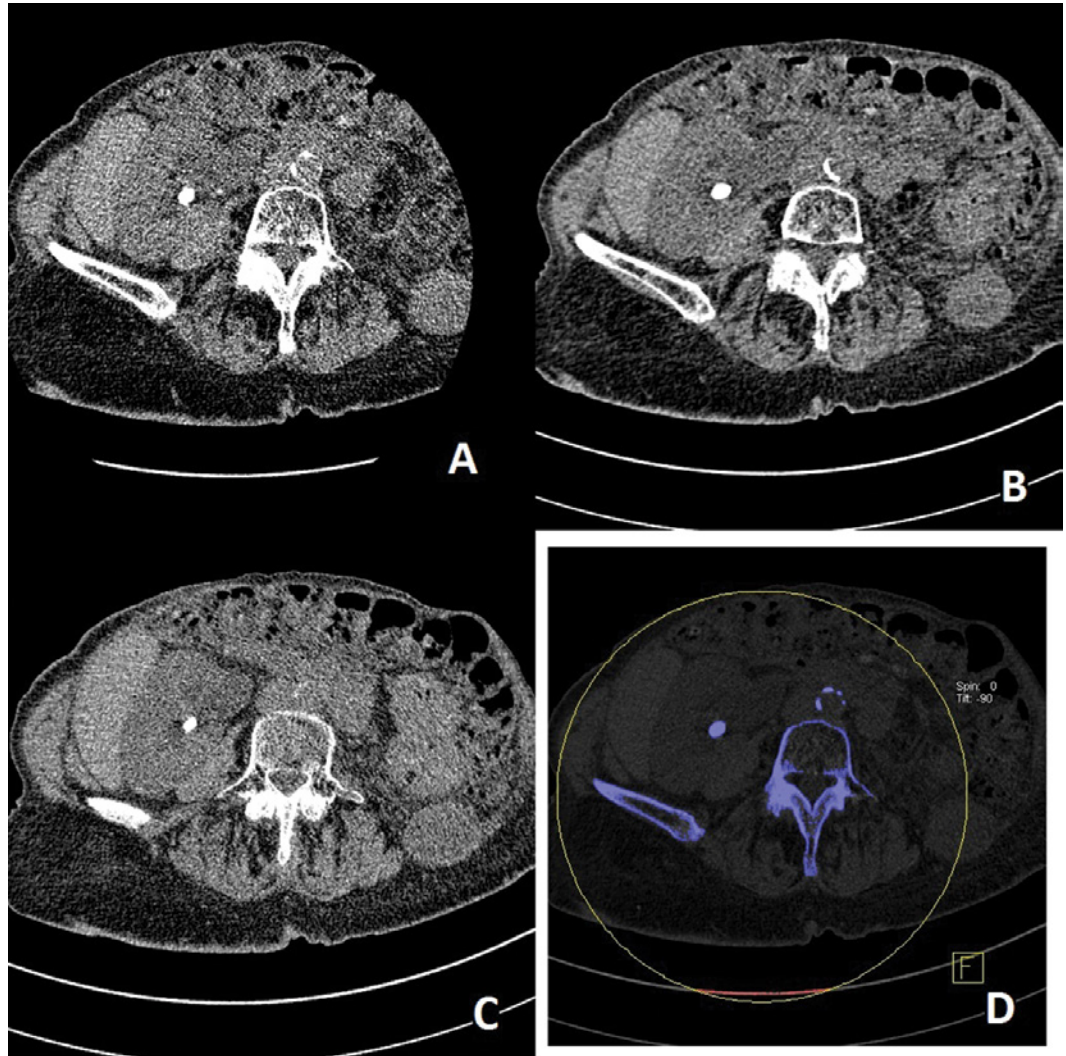
S CT prikažemo kamen, določimo mesto, velikost, število kamnov in njihovo obliko. Lahko ocenimo tudi hidronefrozo in več drugih akutnih dogajanj v trebuhu (žolčne kamne ...). CT preiskava sečil brez kontrastnega sredstva je nadomestila intravenozno urografijo, ki je bila v preteklosti zlati standard za prikaz kamnov v predelu sečil.^{10,11} CT preiskava ima visoko specifičnost in občutljivost za prikaz kamnov.¹² Uporabljajo se različni nizkoenergijski protokoli, ki temeljijo na zmanjšanem naboju rentgenske cevi in/ali v povečanem razmerju med premikom mize na rotacijo in širino snopa RTG žarkov (pri enorezinskih aparatih) oziroma na zmnožku števila kanalov z njihovo širino pri večrezinskih aparatih (*angl.*

pitch). S tem naboj rentgenske cevi znižamo na 30 mAs ali manj, napetost cevi je 120kV, *pitch* 1,25, uporabimo pa širšo kolimacijo. S takšnim protokolom CT preiskave zmanjšamo radiacijski odmerek za 50 % v primerjavi s standardno CT preiskavo.¹³ Obremenitev bolnika z ionizirajočim sevanjem je podobna kot pri nativnem rentgenskem posnetku trebuha.¹³

Tridimenzijaska (3D) rekonstrukcija

Zunajtelesno drobljenje kamnov je najpogostejši terapevtski postopek pri zdravljenju urolitiaz.¹⁴ Pri tem je potrebno vedeti ne samo, kje kamen je, potrebno je tudi predvideti, kako je drobljiv.¹⁵ Če je kamen zelo trd, je smiselnost obremenjevanja bolnika z zunajtelesnim drobljenjem vprašljiva, saj je verjetnost uspešnega drobljenja majhna.¹⁶ Na drugi strani pa je pri dobro drobljivih kamnih smiselno poskusiti z zunajtelesnim drobljenjem tudi pri sorazmerno večjih kamnih. CT preiskava nam ne pokaže samo prisotnosti, položaja in velikosti kamna v sečilih, vse več literature kaže na dejstvo, da lahko iz podatkov, pridobljenih s CT preiskavo, z dodatnimi analizami izvemo še več podatkov za načrtovanje zdravljenja (npr. oceno drobljivosti kamna).^{17,18} CT preiskava omogoča s 3D rekonstrukcijami predvideti drobljivost kamnov in s tem uspešnost zunajtelesnega drobljenja: že na pogled je mogoče oceniti, ali je površina kamna robata (v tem primeru se pričakuje boljše drobljivost) ali pa je kamen homogen in kompakten – z bolj gladko površino (v tem primeru se pričakuje slabša drobljivost).¹⁹ Dodatna analiza rekonstruirane površine na osnovi izračuna prilegajočih se krivulj (krivulja z manjšim polmerom kaže na bolj robat, torej mehkejši kamen) omogoča tudi objektivizacijo in kvantifikacijo tovrstne ocene ter ločevanje med kemijsko zelo podobnimi, vendar po trdoti različnimi kamni – kamni kalcijevega oksalata monohidrata in kalcijevega oksalata dihidrata.¹⁸

Slika 1: A – kamen v ledvici, 80 kV. B – kamen v ledvici, 140 kV. C – kamen v ledvici, 120 kV. D – selektivna rekonstrukcija s programom Syngo DE – Kidney stones (Siemens) – modro obarvanje kaže, da kamen v ledvici ni uraten.



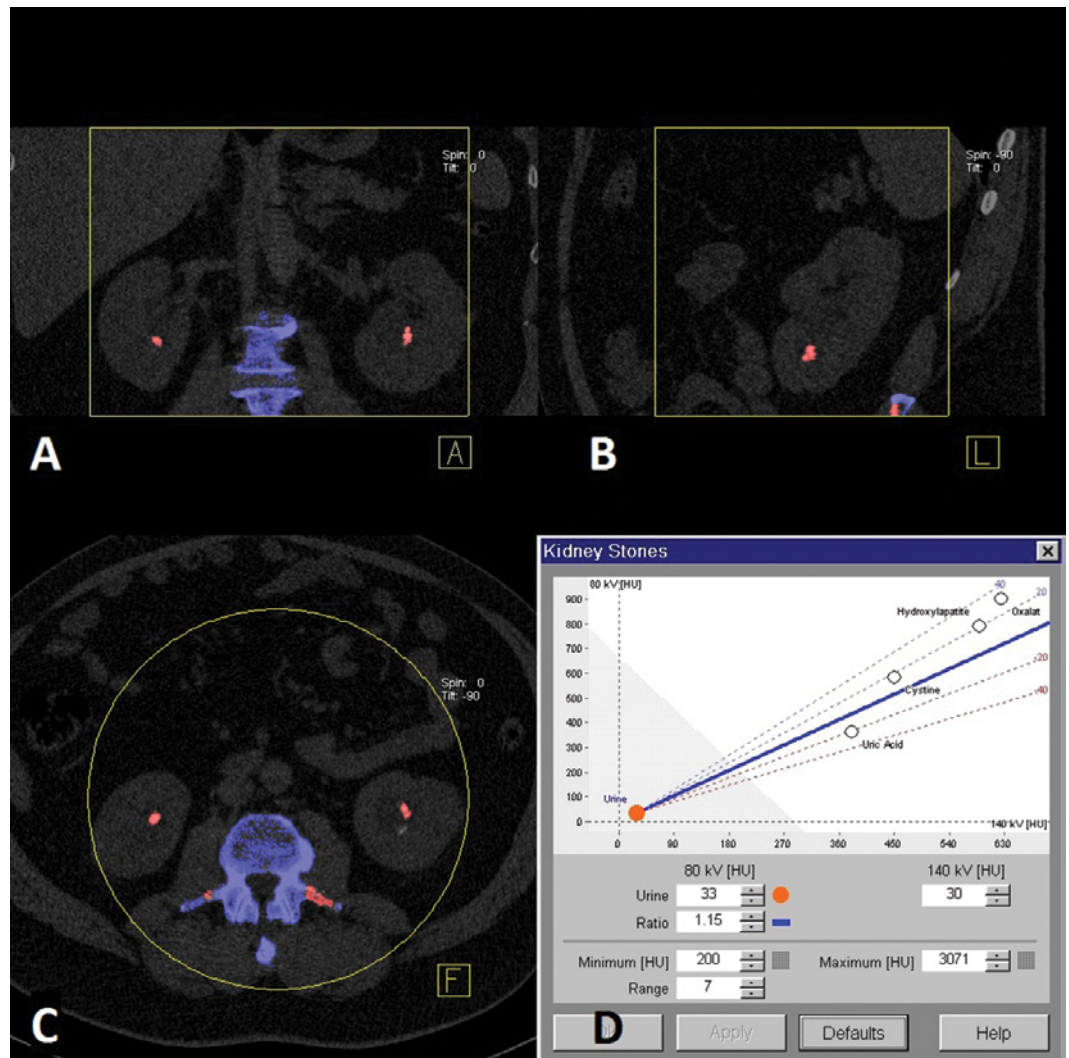
Dvoenergjski računalniški tomografi (DECT)

Proizvajalci računalniških tomografov ponujajo različne možnosti za preiskave z dvojnimi energijami: dvoizvorni CT (*angl.* dual source, DSCT) znamke Siemens, »sendvič« detektorje (znamke Philips) in hitro kVp preklapljanje z namenskimi detektorji (znamke GE Healthcare). Starejša je bila rešitev s programom, ki upravlja računalniški tomograf tako, da z enim obratom cevi zajame podatke pri eni, z naslednjim pa pri drugi napetosti (*angl.* rotate-rotate).⁹

Računalniški tomograf Somatom Definition (znamke Siemens), je 64-rezinski CT z dvema izvoroma rentgenskih žarkov in dvema detektorskima sistemoma. Dve rentgenski cevi in detektorska sistema so razporejeni v pravokotni konfiguraciji ter vgrajeni v en nosilec, kar omogoča hkratno pridobivanje

podatkov pri nižji in višji napetosti rentgenske cevi. Primeri na slikah v tem prispevku so pridobljeni s tem aparatom iz klinične prakse naše bolnišnice. Žal pa je ta aparat dandanes že stari model. Sodobni Siemensov dvoenergjski računalniški tomograf je Somatom Definition Flash, to je 128-rezinski CT z dvema izvoroma rentgenskih žarkov, ki v primerjavi s starim aparatom zajame večje polje (FOV), 33 cm, ima vgrajeno novejšo in hitrejšo programsko opremo za pripadajočo delovno postajo, predvsem pa ima lahko vgrajen kositrni filter na eni cevi, ki se lahko vključi ali izključi in s tem bistveno zmanjša prekrivanje spektrov 80kV in 140 kV signala. Uporaba kositrnega filtra in nove programske opreme omogoča bistven napredek pri ločevanju kamnov različne sestave (pojasnjeno spodaj), pa tudi različne mehko tkivne aplikacije, kot je na primer prikaz silikona pri puščanju protez ali vsadkov itd.

Slika 2: A, B, C – kamna v obeh ledvicah, aksialno, koronarno in transverzalno, kot se prikažeta s selektivno rekonstrukcijo 80 kV in 140 kV seta s programom Syngo DE – Kidney stones. Rdeče obarvanje kaže, da gre za uratne kamne. D – program omogoča prilagoditev parametrov – zlasti razmerja (Ratio) in s tem nadaljno analizo slike, spremembo meje med modro in rdečo obarvanostjo struktur.



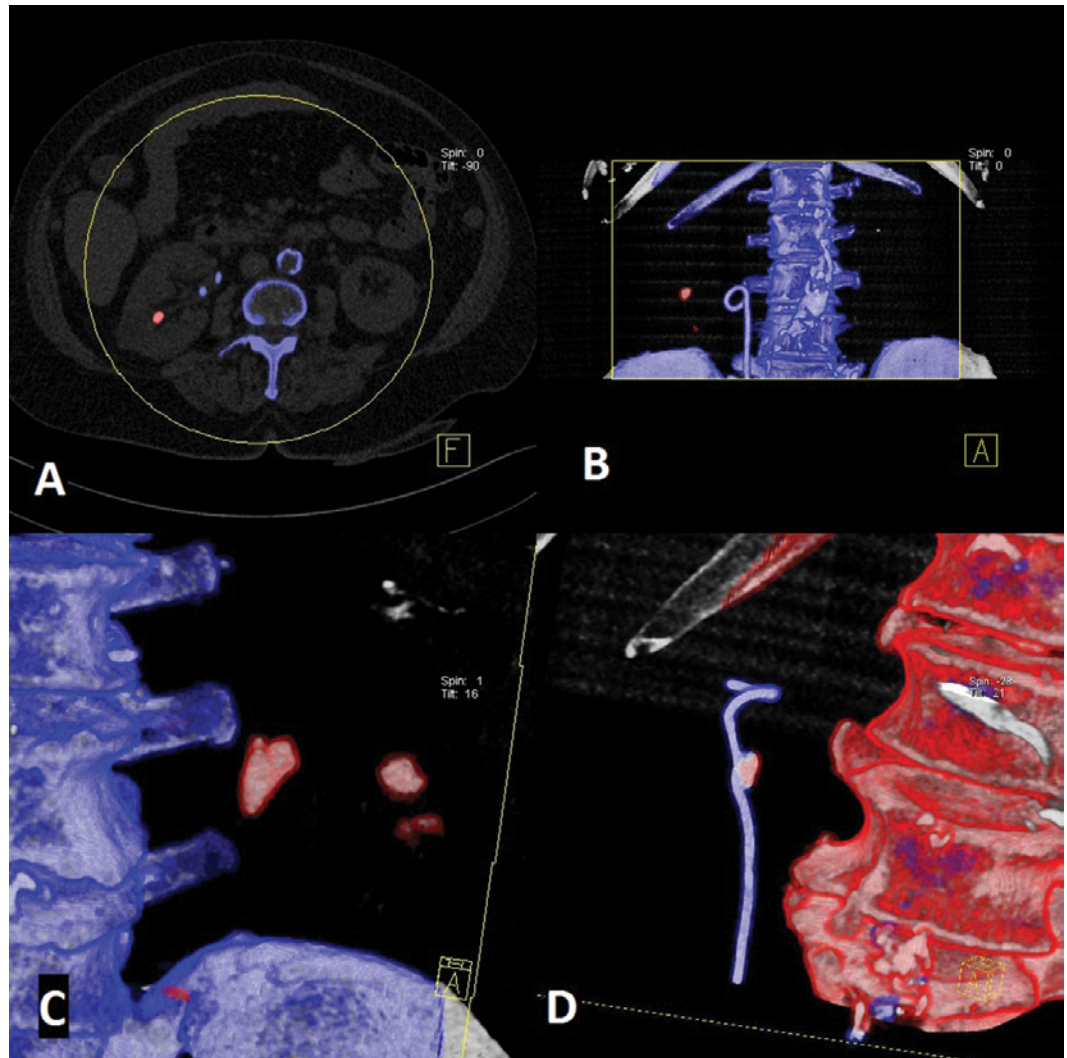
Računalniški tomograf Brilliance 64 Philips Healthcare ima za osnovo dvoplastni detektor (sendvična tehnika) in eno rentgensko cev. Zgornja plast detektorjev absorbira nizkoenergijski del spektra. 64-rezinski računalniški tomograf Discovery 750HD, GE Healthcare, pa uporablja poseben detektor (»Gemstone«) s hitrim preklapljanjem (časovni interval je 0,4 s), kar omogoča simultano pridobivanje nizko- in visokovoltajnih podatkov med rotacijo rentgenske cevi z običajno hitrostjo.²⁰

Identifikacija uratnih kamnov z DECT

Uratne kamne gradijo lahki kemijski elementi (H, C, N, O). Njihova atenuacija rentgenskih žarkov ob visoki in nizki napetosti rentgenske cevi je drugačna v primerjavi z

atenuacijo ostalih kamnov, ki so sestavljeni iz težkih kemijskih elementov (P, Ca, S).²¹ Stopnja atenuacije rentgenskih žarkov je odvisna od energije rentgenskih žarkov, atomskega števila elementov, iz katerih je snov sestavljena, gostote in debeline snovi. Stopnjo atenuacije merimo v Hounsfieldovih enotah (HU).⁹ Uratni kamni imajo v povprečju nižje vrednosti HU v primerjavi z neuratnimi, vendar so z več raziskavami ugotovili, da ločevanje uratnih in neuratnih kamnov samo na osnovi kamnu določenih HU pri klasični CT preiskavi ni mogoče.^{22,23} Več avtorjev je v *in vitro* in *in vivo* študijah dokazalo, da lahko z uporabo dvojnih energij pri napetosti 140 kV in 80 kV zanesljivo ločimo uratne kamne od neuratnih. Neuratni kamni imajo višje atenuacijske vrednosti.^{21,24,25} Tudi pomen okoliških struktur, ki prispevajo k absolutni atenuacijski vrednosti kamna, je manjši pri preiskavi z DECT.²⁶

Slika 3: A – uratni kamen v ledvici in stent DJ v aksialnem prerezu. B – 3D prikaz selektivno rekonstruirane slike istega primera, kot na sliki A. C – 3D prikaz treh uratnih kamnov v levi ledvici. D – v primeru, ko ne moremo z gotovostjo ugotoviti, ali je kamen prisoten ob stentu DJ, lahko z manipulacijo parametrov prikažemo stent v eni (v tem primeru modri), kamen pa v drugi (v tem primeru rdeči) barvi.



Različni računalniški tomografi, ki omogočajo preiskavo z dvojnimi energijami, imajo različne programe za analizo in rekonstrukcijo slike. Za analizo sestave kamnov v sečilih z dvoenergijsko CT preiskavo je prvi ponudil tehnologijo Siemens. To tehnologijo uporabljamo tudi pri nas in jo predstavljamo. Siemens je na osnovi kliničnih in laboratorijskih raziskav razvil komercialni računalniški program Syngo DE, »Kidney Stones«, za DECT postprocesiranje in identifikacijo tipa tkiva in s tem za določanje sestave kamnov. Algoritem temelji na primerjavi med atenuacijo rentgenskih žarkov pri preiskavi z napetostjo rentgenske cevi 140 kV in pri preiskavi z napetostjo rentgenske cevi 80 kV. Program uporablja tri razporeditvene algoritme, ki temeljijo na kamnih znane sestave. Atomsko število kemijskih elementov, iz katerih so sestavljeni kamni, odloča o stopnji absorpcije rentgen-

skih žarkov.²¹ Algoritem segmentira kamen pri 140 kV in pri 80 kV ter določi povprečno atenuacijo (HU) pri vsaki od energij. Razmerje med povprečnima atenuacijama pri dveh energijah je odvisno od sestave kamna. Razmerja atenuacijskih vrednosti so značilno nižja za uratne kamne v primerjavi z drugimi vrstami kamnov.⁷ Barvni prikaz kamna temelji na razmerju atenuacijskih vrednosti posamezne slikovne pike. Program uporablja kot privzeto vrednost za razmejitev 1,15, strukture z razmerjem atenuacije pod to vrednostjo obarva rdeče (Slika 2), nad to vrednostjo pa modro (Slika 1). Tako se uratni kamni obarvajo rdeče, neuratni (cistinški, struvitni, kalcijevi in fosfatni) pa modro. V programu je mogoče spremeniti mejno vrednost in tako lažje ločiti med morebitnimi vsadki ali tujki v sečilih (razne vrste umetnih materialov za stente) in kamni (Slika 3). Ločevanja med posameznimi vrstami

neuratnih konkrementov pa sedanja konfiguracija še ne omogoča.

Identifikacija neuratnih kamnov

Boll s sodelavci je poročal, da so z DECT ločili med neuratnimi kamni. Kamne so skenirali pri 140 kV in pri 80 kV, ugotovili so razliko v atenuacijskih vrednosti pri različnih kV, prav tako v razmerju atenuacijskih vrednosti. Razlika je bila značilna za kamne, sestavljene iz kalcijevega oksalata in kalcijevega fosfata.²⁶ Drugi avtorji ne poročajo o podobnih rezultatih.²⁷ S kositrnim filtrom, ki ga dodamo v višji napetostni cevi, povečamo spektralno ločevanje in povečamo razmerje atenuacij pri neuratnih kamnih. Qu s skupino je tako lahko precej natančno (površina pod krivuljo nad 90 %) ločil pet skupin kamnov: uratne, cistinske, struvitne (magnezijev amonijev fosfat), kamne iz kalcijevega oksalata (skupaj s kalcijevim hidrogenfosfatom dihidratom–brushitom) in kamne iz apatita (kalcijev fosfat).²⁸

Sevalna obremenitev pri dvoenergijski CT preiskavi

Število CT preiskav je v zadnjih 30 letih naraslo, zato se moramo zavedati, da to pomeni tudi večjo obremenitev populacije z rentgenskimi žarki. Preiskava z DECT s klasičnim algoritmom je obremenila bolnika s sorazmerno visokim odmerkom sevanja – 6,6mSv.²⁴ Z uporabo nizkoenergijskih algoritmov pa lahko dosežemo obremenitve bolnika pod 3 mSv, kar je toliko kot pri preiskavi z intravenozno urografijo.²⁷ Efektivni odmerek je pri protokolu za kamne sorazmerno majhen v primerjavi s CT preiskavo po protokolu za ledvičnega raka ali CT urografijo.²⁹

Omejitve CT preiskave pri urolitiazii

Ob rutinski uvedbi nizkoenergijskega CT protokola za prikaz kamnov v predelu sečil brez dajanja jodnega kontrastnega sredstva, ki je večinoma nadomestil IV urografijo,

so opozarjali, da le-ta ne zadošča za prikaz drugih patoloških procesov v trebuhu. Brez dajanja jodnega kontrastnega sredstva na primer ne moremo identificirati krvnega strdka, ki je povzročil motnjo odtoka, ali opredeliti tumorja. Pri bolniku, če kamnov ne prikažemo in ne vidimo vzroka za klinično simptomatiko, dopolnimo preiskavo z dajanjem jodnega kontrastnega sredstva.³⁰ Dvoenergijska CT preiskava z uporabo kositrnega filtra ima precejšen potencial tudi na tem področju z možnostjo nadaljnjega zniževanjem radiacijskih odmerkov in odmerkov kontrastnega sredstva. Kljub mnenju nekaterih, npr. radiologov iz Trsta, da je vloga intravenske urografije povsem stvar preteklosti in da pri njih že leta te preiskave sploh ne delajo več,¹⁰ večina urologov meni, da ima intravenska urografija še vedno mesto pri obravnavi bolnika s kamni v sečilih, na primer v nekaterih primerih načrtovanja operacij.

Kamni, ki so manjši od 2 mm, povzročijo parcialni volumski efekt, zato jih običajno ne analiziramo. Dvomilimetrski kamni tudi ne predstavljajo terapevtskega problema. Kamni z velikostjo 4 mm pa že lahko povzročijo zaporo odtoka urina in torej predstavljajo mejo, pri kateri je že lahko potreben terapevtski poseg.³¹

Nekateri avtorji poročajo, da bolniki, ki imajo indeks telesne teže (BMI) večji od 31, niso primerni za preiskavo z nizkoenergijskim CT protokolom za prikaz kamnov v predelu ledvic. To razlagajo z dejstvom, da je renalna stroma bolj heterogena kot ureter in periureterni prostor, zato bi lahko majhne kamne zamenjali s hiperdenznimi piramidami.¹³ Drugi pa so mnenja, da to ni ovira in niso imeli nobenih težav pri prikazu klinično relevantnih kamnov, se pravi kamnov velikost nad 2 mm v sečilih pri bolnikih z BMI nad 31.³² Pri DECT pa kombinacija debelega bolnika, ki ima BMI > 31 in kamna, umeščene v mali medenici, predstavljala težavo pri določitvi sestave kamna, saj pri 80 kV fotoni nimajo dovolj energije za prodiranje. Velika atenuacija fotonov zaradi kosti medenice, mišic in maščobe vodi k zmanjšani detekciji signala. Razmerje med atenuacijo pri 80 kV in 140 kV je porušeno, zato ne določimo prave sestave kamna.²⁷ Novej-

ši aparat za DECT (DSCT druge generacije Somatom Definition FLASH, Siemens) ima dodan na cevi, ki se uporablja za višjo napetost, 0,4-milimetrski kositrni filter, ki izloči nizkoenergijski spekter pri višji napetosti (140kV).³³ Posledica je boljša ločitev spektrov dveh cevi, tako da lahko uporabimo napetost 100kV za nizkoenergijski prikaz, kar omogoča boljšo prodornost rentgenskih žarkov. Nadalje daje zmanjšan šum pri 140kV možnosti za protokole, pri katerih bo obremenitev bolnika z rentgenskimi žarki še manjša.

Razpravljanje

Že pred več kot četrto stoletje so poskušali s CT določiti sestavo kamnov v predelu sečil, vendar takrat tehnične zmogljivosti CT aparatov in računalniških programov tega še niso omogočale.³⁴ Razvoj večdetektorskih CT aparatov, možnost tankih rezov z enomilimetrsko kolimacijo, nizko razmerje med premikom mize na rotacijo in širino detekcije ter ustrezna programska oprema so temelj, da je CT preiskava postala del diagnostičnega algoritma za prikaz kamnov v predelu sečil.^{35,36} Po mnenju nekaterih je nizkoenergijska nativna CT preiskava celo prva preiskava pred pregledno sliko sečil oziroma trebuha pri obravnavi bolnikov s sumom na ledvično koliko, saj sta natančna identifikacija ter ocena velikosti kamna in njegove umeščenosti odločilna za odločitve o načinu ukrepanja.³⁷ Po našem mnenju CT preiskava sicer praktično nikoli ne prednjači pred ultrazvočno preiskavo in pregledno sliko trebuha, vendar je dejstvo, da vse bolj prodira tudi k nam in nam na področju zdravljenja bolnikov s sumom na urolitiazio omogoča manj ugibanja in bistveno več gotovosti o tem, ali so kamni v sečilih prisotni ali ne. Nove možnosti uporabe podatkov, pridobljenih s CT preiskavo, njeno smiselnost samo povečujejo in prispevajo k hitrej-

ši in boljši obravnavi bolnika. Zaradi večje dostopnosti pa obstaja nevarnost nekritične uporabe, predvsem pri izvedbi same preiskave, ko današnji hitri aparati mimogrede zavedejo k nekritičnemu povečevanju obsevalnega polja. Zato je pomembno izobraževanje vseh, ki sodelujejo v diagnostičnem procesu, rentgenskih inženirjev in zdravnikov radiologov, zato, da bodo izbirali za bolnika primerne parametre ter si prizadevali za razvoj in udeležanje protokolov, ki bodo dejansko dosegali tako nizke obremenitvene odmerke, kot je v literaturi prikazano in utemeljeno. Na strani zdravnikov, ki napotujejo na preiskavo, pa je, da spoznajo možnosti, ki jih CT preiskava ponuja (hkratni pogled v več projekcijah, meritve, 3D rekonstrukcija) in da po opravljeni preiskavi tudi sami slike natančno analizirajo. Vsi sodelujoči pa bodo morali razviti in se nato držati standardov, ki bodo določili, kaj naj vsebuje izvid nove preiskave – DECT kamnov v sečilih.

Zaključek

S CT preiskavo prikažemo kamne v predelu sečil, določimo umeščenost, število in velikost kamnov. Z upoštevanjem atenuacije in s 3D rekonstrukcijo lahko grobo ocenimo drobljivost kamnov. Z DECT ločimo uratne kamne od neuratnih kamnov, kar lahko dodatno bistveno prispeva k izbiri terapevtskih postopkov. Bolnika ne obremenimo s kontrastnim sredstvom, radiacijski odmerek pa je primerljiv z odmerkom, ki ga prejme bolnik pri intravenski urografiji.

Zahvala

Hvala gospe Miri Pušenjak, rad. ing., za pomoč pri pripravi besedila.

Okrajšave

- DECT dvoenergijski CT
- DSCT dvoizvorni CT

Literatura:

1. Park S. Medical management of urinary stone disease. *Expert Opin. Pharmacother.* 2007 Jun; 8(8): 1117–25.
2. Ajayi L, Jaeger P, Robertson W, Unwin R. Renal stone disease. *Ren. Disord. Part 2* 3. 2007 Aug; 35(8): 415–9.

3. Moe OW. Kidney stones: pathophysiology and medical management. *Lancet*. 2006 Jan 28; 367(9507): 333–44.
4. Sellaturay S, Fry C. The metabolic basis for urolithiasis. *Ren. Urol*. 2008 Apr; 26(4): 136–40.
5. Renner C, Rassweiler J. Treatment of renal stones by extracorporeal shock wave lithotripsy. *Nephron*. 1999; 81 Suppl 1: 71–81.
6. Pietrow PK, Preminger GM. Evaluation and medical management of urinary lithiasis. In: Wein AJ, Kavoussi LR, Novick AC, Partin AW, Peters CA, editors. *Campbell-Walsh Urol*. 9th ed. Philadelphia: Saunders; 2007. p. 1393–429.
7. Hidas G, Eliahou R, Duvdevani M, Coulon P, Lemaitre L, Gofrit ON, et al. Determination of renal stone composition with dual-energy CT: in vivo analysis and comparison with x-ray diffraction. *Radiology*. 2010 Nov; 257(2): 394–401.
8. Krambeck AE, Lingeman JE, McAteer JA, Williams JC Jr. Analysis of mixed stones is prone to error: a study with US laboratories using micro CT for verification of sample content. *Urol. Res*. 2010 Dec; 38(6): 469–75.
9. Yeh BM, Shepherd JA, Wang ZJ, Teh HS, Hartman RP, Prevrhal S. Dual-energy and low-kVp CT in the abdomen. *Ajr Am. J. Roentgenol*. 2009 Jul; 193(1): 47–54.
10. Stacul F, Rossi A, Cova MA. CT urography: the end of IVU? *Radiol. Med. (Torino)*. 2008 Aug; 113(5): 658–69.
11. Williams JC Jr, Kim SC, Zarse CA, McAteer JA, Lingeman JE. Progress in the use of helical CT for imaging urinary calculi. *J. Endourol. Soc.* 2004 Dec; 18(10): 937–41.
12. Boulay I, Holtz P, Foley WD, White B, Begun FP. Ureteral calculi: diagnostic efficacy of helical CT and implications for treatment of patients. *Ajr Am. J. Roentgenol*. 1999 Jun; 172(6): 1485–90.
13. Poletti P-A, Platon A, Rutschmann OT, Schmidlin FR, Iselin CE, Becker CD. Low-dose versus standard-dose CT protocol in patients with clinically suspected renal colic. *Ajr Am. J. Roentgenol*. 2007 Apr; 188(4): 927–33.
14. Tuerk C, Knoll T, Petrik A, Sarica K, Staub M, Seitz C. Guidelines on Urolithiasis [Internet]. European Association of Urology; 2011. Available from: <http://www.uroweb.org/guidelines/online-guidelines/>
15. Williams JC Jr, Saw KC, Paterson RF, Hatt EK, McAteer JA, Lingeman JE. Variability of renal stone fragility in shock wave lithotripsy. *Urology*. 2003 Jun; 61(6): 1092–1096; discussion 1097.
16. Bhatta KM, Prien EL Jr, Dretler SP. Cystine calculi—rough and smooth: a new clinical distinction. *J. Urol*. 1989 Oct; 142(4): 937–40.
17. Dretler SP, Spencer BA. CT and stone fragility. *J. Endourol. Soc.* 2001 Feb; 15(1): 31–6.
18. Duan X, Qu M, Wang J, Trevathan J, Vrtiska T, Williams JC Jr, et al. Differentiation of calcium oxalate monohydrate and calcium oxalate dihydrate stones using quantitative morphological information from micro-computerized and clinical computerized tomography. *J. Urol*. 2013 Jun; 189(6): 2350–6.
19. Manglaviti G, Tresoldi S, Guerrer CS, Di Leo G, Montanari E, Sardanelli F, et al. In vivo evaluation of the chemical composition of urinary stones using dual-energy CT. *Ajr Am. J. Roentgenol*. 2011 Jul; 197(1): W76–83.
20. Kraśnicki T, Podgórski P, Guziński M, Czarnecka A, Tupikowski K, Garcarek J, et al. Novel clinical applications of dual energy computed tomography. *Adv. Clin. Exp. Med. Off. Organ Wroclaw Med. Univ*. 2012 Dec; 21(6): 831–41.
21. Primak AN, Fletcher JG, Vrtiska TJ, Dzyubak OP, Lieske JC, Jackson ME, et al. Noninvasive differentiation of uric acid versus non-uric acid kidney stones using dual-energy CT. *Acad. Radiol*. 2007 Dec; 14(12): 1441–7.
22. Mostafavi MR, Ernst RD, Saltzman B. Accurate determination of chemical composition of urinary calculi by spiral computerized tomography. *J. Urol*. 1998 Mar; 159(3): 673–5.
23. Devenci S, Coşkun M, Tekin MI, Peşkirioğlu L, Tarhan NC, Ozkardeş H. Spiral computed tomography: role in determination of chemical compositions of pure and mixed urinary stones—an in vitro study. *Urology*. 2004 Aug; 64(2): 237–40.
24. Graser A, Johnson TRC, Bader M, Staehler M, Haseke N, Nikolaou K, et al. Dual energy CT characterization of urinary calculi: initial in vitro and clinical experience. *Invest. Radiol*. 2008 Feb; 43(2): 112–9.
25. Stolzmann P, Kozomara M, Chuck N, Müntener M, Leschka S, Scheffel H, et al. In vivo identification of uric acid stones with dual-energy CT: diagnostic performance evaluation in patients. *Abdom. Imaging*. 2010 Oct; 35(5): 629–35.
26. Boll DT, Patil NA, Paulson EK, Merkle EM, Simmons WN, Pierre SA, et al. Renal stone assessment with dual-energy multidetector CT and advanced postprocessing techniques: improved characterization of renal stone composition—pilot study. *Radiology*. 2009 Mar; 250(3): 813–20.
27. Thomas C, Heuschmid M, Schilling D, Ketelsen D, Tsiflikas I, Stenzl A, et al. Urinary calculi composed of uric acid, cystine, and mineral salts: differentiation with dual-energy CT at a radiation dose comparable to that of intravenous pyelography. *Radiology*. 2010 Nov; 257(2): 402–9.
28. Qu M, Ramirez-Giraldo JC, Leng S, Williams JC, Vrtiska TJ, Lieske JC, et al. Dual-energy dual-source CT with additional spectral filtration can improve the differentiation of non-uric acid renal stones: an ex vivo phantom study. *Ajr Am. J. Roentgenol*. 2011 Jun; 196(6): 1279–87.
29. Neisius A, Wang AJ, Wang C, Nguyen G, Tsivian M, Kuntz NJ, et al. Radiation Exposure in Urology—A Genitourinary Catalogue for diagnostic imaging. *J. Urol*. 2013 Jun 10;
30. Anderson KR, Smith RC. CT for the evaluation of flank pain. *J. Endourol. Soc.* 2001 Feb; 15(1): 25–9.
31. Miller OF, Kane CJ. Time to stone passage for observed ureteral calculi: a guide for patient education. *J. Urol*. 1999 Sep; 162(3 Pt 1): 688–690; discussion 690–691.
32. Abou El-Ghar ME, Shokeir AA, Refaie HF, El-Nahas AR. Low-dose unenhanced computed tomography for diagnosing stone disease in obese patients. *Stones Endur*. 2012 Sep; 10(3): 279–83.
33. Primak AN, Giraldo JCR, Eusemann CD, Schmidt B, Kantor B, Fletcher JG, et al. Dual-source dual-energy CT with additional tin filtration: Dose and

- image quality evaluation in phantoms and in vivo. *Ajr Am. J. Roentgenol.* 2010 Nov; 195(5): 1164–74.
34. Mitcheson HD, Zamenhof RG, Bankoff MS, Prien EL. Determination of the chemical composition of urinary calculi by computerized tomography. *J. Urol.* 1983 Oct; 130(4): 814–9.
 35. Hu H, Fox SH. The effect of helical pitch and beam collimation on the lesion contrast and slice profile in helical CT imaging. *Med. Phys.* 1996 Dec; 23(12): 1943–54.
 36. Grosjean R, Sauer B, Guerra RM, Daudon M, Blum A, Felblinger J, et al. Characterization of human renal stones with MDCT: advantage of dual energy and limitations due to respiratory motion. *Ajr Am. J. Roentgenol.* 2008 Mar; 190(3): 720–8.
 37. Poletti P-A, Platon A, Rutschmann OT, Verdun FR, Schmidlin FR, Iselin CE, et al. Abdominal plain film in patients admitted with clinical suspicion of renal colic: should it be replaced by low-dose computed tomography? *Urology.* 2006 Jan; 67(1): 64–8.