

CELOTĚLOVÉ VYŠETŘENÍ MAGNETICKOU REZONANCÍ

WHOLE BODY MAGNETIC RESONANCE IMAGING

aktuální přehled

Boris Kreuzberg¹
Jiří Ferda^{1,2}

¹Radiodiagnostická klinika LF UK a FN, Plzeň

²Oddělení nukleární medicíny LF UK a FN, Plzeň

Přijato: 19. 9. 2007

Korespondenční adresa:

doc. MUDr. Boris Kreuzberg, CSc.
Radiodiagnostická klinika
LF UK a FN
Alej Svobody 80, 306 40 Plzeň
e-mail: kreuzberg@fnplzen.cz

Podpořeno výzkumným projektem
MSM 0021620819.

SOUHRN

Kreuzberg B, Ferda J. Celotělové vyšetření magnetickou rezonancí

Využití celotělového MR vyšetření v rutině klinické praxe je umožněno konceptem celotělové maticové cívkou. Mnohoelementové celotělové cívkou lze využít pro paralelní akvizici techniky, vyšetření celého těla je pak proveditelné v reálném čase zobrazením s vysokým prostorovým a tkáňovým rozlišením. Přehledné sdělení se věnuje celotělovému MR vyšetření v diagnostických indikacích u onemocnění s mnohočetným postižením skeletu, u detekce primárních nádorů při metastatické generalizaci neznámého původu, zmíněno využití ve stagingu nádorových onemocnění známého původu a také při systémových onemocněních cévního systému.

Je uveden diagnostický algoritmus s používanými zobrazovacími sekvencemi a jejich specifické využití při jednotlivých typech celotělového zobrazení včetně využití kombinovaných zobrazení s difúzně váženými zobrazeními. Je diskutována diagnostická přesnost metody ve srovnání s jinými, dnes již klasickými metodami (konvenční radiologie, scintigrafie skeletu) i hybridním zobrazením PET/CT. Nespornou výhodou celotělového vyšetření magnetickou rezonancí je kromě relativní vysoké přesnosti i nulová radiační zátěž. Dosažení možnosti celotělového vyšetření pomocí magnetické rezonance je určitým mezníkem ve vývoji této metody. Lze očekávat další vývoj techniky metody i jejího budoucího využití.

Klíčová slova: celotělové vyšetření magnetickou rezonancí, celotělové zobrazení, magnetická rezonance, nádory neznámého původu.

SUMMARY

Kreuzberg B, Ferda J. Whole body magnetic resonance imaging

Whole body MR imaging was enabled due to the introduction of parallel acquisition techniques, fast sequences and mainly whole-body matrix coil. Using the multi-element phased array body coil and parallel acquisition techniques, the examination is feasible in real time with the excellent quality of the images. This article deals with the whole – body MR imaging of the skeleton, brain and parenchymatous organs. The indications to the examination are mainly oncological at the suspicion of malignant tumor spread. The examination brings necessary information for staging of the diseases. The diagnostic algorithm with performed sequences is introduced. There is only marginal remark concerning another form of whole-body MR imaging of cardiovascular system in the article. The diagnostic accuracy of the method in comparison with classical methods (conventional radiography, bone scintigraphy) is being discussed. In the same way the modern, recently used PET/CT is compared with whole body MRI. The diagnostic reliability and results of both methods are discussed. The lack of ionizing radiation load not speaking about relatively high degree of accuracy is undoubtedly the advantages of whole-body MR imaging. The possibility of whole-body imaging by magnetic resonance was the turning point in the development of the method. Further progress of the technique and wider use could be expected.

Key words: whole body MR imaging, whole body imaging, magnetic resonance, tumors of the unknown origin.

ÚVOD

Hledání zobrazovací metody, která by vyšetřila celé pacientovo tělo, bylo snem radiologů téměř od počátku oboru. Bylo to jakési hledání kamene mudrců, kterému však bránila řada okolností. Zpočátku to byly technické nedostatky zobrazovacích metod a samozřejmě i velká radiační zátěž při celotělové expozici. Bylo sice možné pořídit rentgenové snímky celého skeletu, nemocný však byl vystaven velké expozici záření. U generalizovaného postižení skeletu snímkování celého pacientova těla nahradila scintigrafie skeletu, metoda nukleární medicíny využívající metabolické zobrazení celého skeletu pomocí radionuklidu, vázaného na osteotropní nosiče. Scintigrafie skeletu je stále využívána, jejím nedostatkem je její nízká specifita, nízké prostorové rozlišení a malá anatomická přesnost při lokalizaci postižení. Ani při scintigrafii skeletu nelze hovořit o nulové radiační zátěži, tím spíše toto platí pro další metody celotělového zobrazení pozitronovou emisní tomografií PET a výpočetní tomografií (CT) včetně jejich hybridního spojení v PET/CT. Hybridní zobrazení pomocí PET/CT s nejrozšířenějším radiofarmakem ^{18}F -fluorodeoxyglukózou (^{18}F -FDG) využívá přímého zobrazení akcelerovalé glykolytické aktivity nádorové tkáně lokalizované přesně anatomicky v zobrazení CT. Spojením obou metod však s sebou přináší také relativně vysokou radiační zátěž, za níž jsou zodpovědné rentgenové záření využívané CT a záření gamma vznikající anihilací při beta+ rozpadu ^{18}F využívané PET.

Vyšetření magnetickou rezonancí (MR) od počátku nenabízelo možnost celotělového zobrazení nemocného. Tomu bránila řada technických nedostatků – nedostatečná rychlost zobrazení, nízké prostorové rozlišení, obtížné měnění polohy nemocného v izocentru přístroje magnetické rezonance a také konstrukční nepřipravenost radiofrekvenčních cívek. Aby bylo možné uvést celotělové vyšetření magnetickou rezonancí (WBMRI – whole body magnetic resonance imaging) do klinické praxe, bylo nevyhnutelné splnit základní požadavky: zobrazení co největších úseků pacientova těla sekvencemi s dostatečnou rychlostí, s vysokou rozlišovací schopností a tkáňovým kontrastem, tak aby doba vyšetření byla pro nemocné únosná. Na počátku 21. století je dosaženo výrazného urychlení akvizice dat zavedením paralelních akvizičních technik a také například echoplanárních sekvencí do rutinní praxe. Kromě dostatečně dlouhého souosého posunu vyšetřovacího stolu byla koncepce multielementové celotělové phase array cívky zásadním krokem k rutinnímu zavedení celotělového zobrazení magnetickou rezonancí. Výsledný čas vyšetření, kterého se podařilo dosáhnout, byl reálný – okolo 45 minut.

Pomocí WBMRI je možné zobrazit celé pacientovo tělo, toho je využíváno především u generalizovaných postižení skeletu, ale i u dalších onemocnění s celotělovou distribucí patologických změn v oblasti jiných tkání či orgánů, také tepenné eventuálně žilní řečiště, v rozsahu celého těla. Dominující použití je hlavně v onkologické diagnostice, objevují se však i jiné indikace, některé i dosti kuriózní a nečekané. Úkolem tohoto přehledového článku je popsat používaný postup při celotělovém vyšetření magnetickou rezonancí a vlastní zkušenosti s jeho diagnostickým použitím.

METODIKA A MATERIÁL

Celotělové MR vyšetření provádíme od října roku 2004 na přístroji Magnetom Avanto 1,5 T TIM 76 × 18 (Siemens, Erlangen, SRN). Vyšetření je prováděno pomocí virtuální celotělové maticové cívky (TIM – total imaging matrix), která má celkem 76 jednotlivých aktivních elementů lokalizovaných na samostatně zapojitelných phase array cívkách. Celotělová cívka se skládá z paralelního zapojení hlavové cívky, krční cívky, dvou tělových cívek, cívky pro periferní angiografii a spinální celotělové cívky. Aktivní elementy jsou napojeny na 18 snímávacích kanálů (receiving channels). Celý systém je koncipován pro využití paralelních akvizičních technik (PAT). V období od října 2004 do začátku října 2007 bylo provedeno celkem 147 vyšetření WBMRI, jednotlivé indikace k vyšetření jsou shrnuty v tabulce 1, do souboru nejsou zahrnuty indikace celotělového vyšetření u obliterujících cévních onemocnění typu aterosklerózy či diabetické angiopatie.

Tab. 1. Indikace celotělového MR vyšetření

Tab. 1. Indications of the whole body MR imaging

Mnohočetný myelom	85
Monoklonální gamapatie	31
Staging a restaging známého nádoru	19
Nádor nejasné etiologie	18
Vaskulitida	4

Vyšetřovacím postupem je stupňovitá akvizice dat v úrovních od hlavy po dolní končetiny v pěti až šesti stupních dle tělesné výšky vyšetřovaného. Nejprve je provedeno nativní zobrazení, v případě vyšetření generalizace nádorového onemocnění či nádorů neznámé etiologie je doplněno zobrazení ještě po podání kontrastní látky. U indikací celotělového vyšetření systémového onemocnění cév je využívána celotělová kontrastní MR angiografie.

Jako základní zobrazovací sekvencí vyjma cévního vyšetření je využívána T2 vážená inversion recovery sekvence rychlého spinového echa s potlačním signálu tuku (T2 STIR – T2 short tau inversion recovery) v koronární, dále v sagitální a u zobrazení hrudních a břišních orgánů také v transverzální rovině. V rozsahu hlavy a krku a pak v oblastech hrudníku a břicha je využívána navigátorová technika synchronizace akvizice dat a apnoe (navigator-multibreathhold). U všech vyšetření s výjimkou stagingu lymfomů je provedena akvizice dat T1 vážené sekvence gradientního echa ve fázi opozice (spoiled-gradient echo – T1 FLASH in opposed phase). V rozšířeném zobrazení u generalizovaných nádorů provádíme T1 vážené zobrazení ve frontální rovině pomocí rychlého spinového echa. U všech nemocných je mozek zobrazen v transverzální rovině pomocí T2 vážených obrazů rychlého spinového echa (TSE T2) a u generalizace solidních nádorů (karcinom mamy, plic, ledviny, melanoblastom apod.) je doplněno ještě zobrazení po podání kontrastní látky v T1 vážených obrazech spinového echa s magnetizačním transferem (SE T1 MTC). V případě postižení kanálu páteřního je nakonec doplněno i zobrazení T1 váženou sekvencí rychlého spinového echa (T1 TSE) v sagitální rovině. Ve třech případech karcinomu mamy bylo postkontrastní vyšetření doplněno se zaměřením na jaterní parenchym s hepatocelulární kon-

trastní látkou (acidum gadoxeticum) v dynamické a hepato-spezifické fázi pomocí sekvence gradientního echa (FLASH 3D – VIBE – volume interpolated breathhold examination). U vaskulitid byla zhotovena celotělová zobrazení pomocí T1 vážených zobrazení gradientového echa (FLASH), nejprve s provedením nativního zobrazení pro masku, dále po podání kontrastní látky v bolu jako MR angiografie s aplikací intravaskulární kontrastní látky gadofosvesetu, doplněná cí-

Tab. 2. **Základní pulzní sekvence**

Tab. 2. **Basic pulse sequences**

Sekvence TSE-IR (STIR) v rovinách koronárních a sagitálních Parametry: T1 150 ms, TR 2670 ms, TE 101 ms Šíře zobrazované vrstvy: 5–7 mm
Sekvence GRE-FLASH T1 opposed phase Parametry: TR 299 ms, TE 7,15 ms, FA 90° Šíře zobrazované vrstvy: 3 mm

Tab. 3. **Doplňující pulzní sekvence**

Tab. 3. **Supplementary pulse sequences**

Sekvence TSE T2 (pro zobrazení mozku) Parametry: TR 3800 ms, TE 112 ms Šíře zobrazované vrstvy: 4 mm Transverzální rovina
Sekvence SE T1 (pro zobrazení mozku) Parametry: TR 722 ms, TE 16 ms Magnetisation transfer Šíře zobrazované vrstvy: 4 mm Transverzální rovina
Sekvence TSE T1 – nativní Parametry: TR 598 ms, TE 11 ms Šíře zobrazované vrstvy: 5 mm Koronární rovina
Sekvence TSE T1 – postkontrastní Parametry TR 598 ms, TE 11 ms Šíře zobrazované vrstvy: 5 mm Koronární rovina
Sekvence EPI DWI STIR (celotělová DWI) Parametry: TR 9796 ms, TE 93,2 ms TI 180 ms b hodnoty 0, 400 a 800 s/mm ² Šíře zobrazované vrstvy: 4 mm Transverzální rovina
Sekvence 3D FLAS VIBE (játra) Parametry: TR 6,1 ms, TE 2,97 ms, FA 10° spectral fat saturation Šíře zobrazované vrstvy: 3 mm Transverzální rovina

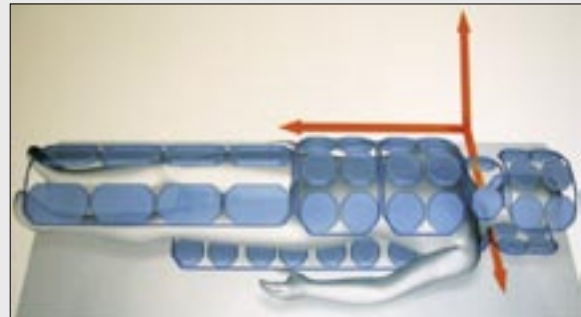
Tab. 4. **Celotělové zobrazení MRA – pulzní sekvence**

Tab. 4. **Whole body MRA pulse sequences**

Celotělová ceMRA Sekvence: GRE – 3D FLASH Parametry: TR 3,59 ms, TE 1,33 ms, FA 25° Voxel velikosti 1,5 × 1,0 × 1,0 mm
ceMRA s vysokým rozlišením – steady state ceMRA Sekvence: GRE – 3D FLASH Parametry: TR 3,34 ms, TE 2,11 ms, FA 25° Voxel velikosti 0,5 × 0,5 × 0,5 mm
ceMRA koronárních tepen 3D turboFLASH ECG-triggered Parametry: TR 650 ms, TE 1,33 ms, FA 25°, TI 260 ms Voxel velikosti 1,5 × 0,7 × 1,1 mm

leným zobrazením s vysokým rozlišením. Jako poslední zobrazovací sekvence byla v posledních třech měsících zavedena echoplanární difuzně vážená sekvence, jejíž implementaci umožnila nová softwarová verze akvizičního systému.

Jednotlivá zobrazení v koronární a sagitální orientaci jsou radiologickým asistentem komponována v jediný panoramatický obraz po celé délce těla, u něhož zůstává prostorové rozlišení identické s partikulárně získanými obrazy.



▲ Obr. 1A



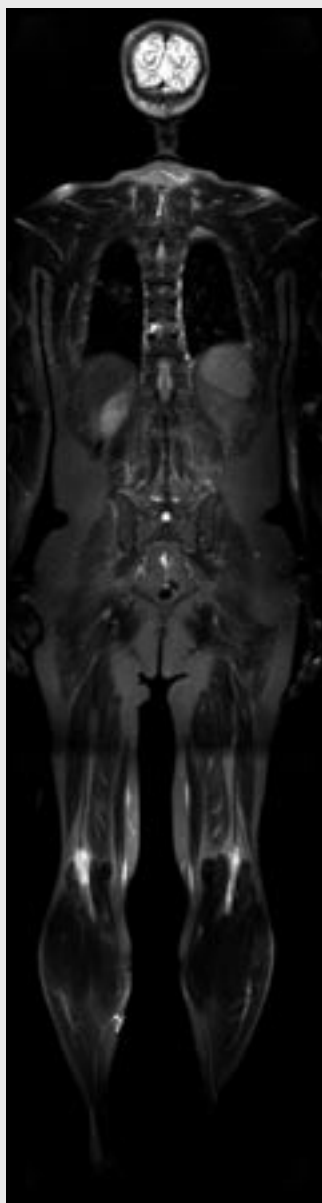
▲ Obr. 1B

Obr. 1. **Celotělové MR zobrazení.** A – schematické znázornění uspořádání jednotlivých elementů celotělové cívky na vyšetřovaném pacientovi, B – snímek nemocného při celotělovém vyšetření s přiloženou sestavou cívek

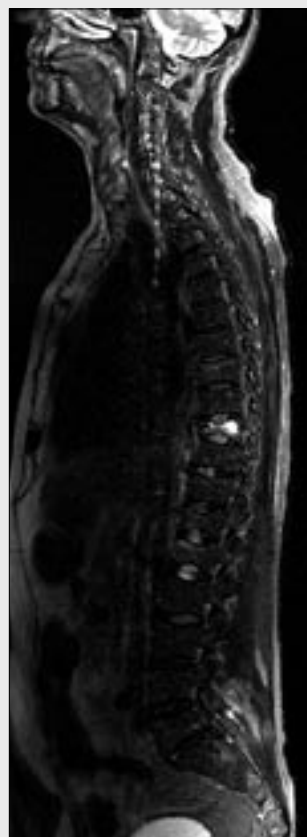
Fig. 1. **Whole-body MR imaging.** A – Schematic illustration of the individual elements of whole – body coil applied on the examined patient. B – The photograph of the patient during whole – body examination with whole body coil

VÝSLEDKY

Od začátku celotělového MR vyšetřování byly hlavní skupinou nemocných, indikovaných k vyšetření nemocní s prokázaným mnohočetným myelomem a monoklonální gamapatií, menšími skupinami byli nemocní s předpokládanou nádorovou generalizací k detekci metastáz, zejména ve skeletu (ale i v plicích, játrech a mozku). V menším množství případů bylo vyšetření použito k vyhledávání primárního tumoru při metastázách nejasného původu. Nejmenší skupinou byla systémová onemocnění cévního systému charakteru vaskulitid. U nemocných s léčeným mnohočetným myelomem byla provedena u celkem 18 nemocných opakovaná kontrolní vyšetření (nejvíce 4× u jediného nemocného) sloužící k monitorování efektu léčby včetně transplantace krvetvorných buněk.



▲ Obr. 2A



▲ Obr. 2B



▲ Obr. 2C



▲ Obr. 2D

Obr. 2. Mnohočetný myelom s difúzně infiltrovanou kostní dření potvrzený nálezem ve sternální punkci i trepanobiopsii kyčelní kosti. A – T2 TIRM – STIR, koronární celotělový obraz ukázal kolabované tělo 9. hrudního obratle s vysokou intenzitou tkáně myelomu a dále menší fokus v ilické kosti poblíž sakroiliakálního kloubu vlevo; B, C – T2 TIRM – STIR, sagitální obrazy ukázaly nejen kolabované obratlové tělo TH9 s extrémně vysokou intenzitou, ale i infiltraci kostní dřeně charakteru soli a pepře v tělech TH7, 8, 11, 12 a L1 s iniciální kompresí těl TH12 a L1. (Za povšimnutí stojí difúzně zvýšená intenzita sternu.); D – T1 GRE ve fázi opozice, sagitální obraz celé páteře s mnohem preciznějším zobrazením konverze signálu kostní dřeně v tělech obratlů infiltrovaných myelomem

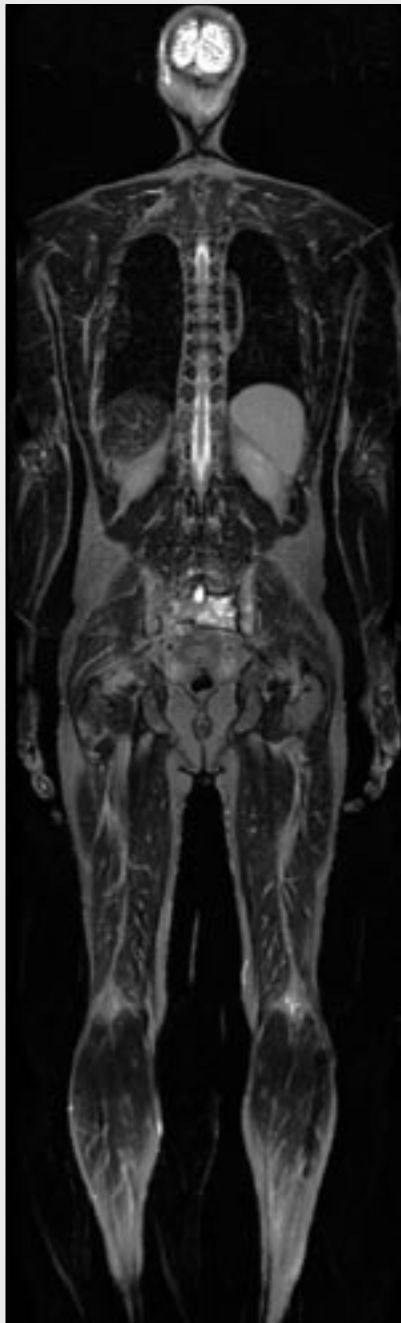
Fig. 2. Multiple myeloma with diffusely infiltrated bone marrow confirmed by the finding in sternal puncture and iliac trepanobiopsy. A – T2 TIRM – STIR, coronal whole body image showed collapsed thoracic vertebral body (TH 9) with high intensity myelomatous tissue and smaller focus in the left iliac bone close to the sacroiliac joint; B, C – T2 TIRM – STIR, sagittal whole spine images displayed not only collapsed thoracic vertebral body (TH 9) with extremely high intensity, but also "salt and pepper" infiltration of bodies TH7, 8, 11, 12 and L1 with initial compression of the bodies TH 12 and L1. (Note the diffusely increased intensity in the sternum.); D – T1 GRE – FLASH in opposed phase, sagittal whole spine image with more precise imaging of the bone marrow signal conversion in the vertebral bodies infiltrated by myeloma

DISKUZE

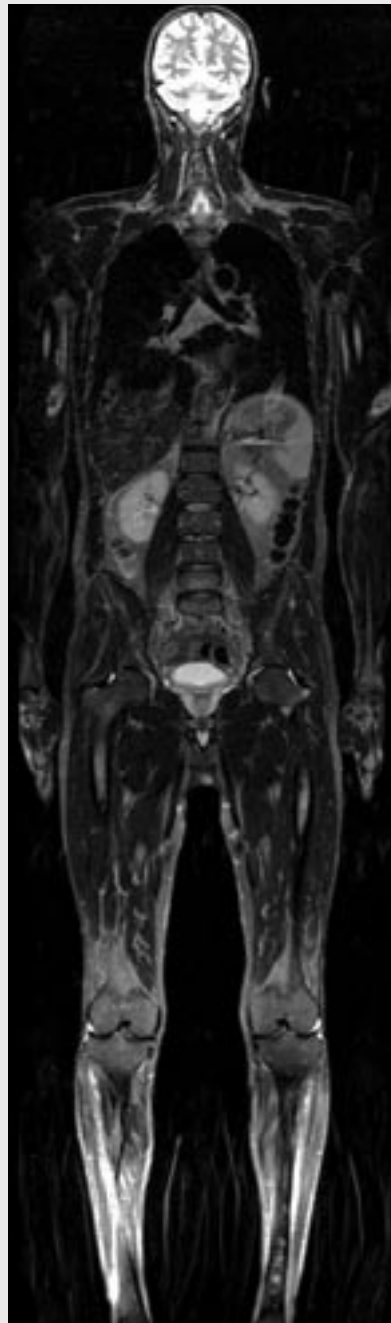
Snahy o celotělové MR vyšetření mají již svoji historii (1). Zdlouhavé zobrazování jednotlivých tělesných partií bylo nahrazeno rozšířením pohybu vyšetřovaného stolu, bylo zavedeno použití rychlých zobrazovacích sekvencí a paralelní zobrazení. Jednotliví výrobci uvedli možnost celotělového zobrazení použitím tzv. „rolling table“ Angio SURF s neomezeným pohybem stolu při vyšetřování na přístroji Magnetom Sonata Maestro Class 1,5T (Siemens, Erlangen, Německo) (2) nebo pomocí tzv. „table top extender“, tedy opět s rozšířením longitudinálního zobrazovacího pole na 200 cm (Intera 1,5T, Philips, Best, Nizozemí) (3). Největší průlom v celotělovém zobrazování umožnil koncept celotělové cívky (Magnetom Avanto 1,5T, TIM – total image matrix – Siemens, Erlangen, Německo). Elementy virtuální celotělové cívky jsou zapojeny „on line“, jejich aplikace je rychlá, ne-

jsou zapotřebí manévry s vyšetřovacím stolem, prodlužování jeho pohybu. Vyšetření celého těla magnetickou rezonancí je komplexní, probíhá v jednotlivých úrovních stupňovitě v celkovém reálném akvizičním čase (cca 45 minut), v základních sekvencích v libovolných rovinách (4).

Nejdříve byla využívána celotělová vyšetření u nemocných s generalizovanými nádorovými onemocněními. Použití celotělového MR vyšetření je výhodné tam, kde předpokládáme vícečetné postižení skeletu a případně mozku a parenchymatózních orgánů. Méně časté je užití při hledání zdroje metastáz, tedy primárního nádoru. Je tedy patrné, že indikace jsou z velké míry onkologické (5, 6). Celkové zhodnocení rozsevu hematogenních metastáz je důležité z hlediska zařazení do klinického stadia onemocnění, průkaz i vyloučení vzdálených metastáz solidních nádorů může zásadně změnit terapeutickou strategii (7). Komplexní zhodnocení rozsahu nádorového onemocnění pomocí magnetické rezonance na-



◀◀ Obr. 3A

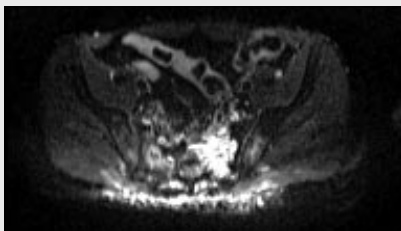


◀ Obr. 3B

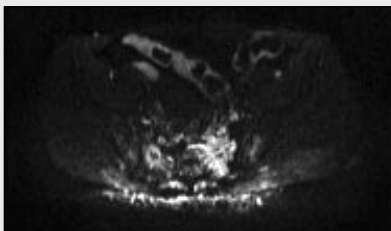
Obr. 3. Mnohočetný myelom, původně solitární postižení v sakroiliakální oblasti. Pacient po transplantaci kostní dřeně, nově diagnostikován relaps paraproteinemie. Celotělové vyšetření našlo nově rozvoj mnohočetných lézí ve skeletu. A, B – T2 TIRM – STIR, koronární celotělové obraz ukázaly vysoce intenzivní infiltraci sakroiliakální oblasti, mnohočetné léze obratlových těl, ve femurech a tibiích; C, D, E – difuzně vážené transverzální obrazy sakroiliakální myelomové infiltrace s b hodnotami 0, 400 a 800, signální intenzita infiltrované kosti je na všech obrazech vysoká; F, G, H – difuzně vážené transverzální obrazy dýlky lemu s b hodnotami 0, 400 a 800, ve srovnání s vysoce intenzivními strukturami na obrazu s b = 0 dosahuje myelomové ložisko nejvyšší intenzity na obrazech s hodnotou b = 800

Fig. 3. Multiple myeloma, originally solitary lesion in sacroiliac region. Patient after bone marrow transplantation, newly diagnosed recurrence of the paraproteinemia.

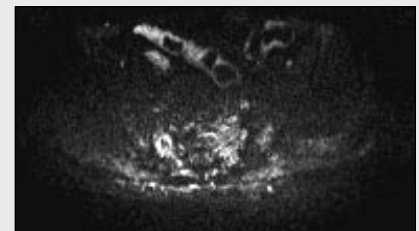
Whole body imaging found new development of the multiple lesions in skeleton. A, B – T2 TIRM – STIR, coronal whole body images showed massive highly intense infiltration in the sacroiliac region, and multiple lesions lumbar vertebral bodies, in femurs and tibiae; C, D, E – diffusion weighted transversal images of the sacroiliac myelomatous infiltration with b values 0, 400 and 800 respectively, the signal intensity of the infiltrated bone is strong in all weightings; F, G, H – diffusion weighted transversal images of the femoral diaphysis level with b values 0, 400 and 800 respectively. In comparison to the other highly intense structures on low b image (b = 0), myelomatous lesion in the left femur reaches the strongest intensity in high b image (b = 800)



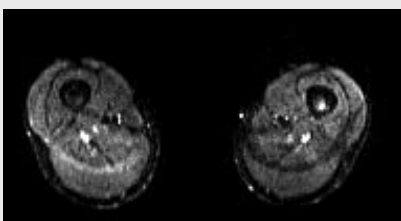
▲ Obr. 3C



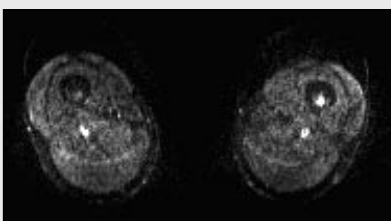
▲ Obr. 3D



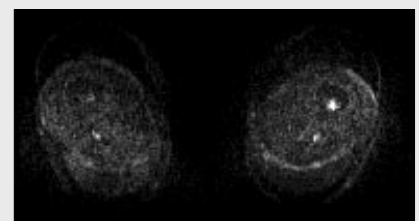
▲ Obr. 3E



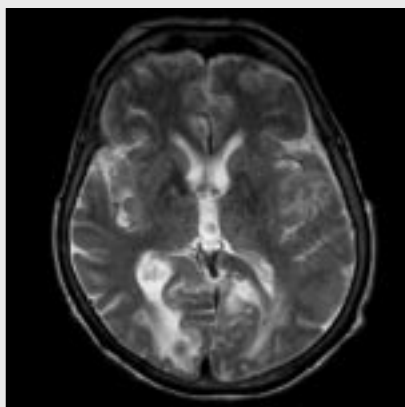
▲ Obr. 3F



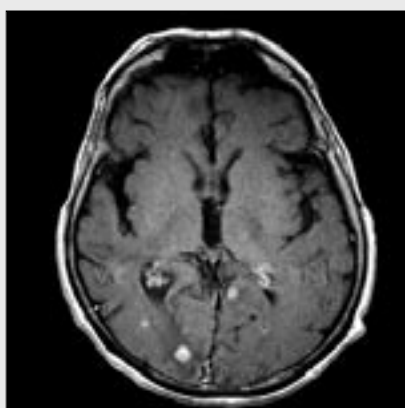
▲ Obr. 3G



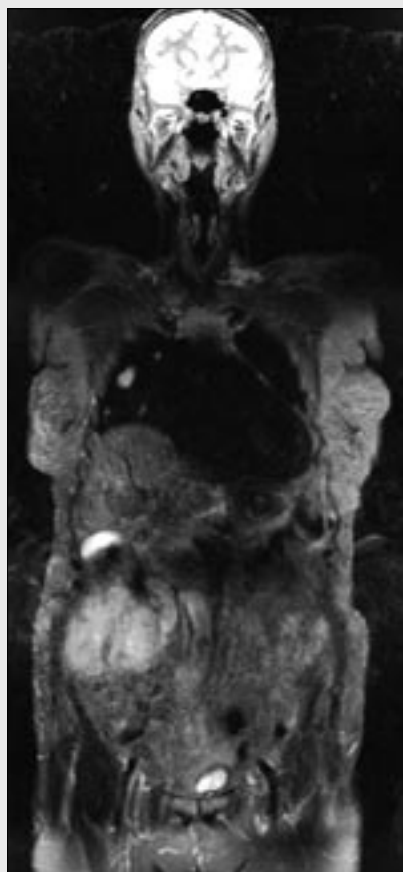
▲ Obr. 3H



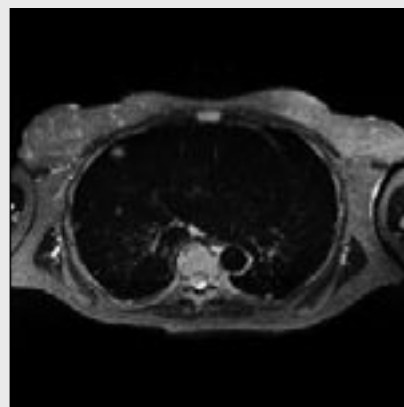
▲ Obr. 4A



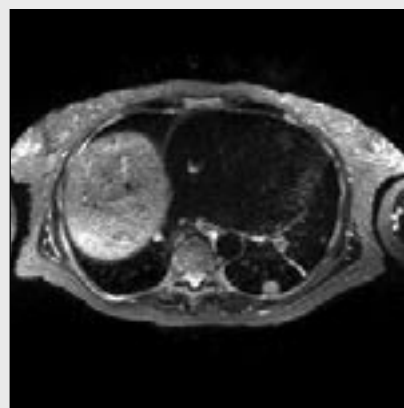
▲ Obr. 4B



▲ Obr. 4C



▲ Obr. 4D



▲ Obr. 4E

Obr. 4. Mnohočetné metastázy v mozku, celotělové MRI vyšetření kvůli hledání nádoru neznámého původu. A – T2 TSE – nejprve provedené vyšetření mozku s mnohočetným hematogenním metastatickým postižením mozku; B – T1 SE s použitím magnetizačního transferu po intravenózním podání gadolinia ukazující mnohočetné metastázy; C – T2 TIRM – STIR, koronární obraz, původním místem nádorové generalizace byl hyperintenzivní renální karcinom, zobrazeny rovněž plicní metastázy, metastázy do mozku kvůli pro mozkovou tkáň nevhodnému nastavení okénka zůstaly skryty; D, E – T2 TIRM – STIR, transverzální obrazy zobrazily mnohočetné plicní hematogenní metastázy, velikost nejmenších rozpoznatelných ložisek je 3–5 mm

Fig. 4. Multiple brain metastases, whole body MRI investigation due to the tumor of unknown origin. A – T2 TSE - initial examination with multiple hematogenous metastatic involvement of the brain; B – T1 SE with magnetization transfer after intravenous application of the gadolinium showing multiple brain metastases; C – T2 TIRM – STIR, coronal whole body image, the original site of the tumor generalization was hyperintense renal carcinoma, lung metastases were also displayed. Brain metastases remained hidden due to the non optimal brain window settings; D, E – T2 TIRM – STIR, transversal images of the thorax detected multiple hematogenous lung metastases; the diameter of the smallest distinguishable lesions is 3–5 mm

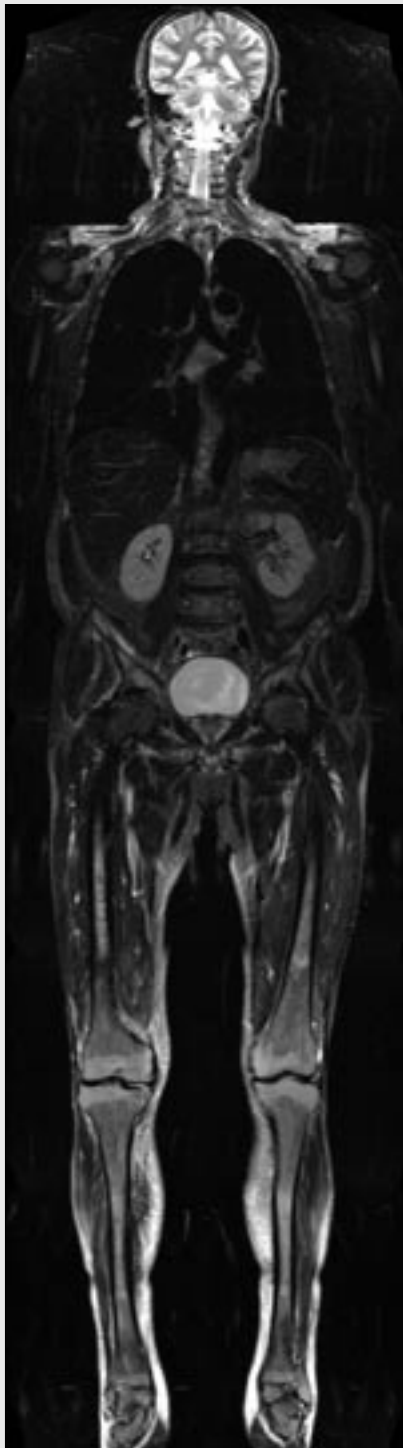
ráží na problémy s akceptovatelnou akviziční dobou, proto je nutné u jednotlivých typů solidních nádorů cíleně zvolit strategii vyšetření – kombinovat sekvence vhodné pro zobrazení skeletu spolu se sekvencí pro parenchymové orgány a postkontrastního zobrazení mozku či jater tak, aby celé vyšetření nepřesáhlo 60 minut. U myeloproliferativních onemocnění, monoklonální gamapatií a mnohočetného myelomu je možné se soustředit jen na zobrazení skeletu. Nekontrastní zobrazení postačuje i u rozsáhlých generalizací karcinomu prsu a plic s doplněním postkontrastního vyšetření mozku.

Při hodnocení generalizovaného postižení kostní dřeně naráží celotělová zobrazení na obecné problémy s interpretací změny signálu kostní dřeně. Dominantním je u neložiskových postižení posouzení konverze tukové kostní dřeně. U řady onemocnění dochází k aktivaci krvetvorby v dříve tukové kostní dřeně, dále se vyskytuje její edém po předchozím ozáření, po chemoterapii i po provedené transplantaci krvetvorných buněk. K významné konverzi dochází i při chronické sepsi, při myelofibróze, amyloidóze, hyper-

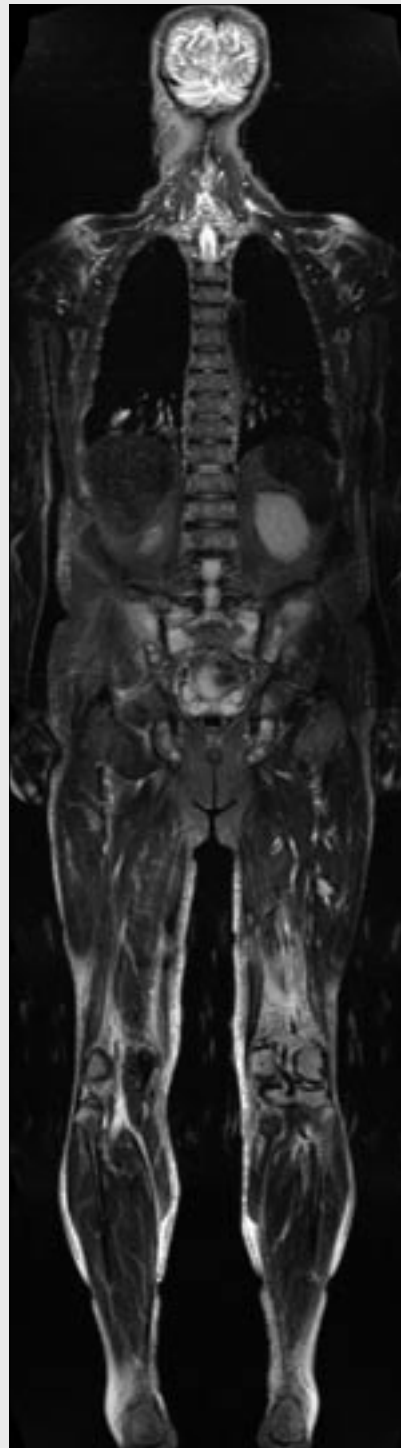
paratyreóze, u myeloproliferativních onemocnění, také u difúzní infiltrace kostní dřeně hemoblastózami i mnohočetným myelomem. Odlišení těchto změn je možné často jen sledováním dynamického vývoje signálu před terapií, během ní a s odstupem od ní. Na rozdíl od těchto difúzních změn je u ložiskového postižení skeletu nutno odlišit fokální změny charakteru akutních, hojících se i únavových zlomenin.

Pro zobrazení plic se u celotělového vyšetření používá T2 vážené STIR sekvence, jejíž výhodou je dobré odlišení tkání mediastina včetně případných metastáz v mízních uzlinách, dále detekce pleurálního výpotku při současném relativně dobrém zobrazení plicního parenchymu. Je udávána schopnost detektovat plicní metastázy od velikosti 5 mm. Stejná sekvence má využití i v detekci jaterních ložisek, postižení retroperitoneálních uzlin a nadledvin.

Budoucí vývoj zobrazení celého těla magnetickou rezonancí v onkologických indikacích bude zřejmě směřovat k přehledným zobrazením založeným na obecných vlastnos-



▲ Obr. 5A



▲ Obr. 5B



▲ Obr. 5C

Obr. 5. Febrilie nejasné etiologie, zvýšená sérová hladina CRP bez doprovodných změn krevních elementů v periferní krvi, celotělové MRI vyšetření kvůli hledání nádoru neznámého původu.

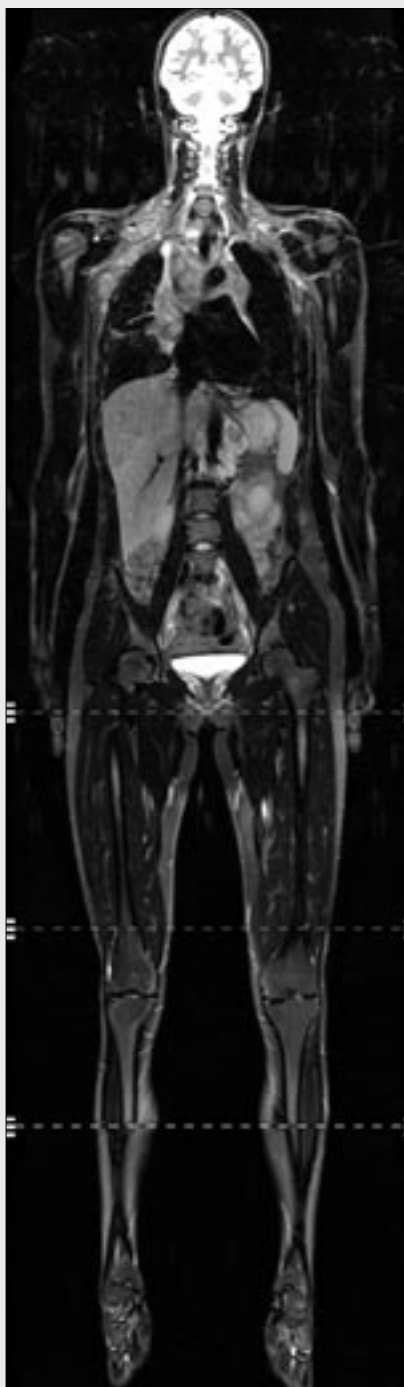
A, B – T2 TIRM – STIR – koronární obrazy ukazující vysoce intenzivní bilaterální infiltraci kostní dřeně femuru a tibie – jak v oblasti diáfýz tak epifýz; struktura soli a pepře v oblasti kostní dřeně obratlů; C – ^{18}F -FDG-PET/CT – celotělový MIP obraz ukazuje difúzně zvýšenou ^{18}F -FDG akumulaci v kostní dřeni. Byla doporučena sternální punkce, byla potvrzena difúzní infiltrace kostní dřeně při akutní myeloidní leukémii.

Fig. 5. Fever of unknown origin, increased CRP serum levels, no changes in the peripheral blood, investigation due to the tumor of unknown origin. A, B – T2 TIRM – STIR, coronal whole body images depicted highly intense bilateral infiltration of the bone marrow of femur and tibia, both in the diaphyses and epiphyses; and salt and “pepper structure” of the vertebral bone marrow; C – ^{18}F -FDG-PET/CT – whole body MIP image demonstrated diffusely increased ^{18}F -FDG uptake in bone marrow. The sternal puncture was recommended, and the diffuse bone marrow infiltration by acute myeloid leukemia was confirmed.

tech nádorové tkáně. U nádorů je snížen aparentní difúzní koeficient (ADC), což je dáno zvýšením buněčnosti společně se zvětšením celkové velikosti buněk, a odpovídá takzvané celulární denzitě nádoru. Zvýšená intenzita nádorové tkáně v difúzně vážených sekvencích doprovázená snížením aparentního difúzního koeficientu je vlastností velké skupiny solidních nádorů (melanoblastom, karcinom mamy, skvamocelulární karcinomy hlavy a krku, epidermoidní karcinom plic) i lymfomů a ostatních hematooonkologických onemocnění. Porovnáním difúzně vážených zobrazení a ADC

map je možné také diferencovat mezi cystickými změnami, nekrózami nádoru a solidními nádorovými tkáněmi (8).

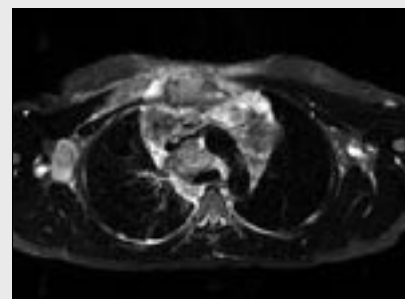
Celotělové difúzně vážené zobrazení bylo zavedeno Takaharou (9) a je testováno v zobrazování především metastáz skvamocelulárních karcinomů hlavy a krku a nověji i u lymfomů a mnohočetného myelomu (10). Preferovány jsou difúzně vážené sekvence s potlačením tuku jak pomocí inverzního pulzu metodou STIR, tak spektrální saturací tuku (fat saturation, SPIR) (9, 10). Obecnou nevýhodou difúzních sekvencí je relativně malý poměr signálu k šumu a také znač-



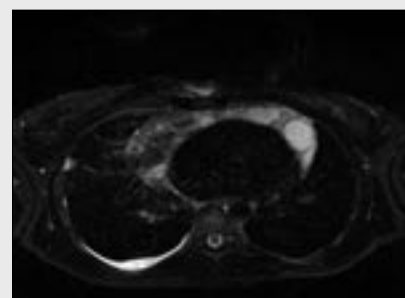
▲ Obr. 6A



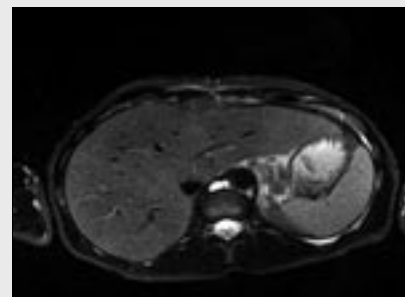
▲ Obr. 6B



▲ Obr. 6C



▲ Obr. 6D



▲ Obr. 6E

Obr. 6. Staging známé Hodgkinovy nemoci. A – T2 TIRM – STIR, B – T1 TSE, koronární obrazy ukazují zvětšené mízní uzliny v pravé axile, v mediastinu a retroperitoneu paraaortálně; C, D, E – mízní uzliny zobrazené na transversálních T2 TIRM – STIR obrazech, za pozornost stojí excelentní kvalita zobrazení včetně zobrazení malého množství pleurální tekutiny

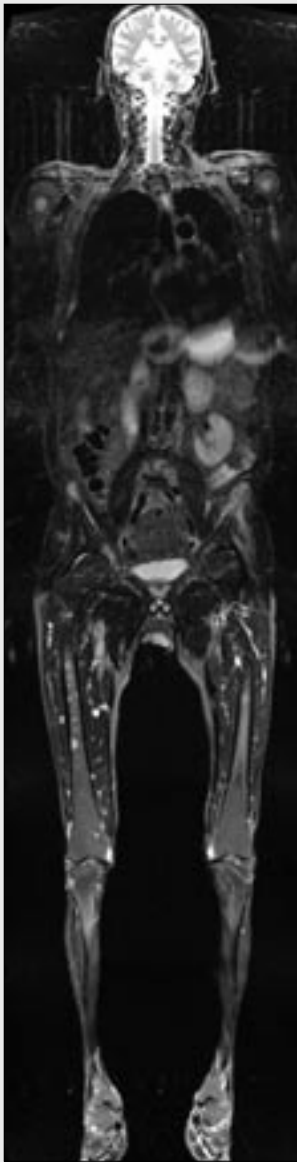
Fig. 6. Staging of the known Hodgkin disease. A – T2 TIRM – STIR, B – T1 TSE, coronal whole body images showed enlarged lymph nodes in the right axillary, mediastinal and retroperitoneal paraaortic regions; C, D, E – lymph nodes demonstrated by the transversal T2 TIRM – STIR images, note the excellent image quality including imaging of the small amount of the pleural fluid

ná senzitivita k susceptibilním artefaktům na pomezí vzduchu a měkkých tkání včetně plicního parenchymu (10). Léze pak může být problematické správně anatomicky lokalizovat, při srovnání s PET/CT je nejvýznamnějším problémem správná detekce plicních metastáz. Jde však o relativně rychlá přehledná zobrazení, která neumožňují zobrazení s dokonalým prostorovým rozlišením, svojí povahou se blíží využití metod nukleární medicíny (10).

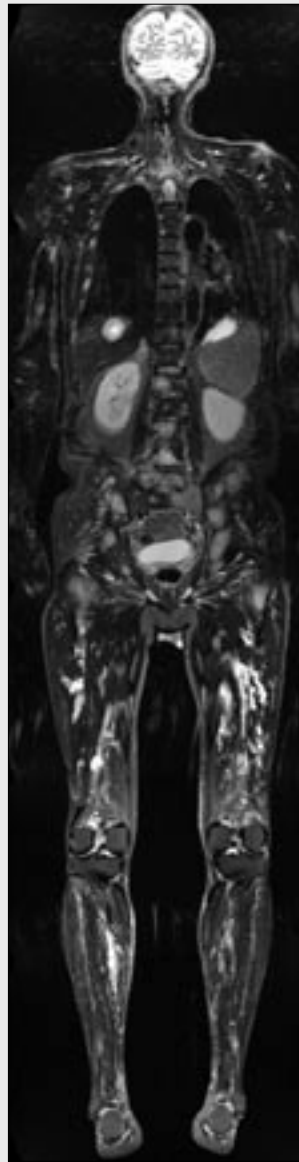
Na druhé straně dalším možným vývojem je využití tkáňově specifických či molekulárně specifických látek pro zobrazení jaterního parenchymu (hepatocelulární kontrastní

látky), vaskularizované tkáně (látky s převážně intravaskulární extracelulární distribucí) a látky specifické pro retikuloendoteliární systém a mízní uzliny. První klinická instalace hybridního systému PET/MRI je zatím ojedinělým experimentálním pokusem, který zatím čeká na ověření v klinické praxi.

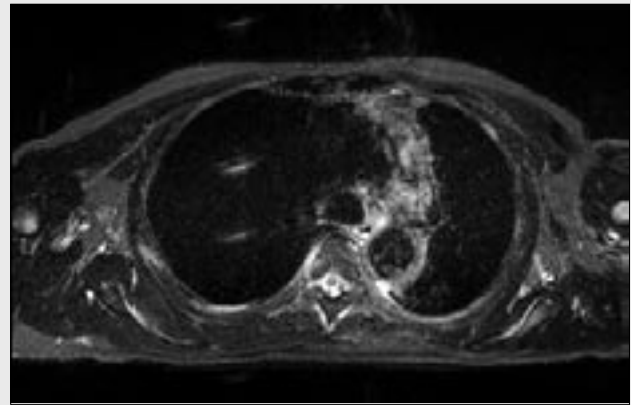
Škála možných indikací celotělového MR vyšetření je ovšem větší, z hlediska dosavadního vývoje radiodiagnostiky je použití mnohdy překvapivé. Objevuje se, zejména v USA, vyšetřování preventivního charakteru, tzv. „manager's imaging“, tedy vyšetřování k vyloučení dosud utajené-



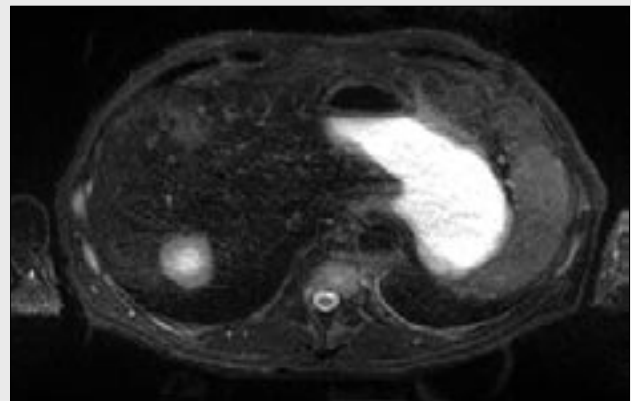
▲ Obr. 7A



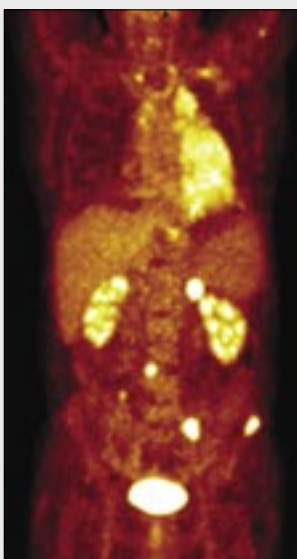
▲ Obr. 7B



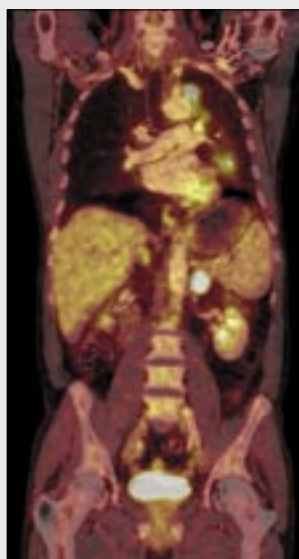
▲ Obr. 7C



▲ Obr. 7D



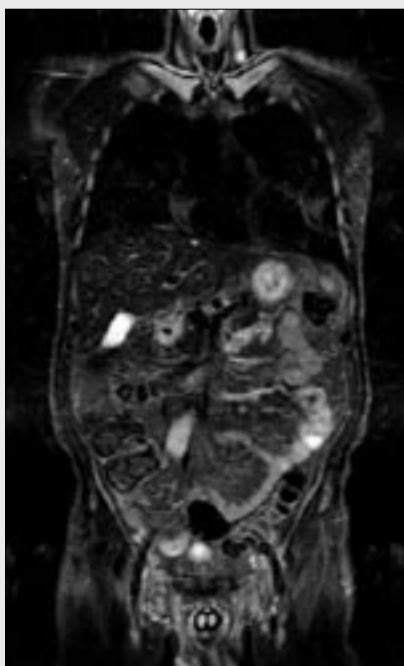
▲ Obr. 7E



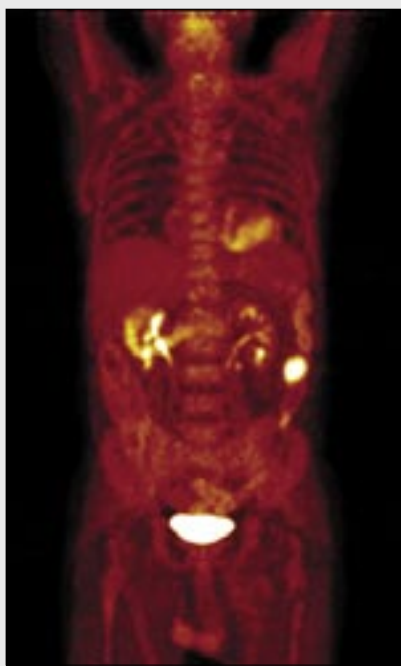
▲ Obr. 7F

Obr. 7. Restaging bronchogenního karcinomu levého horního plicního laloku. A, B – T2 TIRM – STIR, koronární celotělové obrazy ukazují mnohočetné hyperintenzivní metastázy ve skeletu – v pánvi, humerech i femurech – a rovněž metastázu v játrech a levé nadledvině; C, D – transversální T2 TIRM – STIR obrazy zachycují kolabovaný levý horní plicní lalok, infiltraci kostní dřeně obou humerů a metastázu jaterního parenchymu; E, F – ^{18}F -FDG-PET/CT – celotělový MIP obraz (E) a fúzovaný koronární obraz (F), vyšetření bylo provedeno šest měsíců před celotělovým MRI. Porovnání MRI a PET/CT dokumentuje progresi rozsahu metastatického postižení.

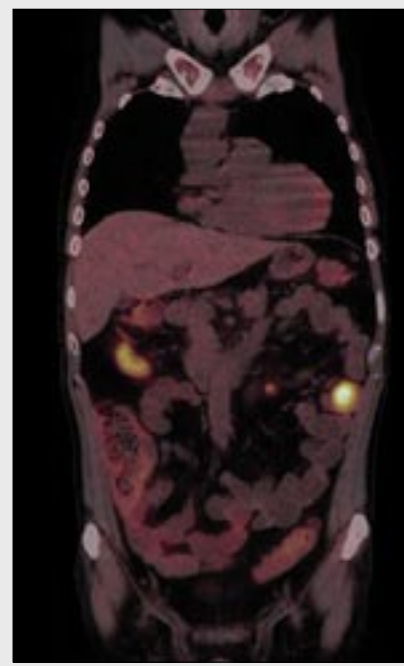
Fig. 7. Restaging of the lung carcinoma of the left upper lobe. A, B – T2 TIRM – STIR, coronal whole body images showed multiple hyperintense metastases in skeleton – in pelvis, humeri and femurs; and in the liver and left adrenal gland; C, D – transversal T2 TIRM – STIR images detected collapsed left upper lobe, infiltration of the bone marrow of the both humeri and metastatic lesion in the liver parenchyma; E, F – ^{18}F -FDG-PET/CT – whole body MIP image (E) and fused coronal image (F), examination performed six months before whole body MRI. Comparison of the whole body MRI and PET/CT documented the progression of the metastatic spread.



▲ Obr. 8A



▲ Obr. 8B



▲ Obr. 8C

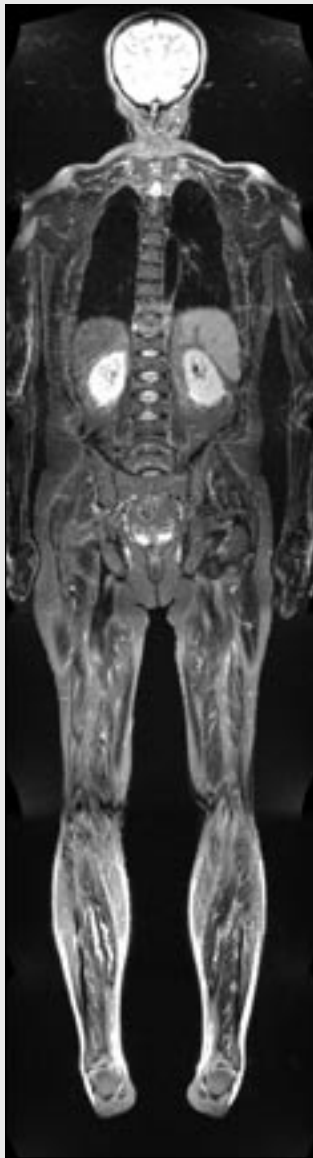
Obr. 8. Diagnostické problémy celotělového MRI – vyšetření kvůli hledání nádoru neznámého původu. U nemocného s anémií a vysokými sérovými hodnotami CRP nebyl rozpoznán karcinom jejunum. A – T2 TIRM – STIR – v jejunální části mezenteria byla nalezena jen jediná drobná hyperintenzivní uzlinka; kvůli pohybovým artefaktům bylo přehlédnuto zesílení stěny jejunum; B – ^{18}F -FDG-PET/CT – celotělový MIP obraz s vysokou akumulací ^{18}F -FDG v jejunální kličce a malé mezenterální uzlině; C – ^{18}F -FDG-PET/CT, s větší přesností ukazuje jak primární tumor tak mizní uzlinu fúzaný planární obraz

Fig. 8. Diagnostic problems of the whole body MRI – investigation due to the tumor of unknown origin. Jejunal carcinoma remained undetected in patient with anemia and increased CRP serum levels. A – T2 TIRM – STIR – only hyper-intense small lymph node was found in the jejunal mesentery; due to the motion artifacts, the jejunal wall swelling was overlooked; B – ^{18}F -FDG-PET/CT – whole body MIP image with increased ^{18}F -FDG uptake in the jejunal loop and in the small lymph node; C – ^{18}F -FDG-PET/CT, fused coronal image showed primary tumor and involved lymph node more precisely

ho onemocnění u exponovaných, vzhledem k ceně vyšetření většinou bohatých klientů. V tomto případě bývá prováděno i vyšetření cévního systému, celotělová MR angiografie (viz níže). Kuriózní je také zapojení celotělového MR vyšetření do virtuální pitvy mrtvých, jejichž religiózní přesvědčení (nebo přesvědčení jejich příbuzných) brání provedení běžné pitvy. Populární se v současnosti stává měření distribuce tělesného tuku pomocí celotělové MR. Při tomto vyšetření lze s použitím rychlého počítačového vyhodnocení posoudit celkové množství tělesného tuku. Tato metoda je mnohem přesnější než posuzování BMI (body mass index) a je z jedinou aplikací CAD (computer aided diagnosis) (11).

Celotělové MR zobrazení se ocitá v konkurenčním postavení oproti donedávna suverénní scintigrafii skeletu. Řada prací analyzuje výsledky obou metod. Ukazuje se vyšší senzitivita i specifita MR zobrazení, navíc toto vyšetření přináší průkaz dalších nádorových změn, lokalizovaných mimo skelet nemocných (12, 13). Samozřejmě, kromě omezení radiační zátěže pacientů, je zde nutné posuzovat i ekonomickou výhodnost. Jestliže dříve byly v primárním nádorovém stagingu používány i další radiologické metody (kromě konvenčního snímání, CT, kostní scintigrafie), pak byly celkové ekonomické náklady takového přístupu vyšší než při izolovaném použití celotělového MR vyšetření (14). Na druhé straně se konkuruje celotělovému MR vyšetření hybridní zobrazení PET/CT. Tato hybridní metoda spojuje v jednom vyšetření výhody pozitronové emisní tomografie, která dete-

kuje vysoce citlivě ložiska vyšší nádorové metabolické aktivity s velkou anatomickou rozlišovací schopností výpočetní tomografie (dnes většinou multidetektorové MDCT s možností submilimetrového zobrazení a s možností všech dalších výhod MDCT, jako jsou fázová vyšetření, rekonstrukce plicního parenchymu s vysokým rozlišením, CT angiografie). Řada studií, orientovaných na porovnání výsledků celotělového MR vyšetření a PET/CT s aplikací ^{18}F -FDG ukazuje vyšší spolehlivost ^{18}F -FDG-PET/CT ve stagingu nádorových onemocnění, v odhalování nádorů neznámé etiologie i v posuzování diseminovaných cévních postižení při systémových onemocněních pojiva i při vaskulitidách. Výraznou limitací celotělového vyšetření MR je problém detekce primárního i sekundárního nádorového postižení střeva, které není možné vzhledem k pohybovým artefaktům spolehlivě hodnotit. Jestliže jsou vyhodnocovány výsledky obou složek této metody, pak PET sama o sobě je velmi spolehlivou metodou k diagnostice metastáz v kostech a lymfatických uzlinách u nádorů s vysokou mírou glykolytické aktivity, kombinace s CT zvyšuje anatomickou přesnost detekce ložisek s jejich přesnou lokalizací. Naproti tomu magnetická rezonance je spolehlivější v průkazu metastáz v játrech (zejména použitím hepatospecifických kontrastních látek) a v mozku. Vzhledem k vysokému pozadí extrémního obrátu aerobní glykolýzy v mozku není detekce metastáz v mozku pomocí PET často vůbec možná, a proto pro kompletní staging onemocnění nevyhnutelně musí obsahovat postkontrastní T1 vážené



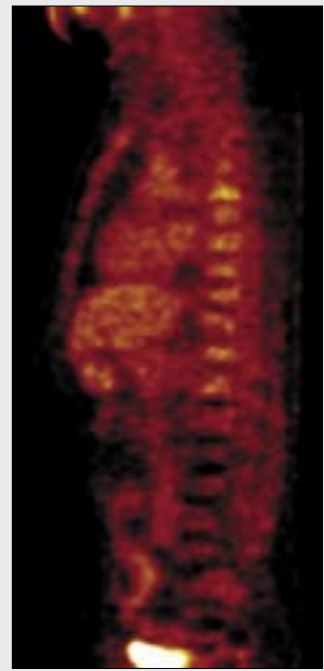
▲ Obr. 9A



▲ Obr. 9B



▲ Obr. 9C



▲ Obr. 9D

Obr. 9. Diagnostické problémy celotělového MRI – mnohočetné fraktury u pacienta léčeného dlouhodobě kortikosteroidy a cytostatiky kvůli ulcerózní kolitidě – diferenciální diagnóza k mnohočetnému myelomu.

A – T2 TIRM – STIR – hyperintenzivní obratlová těla v thorakolumbální oblasti v koronárním obrazu; B – GRE T1 v opozici fáze, konverze signálu obratlových těl v lumbální oblasti kvůli kolapsům obratlových těl – nález je podezřelý z infiltrace kostní dřene; C – ^{18}F -FDG-PET/CT, sagitální obraz prokázal lehce zvýšenou akumulaci ^{18}F -FDG v hrudních obratlových tělech, nízkou v bederních; D – sagitální CT obraz celé páteře s mnohočetnými frakturami rozdílného stupně komprese

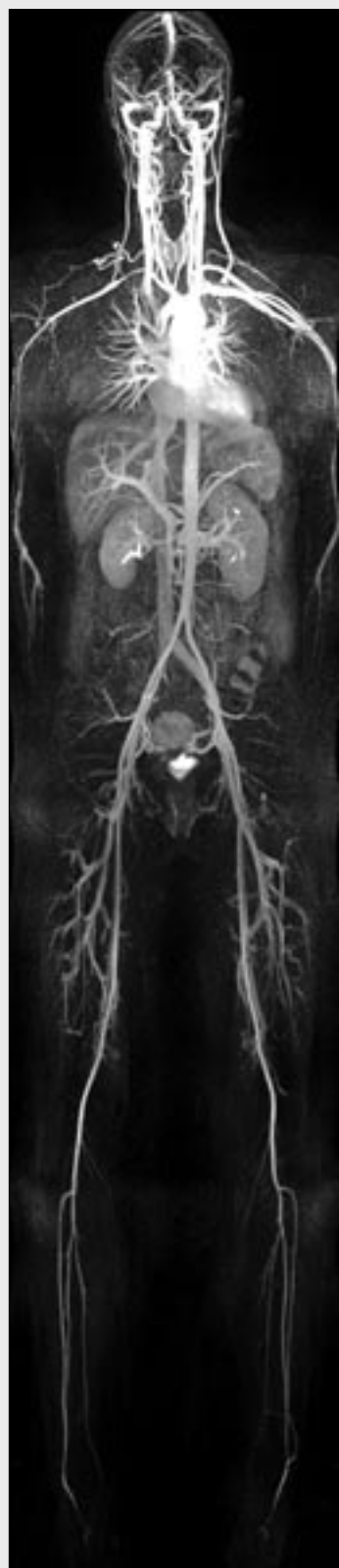
Fig. 9. Diagnostic problems of the whole body MRI – multiple vertebral body fractures in patient under long term therapy with corticosteroids and cytostatics due to the ulcerative colitis – differential diagnosis to the multiple myeloma. A – T2 TIRM – STIR – hyperintense vertebral bodies in the thoraco-lumbar region in the coronal view; B – T1 GRE – FLASH in opposed phase, bone marrow signal conversion in the lumbar spine due to the collapsed vertebral bodies – finding suspected bone marrow infiltration; C – ^{18}F -FDG-PET/CT, sagittal image showed slightly increased ^{18}F -FDG uptake in the thoracic vertebral bodies, but low uptake in lumbar ones; D – Sagittal CT image of the whole spine showed multiple fractures with different degree of the compression

obrazy – u 1,5 T přístrojů SE T1 MTC. Vynikající je tkáňový kontrast MRI a rozlišení při zobrazení měkkých částí (15). Na druhé straně byly provedeny studie, které hodnotí celotělové MR vyšetření jako spolehlivější než PET/CT při detekci metastáz v kostní dřeni. Poukazují při MR na velikost detekovatelných lézí v kostech od 2 mm v průměru, při PET/CT od 5 mm v průměru (16), důvodem je výrazně horší rozlišení PET, zejména u nádorů se střední úrovní aerobní glykolýzy a současná absence osteolytické destrukce při CT. Následně po instalaci PET/CT téměř vymizely v naší nemocnici indikace stagingu nádorových onemocnění prsu a plic, zůstávají indikace u nádorů s nízkou či variabilní úrovní akumulace ^{18}F -FDG, jako je renální karcinom, využíváno je celotělového zobrazení také u stagingu lymfomů u jedinců v adolescentním věku, kdy je možno takto účinně snížit úhrnnou radiační zátěž nemocných.

Zatímco diskuze o vyšší spolehlivosti celotělového MR vyšetření nebo PET/CT není dosud uzavřena, nabízí se kompromis v podobě spojení pozitronové emisní tomografie a celotělového MR vyšetření (PET/MRI). Vysoká senzitivita

PET vyšetření díky detekci akcelerované metabolické aktivity, předcházející anatomické změny postrádá zasazení do anatomického rámce, řešení se nabízí fúzí s magnetickou rezonancí. Tím by se zvýšila diagnostická přesnost postižení kostní dřene a také se snižuje radiační zátěž (oproti PET/CT). Budoucnost ukáže, zda právě kombinace těchto dvou metod je slibná pro zobrazování v onkologii a pro onkologický screening (17). Jako slibná metoda se rovněž ukazuje celotělové vyšetření pomocí difúzní vážených sekvencí (18).

V práci je jen okrajově zmíněno celotělové kardiovaskulární MR zobrazení, nebylo záměrem referovat zevrubně o této metodě, do sdělení byla zahrnuta jen vyšetření z indikace systémových onemocnění typu vaskulitidy. Jak vyplývá z předchozího, indikace ke dvěma typům celotělového MR vyšetřování se zásadně liší. Celotělové zobrazení arteriálního systému může v budoucnu sloužit k preventivnímu vyšetřování tepenného řečiště a srdce. Jde tedy o kombinaci celotělové kontrastní MR angiografie včetně MR angiografie věnitých tepen a funkční vyšetření srdce magnetickou rezonancí. Průměrný čas vyšetření je udáván okolo 80 minut.



◀◀ Obr. 10A



◀ Obr. 10B



◀ Obr. 10C



◀ Obr. 10D

◀ Obr. 10E

Obr. 10. Celotělová kontrastní MR angiografie (ceMRA) u Takayashuovy arteritidy, použita intravaskulární kontrastní látka gadofosveset.
 A – celotělový maximum intenzity projection (MIP) angiogram v koronárním pohledu; B – detailní tenká vrstva MIP demonstruje dlouhé symetrické zúžení podklíčkové tepny s rozvinutým kolaterálním oběhem hlubokými krčními tepnami; C – zakřivená rekonstrukce podklíčkové tepny v časně dynamické fázi ceMRA; D – „Steady state“ fáze ceMRA, akvizice dat s vysokým rozlišením umožňuje rekonstruovat postižený segment s vysokou přesností; E – ceMRA věnčitých tepen, normální nález

Fig. 10. Whole body contrast enhanced MR-angiography (ceMRA) in Takayasu arteritis, blood-pool agent gadofosveset was used.
 A – Whole body maximum intensity projection (MIP) angiogram in the coronal view; B – Detailed thin slab MIP demonstrated long symmetric narrowing of the subclavian artery with developed collateral circulation via deep cervical arteries; C – Curved reformation of the subclavian artery in early dynamic phase of the ceMRA; D – Steady state phase of the ceMRA, high resolution acquisition enables to perform detailed reconstruction of involved arterial segment with increased precision; E – Coronary ceMRA – normal finding

Metoda se tedy v dnešní podobě hodí spíše k prevenci. Pokud je celotělové vyšetření využito k průkazu systémových změn tepenného systému, autoimunitní poškození tepen při Takayashuově chorobě, periarteritis nodosa atd. (19, 20), je možné použitím látek s intravaskulární extracelulární distribucí, které je možné využít jednak k zobrazení arteriálního systému v době prvního průchodu k.l. cévním systémem, ale i k pozdějšímu zobrazení s vysokým rozlišením. U vaskulitid je možné i současné zobrazení plicního cévního systému i věnčitých tepen.

ZÁVĚR

Naše dosavadní zkušenosti s celotělovým MR vyšetřením jsou velmi povzbudivé, omezením pro další navýšení vy-

šetřených osob je zejména nedostatečný prostor v plném zatížení našeho jediného pracoviště magnetické rezonance. Vyšetření si získalo důvěru onkologických specialistů. Nejčastěji jsou indikováni nemocní s podezřením na diseminaci nádorových onemocnění do skeletu, především s diagnózou mnohočetného myelomu. Vyšetření probíhá díky paralelnímu zobrazení s panoramatickým systémem cívek typu TIM v reálném vyšetřovacím čase, s výbornou diagnostickou kvalitou. Nezanedbatelná je náhrada mnoha vyšetření jedním komplexním zobrazením s ušetřením expozice ionizujícím zářením i s ušetřením prostředků na léčbu onkologických nemocných.

LITERATURA

1. Goyen M, Schlemmer H P. Ganzkörper – MRT – Diagnostische Strategie der Zukunft. Radiologie 2006; 53: 207–213.
2. Ghanem N, Lohrmann C, Engelhardt M, et al. Whole body MRI in the detection of bone marrow infiltration in patients with plasma cell neoplasms in comparison with the radiological skeletal survey. Eur Radiol 2006; 16(5): 1005–1014.
3. Nakanishi K, Kabayashi M, Takahashi S, et al. Whole body MRI for detecting metastatic bone tumor: Comparison with bone scintigrams. Magn Reson Med Sci 2005; 4(1): 11–17.
4. Kreisler P. Technical survey: from local MRI to whole – body MR using fast imaging techniques. Radiologie 2004; 44(9): 820–825.
5. Schmidt GP, Hang AR, Schoenberg SO, et al. Whole – body MRI and PET/CT in the management of cancer patients. Eur Radiol 2006; 16(6): 1216–1225.
6. Schmidt GP, Schmid R, Hahn K, et al. Whole – body MRI and PET/CT in tumor diagnosis. Radiologie 2004; 44(11): 1079–1087.
7. Antoch G, Vogt FM, Freudenberg LS, et al. Whole – body dual – modality PET/CT and whole – body MRI for tumor staging in oncology. JAMA 2003; 290(24): 3199–3206.
8. Takahara T, Imai Y, Yamashita T, Yasuda S, Nasu S, Van Cauteren M. Diffusion weighted whole body imaging with background body signal suppression (DWIBS): technical improvement using free breathing, STIR and high resolution 3D display. Radiat Med 2004; 22(4): 275–282.
9. Abdel Razek AA, Soliman NY, Elkhamary S, Alsharaway MK, Tawfik A. Role of diffusion-weighted MR imaging in cervical lymphadenopathy. Eur Radiol 2006; 16(7): 1468–1477.
10. Murtz P, Krautmacher C, Traber F, Gieseke J, Schild HH, Willinek WA. Diffusion-weighted whole-body MR imaging with background body signal suppression: a feasibility study at 3.0 Tesla. Eur Radiol 2007; 24: (Epub ahead of print).
11. Brennan DD, Whelan PF, Robinson K, et al. Rapid automated measurement of body fat distribution from whole – body MRI. AJR 2005; 185(2): 418–423.
12. Herborn CU, Unkel C, Vogl FM, et al. Whole- body MRI for staging patients with head and neck squamous cell carcinoma. Acta Otolaryngol 2005; 125(11): 1224–1229.
13. Ghanem N, Althoefer C, Kelly T, et al. Whole-body MRI in comparison to skeletal scintigraphy in detection of skeletal metastases in patients with solid tumors. In Vivo 2006; 20(1): 173–182.
14. Goo HW, Yang DH, Ra YS, et al. Whole body MRI of Langerhans cell histiocytosis: comparison with radiography and bone scintigraphy. Pediatr Radiol 2006; 36(10): 1019–1031.
15. Seemann MD, Meisetschlaeger G, Gaa J, Rummeny EJ. Assessment of the extent of metastases of gastrointestinal carcinoid tumors using whole – body PET, CT, MRI, PET/CT and PET/MRI. Eur J Med Res 2006; 11(2): 58–65.
16. Schmidt GP, Schoenberg SO, Schmid R, Stahl R, Tiling R, et al. Screening for bone metastases: whole – body MRI using a 32 – channel system versus dual modality PET-CT. Eur Radiol 2007; 17(4): 939–949.
17. Seemann MD. Whole – body PET/MRI: the future in oncological imaging. Technol Cancer Res Treat 2005; 4(5): 577–582.
18. Mechl M, Neubauer J, Krejčířík P, Sedláková J. Celotělové vyšetření pomocí magnetické rezonance se zobrazením difúze u nemocných s mnohočetným myelomem – první zkušenosti. Ces Radiol 2007; 61: 364–369.
19. Herborn CU, Vogl FM, Goyen M. Cardiovascular whole – body MRI: possibilities and limitations in prevention. Radiologie 2004; 44(9): 826–834.
20. Kramer H, Schoenberg SO, Nikolaou K, et al. Cardiovascular whole-body MRI with parallel imaging. Radiologie 2004; 44(9): 835–843.