

HYBRIDNÍ ZOBRAZENÍ JATER A PANKREATU POMOCÍ PET/MR

HYBRID IMAGING OF LIVER AND PANKREAS USING PET/MRI

přehledový článek

Jiří Ferda
Eva Ferdová
Jan Baxa

Klinika zobrazovacích metod LF UK
a FN, Plzeň

Přijato: 15. 12. 2016.

Korespondenční adresa:

prof. MUDr. Jiří Ferda, Ph.D.
Klinika zobrazovacích metod LF UK
a FN
Alej Svobody 80, 306 40 Plzeň
e-mail: ferda@fnplzen.cz

Podpořeno projektem Ministerstva
zdravotnictví ČR Koncepční rozvoj
výzkumné instituce 00669806 – FN
Plzeň a Programem rozvoje vědních
oborů Karlovy Univerzity (projekt
P36).

Konflikt zájmů: žádný.

Hlavní stanovisko práce

Hybridní zobrazení PET/MR umožňuje využít výhod zobrazení jater pomocí hepatospecifické fáze s hodnocením metabolické aktivity tkání.

SOUHRN

Ferda J, Ferdová E, Baxa J. Hybridní zobrazení jater a pankreatu pomocí PET/MR

Hybridní zobrazení pomocí PET/MR u onemocnění jater a pankreatu využívá vysokého kontrastního rozlišení magnetické rezonance spolu s možnostmi posouzení dynamického postkontrastního zobrazení hepatospecifickou kontrastní látkou, která dovoluje posoudit perfuzní charakteristiky tkání a také schopnost akumulovat hepatospecifickou látku a současně hodnotit metabolickou aktivitu ložisek. Možnost dechově synchronizované akvizice dat výrazně zpřesňuje evaluaci metabolické aktivity ložisek. Pro zobrazení jaterních sekundárních nádorů a nádorů cholangiogenní je využívána kombinace podání hepatospecifické kontrastní látky s ^{18}F -fluorodeoxyglukózou. U hepatocelulárního karcinomu je možné využít kromě ^{18}F -fluorodeoxyglukózy také ^{18}F -fluorocholin. Kombinace MR a PET je vhodným nástrojem k přesnému posouzení jednak povahy pankreatických nádorových procesů, včetně posouzení biologické aktivity cystických nádorů, ale dovoluje i výrazné zpřesnění stagingu, především odlišení nádorů s jaterními metastázami. U neuroendokrinních nádorových procesů pankreatu, ale i u jaterních metastáz se uplatňuje ^{18}F -fluorodihydroxyfenylalanin.

Klíčová slova: hybridní zobrazení, PET/MR, jaterní nádory, nádory pankreatu.

Major statement

Hybrid imaging PET/MRI enables to use the advantages of the liver imaging using hepatospecific contrast agent with the evaluation of the metabolic activity.

SUMMARY

Ferda J, Ferdová E, Baxa J. Hybrid imaging of liver and pancreas using PET/MRI

Hybrid imaging using PET/MRI in liver and pancreas uses the enhanced tissue contrast of magnetic resonance including dynamic enhancement using gadolinium based contrast agent with early extracellular and late hepatospecific distribution with addition of the evaluation of the metabolic activity of the tissues. The possibility of the synchronous data acquisition with the breathing movements improves the detectability of the presence and level of the metabolic activity within the lesions. ^{18}F -fluorodeoxyglucose is being an optimal radiopharmaceutical in detection and follow-up of the liver metastases and cholangiogenous tumors. The hepatocellular carcinoma imaging could be based both on the ^{18}F -fluorodeoxyglucose and ^{18}F -fluorocholine. It is the advantage to combine magnetic resonance and positron emission tomography in patients with pancreatic tumors, including the assessment of the behavior and in the evaluation of the staging of the tumor, especially in cases when the hepatic metastases of pancreatic tumors should be excluded. In tumors of neuroendocrine origin even in pancreatic or liver secondary tumors, the useful radiopharmaceutical is ^{18}F -fluorodihydroxyphenylalanine.

Key words: hybrid imaging, PET/MRI, liver tumors, pancreatic tumors.

ÚVOD

V diagnostice patologických procesů jater a pankreatu hrají v současnosti významnou roli jak magnetická rezonance, tak hybridní zobrazení pomocí PET/MR. Multimodální přístup k posuzování patologických procesů je vlastní magnetické rezonanci, proto zavedením hybridního integrovaného systému PET/MR do klinické praxe umožňuje obohatit posuzování povahy tkání a patologických procesů i o posouzení metabolismu (1–3). ^{18}F -FDG je nejčastěji používané radiofarmakum v hybridním zobrazení, vzhledem ke svému univerzálním vlastnostem je ^{18}F -fluorodeoxyglukóza cenným biomarkerem o úrovni oxidativní glykolýzy ve tkáních, její využití je nejčastější i při hybridním zobrazování patologických procesů vycházejících z oblasti hrudníku, břicha i retroperitonea. I když je oxidativní glykolýza zpravidla vystupňována ve většině nádorových procesů, existují i nádorová onemocnění, která vykazují variabilní nebo malou úroveň oxidativní glykolýzy. U takových procesů může být posouzení akumulace ^{18}F -FDG přínosem v diferenciální diagnostice, k posouzení viability nádorového procesu, odpovědi na terapii nebo dokonce posouzení stupně diferencovanosti nádorové tkáně. Vedle nádorových onemocnění je přítomna ^{18}F -FDG avidita také u procesů povahy zánětů, zde se na akumulaci podílejí především celulární vektory zánětu. Kromě ^{18}F -FDG jsou sice využívána i jiná radiofarmaka v detekci nádorových onemocnění břicha a retroperitonea, jejich využití je však cíleno na specifické nádorové procesy, jako jsou zejména nádory neuroendokrinního původu, využívána jsou ^{18}F -FDOPA (4) nebo v České republice zatím nedostupná ^{68}Ga značená analoga somatostatinu. Z ostatních radiofarmak má využití v abdominální diagnostice ještě ^{18}F -fluorocholin (^{18}F -FCH) pro zobrazení hepatocelulárního karcinomu. Magnetická rezonance se vyznačuje vysokým kontrastním rozlišením u parenchymových orgánů. Kromě morfologického zobrazení pomocí T1-vážených a T2-vážených obrazů jsou široce používány i zobrazení pomocí difuzního vážení a také postkontrastní dynamické studie s využitím gadoliniových kontrastních látek s časnou extracelulární distribucí kombinovanou s pozdní hepatocytární distribucí (5). Možnosti posouzení metabolismu a přesná lokalizace metabolické aktivity ve tkáních u břišních a retroperitoneálních orgánů jsou významně ovlivněny dechovou aktivitou (6, 7). Pro posouzení abdominálních orgánů se při vyšetření MR využívají akvizice dat se zadržením dechu, nebo navigátorová technika kombinující monitorování dechových pohybů bránice s cílenou akvizicí dat v určité fázi pohybu. I když tradiční způsob akvizice dat pro pozitronovou emisní tomografii je snímání v jednotlivých pozicích při klidném dýchání, lze podobnou techniku synchronizované akvizice dat využívat i pro PET.

AKVIZICE DAT

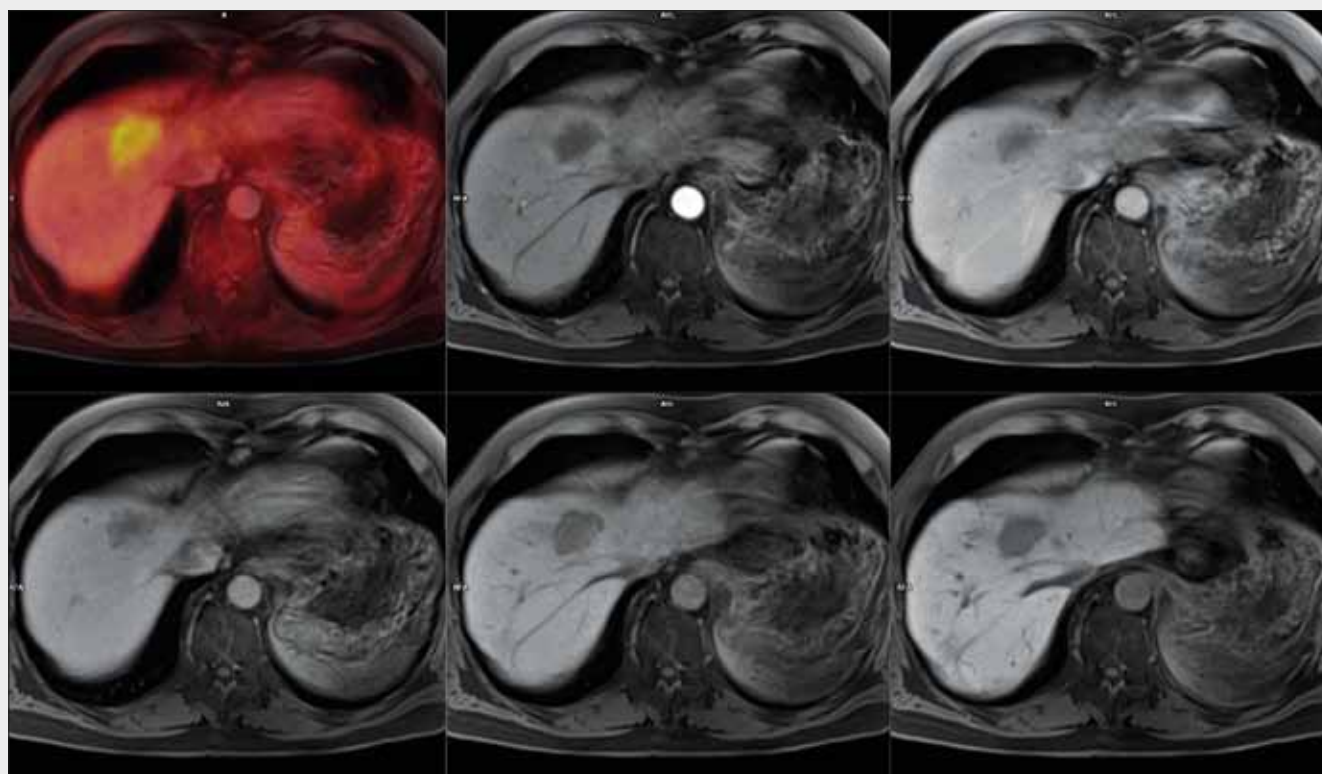
Pohybová aktivita orgánů dutiny hrudní je ovlivněna pohyby bránice a mezižebních svalů, v blízkosti levé srdeční komory také kontrakcemi srdce. Tkáně poblíž bránice mají větší amplitudu dechových exkurzí, než je tomu u orgánů v oblasti plicních vrcholů. Výrazná pohybová aktivita je přítomna i u abdominálních orgánů. Během exkurzí bránice vykonávají abdominální orgány velice komplexní pohyb. Kromě kra-

niokaudální translace je přítomna i latero-laterální inklinace a dále jsou elastické orgány deformovány také tlakem okolních orgánů, páteře a břišní stěny. V případě jater je deformace parenchymu dýchacími pohyby relativně malá v horních částech jater, v dolní části pravého jaterního laloku v segmentech 5 a 6 a potom v oblasti apikálních částí levého laloku jsou deformace významnější. Podobně je možné zaznamenat významné pohyby u některých orgánů tkání v retroperitoneu, zejména ledviny vykonávají kraniokaudální pohyby a současně pohyby kývavé směrem od páteře, podobné pohyby vykonávají i nádorové útvary uložené v oblastech retroperitonea v paravertebrálních prostorech. Relativně málo se v retroperitoneu mění poloha pankreatu, abdominální aorty. Útvary uložené ve volné dutině břišní jsou zatíženy kromě dýchacích pohybů také přenesením pohybů gastrointestinálního traktu (6, 7). Pohybová dechová synchronizace významně přispívá k vyšší kvalitě zobrazení u patologických nálezů v oblasti plicní tkáně, jater, ledvin, ale i u retroperitoneálních nádorů a při cíleném zobrazení patologických útvarů uložených v oblasti epigastria.

Dechová synchronizace akvizice dat pozitronové emisní tomografie využívá monitorování pohybů břicha pomocí polštářku snímajícího na základě své deformace amplitudu pohybu břišní stěny. Akvizice dat PET je realizována v době výdechu, neboť v této době je významněji delší perioda „zmrzlého“ pohybu orgánů. Obvyklá doba akvizice dat je 10–15 minut, po tuto dobu dochází k načtení zřetelně vyššího počtu záznamů koincidencí, než je tomu u běžné tří- nebo čtyřminutové akvizice dat. Dále je podstatně zvýšena správná koregistrace koincidenčního záření do místa skutečného vzniku dvojice fotonů anihilačního záření. Z důvodu delší doby akvizice a snížení prostorových distorzí mezi jednotlivými registracemi koincidencí dochází pak k podstatnému zvýšení prostorového i kontrastního rozlišení PET v jednotlivých orgánech.

Pokud jsou akumulující objekty obklopeny tkáněmi s nízkou úrovní metabolické aktivity, je pohybová synchronizace využitelná především k lepší možnosti stereometrie a dále evaluace skutečné metabolické aktivity tkáně. Takto dominující je prostorové rozlišení u plicních primárních i sekundárních nádorových onemocnění a také u nemocných s nenádorovými patologickými procesy v plicní tkáni. Vysoký počet registrovaných koincidencí se správně registrovanou polohou dovoluje efektivní využití rekonstrukčního algoritmu point-spread-function (PSF). Tento způsob datové rekonstrukce, vycházející z astrofyzikálních matematických modelů analýzy obrazů zahlcených daty, zohledňuje Airyho funkci, a podstatným způsobem ovlivňuje rozlišení hypersignálních struktur na vysoce aktivním pozadí. V PET zobrazení je zvýšené rozlišení mezi tkáněmi s nevelkými rozdíly v metabolické aktivitě možností jak lépe hodnotit metabolickou aktivitu v jaterní tkáni (6), a to jak možnost odlišení ložisek s nižší metabolickou aktivitou, než je pozadí jaterního parenchymu, tak i u procesů, u nichž metabolická aktivita je jen nepatrně vyšší.

Kromě cíleného zobrazení abdominálních orgánů s dechovou synchronizací je přínosné doplnit i celotrupové zobrazení k posouzení celotělové distribuce patologických procesů. Zpravidla je cílené zobrazení orgánů s dechovou synchronizací prováděno v jedné poloze detektorové soustavy, kdy v jedné poloze je možné vyšetřit úsek těla o kraniokaudální rozsahu 25 cm. Datová akvizice se pohybuje v rozmezí 10–15 minut, kdy v této době je provedeno cílené vyšetření cílového orgánu



▲ Obr. 1

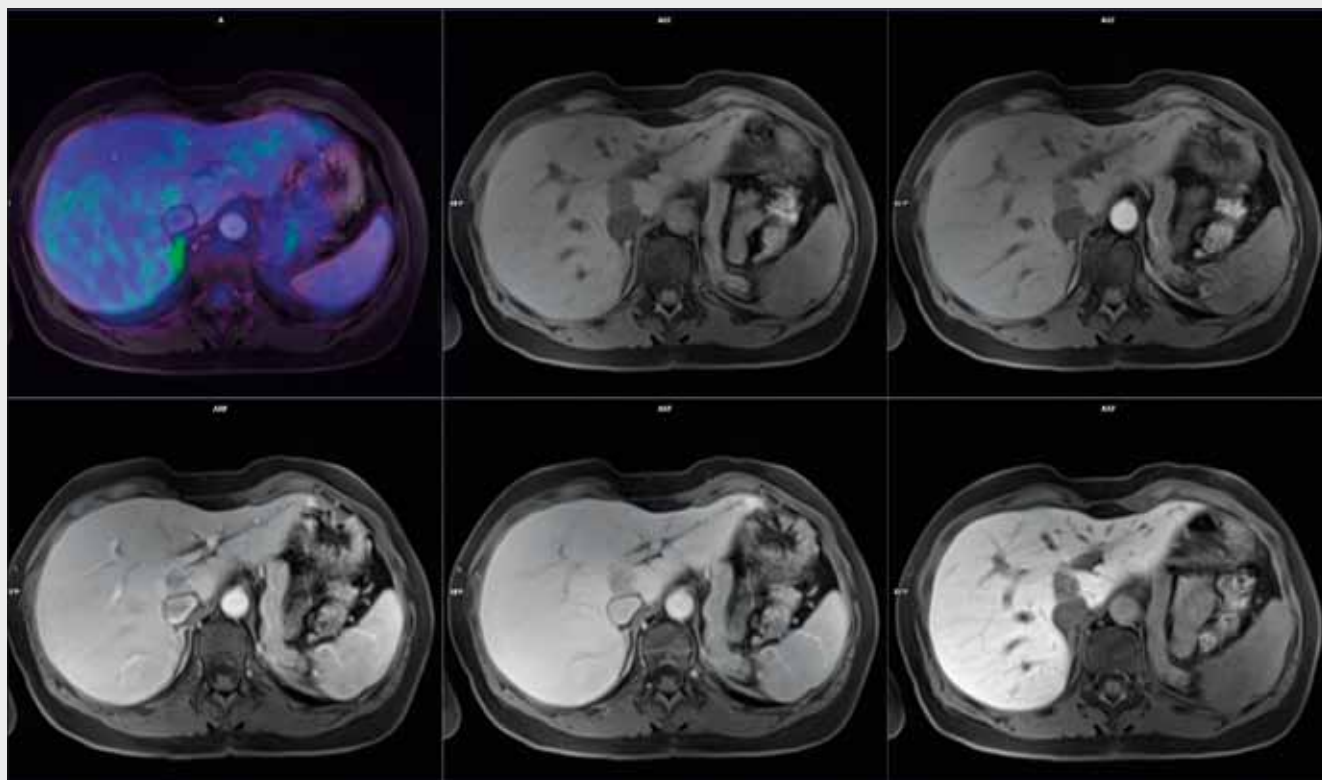
Obr. 1. ^{18}F -FDG-PET/MR, metastáza kolorektálního karcinomu: shora zleva fúze PET/MR, MR v arteriální, portální, pozdní extracelulární fázi, dále v hepatospecifické fázi po 10 a 30 minutách

Fig. 1. ^{18}F -FDG-PET/MRI, metastatic lesion of colorectal carcinoma: from top left to down right – PET/MRI fusion, MRI in arterial, portal, late extracellular phases, followed by hepatospecific phases after 10 and 30 minutes

plně diagnostickým zobrazením sekvencemi MR s využitím T2-vážených zobrazení pomocí rychlých sekvencí HASTE, sekvencí rychlého spinového echa s potlačením signálu tuku spektrální saturací nebo adiabatickou saturací, případně zobrazení sekvencemi inversion recovery STIR (sort tau inversion recovery) s dechovou synchronizací pomocí navigátorové techniky. Dále jsou využívány echoplanární sekvence difúzního vážení s potlačením signálu tuku k posouzení celularity patologických procesů. T1-vážené sekvence jsou využívány především s možností akvizice dat v apnoe, jedná se o T1-vážené sekvence spoiled gradient echo VIBE (volume interpolated breath-hold examination) v oblasti břicha s potlačením signálu tuku spektrálním pulsem, v oblasti hrudníku bez potlačení signálu tuku. T1-vážené obrazy jsou získávány dynamicky po aplikaci gadoliniové kontrastní látky, v případě, že jde o primární jaterní proces, nebo o proces, který vede nebo může vést k sekundárnímu poškození jater, je vhodné využít hepatospecifickou gadoliniovou kontrastní látku. Je-li použito acidum gadoxeticum s hepatospecifickým účinkem, je možné vzhledem k pauze mezi časnými a pozdními hepatospecifickými fázemi provést celotrupové zobrazení u vyšetření s hepatospecifickou fází mezi 10. a 30. minutou, pozdní fáze jsou ukončením vyšetření (5, 8).

NÁDORY JATER

Pro zobrazení primárních jaterních nádorových onemocnění a také u nádorů, u nichž je podezření na jaterní metastatický proces, nebo je třeba jej vyloučit, je využíváno komplexního protokolu pro zobrazení jater. Vyšetřovací protokol PET/MR pro jaterní parenchym využívá standardního plnohodnotného vyšetření MR a zobrazení PET s cílenou akvizicí dat v oblasti epigastria a celotělovým záznamem. Protokol v sobě zahrnuje nejprve T1-vážené bez podání kontrastní látky a T2-vážené sekvence doplněné o difúzní zobrazení. Difúzní zobrazení má význam především při vyhledávání ložiskových lézí v jaterním parenchymu. Následuje dynamické zobrazení jater po aplikaci hepatospecifické kontrastní látky v arteriální, časné a pozdní portální fázi, fázi ekvilibria, opožděné fázi, doplněné dvěma fázemi hepatospecifickými v 10. a 30. minutě po aplikaci hepatospecifické kontrastní látky acidum gadoxeticum. Dynamické sekvence T1 gradientního echa jsou získávány v apnoe v jednotlivých měřeních délky kolem 20 s. Akvizice dat pro PET je nejprve prováděna cíleně s dechovou synchronizací na oblast jater po dobu 10 minut, následuje potom celotrupové zobrazení s akvizicí dat v pěti polohách po 4 minutách s pokrytím celého těla, po 30 minutách od podání hepatospecifické kontrastní látky je doplněno ještě zobrazení pozdní.



▲ Obr. 2

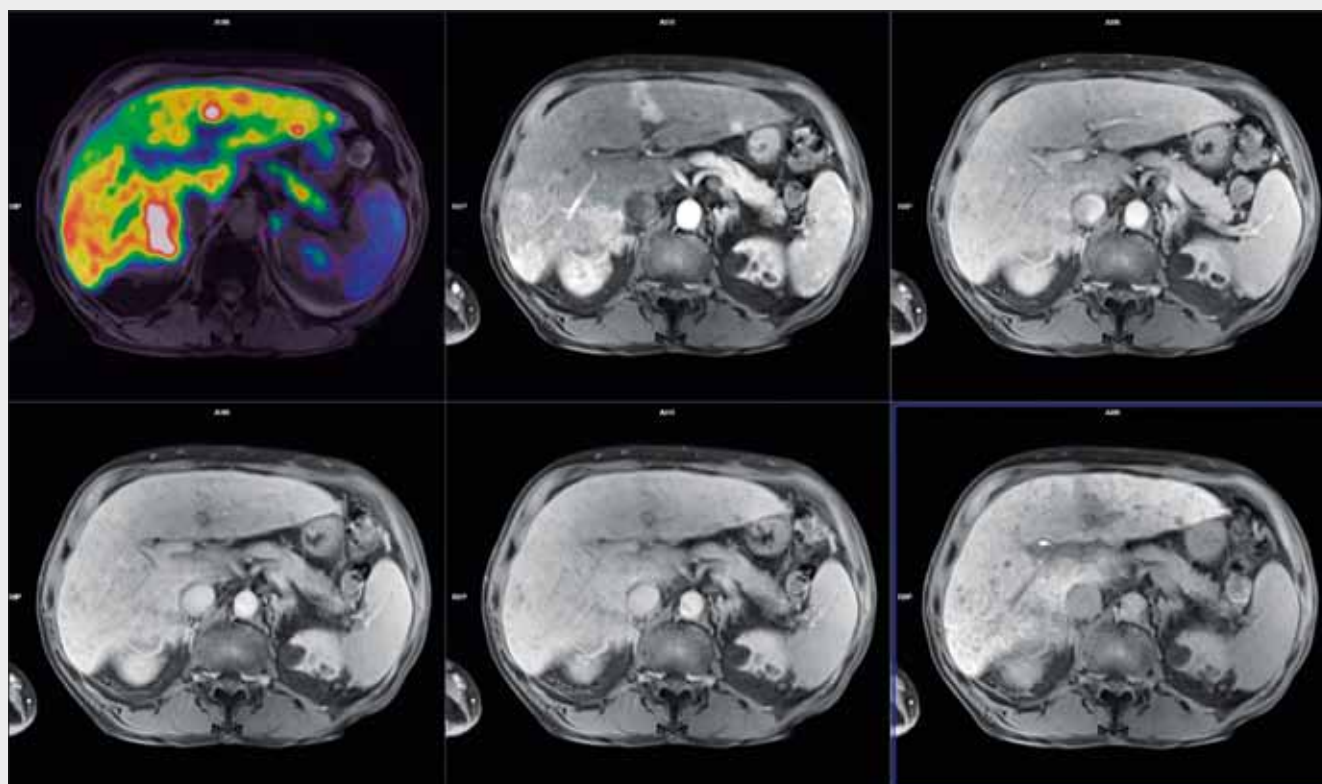
Obr. 2. ^{18}F -FDG-PET/MR, metastáza dobře diferencovaného renálního karcinomu, patrná metastáza v S1 jater před dolní dutou žilou, ložisko se typicky sytí kontrastní látkou, vykazuje jen minimální zvýšení metabolismu ve srovnání s okolním jaterním parenchymem: shora zleva fúze PET/MR, MR nativně, dále v arteriální, portální, pozdní extracelulární fázi, dále v hepatospecifické fázi po 30 minutách

Fig. 2. ^{18}F -FDG-PET/MRI, metastatic lesion of well differentiated renal cell carcinoma in caudate lobe, the metabolic activity of the lesion is even the same as the surrounding liver tissue: from top left to down right – PET/MRI fusion, unenhanced MRI, then in arterial, portal, late extracellular phases, followed by hepatospecific phase after 30 minutes

Při využití PET/MR v diagnostice primárních jaterních nádorů je významnou informací pro volbu zobrazení, jaký typ nádoru je pravděpodobný, jde-li o hepatocelulární karcinom, nebo o cholangiogenní nádor. Jde-li o prokázaný hepatocelulární karcinom (HCC), nebo je jeho přítomnost vysoce pravděpodobná, lze využít podání z fluorovaných radiofarmak ^{18}F -FCH i ^{18}F -FDG. Distribuce ^{18}F -FCH v jaterním parenchymu, ostatně jako i v jiných tkáních, je velice závislá na míře prokrvení tkání a teritoriální distribuci perfuze v játrech. V jaterním parenchymu se spolupodílí na distribuci akumulace ^{18}F -FCH, ale i jiný faktor a tím je charakter energetického metabolismu v nádorové tkáni. ^{18}F -FCH je markerem metabolismu výstavby fosfolipidů, proto je de facto markerem lipidového metabolismu. To je důvod zvýšené akumulace v dobře diferencované tkáni HCC, naproti tomu špatně diferencované HCC jsou typické vysokou úrovní aerobní glykolýzy jako cesty získávání energie. ^{18}F -FCH se typicky akumuluje v dobře prokrvené, dobře diferencované tkáni hepatocytárního původu, jako jsou dobře diferencované hepatocelulární karcinomy, ale kromě toho také fokální nodulární hyperplazie (FNH), naopak v hepatocelulární adenomu charakteristicky akumuluje ^{18}F -FDG jen minimálně. Jelikož však v dobře diferencovaných hepatocelulárních útvech (dobře diferencovaný HCC i FNH) se typicky také akumuluje hepatospecifická kontrastní

látko, je možné k odlišení takových lézí využít právě jen MR. Jak bylo již výše zmíněno s postupem dediferenciace hraje stále se zvyšující roli aerobní glykolýza, a tedy utilizace glukózy v energetickém metabolismu nádoru. Využití ^{18}F -FDG při posuzování stupně diferencovanosti má své místo v odhadnutí povahy hepatocelulárních lézí a proto při vyšetření PET/MR hraje významnou roli právě i využití ^{18}F -FDG. Podání ^{18}F -FDG dovoluje v kombinaci s podáním hepatospecifické kontrastní látky odpovědět dobře na otázku tedy stupně diferencovanosti a míry prokrvení. U dobře diferencovaných HCC je typicky přítomná akumulace ^{18}F -FDG shodná anebo velice podobná okolnímu jaternímu parenchymu, se zvyšujícím se stupněm dediferencovanosti se zvyšuje i úroveň akumulace ^{18}F -FDG. Kombinací distribuce hepatospecifické látky a ^{18}F -FDG lze v nádorové tkáni HCC odlišit tedy tkáně s postupnou ztrátou diferenciací a posoudit, v jaké části nádoru dochází k evoluci nádorové tkáně ve více agresivní typ nádoru.

Při podezření z primárních jaterních nádorů cholangiogenního původu nemá význam podání ^{18}F -FCH, neboť se v cholangiogenních lézích neakumuluje, naopak ^{18}F -FDG vykazuje typicky zvýšenou akumulaci ve středně a hůře diferencovaných primárně intrahepatálních cholangiogenních karcinomech, stejně jako u karcinomu žlučníku a karcinomech velkých žlučových cest. Vysokou akumulaci ^{18}F -FDG



▲ Obr. 3

Obr. 3. ¹⁸F-FCH-PET/MR, dobře diferencovaný hepatocelulární karcinom, hypervaskularizovaná infiltrace s akumulací FCH, částečnou akumulací hepatospecifické kontrastní látky, další nádorové uzly v levém laloku: shora zleva fúze PET/MR, MR v arteriální, portální, pozdní extracelulární fázi, dále v hepatospecifické fázi po 10 a 30 minutách

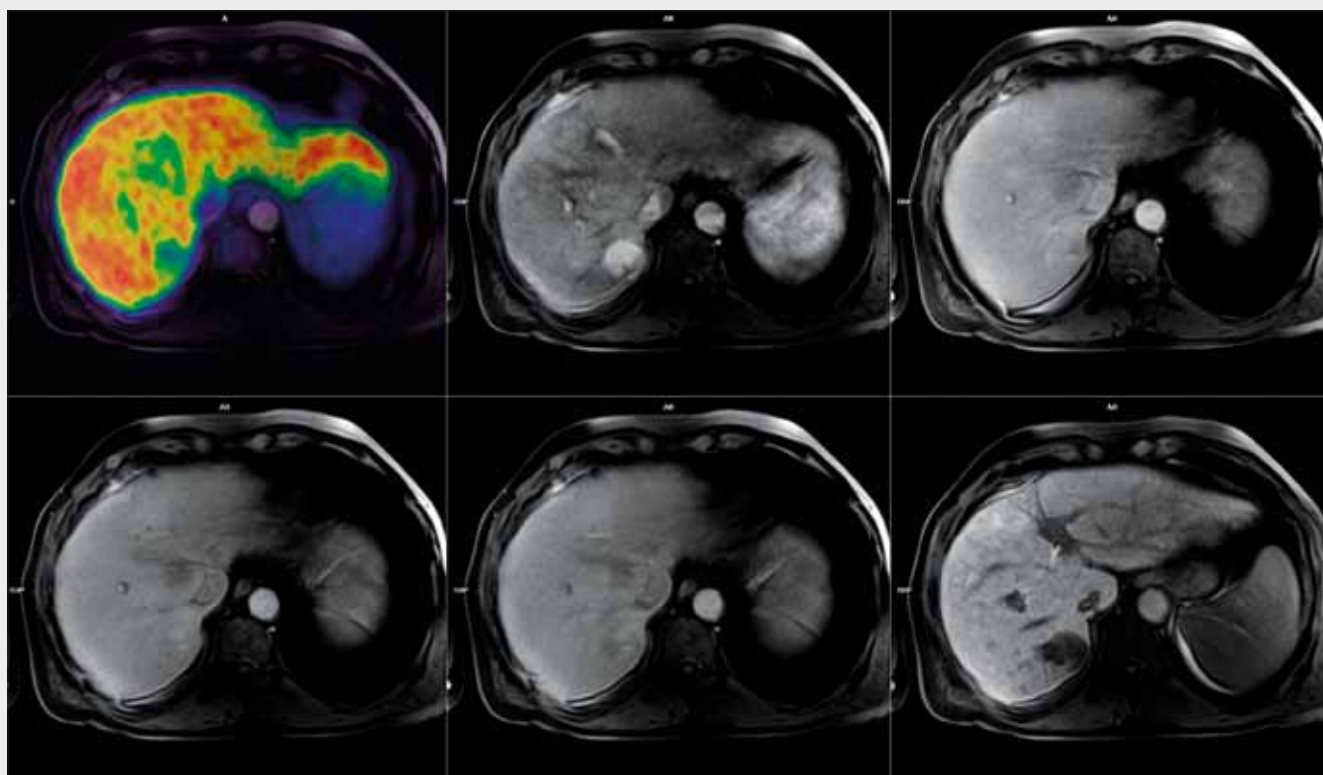
Fig. 3. ¹⁸F-FCH-PET/MRI, well differentiated hepatocellular carcinoma involved the right lobe with additional tumorous nodules in left lobe, tumorous tissue is hypervascularized with enhanced accumulation of fluorocholine: from top left to down right – PET/MRI fusion, MRI in arterial, portal, late extracellular phases, followed by hepatospecific phases after 10 and 30 minutes

Lze detekovat i v cystických cholangiogenních karcinomech – biliárním kystadenokarcinomu. Synchronizovaná akvizice dat s dechovou aktivitou má velký význam v zobrazení metabolické aktivity ve stěně cystoidních ložisek a hraje roli při správné interpretaci metabolické aktivity solidní složky cystických nádorů.

U sekundárních jaterních nádorů je vždy cílené zobrazení jater nedílnou součástí celotrupového zobrazení PET/MR v případě (8), že jde o známé metastatické postižení, kdy jde o indikaci k resekční terapii nebo lokoregionální terapii, jde-li o jedinou lokalizaci diseminace nádorového procesu a je-li nutné o přesné zhodnocení odpovědi na terapii, nebo jde o vyloučení jaterní diseminace. Nejvýznamnější nádorové procesy se sekundárním postižením jater, kdy je výhodné použití PET/MR, se jeví *kolorektální karcinom* – indikace k resekčnímu výkonu i kontrola efektu léčby, *karcinom prsu* a hodnocení odezvy na systémovou terapii, detekce *metastáz neuroendokrinních nádorů* pro hodnocení jak diseminace, tak účinků terapie a *karcinom pankreatu* při posuzování stagingu, kdy vyloučení jaterních metastáz u lokálně operabilního karcinomu může mít stěžejní význam k rozhodnutí o způsobu terapie.

Při vyhledávání metastáz v jaterním parenchymu jsou podstatnými dvě sekvence magnetické rezonance T1-vážené

zobrazení v pozdní hepatospecifické fázi distribuce acidum gadotericum a difúzně vážená sekvence s vysokou hodnotou b. Obě nabízejí vysoký kontrast mezi tkání metastatického procesu a okolní jaterní tkání. Z hlediska následné fúze s metabolickým obrazem PET jsou vzhledem k významné distorzi obrazu méně vhodná difúzní zobrazení. Naproti tomu T1 zobrazení má vynikající kontrast současně s minimální distorzi obrazu, jen minimálním problémem je skutečnost, že data MR jsou získávána v nádechu, PET data ve výdechu, automatická elastická adaptace fúze však umožňuje spojení obou obrazů s vysokou přesností. Při volbě zda použít ¹⁸F-FDG a při posuzování metabolické aktivity metastáz hraje roli několik faktorů. Významný je histologický typ nádorového onemocnění. Míra glykolytické aktivity, a tedy úroveň akumulace ¹⁸F-FDG je ovlivněna faktem, zda jde o nádorové onemocnění s vysokou mírou glykolytické aktivity (*kolorektální karcinom*, *karcinom prsu*, *duktální invazivní karcinom pankreatu*), nebo nádory s variabilní úrovní akumulace ¹⁸F-FDG v závislosti na stupni diferenciaci (např. *konvenční renální karcinom* nebo *kystadenokarcinomy pankreatu*), nebo jde o nádory po terapii a úroveň glykolytické aktivity může být snížena léčbou (*kolorektální karcinom* a *karcinom prsu* po chemoterapii). Protože samotná metabolická aktivita jaterního parenchymu je relativně vysoká ve srovnání s ostat-



▲ Obr. 4

Obr. 4. ^{18}F -FCH-PET/MR, špatně diferencovaný hepatocelulární karcinom, hypervaskularizované ložisko s akumulací FCH v pravém laloku, chybějící akumulací hepatospecifické kontrastní látky: shora zleva fúze PET/MR, MR v arteriální, portální, pozdní extracelulární fázi, dále v hepatospecifické fázi po 10 a 30 minutách

Fig. 4. ^{18}F -FCH-PET/MRI, poorly differentiated hepatocellular carcinoma involved the right lobe with additional tumorous nodules in left lobe, tumorous tissue is hypervascularized without accumulation of fluorocholine: from top left to down right – PET/MRI fusion, MRI in arterial, portal, late extracellular phases, followed by hepatospecific phases after 10 and 30 minutes

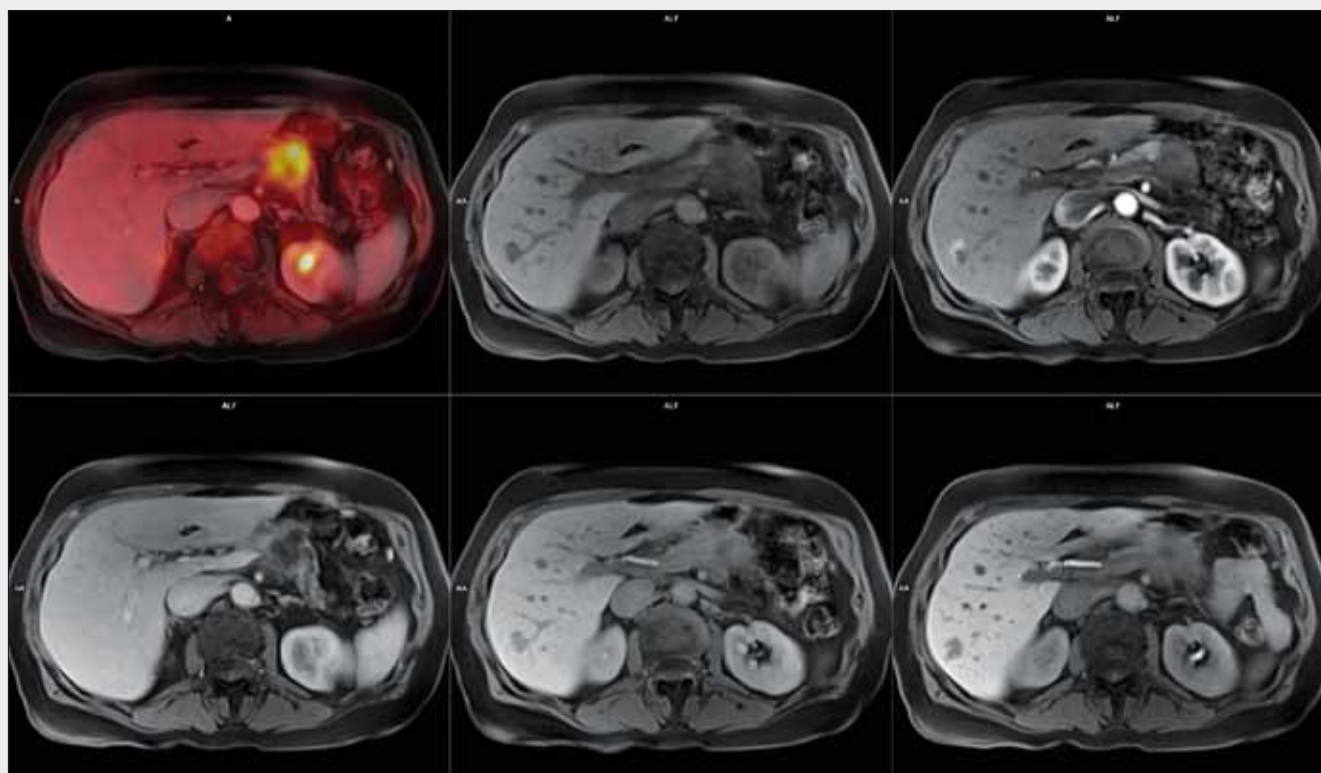
ními tkáněmi, je významnou pomocí prodloužená akvizice dat se synchronizací s dechem. Dovoluje detekci metabolické aktivity ložiskových procesů, kdy jsou jen velmi malé rozdíly mezi metabolickou aktivitou nádorové tkáně a jaterního parenchymu a korelovat je se strukturou tkáně jater a to včetně pozdní hepatospecifické fáze (10). Synchronizovaná akvizice dat s dechovou aktivitou dovoluje v jaterním parenchymu také odlišit zvýšenou akumulaci ve žlučovodech a v jejich okolí, pokud je u nemocného přítomna refluxní cholangiitida při biliodigestivní anastomóze nebo po instrumentálním výkonu na žlučových cestách (10).

U metastáz nádorů neuroendokrinního původu hrají při volbě optimálního radiofarmaka roli následující faktory – Jde o dobře diferencovaný neuroendokrinní nádor APUD řady? Má význam zobrazení přítomnosti somatostatinových receptorů? Nejde o insulinom pankreatu? Nejedná se o malobuněčný (neuroendokrinní) karcinom? ^{18}F -FDG má význam jen v případech, kdy se jedná o známý malobuněčný karcinom, v případech dobře diferencovaných nádorů je možné využití zobrazení pomocí ^{18}F -FDOPA (4), který ukazuje na perzistující aktivitu dekarboxylace aminokyselin a tvorbu biogenních aminů, a tedy na dobrou diferenciaci tkáně, nebo akumulaci somatostatinových analog značených ^{68}Ga (DOTATOC,

DOTANOC, DOTATE) na přítomnost somatostatinových receptorů. Při hodnocení akumulace ^{18}F -FDOPA v jaterním parenchymu je třeba mít na paměti hepatobiliární exkreci ^{18}F -FDOPA, a tedy možnost zvýšené akumulace radiofarmaka v intrahepatálních i extrahepatálních žlučovodech, ve žlučníku, ale i v lumen trávícího traktu.

NÁDORY PANKREATU

Pankreatický invazivní duktální karcinom je nádorové onemocnění s velice významným vzestupem incidence v západní populaci, jeho kurabilita je mimořádně závislá na detekci ve stadiu, které dovoluje radikální chirurgickou resekci nádoru. U duktálního karcinomu pankreatu v případě malého rozsahu nádoru je nutné prokázat, že jde o nádorové onemocnění, odlišit pankreatitidu, ale i jiné nádorové procesy pankreatu, jako jsou kystadenokarcinom nebo benigní léze typu intraduktální papilární mucinózní neoplazma nebo nádory neuroendokrinního původu typu insulinomu. Pro pankreatické léze, pokud není prokázán endokrinní klinický syndrom, jako je hyperinzulinismus nebo Zollinger-Ellisonův syndrom, je ideálním radiofarmakem ^{18}F -FDG. Není-li



▲ Obr. 5

Obr. 5. ^{18}F -FDG-PET/MR, duktální karcinom těla pankreatu, v játrech hemangiom: shora zleva fúze PET/MR, MR nativně, dále v arteriální, portální, pozdní extracelulární fázi, dále v hepatospecifické fázi po 30 minutách

Fig. 5. ^{18}F -FDG-PET/MRI, ductal carcinoma in pancreatic body, the hemangioma: in right live lobe, from top left to down right – PET/MRI fusion, unenhanced MRI, then in arterial, portal, late extracellular phases, followed by hepatospecific phase after 30 minutes

již nemocný pro nádorové onemocnění léčen chemoterapií, vylučuje absence vysoké akumulace FDG s vysokou pravděpodobností invazivního duktálního karcinomu. K odlišení pankreatitidy od karcinomu se zvýšenou akumulací ^{18}F -FDG v PET/MR významně přispívají T2-vážené sekvence s přítomností vysokého signálu při edematózních a eventuálně postnekrotických změnách a difuzní zobrazení bez známek restrikce difuze v akumulující tkáni (11, 12). Při podezření na karcinom pankreatu u nemocných s vysokými sérovými hodnotami onkomarkeru Ca 19-9, kdy je velikost nádoru zatím velice malá a může uniknout zobrazení pomocí výpočetní tomografie, dovoluje kombinace vysokého kontrastu magnetické rezonance a posouzení metabolické aktivity odlišit i velmi malé léze. Pro posouzení operability, resp. pro indikaci k resekčnímu výkonu má kromě lokální invaze a zazdění cévních struktur zásadní význam přítomnost jaterních metastáz. Zazdění cévních struktur lze posoudit pomocí dynamického poskontrastního zobrazení, jaterní metastázy a odlišení od jaterních ložiskových lézí jiného původu je možné podáním hepatospecifické kontrastní látky.

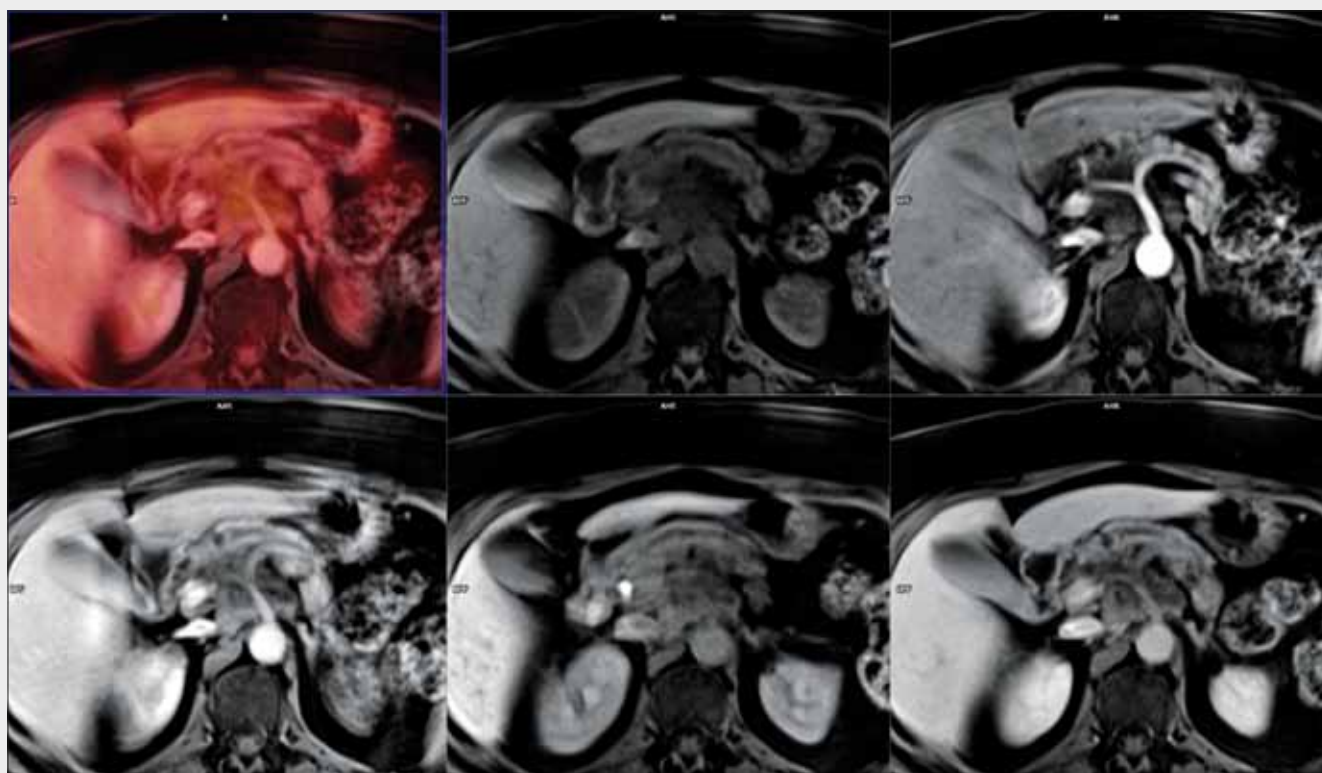
Vysoká úroveň glykolytické aktivity v cystických a cystoidních lézích ukazuje na přítomnost kystadenokarcinomu, naopak její absence se současnou mírnou restrikcí difuze uka-

zuje na benigní léze typu kystadenomu nebo IPMN. I u mucinózního kystadenokarcinomu je detekovatelná zvýšená metabolická aktivita v solidní části tumoru, a to díky využití synchronizace s dechovou aktivitou.

U nádorů v oblasti pankreatu s nejasným původem dovoluje kombinace podání ^{18}F -FDG s kompletním zobrazením MR včetně difuzního zobrazení s posouzením restrikce difuze, T2-váženým zobrazením k detekci cystoidní složky a úrovní glykolytické aktivity lze odlišit duktální karcinom, kystadenomy, kystadenokarcinomy, IPMN, ale i nádory neuroendokrinní povahy.

DISKUSE

Kombinace výhod mikrostrukturálního zobrazení pomocí difuzního zobrazení, charakteru sycení kontrastní látkou, včetně možností využít intracelulární distribuce hepatospecifické kontrastní látky v případě jaterního parenchymu, s hodnocením metabolismu tkáně dovoluje lépe specifikovat funkční procesy v nádorovém i zánětlivém procesu. Kombinace hodnocení zvyšují senzitivitu a specificitu diagnostického procesu a mohou mít přímý dopad na volbu léčebné



▲ Obr. 6

Obr. 6. ^{18}F -FDG-PET/MR, níže akumulující dobře diferencovaný mucinózní karcinom těla pankreatu obrůstající truncus coeliacus: shora zleva fúze PET/MRI, MRI nativně, dále v arteriální, portální, pozdní extracelulární fázi, dále v hepatospecifické fázi po 30 minutách
 Fig. 6. ^{18}F -FDG-PET/MRI, well differentiated mucinous kystadenocarcinoma of the pancreas infiltrating the arteries originating from coeliac trunc: from top left to down right – PET/MRI fusion, unenhanced MRI, than in arterial, portal, late extracellular phases, followed by hepatospecific phase after 30 minutes

strategie. Detailní hodnocení tkáně pomocí kombinace PET a MR zvyšuje detektabilitu patologických procesů zejména ve tkáních, které mají samy o sobě vysokou nebo vyšší úroveň metabolické aktivity. Tyto výhody jsou nejvýznamnější u jaterního parenchymu, ale i u pankreatu. Korekce pohybových artefaktů významně přispívá ke zvýšení kontrastu mezi okolní tkání a tkání patologického procesu. Získání informací o metabolické aktivitě původně velmi malých ložiskových procesů dovoluje lépe posoudit efekt systémové i lokoregionální terapie především u nemocných, kdy je přítomen i jaterní metastatický proces. Naproti tomu detailní informace o metabolické aktivitě a mikrostruktuře tkáně – v případě vysoké celulózní denzity nádorových procesů spojených s restrikcí difuze, nebo restrikce difuze v pyogenním obsahu abscedujícího procesu – vede ke snadnější diferenciaci mezi benigními a maligními lézemi. Z radiofarmak stále hraje dominantní roli ^{18}F -FDG, ale v abdominální oblasti se uplatňují i radiofarmaka specifická pro diagnostiku neuroendokrinních tumorů, jako jsou somatostatinová analoga značená ^{68}Ga a ^{18}F -FDOPA (4).

Budoucnost PET/MR v oblasti břicha je v dalším rozvoji techniky sekvencí magnetické rezonance s použitím potlačení nehomogenit magnetického pole a zavedením rychlých sekvencí s vyšším časovým prostorovým rozlišením a s automa-

tickou pohybovou korekcí, jak pro techniky difuzního zobrazování, tak i pro dynamická T1-vážená zobrazení s podáním kontrastní látky typu data samplingu, nebo radiální akvizice dat K prostoru. Naproti tomu u PET zobrazení lze dlouhou dobu akvizice dat v jedné pozici využít k snížení aplikované aktivity radiofarmak. Na našem pracovišti s úspěchem používáme aplikované aktivity u ^{18}F -FDG s dávkou 2,5 MBq/kg, u ^{18}F -FDOPA a ^{18}F -FCH 1,25 MBq/kg. Kombinace nových postupů akvizice dat PET dovoluje i využití rekonstrukce obrazových dat pomocí algoritmů s vysokým rozlišením, kdy nejvýznamnějším je point spread function.

ZÁVĚR

Nové směry abdominálního zobrazení pomocí PET/MR čekají stále na svoje jasné místo v diagnostickém algoritmu, ale možnost individualizace vyšetřovacího protokolu a volba optimálního radiofarmaka již na současném stadiu vývoje metody ukazují na klinickou využitelnost PET/MR v personalizovaném přístupu k diagnostice a terapii (10). Další vývoj klinických indikací bude záviset na zvýšení dostupnosti metody a provedení rozsáhlejší analýzy výhod PET/MR na větších souborech vyšetřených nemocných.

LITERATURA

1. **Jadvar H, Colletti PM.** Competitive advantage of PET/MRI. *Eur J Radiol* 2014; 83(1): 84–94.
2. **Fraum TJ, Fowler KJ, McConathy J, Parent EE, Dehdashti F, Grigsby PW, Siegel BA.** PET/MRI for the body imager: abdominal and pelvic oncologic applications. *Abdom Imaging* 2015; 40(6): 1387–1404.
3. **Ruhlmann V, Ruhlmann M, Bellendorf A, Grueneisen J, Sawicki LM, Grafe H, Forsting M, Bockisch A, Umutlu L.** Hybrid imaging for detection of carcinoma of unknown primary: A preliminary comparison trial of whole-body PET/MRI versus PET/CT. *Eur J Radiol* 2016; 85(11): 1941–1947.
4. **Blanchet EM, Millo C, Martucci V, Mass-Moreno R, Bluemke DA, Pacak K.** Integrated whole-body PET/MRI with ^{18}F -FDG, ^{18}F -FDOPA, and ^{18}F -FDA in paragangliomas in comparison with PET/CT: NIH first clinical experience with a single-injection, dual-modality imaging protocol. *Clin Nucl Med* 2014; 39(3): 243–250.
5. **Mayerhoefer ME, Ba-Ssalamah A, Weber M, Mitterhauser M, Eidherr H, Wadsak W, Raderer M, Trattnig S, Herneth A, Karanikas G.** Gadoxetate-enhanced versus diffusion-weighted MRI for fused Ga-68-DOTANOC PET/MRI in patients with neuroendocrine tumours of the upper abdomen. *Eur Radiol* 2013; 23(7): 1978–1985.
6. **Roy P, Lee JK, Sheikh A, Lin W.** Quantitative comparison of misregistration in abdominal and pelvic organs between PET/MRI and PET/CT: effect of mode of acquisition and type of sequence on different organs. *AJR Am J Roentgenol* 2015; 205(6): 1295–1305.
7. **Grimm R, Fürst S, Souvatzoglou M, Forman C, Hutter J, Dregely I, Ziegler SI, Kiefer B, Hornegger J, Block KT, Nekolla SG.** Self-gated MRI motion modeling for respiratory motion compensation in integrated PET/MRI. *Med Image Anal* 2015; 19(1): 110–120.
8. **Beiderwellen K, Geraldo L, Ruhlmann V, Heusch P, Gomez B, Nensa F, Umutlu L, Lauenstein TC.** Accuracy of ^{18}F FDG PET/MRI for the Detection of Liver Metastases. *PLoS One* 2015; 10(9): e0137285.
9. **Beiderwellen K, Gomez B, Buchbender C, Hartung V, Poeppel TD, Nensa F, Kuehl H, Bockisch A, Lauenstein TC.** Depiction and characterization of liver lesions in whole body ^{18}F -FDG PET/MRI. *Eur J Radiol* 2013; 82(11): e669–675.
10. **Hope TA, Verdin EF, Bergsland EK, Ohliger MA, Corvera CU, Nakakura EK.** Correcting for respiratory motion in liver PET/MRI: preliminary evaluation of the utility of bellows and navigated hepatobiliary phase imaging. *EJNMMI Phys* 2015; 2(1): 21, doi:10.1186/s40658-015-0125-0.
11. **Tatsumi M, Isohashi K, Onishi H, Hori M, Kim T, Higuchi I, Inoue A, Shimosegawa E, Takeda Y, Hatazawa J.** ^{18}F -FDG PET/MRI fusion in characterizing pancreatic tumors: comparison to PET/CT. *Int J Clin Oncol* 2011; 16(4): 408–415.
12. **Gavra M, Syed R, Fraioli F, Afaq A, Bomanji J.** PET/MRI in the Upper Abdomen. *Semin Nucl Med* 2015; 45(4): 282–292.