

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH VĚD

Ústav radiologických metod

Michaela Hrabalová

PET/CT vyšetření

Bakalářská práce

Vedoucí práce: MUDr. Iva Metelková, Ph.D.

Olomouc 2021

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jen uvedené bibliografické a elektronické zdroje.

Olomouc 30. 4. 2021

podpis

Na tomto místě bych ráda poděkovala mé vedoucí práce MUDr. Ivě Metelkové, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, cenné rady, ochotu a trpělivost při zpracování této práce a Ing. Petru Vybíralovi za poskytnutí obrazových příloh.

ANOTACE

Typ závěrečné práce: Bakalářská práce

Téma práce v ČJ: Nukleární onkologie

Téma práce v AJ: Nuclear Oncology

Název práce: PET/CT vyšetření

Název práce v AJ: PET/CT examination

Datum zadání: 2020-11-30

Datum odevzdání: 2021-04-30

Vysoká škola, fakulta, ústav: Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta zdravotnických věd

Ústav radiologických metod

Autor práce: Michaela Hrabalová

Vedoucí práce: MUDr. Iva Metelková, Ph.D.

Oponent práce: MUDr. Miroslava Budíková, Ph.D.

Abstrakt v ČJ: Tato přehledová bakalářská práce shrnuje poznatky o PET/CT vyšetření. Součástí této práce je přiblížení technických podmínek hybridního zobrazování, vlastností a klinického využití vybraných radiofarmak, přípravy pacienta a radiační ochrany pacientů a pracovníků v nukleární medicíně. Bakalářská práce se v závěru věnuje také problematice PET/CT vyšetření dětí. K vytvoření této práce byla použita odborná literatura a články získané na základě rešerše s použitím databází EBSCO, Medvik, Google Scholar a s využitím informací ze státních ústavů SÚKL a ÚZIS.

Abstrakt v AJ: This bachelor thesis gives a detailed account about a use of a combination of PET/CT methods in nuclear medicine. This study describes the technical specifications of this hybrid procedure as well as a use and character-

ristics of specific radiopharmaceuticals in clinical use. The importance of the preparation of the patients, prior to the procedure, is also outlined in this document. It includes the personal anti-radiation protective equipment for both, patients and operating staff. Furthermore, this work mentions how PET/CT method is used for children patients examination. The relevant topic-specific literature, and the resources used in this text were obtained via EBSCO, Medvik and Google Scholar. Moreover, the information from database of the national institutes, SÚKL and ÚZIS, were utilized.

Klíčová slova v ČJ: Nukleární medicína, nukleární onkologie, pozitronová emisní tomografie, PET/CT, radiofarmakum, ^{18}F – fluorodeoxyglukóza, ^{18}F – cholin, ^{18}F – fluorothymidin, ^{18}F – DOPA, ^{18}F – FMISO, radiační ochrana

Klíčová slova v AJ: Nuclear medicine, nuclear oncology, positron emission tomography, PET/CT, radiopharmaceuticals, ^{18}F – fluorodeoxyglucose, ^{18}F – choline, ^{18}F – fluorothymidine, ^{18}F – DOPA, ^{18}F – FMISO, radiation protection

Rozsah: 49/2

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 POZITRONOVÁ EMISNÍ TOMOGRAFIE.....	9
2 HYBRIDNÍ ZOBRAZENÍ PET/CT.....	10
2.1 Historie a současnost.....	10
2.2 Technické podmínky	10
3 RADIOFARMAKA PRO PET/CT VYŠETŘENÍ.....	14
3.1 ¹⁸ F - fluorodeoxyglukóza	16
3.2 ¹⁸ F - cholin.....	17
3.3 ¹⁸ F - fluorothymidin.....	19
3.4 ¹⁸ F - DOPA.....	20
3.5 ¹⁸ F - FMISO.....	22
4 PŘÍPRAVA PACIENTA PŘED PET/CT VYŠETŘENÍM A PROVEDENÍ VYŠETŘENÍ.....	24
4.1 Indikace a kontraindikace.....	24
4.2 Příprava pacienta.....	25
4.3 Postup vyšetření	27
5 RADIAČNÍ OCHRANA V NUKLEÁRNÍ MEDICÍNĚ.....	29
5.1 Radiační ochrana pracovníků nukleární medicíny	29
5.2 Radiační ochrana pacientů v nukleární medicíně	32
6 PET VYŠETŘENÍ V DĚTSKÉM VĚKU	34
ZÁVĚR.....	37
REFERENČNÍ SEZNAM.....	39
SEZNAM ZKRATEK.....	45
SEZNAM TABULEK.....	47
PŘÍLOHY	48

ÚVOD

Pozitronová emisní tomografie v kombinaci s výpočetní tomografií (PET/CT) je jednou z nejmodernějších zobrazovacích metod, díky které lze během jednoho vyšetření získat anatomický a funkční obraz tkáně (Votrubová a kol., 2009, s. 3).

V České republice se hybridní zobrazování PET/CT rozvíjí od roku 2003, kdy tento přístroj byl instalován do Nemocnice Na Homolce v Praze (Votrubová a kol., 2009, s. 7). V současné době je těchto přístrojů v naší republice k dispozici 16 (ÚZIS, 2019). Ročně se v České republice provede několik tisíc těchto vyšetření. Dle poslední statistiky bylo v roce 2018 provedeno 31 733 PET/CT vyšetření, což odpovídá 2,99 vyšetření na 1 000 osob celé populace (ÚZIS, 2019).

Hlavním cílem této bakalářské práce je dohledat a sumarizovat informace o PET/CT vyšetření a přiblížit informace o radiofarmacích, přípravě pacienta k tomuto vyšetření, radiační ochraně v nukleární medicíně a PET vyšetření dětí.

Cíl bakalářské práce je dále specifikován v dílčích cílech:

1. Předložit dohledané poznatky o historii a technických podmínkách hybridního PET/CT zobrazování,
2. předložit dohledané poznatky o vlastnostech a klinickém využití vybraných radiofarmak používaných při PET/CT vyšetření,
3. předložit dohledané poznatky o přípravě pacienta před PET/CT vyšetřením,
4. předložit dohledané poznatky o radiační ochraně pracovníků a pacientů v nukleární medicíně
5. předložit dohledané poznatky o vyšetření dětí pozitronovou emisní tomografií.

Pro bakalářskou práci byla nastudována tato vstupní literatura:

1. KORANDA, Pavel. Nukleární medicína. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, 201 s. Skripta. ISBN 978-80-244-4031-6.

2. KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. Nukleární medicína. 6. přepracované vydání (v Nakladatelství P3K vydání druhé). V Praze: P3K, 2015, 161 s. ISBN 978-80-87343-54-8.
3. VOTRUBOVÁ, Jana. Klinické PET a PET/CT. Praha: Galén, c2009, xi, 207 s. ISBN 978-80-7262-619-9.
4. KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK. Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami. Praha: Grada Publishing, 2018, 304 s. ISBN 978-80-271-0168-9.

Přehled aktuálních poznatků a informací v mé bakalářské práci byl vytvořen na základě informací ze vstupní literatury a rešeršní činnosti. K rešerši byly použity databáze EBSCO, Medvik a Google Scholar, a také státní ústavy ÚZIS a SÚKL. Vyhledávacími kritérii byl jazyk český a anglický, případně slovenský. Pro vyhledávání byla použita klíčová slova nukleární medicína, nukleární onkologie, pozitronová emisní tomografie, PET/CT, radiofarmakum, ^{18}F – fluorodeoxyglukóza, ^{18}F – cholin, ^{18}F – fluorothymidin, ^{18}F – DOPA, ^{18}F – FMISO a radiační ochrana. Prostřednictvím výše zmíněných databází bylo nalezeno celkem 36 článků na dané téma, z nichž bylo v práci použito 23. Ostatní nepřinášely potřebné informace.

1 POZITRONOVÁ EMISNÍ TOMOGRAFIE

Pozitronová emisní tomografie (PET) patří mezi neinvazivní tomografické zobrazovací metody prováděné na pracovištích nukleární medicíny. Zobrazovací metody nukleární medicíny, na rozdíl od metod radiodiagnostických, umožňují zobrazit funkci jednotlivých orgánů a tkání (Kupka a kol., 2015, s. 15).

Pozitronová emisní tomografie (PET) je metoda založena na detekci anihilačního záření. Anihilace je proces, při kterém se setká pozitron, vytvořený v nestabilním jádře pozitronového zářiče β^+ přeměnou protonu na neutron, s elektronem okolní hmoty, přičemž dojde k jejich společnému zániku (anihilaci) provázenému emisí dvou kvant záření gama o energii 511 keV. Tato kvanta gama záření se z místa střetu pohybují opačným směrem téměř po přímce (Bělohávek a kol., 2003, s. 10).

Přístrojové vybavení PET prošlo značným vývojem. Z prvotních systémů, obsahujících jeden prsteneček s více detektory, se vyvinuly systémy obsahující mnoho kruhovitě uspořádaných detektorů s počtem krystalů v řádu desetitisíců. Uspořádání detektorů do prstence okolo pacienta umožňuje koincidenční detekci dvou fotonů gama záření vzniklých jednou anihilací (Ziessman a kol., 2006, s. 64).

PET detekuje pouze impulzy pocházející ze stejné anihilační události, resp. v rámci časového okna shody, které trvá zpravidla do 10 ns. Takto registrované impulzy se označují jako pravé koincidenční události (Ziessman a kol., 2006, s. 64). Předpokládá se, že k interakci došlo na přímce spojující dva detektory. Tato přímka je označována jako linie odezvy (LOR) nebo linie shody (Basu a kol., 2011). Pokud se událost nezaznamená v rámci jednoho časového okna shody, informace o anihilaci se zahodí. Tato funkce efektivně provádí tzv. elektronickou kolimaci (Ziessman a kol., 2006, s. 64). Z toho vyplývá, že není nutné používat olověné kolimátory jako při planární scintigrafii nebo SPECT, což umožňuje podstatně vyšší citlivost PET, oproti SPECT (Koranda a kol., 2014, s. 30). Miliony zaznamenaných náhodných událostí jsou podkladem pro softwarovou rekonstrukci 3D obrazu distribuce radiofarmaka v těle (Basu a kol., 2011).

2 HYBRIDNÍ ZOBRAZENÍ PET/CT

2.1 Historie a současnost

Historie

Současné PET kamery jsou již dnes konstruovány jako hybridní PET/CT systémy, které spojují dvě moderní technologie do jednoho přístroje (Lang, Kamínek, 2010). První hybridní PET/CT skener, který byl představen v roce 1998, vyvinul profesor radiologie D. Townsend (Votrubová a kol., 2009, s. 7). V březnu roku 2001 byl na Klinice nukleární medicíny ve Fakultní nemocnici v Curychu zaveden provoz prvního komerčního PET/CT zařízení. Dnes je takovýchto zařízení v klinické praxi po celém světě několik tisíc (Kletter, 2010) a samostatné PET kamery se již od roku 2006 nevyrábí (Pan, Mawlawi, 2008). V roce 2001 byla v České republice instalována historicky první PET kamera v Nemocnici Na Homolce v Praze a o dva roky později se v této nemocnici zahájil provoz hybridního přístroje PET/CT (Votrubová a kol., 2009, s. 7). V Olomouci se technologie PET/CT rozvinula v roce 2005, kdy fakultní nemocnice zakoupila tento přístroj jako první zdravotnické zařízení na Moravě (Bielesz, 2018).

Současnost

V České republice se v současné době nachází 16 systémů PET/CT a pouze jedno pracoviště se samotným PET (ÚZIS, 2019).

Počet vyšetření pomocí hybridního PET/CT systému má dle posledních dohledatelných informací stoupající trend. Dle statistik Ústavu zdravotnických informací a statistiky ČR (ÚZIS ČR) bylo v České republice v roce 2018 provedeno 31 733 vyšetření PET/CT přístroji, zatímco v roce 2017 to bylo téměř o polovinu méně (ÚZIS, 2019).

2.2 Technické podmínky

Hybridní PET/CT systémy obsahují plnohodnotné multidetektorové CT, poskytující kompletní anatomické a morfologické zobrazení, a PET kameru, která zprostředkovává informace o funkci vyšetřované oblasti. Takto je možné získat anatomický a funkční obraz tkáně během jednoho vyšetření beze změny polohy pacienta, což eliminuje nepřesnosti, které vznikaly počítačovou fúzí obrazů zho-

tovených při různých vyšetřeních, a také zvyšuje komfort pacienta, který vyšetření podstoupí pouze jednou (Votrubová a kol., 2009, s. 44). Jedná se o základní zobrazovací metodu nejen v onkologii, v níž její klíčová role spočívá ve stagingu nádorů a jejich terapeutické odpovědi na léčbu, ale také v neurovědě a dalších aplikacích molekulárního zobrazování (Schillaci, Urbano, 2019).

Registrace PET a CT obrazu

Samotné vyšetření obvykle začíná skenovacím projekčním rentgenovým snímkem označovaným jako topogram, který slouží k vymezení oblasti zájmu, která je následně vyšetřena pomocí PET a CT. Během snímání topogramu rentgenka stojí v předem zvolené pozici a lůžko s pacientem projíždí skrz CT gantry. Vlastní akvizice dat počítačové tomografie probíhá pouze ve zvolené vyšetřovací oblasti. Po získání CT dat je vyšetřovací stůl s pacientem zasunut hlouběji do gantry, kde jsou ze stejné oblasti nasnímána emisní PET data (Votrubová a kol., 2009, s. 44).

Akvizice PET dat probíhá v určitých zorných polích, označovaných jako „postele“, s mírným překrytím, které je důležité k zamezení ztrátě dat v důsledku poklesu citlivosti PET skeneru na okrajích axiálního zorného pole. Každá z těchto oblastí, které jsou vymezeny délkou axiálního zorného pole, jejíž velikost je obvykle 15-20 cm, je podrobena samotnému snímání PET dat po dobu přibližně 3 minut, v závislosti na vzájemném vztahu radiofarmaka a citlivosti skeneru. Poté se lůžko s pacientem automaticky posune a proběhne snímání dat v dalším vymezeném zorném poli. Obvykle se s ohledem na výšku pacienta a požadovaném rozsahu snímá 5–7 postelí (Votrubová a kol., 2009, s. 44 a 49).

Před technologií PET/CT byla data PET a CT získávána při dvou různých vyšetřeních a jejich sjednocení bylo prováděno softwarovými technikami. Tento způsob s sebou nesl i řadu nepřesností. Průměrná chyba ve fúzi samostatných PET a CT obrazů u vyšetření mozku byla okolo 2–3 mm, u vyšetření hrudníku pak dosahovala 5–11 mm (Pan, Mawlawi, 2008).

Hybridní PET/CT přístroje zajišťují z velké části spojení PET a CT obrazů samostatně díky moderním hardwarovým systémům. Z důvodu snímání PET skenů do menší obrazové matice, než jsou zaznamenávány CT skeny, je před samotným spojením obrazů nutné, aby tyto obrazy byly zvětšeny. Nedílnou

součástí těchto systémů je pak metoda alpha – blending, která přiřazuje jednotlivým modalitám různý stupeň průhlednosti, a která zajišťuje překrytí PET obrazů přes obrazy CT (Votrubová a kol., 2009, s. 44).

Velkou výhodou těchto hybridních PET/CT systémů je možnost prohlížení hybridních obrazů PET/CT nebo možnost prohlížení PET a CT obrazů odděleně (Votrubová a kol., 2009, s. 44).

Korekce absorpce na podkladě CT dat

CT zaujímá v hybridních systémech PET/CT nezastupitelnou roli. Pomocí CT je možné určit přesnou anatomickou lokalizaci zájmové oblasti, a také má důležitou roli v korekci na zeslabení, kde poskytuje informace pro výpočet atenuační mapy (Kupka a kol., 2015, s. 35). Tato mapa je hlavním nástrojem pro korekci surového PET skenu na zeslabení anihilačních fotonů ve tkáni (Koranda a kol., 2014, s. 31).

V důsledku různé hloubky uložení oblasti zájmu v těle pacienta a denzité jejího okolí může docházet k rozdílnému pohlcování anihilačních fotonů, což může vést ke vzniku artefaktů a chybnému hodnocení PET obrazů. Záření emitované pacientem je zeslabováno pohlcením a rozptylem v jeho těle (Kupka a kol., 2015, s. 35). Ložiska vyskytující se na periférii vykazují vyšší aktivitu, než by vykazovala identická ložiska nacházející se hlouběji, což by vedlo k tomu, že by výsledná distribuce radiofarmaka neodpovídala reálnému vychytávání radiofarmaka v tkáních, a proto je potřeba tuto chybu odstranit tzv. korekcí na zeslabení (Votrubová a kol., 2009, s. 44).

Velkou výhodou hybridních PET/CT systémů je fakt, že ke korekci absorpce emisního PET skenu využívají CT data zhotovena přidruženým výpočetním tomografem. Tato skutečnost s sebou přináší benefity také pro pacienty, zejména se výrazně zkrátí čas potřebný k jednotlivému vyšetření (Votrubová a kol., 2009, s. 45). Jelikož je CT obraz ve své podstatě založen na zeslabení záření tkání, je možné informaci v něm použít pro matematickou korekci obrazu funkčního (Kupka a kol., 2015, s. 35).

Před rozvojem hybridních PET/CT systémů se k totožnému účelu používal externí zdroj záření, jehož nevýhodou byla delší doba snímání, řádově několik minut (při použití CT několik sekund). Na druhou stranu tato metoda s sebou nese riziko vzniku artefaktů, protože následné zpracování map korekčních koe-

ficientů je poněkud obtížnější (Votrubová a kol., 2009, s. 45; Kupka a kol., 2015, s. 35; Lang, Kamínek, 2010).

Artefakty plynoucí z korekce absorpce podle CT dat

Artefakty vyskytující se na CT snímcích jsou poměrně běžné. Často souvisejí s kovovými implantáty – ortopedické pomůcky, zubní výplně nebo chirurgické klipy a cívky, které způsobují světlé a tmavé pruhy v rekonstruovaném CT snímku, čímž se výrazně sníží kvalita nasnímaných dat (Reinert a kol., 2019).

Výše zmíněné artefakty se z důvodu korekce absorpce na podkladě CT dat přenášejí i do PET snímků, kde mohou způsobit falešně nízkou nebo vysokou naměřenou hodnotu koncentrace aktivity (Reinert a kol., 2019). Přítomnost kardiostimulátorů a různých kovových implantátů způsobuje vysokou absorpci rentgenového záření, což vede k situaci, kdy korekční algoritmus nadhodnotí zeslabení v těchto místech a ve výsledném PET obrazu se objeví hyperaktivní ložisko (Votrubová a kol., 2009, s. 46).

Ojedinele se mohou objevit i tzv. ořezové artefakty, které vznikají z důvodu rozdílné velikosti zorného pole PET a CT. PET skenery mají obvykle zorné pole velikosti 70 cm a CT skenery přibližně 50 cm. Tato skutečnost může zapříčinit situaci, kdy pacient nebude zcela pokryt zorným polem CT skeneru, ale bude zabrán pouze větším zorným polem PET. V takovém případě nebude na přebývajících částech PET snímku aplikována žádná korekce. Pomocí speciálního rekonstrukčního algoritmu, který rozšiřuje zorné pole CT, lze tento artefakt eliminovat (Votrubová a kol., 2009, s. 46).

Často se mohou objevit také artefakty spojené s dýcháním, které ovlivňují zejména periferní a bazální plicní léze a játra. To se může projevit na bazi plic tzv. „banana“ artefaktem, který se projevuje snížením aktivity na PET snímku s korekcí absorpce. Vzhledem k délce snímání není možné snímat plíce při zadržování dechu. Proto se doporučuje PET akvizice v mělkém dýchání a snímání CT dat v mělkém výdechu (Votrubová a kol., 2009, s. 46).

3 RADIOFARMAKA PRO PET/CT VYŠETŘENÍ

Radiofarmaka jsou léčivé přípravky skládající se z biologicky nebo chemicky aktivních látek (Lázníček, Komárek, 1998, s. 27), které se využívají k diagnostice a terapii. Základními složkami radiofarmak jsou jeden nebo více radionuklidů vázaných na vhodný nosič – farmakum. Vhodné farmakum je voleno na základě biodistribuce v lidském organismu, například vychytávání nebo vylučování. Radionuklid, který je zdrojem ionizujícího záření, umožňuje detekci látky externím skenerem. Specifickou vlastností radioaktivních přípravků je proměnlivý obsah látky závislý na čase, jelikož radionuklid podléhá radioaktivním přeměnám, a tím pádem se jeho množství snižuje (Kraft, Pekárek, 2014, s. 5).

Radiofarmaka jsou označovány jako radiotraccery, protože jsou podávány v subfarmakologických dávkách, které sledují fyziologický nebo patologický děj v těle (Ziessman a kol., 2014, s. 1).

Radiofarmaka pro klinické využití musí splňovat určité parametry. Radionuklidový rozpad by měl emitovat záření dostatečné energie, která je 100–200 keV pro gama kamery a 511 keV pro pozitronovou emisní tomografii. Nesmí obsahovat částicové záření, které zvyšuje radiační dávku pacienta a v neposlední řadě by poločas rozpadu radiofarmaka měl být dostatečně dlouhý pouze pro dané vyšetření, obvykle několik hodin (Ziessman a kol., 2014, s. 1).

V nukleární medicíně se využívají pouze uměle vyrobené radionuklidy. Přírodně se vyskytující radionuklidy, například těžké toxické prvky uran nebo aktinium, nemají žádný klinický význam (Ziessman a kol., 2014, s. 1).

Mezi nejrozšířenější radionuklidy využívající se při PET/CT vyšetřeních jsou organické radionuklidy uhlík (^{11}C), dusík (^{13}N), kyslík (^{15}O) a fluor (^{18}F) (Fanti a kol., 2010, s. 9).

Radionuklidy jsou charakteristické poločasem přeměny ($T_{1/2}$), který je definován jako střední doba, za kterou se přemění právě polovina atomů vzorku (Kraft, Pekárek, 2014, s. 8). Poločas přeměny ^{11}C je 20.4 min, ^{13}N 9.98 min, ^{15}O 2.03 min a ^{18}F 109.8 min. První tři výše zmíněné radionuklidy nelze vzhledem k jejich krátkému poločasu přeměny používat na pracovištích, které nedisponují cyklotronem k jejich výrobě. Vzhledem k těmto okolnostem nejsou radiofarmaka

založená na ^{11}C , ^{13}N a ^{15}O v dnešní době velmi využívaná. Fluor (^{18}F) je pro svůj relativně dlouhý poločas přeměny nejpoužívanějším radionuklidem pro klinické účely. Díky této vlastnosti fluoru je možné vyrábět radionuklidy s ^{18}F v cyklotronech vzdálených i 3 hodiny od PET skeneru. Zdaleka nejpoužívanějším radiofarmakem značeným ^{18}F je 2-[^{18}F]-fluoro-2-deoxy-D-glukózu (^{18}F - FDG) (Fanti a kol., 2010, s. 9).

Radionuklidy využívané v nukleární medicíně se uměle vyrábějí třemi základními způsoby – v jaderných reaktorech a cyklotronech (primární zdroje) nebo radionuklidových generátorech (sekundární zdroje) (Owunwanne a kol., 1995, s. 3).

Podstatou výroby radionuklidů v jaderném reaktoru je řízená řetězová reakce, kde výchozím štěpným materiálem jsou nejčastěji uran (^{235}U) nebo plutonium (^{239}Pu) (Kraft, Pekárek, 2014, s. 10). Radionuklidy se v těchto zařízeních vyrábějí buď aktivací terčového materiálu teplými neutrony, přičemž vznikají například radionuklidy jód (^{131}I), chrom (^{51}Cr) a fosfor (^{32}P), nebo izolací štěpných produktů uranu, kdy vzniká molybden (^{99}Mo) a rovněž jód (^{131}I) (Koranda a kol., 2014, s.17).

V cyklotronech jsou stabilní jádra vhodného terčového materiálu „bombardována“ nabitými částicemi (elektrony, protony, deuterony a alfa částice), které jsou v magnetickém poli na kruhové dráze urychlovány na takové rychlosti, aby překonaly bariéru obklopující jádro (Owunwanne a kol., 1995, s. 4). Takto vznikají například indium ^{111}In , fluor ^{18}F , uhlík ^{11}C , kyslík ^{15}O a dusík ^{13}N . Pozitronové zářiče ^{11}C , ^{15}O a ^{13}N charakteristické krátkým poločasem přeměny se připravují v tzv. lékařských cyklotronech přímo na pracovištích nukleární medicíny (Koranda a kol., 2014, s.18).

Radionuklidové generátory fungují na principu přeměny mateřského radionuklidu s delším poločasem přeměny na radionuklid dceřiný s kratším fyzikálním poločasem. Nejrozšířeněji používaným je molybden (^{99}Mo) – technecium ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) generátor, ve kterém se z mateřského molybdenu s poločasem přeměny $T_{1/2}$ 66.2hod. vyrábí Technecium $^{99\text{m}}\text{Tc}$ s poločasem přeměny $T_{1/2}$ 6.02 hod (Kraft, Pekárek, 2014, s. 11).

Jako léky jsou radiofarmaka velmi bezpečná. Mírné nežádoucí účinky se vyskytují velmi sporadicky a vážné reakce velmi vzácně (Mettler a kol., 2006, s. 12).

3.1 ^{18}F - fluorodeoxyglukóza

^{18}F – fluorodeoxyglukóza (^{18}F – FDG) je nejčastějším radiofarmakem využívaným v klinickém PET/CT zobrazování (Mettler a kol., 2006, s. 371). ^{18}F – FDG byla poprvé popsána v roce 1978 Idem et al. a dnes se odhadem podílí na více než 90 % všech PET vyšetřeních (Votrubová a kol., 2009, s. 17). ^{18}F – FDG je vhodná pro diagnostiku, stážování a monitorování terapie. V některých případech není použití tohoto radiofarmaka příliš vhodné, především pro jeho nízkou specifitu, jelikož zánět nebo infekce mohou také absorbovat ^{18}F – FDG, která konkuruje nebo převyšuje absorpci v malignitách (Ziessman a kol., 2014, s. 18).

Glukózové transportéry zajišťují dopravu glukózy a ^{18}F – FDG do buněk, kde jsou fosforylovány hexokinázami, přičemž vzniká fosforylovaná glukóza (glukóza 6 - fosfát), která může být dále metabolizována, a fosforylovaná ^{18}F – FDG (2-FDG-6-fosfát), která nemůže být fosforylována a zůstává zachycena v buňce v poměru rychlosti metabolismu glukózy. To umožňuje dostatek času k zobrazení distribuce ^{18}F – FDG v tkáních (Mettler a kol., 2006, s. 372).

^{18}F – FDG se primárně vylučuje ledvinami a optimální doba pro zobrazování distribuce radiofarmaka je obvykle 40 až 60 minut (Ziessman a kol., 2014, s. 228).

Zvýšená aktivita ^{18}F – FDG je u nádorů způsobena několika faktory. Jsou to zejména zvýšená aktivita glukózových transportérů, nízkých hladin glukóza - 6 - fosfatázy a neschopností 2-FDG-6-fosfátu opustit buňky (Ziessman a kol., 2014, s. 227).

Z výše uvedeného vyplývá, že hyperglykémie před skenováním může vést ke snížené citlivosti PET skenu a zhoršení kontrastu mezi nádorem a krevním pozadím. Tato skutečnost vede k potřebě adekvátní přípravy pacienta k vyšetření, (Votrubová a kol., 2019, s. 17), která je popsána v kapitole 4.

Pro hodnocení vychytávání ^{18}F - FDG je obvykle používán dvoukompartmentový model, jehož výsledkem je stanovení spotřeby ^{18}F - FDG v tkáních.

První kompartment udává množství volné ^{18}F - FDG ve tkáních a druhý kompartment představuje ^{18}F - FDG vázanou ve formě 2-FDG-6-fosfátu (Votrubová a kol., 2019, s. 17).

Fyziologická distribuce ^{18}F – FDG odráží metabolismus glukózy. Vysoká absorpce je přítomna v mozku, ledvinách, močovodech a močovém měchýři. V srdci, gastrointestinálním traktu, slinných žlázách a varlatech je aktivita variabilní. V kostní dřeni je fyziologicky nízká aktivita (Ziessman a kol., 2014, s. 230).

^{18}F – FDG vyšetření se využívá například v onkologické diagnostice nádorů plic. Bronchogenní karcinom (BCA) prokazatelně vykazuje vysoký metabolismus glukózy, díky čemuž se stal předmětem první onkologické studie pomocí ^{18}F – FDG na světě. BCA velmi často metastazuje do kostí, které vykazují vysokou akumulaci ^{18}F – FDG. Při hodnocení nálezu je nutné brát zřetel na zlomeniny, které zvýšeně akumulují ^{18}F – FDG ještě nějakou dobu po úraze (Votrubová a kol., 2009, s. 83).

3.2 ^{18}F - cholin

Cholin je nezbytným substrátem pro výstavbu buněčných membrán. Radioaktivně se značí uhlíkem ^{11}C nebo fluorem ^{18}F (Votrubová a kol., 2009, s. 18).

Uhlíkem značený cholin byl poprvé použit v onkologické diagnostice v roce 1997 (Fanti a kol., 2010, s. 14). ^{11}C - cholin lze vzhledem ke svému krátkému fyzikálnímu poločasu (20 minut) použít pouze na pracovištích nukleární medicíny vybavených cyklotronem, zatímco ^{18}F - cholin s poločasem rozpadu 110 minut je možné dopravovat ze vzdálenějších center (Cuccurullo a kol., 2017).

^{18}F – FCH lze využít v primární diagnostice karcinomu prostaty, u kterého je první volbou diagnostiky histologické vyšetření vzorků získaných biopsií prostaty, ke které jsou indikováni pacienti se zvýšenou hladinou prostatického specifického antigenu (PSA) a patologickým palpačním nálezem. V případě negativního výsledku jsou pacienti s přetrvávajícími příznaky, ukazujícími na karcinom prostaty, a zvyšující se hladinou PSA indikováni k opakované biopsii a následně k multiparametrické magnetické rezonanci (MP – MRI) nebo metodám nukleární medicíny – PET/CT, popř. PET/MRI (Kudláčková a kol., 2016).

Využitím ^{18}F – FCH PET/CT v primodiagnostice karcinomu prostaty se ve stejnojmenné studii zabývali autoři Kudláčková a kol. v letech 2013 až 2015,

jejichž cílem bylo zjistit přínos výše zmíněného radiofarmaka pro cílenou biopsii u pacientů s opakovaně negativními histologickými nálezy biopsií u karcinomu prostaty. Výsledky ukazují, že z celkového počtu 30 pacientů byl u 46 % mužů potvrzen karcinom prostaty, z nichž 88mi procentům pacientů byl diagnostikován anteriorně lokalizovaný tumor, což se jeví jako možné vysvětlení negativních výsledků histologických vyšetření. ^{18}F – FCH PET/CT vyšetření, díky kterému by bylo možné provádět cílené biopsie pod sonografickou kontrolou, se jeví jako stěžejní vyšetřovací metoda, která by dokázala zabránit velkému množství zbytečných biopsií (Kudláčková a kol., 2016).

^{18}F – FCH hraje také důležitou roli při detekci a lokalizaci místa relapsu rakoviny prostaty, ke kterému dochází i přes velmi úspěšnou léčbu u lokalizovaného karcinomu až v 15 – 40 % případů do 10ti let po primární léčbě. U těchto pacientů dochází k detekovatelnému vzestupu hladiny PSA v séru, což se nazývá biochemické selhání (Sollini a kol., 2016). Tato metoda je senzitivní v případě, kdy se hodnota PSA u pacientů zvýší nad 2 ng/ml (Ptáčnick, Kubinyi, 2016).

Cholinové stopovací látky se nehromadí pouze v metastázách rakoviny prostaty, ale také v mnoha jiných novotvarech a zánětlivých procesech. Pomocí fluorem značeného cholinu je možné identifikovat také například adenom příštítných tělísek (Huber a kol., 2018).

Pro detekci a lokalizaci adenomu příštítných tělísek se rutinně využívá $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – MIBI SPECT vyšetření. V posledních letech se také postupně začíná využívat ^{18}F – FCH PET/CT vyšetření, které poskytuje vyšší prostorové rozlišení a doplňkové anatomické a funkční informace. Těmito dvěma výše zmíněnými modalitami se ve své studii prováděné se 100 pacienty v letech 2015 až 2017 zabývali Beheshti a kol. (2018), kteří porovnávali přínos ^{18}F – FCH PET/CT vyšetření a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – MIBI nebo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - tetrofosmin SPECT/CT v předoperační diagnostice adenomů příštítných tělísek u pacientů s primární hyperparathyreózou (Beheshti a kol., 2018).

Výsledky této studie ukazují výrazně vyšší citlivost (93, 7 %) u ^{18}F – FCH PET/CT v porovnání s 60,8 % citlivostí u $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – MIBI / $^{99\text{m}}\text{Tc}$ – tetrofosmin SPECT/CT. Autoři uvádí možnost rozlišné citlivosti mezi těmito dvěma modalitami spočívající v rozdílné velikosti adenomů příštítných tělísek nebo skuteč-

nosti, že u 40 % pacientů bylo použito ^{99m}Tc – tetrofosmin pro SPEC/CT namísto ^{99m}Tc – MIBI. S odkazem na literaturu ale také říkají, že by tato skutečnost nemusela zapříčinit výrazné zkreslení výsledků této studie z důvodu stejné účinnosti detekce těchto dvou radiofarmak (Beheshti a kol., 2018).

S ohledem na výsledky této studie autoři vidí velmi slibný potenciál ^{18}F – FCH PET/CT pro včasnou detekci a lokalizaci malých adenomů přístítných tělísek u pacientů s primární hyperparatyerózou (Beheshti a kol., 2018).

Mezi další indikace ^{18}F – FCH PET/CT patří lokalizace hepatocelulárního karcinomu. Vyšetření pomocí tohoto radiofarmaka je indikováno k doplnění ^{18}F – FDG PET/CT v případě, kdy vyšetření pomocí fluorodeoxyglukózy neposkytuje dostatečné informace a je plánovaná chirurgická resekce nebo transplantace (SÚKL, 2017).

3.3 ^{18}F - fluorothymidin

3'-deoxy-3'-[^{18}F]-fluorothymidin (^{18}F - FLT) je radioaktivně, pomocí pozitronového zářiče ^{18}F , značený analog thymidinu, který umožňuje diagnostikovat nádory na základě zobrazení jejich mitotické aktivity (Votrubová a kol., 2009, s. 18).

^{18}F – FLT se fyziologicky zvýšeně vychytává v krvetvorné kostní dřeni a parenchymu jater, naopak v mozku a svalové tkáni se prakticky neakumuluje. Ve srovnání s ^{18}F - FDG, která se fyziologicky v mozku a při fyzické aktivitě také v příčně pruhovaných svalech vychytává, není nutné pacienta omezovat v mluvení a příjmu tekutin při přípravě před vyšetření, jako při vyšetření s ^{18}F – FDG (Ferda a kol., 2011).

^{18}F – FLT je radiofarmakum vhodné pro zobrazení proliferace nádorových buněk. Chen a kol. (2005) se ve své studii, které se zúčastnilo 25 pacientů s nově diagnostikovaným gliomem nebo s doloženou anamnézou dříve léčeného gliomu, zabývali porovnáním ^{18}F – FLT a ^{18}F – FDG z hlediska vychytávání v mozkových gliomech a pro posouzení, zda je ^{18}F – FLT citlivější a specifitější než ^{18}F – FDG. Součástí této studie bylo také stanovování progresu nádoru a délka přežití analyzované na základě Kaplan – Meierovy statistiky (Chen a kol., 2005).

Výsledkem této studie je skutečnost významného rozdílu mezi vychytáváním ^{18}F – FLT u gliomů vysokého a nízkého stupně. ^{18}F – FLT bylo dobře vychytáváno v nádorech vysokého stupně, zatímco nádory nízkého stupně a stabilní léze nevykazovaly znatelné vychytávání. Vzhledem k nízkému vychytávání ^{18}F – FLT v normální mozkové tkáni, je toto radiofarmakum vhodné pro detekci opětovného výskytu nádoru (Chen a kol., 2005).

Závěrem autoři uvádí, že byla zjištěna vyšší citlivost ^{18}F – FLT pro hodnocení recidivujících gliomů vysokého stupně než u ^{18}F – FDG a fakt, že na základě Kaplan – Meierovy analýzy byly zjištěny lepší prognostické vlastnosti pro předpověď délky přežití a progresu nádoru u ^{18}F – FLT oproti ^{18}F – FDG (Chen a kol., 2005).

^{18}F – FLT, které se jen velmi málo vychytává v zánětlivých procesech, je vhodné pro použití k odlišení těchto změn od maligní plicní tkáně, k čemuž není vhodné ^{18}F – FDG, které se zvýšeně vychytává v obou případech (Koranda a kol., 2014, s. 152).

Dalším využitím ^{18}F – FLT PET/CT je posouzení viability nádorové tkáně důležité při monitorování účinku radioterapie nádorů hlavy a krku. Na základě rozlišení nekrotické tkáně od tkáně životaschopné je možné radiační dávku upravit a přesněji zaměřit na oblast, kde byl nádor nedostatečně ozářen (Ferda a kol., 2011). Toto tvrzení Ferda a kol. (2011) dokládají studii, ve které vyšetřovali 18 pacientů pomocí ^{18}F – FLT PET/CT. U 10 - ti osob byl prokázán dostatečný efekt radioterapie, protože v ozařované oblasti nebyla zvýšená akumulace tohoto radiofarmaka. U ostatních 8mi pacientů se v místě léze stále zvýšeně ^{18}F – FLT vychytávalo, u 3 osob bylo zaznamenáno velmi vysoké vychytávání. U těchto tří osob se následně provedla eskalace radiační dávky záření.

3.4 ^{18}F - DOPA

L - 3,4 – dihydroxy – 6 - [^{18}F] - fluorofenylalanin (^{18}F – DOPA) je radioaktivně značená neproteinogenní aminokyselina vyvíjená v 70. a 80. letech minulého století (Fanti a kol., 2010, s. 162), která se dříve využívala především při PET zobrazování presynaptického dopaminergního systému ve striatu lidského mozku za účelem vyšetření řady poruch CNS, zejména Parkinsonovy choroby a schizofrenie (Pretze a kol., 2014).

Navzdory snižujícímu se trendu použití ^{18}F – DOPA při PET vyšetření **Parkinsonovy nemoci (PN)** přitáhlo toto radiofarmakum opět svou pozornost, v souvislosti s nástupem buněčné terapie PN jako biomarker terapeutické látky. Akamatsu a kol. (2017) provedli ^{18}F – DOPA PET vyšetření u 10 pacientů s PN a u 10 zdravých lidí s využitím novějších PET/CT přístrojů s vysokým rozlišením za účelem přehodnocení této techniky, protože většina podobných studií byla provedena před mnoha lety na PET skenerech s nižším rozlišením. Výsledkem této studie bylo potvrzení možnosti využít této techniky pro získání základních informací pro regenerační dopaminergní terapii (Akamatsu a kol., 2017).

V posledních letech se ^{18}F – DOPA uplatňuje zejména při zobrazování **neuroendokrinních tumorů (NET)** vycházejících z neuroendokrinních buněk, které regulují různé tělesné funkce prostřednictvím parakrinní stimulace (Fanti a kol., 2010, s. 162), a které ve vysoké míře vychytávají ^{18}F – DOPA. Pro neuroendokrinní nádory je typická produkce látek odvozených od velkých aminokyselin, například serotonin nebo katecholaminy. ^{18}F – DOPA je intracelulárně přenášena transportérem velkých neutrálních aminokyselin (LAT1) a dekarboxylázou (AADC) přeměněna na fluorodopamin a dále na některý z katecholaminů (Ferdová a kol., 2013).

Nádory vycházející z neuroendokrinního systému jsou lokalizovány převážně v gastrointestinálního traktu a s výjimkou izulinomu jsou maligní. Nejčastějším nádorem jsou **karcinoidy** (Zamrazil, 2007). Karcinoidy se dělí na 2 velké skupiny – karcinoidy vycházející z gastrointestinálního traktu a karcinoidy z plicní tkáně. Klinické projevy jsou závislé na primární lokalizaci nádoru a tyto tumory mohou být i několik let latentní a následně se projevovat nespecifickými příznaky. Typickým projevem je tzv. karcinoidový syndrom prezentovaný zarudnutím obličeje, tachykardií nebo průjmy (Barkmanová, 2009).

Karcinoid se typicky vyskytuje v žaludku, tenkém a tlustém střevě, játrech a plicích. Dalšími nádory patřící do této skupiny jsou například gastrinom, inzulinom, somatostatinom, vipom nebo glukagonom (Zamrazil, 2007).

Ferdová a kol. (2013) se zabývali zobrazením NET typu karcinoidu pomocí ^{18}F – DOPA PET/CT vyšetření, které během 12ti měsíců podstoupilo 13 nemocných. Bylo zjištěno, že toto vyšetření je vhodné pro hodnocení stagingu i restagingu NET, jelikož nové informace přineslo v 84 % případů. Autoři také

zmiňují doporučení podání karbidopy per os před samotným vyšetřením pro zvýšení vychytávání radiofarmaka v neuroendokrinních tumorech, nicméně ta není v ČR k dispozici.

3.5 ^{18}F - FMISO

Hypoxie nádoru je významným ukazatelem prognózy tumorů a prokázaným činitelem způsobující rezistenci nádorových lézí vůči radioterapii. Její přítomnost předpovídá recidivu, metastázy a kratší dobu přežití. Hypoxie podporuje agresivnější a odolnější nádorové vlastnosti, zprostředkované transkripčním faktorem hypoxií – indukovaným faktorem 1 (HIF – 1), který způsobuje zástavu buněčného cyklu, angiogenézu a zrychlenou glykolýzu (Ziessman a kol., 2014, s. 20).

Nejpoužívanějšími radiofarmaky pro PET/CT zobrazení sníženého obsahu kyslíku v tkáních jsou 2 – nitroimidazoly, které jsou zastoupeny [^{18}F] – fluoromisonidazolem (^{18}F – FMISO) a [^{18}F] – fluoroerythronitroimidazolem (^{18}F – FE-TNIM) (Votrubová a kol., 2009, s. 19).

^{18}F – FMISO je nejrozsáhleji studovaným nitroimidazolem pro in vivo zobrazování. Díky své lipofilní povaze snadno proniká do buněk. Tkáňové nitroreduktázy generují radikální anionty, které jsou v přítomnosti kyslíku rychle eliminovány. Při hypoxii se tyto radikály váží na makromolekuly tkáně a zůstávají zachovány. Tím pádem je možné po ekvilibraci zobrazit hypoxická místa jako místa s vysokou akumulací ^{18}F – FMISO (Ziessman a kol., 2014, s. 21). Z důvodu lipofilních vlastností ^{18}F – FMISO je clearance tohoto radiofarmaka pomalá, což vyžaduje odsunutí skenování o 4 – 6 hodin po aplikaci, aby se dosáhlo optimálního kontrastu mezi oblastí s hypoxií a bez ní. V klinickém využití probíhá nejčastěji skenování po 2 hodinách od aplikace radiofarmaka z důvodu rychlého rozpadu fluoru – 18 (Fanti a kol., 2010, s. 183).

^{18}F – FMISO je vhodným radiotracerem pro nádory mozku, protože díky své lipofilní povaze může procházet hematoencefalickou bariérou a ve zdravé mozkové tkáni se hromadí pouze mírně. Pro mozek přináší neinvazivní zobrazení hypoxie velký klinický význam, jelikož biopsie mozku je velmi invazivní. Spolu s mozkem nevykazují fyziologické vychytávání ^{18}F – FMISO také plíce a oblast hlavy a krku. ^{18}F – FMISO se fyziologicky hromadí v játrech a gastrointestinál-

ním traktu, jelikož je vylučován hepatobiliárním systémem, proto není vhodné ho použít pro hodnocení hypoxických lézí v těchto oblastech (Hirata, K. a kol., 2019).

4 PŘÍPRAVA PACIENTA PŘED PET/CT VYŠETŘENÍM A PROVEDENÍ VYŠETŘENÍ

4.1 Indikace a kontraindikace

Indikace

PET/CT vyšetření podstupují 3 stěžejní skupiny pacientů. První skupinu tvoří pacienti, které indikující lékaři zasílají se záměrem zjištění diagnózy. Druhou skupinu tvoří pacienti s prokázaným nádorovým nebo zánětlivým onemocněním, u kterých se provádí celotělové stážování onemocnění, a třetí skupinou jsou pacienti, kteří jsou opakovaně vyšetřováni z důvodu podezření na remisi či recidivu onemocnění. V poslední době se PET/CT vyšetření používá také k plánování radioterapie (Votrubová a kol., 2009, s. 49).

Kontraindikace

Kontraindikace pro PET/CT vyšetření jsou v souladu s kontraindikacemi jiných vyšetření využívajících ionizující záření, kam patří hlavně těhotenství (Votrubová a kol., 2009, s. 50) a kontraindikacemi pro podání jodové kontrastní látky (Ferda a kol., 2002, s. 18).

Poškození **plodu** vlivem ionizujícího záření závisí zejména na fázi vývoje plodu. V prvním trimestru je plod nejvíce radiosenzitivní a citlivost na IZ postupně klesá s přibývajícím délkou gravidity ženy. Nejvyšší citlivost plodu na IZ je v období 3. až 8. týdne těhotenství, tedy v období organogeneze, kdy následkem ozáření mohou vznikat různé abnormality a malformace (Súkupová, 2018, s. 185).

Aplikace **kontrastní látky** může být kontraindikována z různých příčin. Mezi nejčastější důvod patří předchozí alergická reakce na jodovou kontrastní látku, možnost vzniku renální nedostatečnosti u již částečně poškozených ledvin, riziko vzniku šokového stavu u polyvalentního alergika a vzplanutí hyperthyreózy. U pacientů s touto diagnózou by se v rozmezí 2-3 týdnů po zvýšeném příjmu jodu mohla výrazně zvýšit produkce thyroideálních hormonů, která by mohla vyvrcholit v akutní thyreotoxikózu (Ferda a kol., 2002, s. 18).

Pacienti, kteří mají prokázanou **těžkou alergií** na jodovou kontrastní látku, se vyšetřují s kontrastní látkou pouze v nevyhnutelné situaci, po patřičné pří-

pravě a za dohledu anesteziologa (Votrubová a kol., 2009, s. 48). Pacienti s předchozí alergickou reakcí po podání JKL nebo s astmatem jsou indikováni k **protialergické léčbě**, která spočívá v podání Prednisonu 40 mg per os 12 – 18 hodin před vyšetřením s JKL a dalším podáním Prednisonu 20 mg per os v době 6 – 9 hodin před vyšetřením (Tichý, 2009).

Po podání kontrastní látky se mohou vyskytnou **nežádoucí reakce**. Mezi lehké nežádoucí reakce se řadí sucho v ústech a pocit na zvracení. Středně těžké reakce jsou prezentovány zvracením, kopřivkou a ztíženým dýcháním. K nejzávažnějším reakcím patří křečovitě záchvaty, bezvědomí a zástava oběhu. Z těchto důvodů je nutné, aby pracoviště, na kterém se podávají kontrastní látky, bylo vybaveno prostředky pro resuscitaci a rozvodem kyslíku (Ferda a kol., 2002, s. 19).

Mezi další kontraindikace pro PET/CT vyšetření patří dekompenzovaný diabetes, neschopnost pacienta vydržet 30 minut vleže na zádech, a příliš vysoká hmotnost pacienta překračující maximální nosnost vyšetřovacího stolu (Tichý, 2009).

4.2 Příprava pacienta

Před každým lékařským výkonem je nutné pacienta informovat o charakteru, průběhu, účelu, prospěchu, následcích a možném potenciálním riziku daného vyšetření. Následně pacient stvrzuje srozumitelnost tohoto poučení podpisem **informovaného souhlasu** (Kubinyi a kol., 2018, s. 280).

Pro správné provedení PET/CT vyšetření, které má přinést relevantní diagnostickou informaci, je nutná adekvátní příprava a spolupráce pacienta. Tato příprava zahrnuje zejména lačnění, dostatečnou hydrataci, udržení normální hladiny glykémie, případně protialergickou přípravu pacienta z důvodu alergických reakcí na jodovou kontrastní látku (JKL) (Votrubová a kol., 2009, s. 46).

Základní požadavkem na pacienty, kteří se připravují na PET/CT vyšetření, je, aby se po dobu alespoň šesti hodin zdrželi konzumace potravin. **Lačněním** docílíme situace, kdy se metabolismus glukózy udrží na bazální úrovni a ^{18}F - FDG se tedy nebude zvýšeně vychytávat ve svalech a střevní stěně, ale pouze v nádorových buňkách. (Votrubová a kol., 2009, s. 47).

Výjimku v lačnění představuje **vyšetření životaschopnosti (viability) myokardu**, kdy pacient naopak nesmí být lačný, jelikož glukóza by byla jen málo využívána srdeční svalovinou a distribuce ^{18}F – FDG by byla značně nehomogenní. Specifická příprava pacienta vede ke standardizaci vyšetření. První možností, jak zvýšit vychytávání ^{18}F – FDG v myokardu je per os podání 50 – 75 g glukózy asi hodinu před podáním samotné ^{18}F – FDG. Tento způsob přípravy nelze použít u vyšetření pacientů s diabetem. Druhou možností je tzv. inzulinový clamp, jehož podstatou je dosažení vysoké hladiny inzulinu, normální hladiny glukózy v krvi a nízké hladiny mastných kyselin. Tímto způsobem vznikají nejlépe hodnotitelné PET obrazy s vysokým kontrastem mezi myokardem a pozadím. Tato metoda je vhodná k použití i u diabetiků. Posledním způsobem, jak zvýšit akumulaci ^{18}F – FDG v srdeční svalovině je podání derivátu kyseliny nikotinové Acipimoxu, který snižuje plazmatickou koncentraci mastných kyselin (Votrubová a kol., 2009, s. 176).

Specifickou přípravu pacienta si vyžaduje také ^{18}F – FDG PET/CT vyšetření **infekční endokarditidy**, což je zánět srdeční nitroblány postihující převážně srdeční chlopně. Význam této přípravy spočívá v dosažení stavu, kdy myokard získává energii především z β - oxidace volných mastných kyselin a v důsledku potlačení glykolytických dějů nedochází ke zvýšené akumulaci ^{18}F – FDG v myokardu. Tento stav je možné navodit třemi způsoby, ideálně jejich kombinací. Protrahovaným lačněním, specifickým dietním opatřením a i. v. aplikací nefrakcionovaného heparinu, který stimuluje lipoproteinovou lipázu. Dietní opatření zahrnují omezení sacharidů a zvýšený příjem tuků a bílkovin 24 hod před vyšetřením (Zogala, 2020).

Součástí přípravy pacienta před PET/CT vyšetřením s ^{18}F – FDG je měření **glykémie**, která by neměla překročit hranici 10 mmol/l. Tato hodnota není dosud jednoznačně stanovena, jedná se spíše o horní mez arbitrárně stanovenou na většině pracovišť nukleární medicíny (Votrubová a kol., 2009, s. 47). S cílem co nejnižší hladiny glykémie se také doporučuje pacientům 1 až 2 dny před vlastním vyšetřením omezit fyzickou aktivitu (Tichý, 2009). V případě vysoké hladiny glykémie nelze vyšetření provést, jelikož vysoká hladina glukózy zhoršuje vychytávání ^{18}F – FDG v nádorových buňkách a došlo by ke zhoršení kontrastu mezi nádorovou lézí a pozadím. Nabízí se však možnost snížení glyké-

mie v krvi podáním inzulínu těsně před samotným vyšetřením. Tento způsob však není možné aplikovat, protože by se většina ^{18}F – FDG vychytala v kosterním svalstvu, což je nežádoucí. Pro úspěšné ^{18}F – FDG PET/CT vyšetření u diabetiků je proto žádoucí adekvátní kompenzace diabetu (Koranda a kol., 2014, s. 151). Těmto pacientům se doporučuje poslední jídlo a dávka inzulínu večer před vyšetřením (Tichý, 2009).

Dalším důležitým bodem v přípravě pacienta je **hydratace**. Dostatečný příjem neslazených nápojů přispívá ke snížení radiční zátěže pacienta a prevenci nefropatií způsobených aplikací jodové kontrastní látky (Votrubová a kol., 2009, s. 47).

V některých případech, například při vyšetření střeva, které je v těsné blízkosti orgánů se stejnou denzitou, je nutné mezi těmito strukturami zvýšit kontrast pomocí kontrastní látky, aby je bylo možné na CT skenech dobře rozeznat. Kontrastní látka se podává per os, per rectum a ve výjimečných případech také duodenální sondou přímo do tenkého střeva (Votrubová a kol., 2009, s. 47). Jedná se o metodu tzv. **dvojího kontrastu**, kdy se současně aplikuje pozitivní i negativní KL (Vomáčka a kol., 2015, s. 70). V případě perorálního podání, s účelem odlišit žaludek a střevní kličky, pacient popíjí v intervalu 60-90 minut před vyšetřením pozitivní či negativní KL ředěnou vodou o objemu jeden až dva litry. Nejčastěji perorálně podávanými pozitivními kontrastními látkami jsou jodové roztoky. Z negativních kontrastních látek jsou to 2 – 2,5 % roztok manitolu nebo sorbitolu, jejichž hlavní nevýhodou je vyvolání průjmu, a voda. Pro zvýšení kontrastu v orální části trávicí trubice je doporučováno podání vody až při polkládání pacienta na vyšetřovací stůl (Votrubová a kol., 2009, s. 47).

4.3 Postup vyšetření

PET/CT vyšetření se provádí výhradně objednaným pacientům, kteří mají vystavenou žádanku. Taková žádanka mimo osobních údajů obsahuje důležité informace o rozsahu vyšetření, hmotnosti pacienta, alergiích, diabetu a případně informace o již prodělané léčbě (Tichý, 2009).

Celý proces vyšetření začíná v aplikační místnosti, kde radiologický asistent provede přípravu pacienta, která zahrnuje měření hladiny glukózy v krvi, zavedení flexibilní kanyly, poučení pacienta a přípravu kontrastní látky k popíjení

(Tichý, 2009). Flexibilní kanyla je potřebná k podání radiofarmaka a následně k aplikaci JKL. Nejčastěji se používá modrá (22 G) a růžová (20 G) kanyla (Votrubová a kol., 2009, s. 48). Nejběžnější umístění flexibilní kanyly je v kubitální žíle. V případě nemožnosti zavést kanylu do žil horní končetiny, je možné zajistit žilní přístup na hřbetu nohy nebo femorální žíle (Ferda a kol., 2002, s. 20).

K samotné aplikaci radiofarmaka, připraveného v laboratoři do stříkačky, přichází lékař, který po krátkém informačním rozhovoru s pacientem provede aplikaci (Tichý, 2009).

Po aplikaci je pacient zaveden do kabinky, kde probíhá tzv. klidová fáze vyšetření. Během těchto 60 minut je nutné, aby pacient setrval v klidu, aby nedošlo k vychytávání radiofarmaka v kosterním svalstvu. Během této doby pacient také popíjí kontrastní látku. Na konci této doby je pacient přes telekomunikační zařízení vyzván k tomu, aby se vymočil a odložil oblečení (Tichý, 2009).

Záhy je pacient uložen na vyšetřovací stůl, kde se v indikovaných případech podává poslední premedikace – Buscopan, analgetika nebo sedativa. Následně se pacient napojí na injektor JKL (Tichý, 2009).

Standartním způsobem podání kontrastní látky je její **intravenózní aplikace**. Podávají se jodové kontrastní látky, které se z těla dostávají vylučovacím systémem (Ferda a kol., 2002, s. 18). U rizikových pacientů, mezi které se řadí například lidé s předchozí alergií na jodovou kontrastní látku, pacienti s renální insuficiencí nebo osoby s transplantovanou ledvinou, se doporučuje aplikace neionické kontrastní látky, která vyvolává méně nežádoucích účinků (Votrubová a kol., 2009, s. 48).

Standartním rozsahem pro PET/CT vyšetření je část od baze lební po proximální třetinu stehen (Votrubová a kol., 2009, s. 49).

5 RADIAČNÍ OCHRANA V NUKLEÁRNÍ MEDICÍNĚ

Koncepce radiační ochrany spočívá ve snaze zabránit vzniku deterministických účinků ionizujícího záření a stochastické účinky snížit na co nejnižší úroveň. **Deterministické účinky** vznikají v řádu dnů až týdnů poté, co dávka záření překročí určitý práh definovaný pro každou tkáň. Příkladem deterministických účinků je například akutní nemoc z ozáření, zelený zákal či sterilita. **Stochastické účinky** se projevují vznikem zhoubných nádorů a genetických vad. Jsou bezprahové a pravděpodobnost výskytu se zvyšuje s dávkou (Hušák a kol., 2009, s. 39). Doba latence stochastických účinků může být až desítky let – jedná se o pozdní účinky (Kupka a kol., 2015, s. 21).

Současná podoba radiační ochrany v České republice i ve světě, je založena zejména na doporučeních ICRP (Mezinárodní komise pro radiační ochranu) z roku 2007 (ICRP Publikace 103), na které navazují příslušné standardy IAEA (Mezinárodní agentura pro atomovou energii) a směrnice EU (Kubinyi a kol., 2018, s. 132).

Požadavky na zajištění radiační ochrany v ČR jsou legislativně upraveny atomovým zákonem. Orgánem vykonávajícím kontrolu nad využíváním jaderné energie a ionizujícího záření je **Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)** (Kubinyi a kol., 2018, s. 137). Mezi další úkoly SÚJB patří kontrola v oblasti zajišťování jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, stanovování limitů ozáření, sledování ozáření radiačních pracovníků a obyvatelstva, řízení činnosti Celostátní radiační monitorovací sítě a odborná spolupráce s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) (SÚJB).

5.1 Radiační ochrana pracovníků nukleární medicíny

V nukleární medicíně jsou radiační pracovníci vystaveni nejen vnějšímu ozáření, ale také vnitřnímu ozáření způsobeného vniknutím radioaktivní látky do organismu (Klener a kol, 2000, s. 330). Každý pracovník je vybaven **osobním dozimetrem**, a případně také prstovým dozimetrem (Klener a kol, 2000, s. 322). Vnitřní ozáření nabývá zpravidla zanedbatelných hodnot. Dozimetry používané pro měření vnějšího ozáření jsou filmové, termoluminiscenčními (TLD)

nebo s opticky stimulovanou luminiscencí (OSL) (Kubinyi a kol., 2018, s. 169 a 258).

Pro nošení osobního dozimetru jsou stanovena určitá pravidla. Osobní dozimetr musí být vždy umístěn na **referenčním místě**, které je mezinárodně stanoveno. Jedná se o levou horní část hrudníku a dozimetr je vždy umístěn na oděvu (Kubinyi a kol., 2018, s. 171). V případě, že pracovník nosí ochrannou stínící zástěru, umisťuje se dozimetr na její vnější stranu (Hušák a kol., 2009, s. 57). Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, upravuje pravidla pro nošení osobního dozimetru při používání ochranné zástěry. Radiační pracovník používající stínící zástěru musí mít přiděleny dva osobní dozimetry, z nichž jeden se umisťuje na její vnější stranu a druhý pod ní. V případě, že osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$ je vyšší než 10 mSv / měsíc, je nutné vyhodnotit i dozimetr pod zástěrou a následně výpočtem stanovit efektivní dávku, kterou radiační pracovník obdržel (Vyhláška 422/2016 Sb.). Vyhodnocování dozimetru provádí oprávněná dozimetrická služba každý měsíc (Hušák a kol., 2009, s. 57). Toto tvrzení platí dle Vyhlášky č. 422/2016 Sb. pouze pro **radiační pracovníky kategorie A**, kteří jsou dle této vyhlášky definováni jako pracovníci, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně, ekvivalentní dávku na oční čočku vyšší než 15 mSv nebo ekvivalentní dávku vyšší než 3/10 limitu ozáření pro kůži a končetiny. **Radiační pracovníci kategorie B** jsou dle této vyhlášky definováni jako ostatní radiační pracovníci, jiní než kategorie A.

Dozimetry jsou uzpůsobeny k měření **osobního dávkového ekvivalentu** $H_p(10)$ v hloubce tkáně 10 mm pod povrchem těla, $H_p(0,07)$ v hloubce tkáně 0,07 mm pod povrchem těla (Hušák a kol., 2009, s. 20) a $H_p(3)$ v hloubce tkáně 3 mm pod povrchem těla. (Kubinyi a kol., 2018, s.100). Vzhledem ke skutečnosti, že veličiny ekvivalentní a efektivní dávka, které jsou hlavními veličinami radiační ochrany a velmi důležitými v systému limitů pro omezování ozáření osob, nejsou přímo měřitelné, monitorují se na základě tzv. **operačních veličin**. Operační veličiny vhodným způsobem aproximují hlavní veličiny radiační ochrany. Mezi tyto operační veličiny mimo jiné spadá i osobní dávkový ekvivalent H_p . $H_p(10)$ odpovídá veličině radiační ochrany efektivní dávka, $H_p(0,07)$ odpovídá ekvivalentní dávce na kůži a $H_p(3)$ odpovídá ekvivalentní dávce na oční čočku.

Operační veličiny jsou definovány pouze pro vnější ozáření a pro monitorování pracoviště (Kubinyi a kol., 2018, s. 98). Při příjmu radioaktivní látky lze míru vnitřního ozáření radiačního pracovníka zjistit měřením aktivity radionuklidů v jeho těle nebo exkrettech a následně se stanovují hodnoty úvazku ekvivalentní a efektivní dávky (Vyhláška č. 422/2016 Sb.).

V systému limitů jsou definovány **limity obecné** (vztahující se na obyvatelstvo), **limity pro radiační pracovníky** (tzv. profesní ozáření) a **limity pro žáky a studenty** ve věku od 16 do 18 let. Limity pro studenta staršího 18 let jsou shodné jako pro radiačního pracovníka (Kubinyi a kol., 2018, s. 143-145).

Hodnoty těchto limitů dle Vyhlášky č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1: Hodnoty obecných limitů, limitů pro radiační pracovníky a limitů pro žáky a studenty

Veličiny	Limity		
	Obecné	Pro radiační pracovníky	Pro žáky a studenty
Součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření za 1 kalendářní rok (mSv)	1	20	6
Součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření za 5 po sobě jdoucích let (mSv)	-	100	-
Ekvivalentní dávka v oční čočce za 1 kalendářní rok (mSv)	15	-	15
Ekvivalentní dávka v oční čočce za 5 po sobě jdoucích let (mSv)		100	
Průměrná ekvivalentní dávka na každý 1 cm ² kůže bez ohledu na velikost ozářené plochy za 1 kalendářní rok (mSv)	50	500	150
Průměrná ekvivalentní dávka na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky za jeden kalendářní rok	-	500	150

Vyhláška č. 422/2016 Sb. definuje také **odvozené limity** pro radiační pracovníky udávané v $H_p(0,07)$, $H_p(3)$ a $H_p(10)$. Limity pro zevní ozáření jsou vyjádřeny prostřednictvím operačních veličin. Do této kategorie patří osobní dávkový ekvivalent v hloubce 0,07 mm, 3 mm a 10 mm. Pro vnitřní ozáření jsou tyto limity vyjádřeny příjmem jednotlivého radiofarmaka radiačním pracovníkem. Pokud nejsou překročeny tyto odvozené limity, považují se limity pro profesní ozáření za nepřekročené.

I přes přímý kontakt personálu nukleární medicíny s otevřenými zdroji záření je efektivní dávka těchto pracovníků udržována hluboko pod dávkovým limitem. Zpravidla se pohybuje mezi 0,5-2 mSv ročně (dávkový limit je 20 mSv/rok). Vyšší průměrná efektivní dávka je registrována pouze u radiologických asistentů na PET pracovištích, kde nabývá hodnot 2-3 mSv. Je dokázáno, že i přes několikaletou expozici pracovníků IZ nebylo zaznamenáno poškození zdraví těchto pracovníků, ani nedošlo k předčasnému úmrtí a zvýšenému výskytu nádorových onemocnění v důsledku expozice IZ (Kubinyi a kol., 2018, s. 258).

Ochrana pracovníků před zevním zářením stojí na třech hlavních pilířích. Jedná se o **ochranu časem**, kdy by se měl pracovník v blízkosti zdroje záření zdržovat co nejkratší dobu, **vzdáleností**, kdy by měl pracovník dodržovat dostatečný rozestup od zdroje záření, a **stíněním**, například použitím speciálních stínících nádob pro radionuklidy a ovladnou oddělenou od vyšetřovny stínící stěnou. Ochrana před vnitřní kontaminací je zajištěna zejména přísným dodržováním hygienických pravidel – používáním jednorázových gumových rukavic, prací s radiofarmakem v digestoři a zákazem konzumace jídla a pití v kontrolované pásmu (Hušák a kol., 2009, s. 97-100).

Při práci s radioaktivními látkami vzniká radioaktivní odpad, se kterým musí být patřičně zacházeno. Běžnou součástí pracovišť nukleární medicíny je tzv. **vymírací místnost**, kde jsou tyto odpady skladovány do doby, než jejich aktivita poklesne na bezpečnou hodnotu, za kterou se v praxi považuje 10 fyzikálních poločasů radionuklidu (Klener a kol, 2000, s. 341).

5.2 Radiační ochrana pacientů v nukleární medicíně

Pacienti, kteří jsou vyšetřováni pomocí hybridních PET/CT přístrojů jsou ozáření z vnitřních, i z vnějších zdrojů. Vnější zdroj je CT. Pacient, kterému bylo naaplikováno radiofarmakum, je vnitřně ozařován po celou dobu, kdy se tato látka nachází v jeho těle. Z takového pacienta se stává zdroj záření, který ozařuje i své okolí. Těmto pacientům je doporučováno se v den aplikace nestýkat s malými dětmi a těhotnými ženami, protože tito jedinci patří mezi osoby nejvíce citlivé na záření (Kubinyi a kol., 2018, s. 269). Proces vylučování radiofarmaka z těla pacienta lze také zrychlit přirozenými biologickými mechanismy, například zvýšeným přísunem tekutin a následným močením v případě radio-

farmak eliminovaných vylučovacím systémem nebo užíváním projímadel pro zrychlení střevní pasáže v případě vylučování radioaktivní látky gastrointestinálním traktem (Koranda a kol., 2014, s. 59).

Hlavní prioritou radiační ochrany pacienta je snížit ozáření z vnitřních a vnějších zdrojů na co nejmenší možné minimum (Kubinyi a kol., 2018, s. 270). Zároveň však aplikovaná aktivita a expoziční parametry CT musí být dostačující pro diagnostický přínos daného vyšetření. Potřebné aktivity radionuklidů se volí s ohledem na **diagnostické referenční úrovně** (DRÚ) stanovené pro standardního pacienta o hmotnosti 70 kg, které by neměly být rutinně překračovány (Koranda a kol., 2014, s. 57).

Radiační zátěž pacienta z vyšetření PET/CT závisí nejen na aktivitě aplikovaného radiofarmaka, ale také na způsobu použití CT. CT složku je možné využít pouze k vytvoření atenuační mapy sloužící pro korekci PET skenu na zeslabení anihilačních fotonů, nebo se využívá jako plnohodnotné CT vyšetření nativní/s jodovou kontrastní látkou. V prvním případě je ve tkáni radiační zátěž na relativně nízké úrovni a efektivní dávka se při celotělovém snímání pohybuje okolo 1 mSv. Při plnohodnotném CT se efektivní dávka při celotělovém snímání pohybuje v rozmezí 7-10 mSv. Efektivní dávka z radiofarmaka závisí na aplikované aktivitě. Většinou to bývá kolem 7 mSv v případě aplikace 350 MBq ^{18}F (Kubinyi a kol., 2018, s. 279).

Ve Fakultní nemocnici v Olomouci je průměrná aplikovaná aktivita pro standardního pacienta o hmotnosti 70 kg pacienta nižší. Tato hodnota se pohybuje okolo 200 MBq a výsledná efektivní dávka z celotělového PET vyšetření vychází na 3,8 mSv. CT složka představuje pro 70 kg pacienta efektivní dávku 10 mSv, takže celková efektivní dávka z hybridního PET/CT vyšetření se pohybuje okolo 14 mSv. Průměrná hmotnost pacientů na PET/CT vyšetření na zmíněném pracovišti je 78,8 kg, a tím pádem se průměrná aplikovaná aktivita pohybuje okolo 225 MBq (Ptáček, 2013).

V důsledku častějších vyšetření využívajících IZ, dochází ke zvyšování průměrné efektivní dávky obyvatel (Kubinyi a kol., 2018, s. 270). Dle Korandy a kol. (2014) efektivní dávka obyvatelstva z přírodních zdrojů představuje 3,5 mSv ročně a efektivní dávka z lékařského ozáření se odhaduje na 1,3 mSv ročně.

6 PET VYŠETŘENÍ V DĚTSKÉM VĚKU

Zhoubná nádorová onemocnění dětí tvoří méně než 1 % všech malignit a v závěsu za traumaty jsou druhou nejčastější příčinou smrti v nízkém věku. U dětí se nejčastěji vyskytují leukémie a lymfomy, tumory mozku, tumory ledvin, sarkomy měkkých tkání a kostí a nádory ze zárodečných buněk. V porovnání s nádory dospělých jsou dětské nádory typické rychlejším růstem a kratší dobou, za kterou dojde ke zdvojení nádorových buněk (Šlampa, Petera, 2007, s. 397–399).

Klíčem k úspěšné léčbě dětí s maligním onemocněním je stanovení lokality a velikosti primární nádorové léze, definování metastáz a klasifikace klinického stádia a biologické povahy onemocnění s cílem monitorování účinku protinádorové terapie. Dalším benefitem, který s sebou dané vyšetření přináší, je možnost brzy odhalit opětovný výskyt tumoru. Tyto požadavky je schopno přinést celotělové PET vyšetření, ke kterému se nejčastěji využívá analog glukózy ^{18}F – fluorodeoxyglukóza, která zprostředkovává zobrazení metabolických změn ještě před změnami anatomickými, a ve většině dětských nádorů se hojně akumuluje. Částečnou nevýhodou ^{18}F – FDG je její vlastnost vylučování močí, a proto není vhodné použít toto radiofarmakum pro nádory v oblasti močových cest (Koranda a kol., 2005).

Nejčastějšími diagnózami pro indikaci dětí k PET vyšetření jsou maligní lymfomy, sarkomy kostí a měkkých tkání (Votrubová a kol., 2009, s. 164).

Maligní lymfomy tvoří přibližně 1/10 dětských maligních tumorů a vyskytují se s nejvyšší frekvencí v období 7–11 let věku dítěte, přičemž u chlapců se maligní lymfomy vyskytují 3krát častěji než u dívek. Rozlišují se nehodgkinské lymfomy (60 %) a Hodgkinova choroba (40 %) (Šlampa, Petera, 2007, s. 403).

Votrubová a kol. (2009, s. 166) uvádí výsledky vlastní studie, ve které bylo provedeno 150 ^{18}F – FDG PET vyšetření u 91 dětských pacientů s lymfomem, z nichž 64 bylo Hodgkinova choroba (HD) a 27 nehodgkinský lymfom (NHL). Indikacemi k tomuto vyšetření bylo primární stážování tumoru (80 vyšetření) a v 70ti případech restaging po ukončení terapie s odstupem 4-6 týdnů. Výsledky uvádějí, že díky ^{18}F – FDG PET se u 30ti pacientů (z celkového počtu 91) modifikovala léčba a žádné léze nebyly ^{18}F – FDG PET falešně negativní.

Sarkomy měkkých tkání jsou 5. nečastější malignitou v dětském věku. Jsou prezentovány zejména rhabdomyosarkomy, které tvoří 60-70 % všech sarkomů měkkých tkání (Šlampa a Petera, 2007, s. 409). Nádory kostí jsou zastoupeny osteosarkomem, který je vysoce maligní a postihuje metafýzy dlouhých kostí, a Ewingovým sarkomem (Votrubová a kol., 2009, s. 167), který je typický pro oblast epifýz dlouhých kostí (Šlampa, Petera, 2007, s. 409).

¹⁸F – FDG PET přináší doplňující informace o rozsahu nádoru a zejména informace o mimoplicním metastazování, zejména v kostní dřeni a měkkých tkáních. Votrubová a kol. (2009, s. 169) uvádí výsledky studie Daldrup – Link a kol. (2001), kteří zobrazovali kostní metastázy pomocí PET, MR a kostní scintigrafie za účelem porovnání diagnostické přesnosti těchto zmíněných zobrazovacích metod. Zjistili, že pozitronová emisní tomografie vykazovala 90 % senzitivitu, magnetická rezonance 82 % a kostní scintigrafie pouze 71 % citlivost. PET dokázala s nejvyšší citlivostí (86 %) zhodnotit zejména metastatická ložiska v kostech o velikosti menší než 1 cm. Senzitivita MR a kostní scintigrafie byla pouze 57 % (Votrubová a kol., 2009, s. 169).

Nižší citlivost PET k detekci plicních metastáz menších než 1 cm, které se nejčastěji vyskytují při sarkomech kostí a měkkých tkání u dětí, a současně dobré citlivosti CT k jejich průkazu spělo k zavedení hybridního PET/CT vyšetření pro primární stážování sarkomů u dětí (Votrubová a kol., 2009, s. 169). Votrubová a kol. (2009, s. 169) uvádějí ve své publikaci výsledky studie prováděné Arushem a kol. (2007), kteří na souboru 19 dětí zjišťovali senzitivitu, specificitu a citlivost ¹⁸F – FDG PET/CT vyšetření k detekci vzdálených metastáz u dětí se sarkomy. Výsledky udávají 77 % senzitivitu, 83 % specificitu a 79 % přesnost.

Příprava dítěte k vyšetření

Příprava dítěte se neobejde bez informovanosti rodičů o daném vyšetření, kteří mají za úkol adekvátně připravit dítě k výkonu. Jedná se zejména o zajištění lačnění, dobré hydratace, případně podání perorální premedikace za účelem zklidnění dítěte. Rodiče by také měli dítěti přiměřeně k jeho věku vysvětlit, co ho čeká (Kupka a kol., 2015, s. 134).

Z důvodu bezpečnosti a omezení pohybu nejmenších se velmi často přistupuje k fixaci dítěte. Při vyšetření retardovaných dětí nebo velmi anxiózních dětí se může přistoupit také k farmakologickému zklidnění nebo celkové anestezii (Kupka a kol., 2015, s. 134).

Radiační ochrana dítěte

Děti jsou obecně více ohroženy vznikem stochastických účinků po ozáření, a proto je nutné každé lékařské ozáření velmi dobře odůvodnit. U dětí dochází také k rozdílné biodistribuci radiofarmaka, než u dospělých (Kubinyi a kol., 2018, s. 271), která je zapříčiněna ještě nedovyvinutím některých struktur nebo procesů v těle (Kupka a kol., 2015, s. 135).

Výpočet aplikované aktivity pro dítě se opírá o hodnoty aktivit pro dospělé jedince, přepočítané na velikost tělesného povrchu dítěte dle tabulek stanovených Evropskou asociací nukleární medicíny (EANM) (Kubinyi a kol., 2018, s. 272). Vzhledem k tomu, že by mohla nastat situace, kdy by u novorozenců byla aktivita vypočtená výše zmíněným způsobem příliš malá, že by neposkytla relevantní diagnostickou informaci, EANM doporučila minimální aplikované aktivity pro jednotlivá vyšetření. Například pro ^{18}F – FDG vyšetření trupu je to 26 MBq a pro mozek 14 MBq (Kupka a kol., 2015, s. 135).

ZÁVĚR

Hlavním cílem této přehledové bakalářské práce bylo dohledat a sumarizovat informace týkající se PET/CT vyšetření.

Tato práce se v krátké počáteční kapitole věnuje pozitronové emisní tomografii, jejímu vývoji a principu.

Druhá kapitola je uvedena informacemi o historii hybridních PET/CT přístrojů a jejich současném využití v medicíně, a dále je zaměřena na technické podmínky. Objasňuje výhody spojení pozitronové emisní tomografie s výpočetní tomografií, přibližuje informace o principu vzniku obrazu a zastoupení výpočetní tomografie v hybridním PET/CT systému. Na závěr jsou zde uvedeny informace o artefaktech, které mohou vznikat při vzniku obrazu a znehodnocovat výsledek vyšetření.

Třetí kapitola se věnuje vybraným radiofarmakům, která se využívají při vyšetření. V úvodu popisuje obecné vlastnosti těchto radioaktivních látek a jejich výrobu. Následně rozebírá jednotlivá radiofarmaka – jejich vlastnosti a klinický význam. Pro tuto práci byla vybrána radiofarmaka značená fluorem – konkrétně ^{18}F - fluorodeoxyglukóza, ^{18}F – cholin, ^{18}F – fluorothymidin, ^{18}F – DOPA a ^{18}F – FMISO.

Čtvrtá kapitola se věnuje popisu přípravy pacienta před PET/CT vyšetřením. Zaměřuje se na vlastní přípravu pacienta (lačnění, hydratace) a také přibližuje roli radiologického asistenta při tomto vyšetření. Součástí kapitoly jsou také informace o indikacích a kontraindikacích tohoto vyšetření.

Pátá kapitola se věnuje radiační ochraně pacientů a pracovníků v nukleární medicíně. Přibližuje informace o vlastním monitorování pracovníka a o limitech, které musí splňovat. Druhá část kapitoly zaměřující se na pacienty se věnuje zejména možnostem, jak snížit radiační dávku pacienta.

Poslední kapitola se zabývá dětským věkem. Nádory, které jsou s dětmi spojené, a samotným vyšetřením pomocí pozitronové emisní tomografie a PET/CT. Součástí kapitoly je také příprava dětského pacienta k výkonu a radiační ochrana.

V dnešní době, kdy je bohužel nárůst nádorových i jiných onemocnění, je PET/CT jako hybridní metoda s vysokou citlivostí široce používaná a role radiologického asistenta je u něj čím dál tím větší.

V bakalářské práci byly dohledány a předloženy poznatky odpovídající na všechny cíle, které byly v úvodu stanoveny – informace o pozitronové emisní tomografii a hybridní metodě PET/CT, informace o radiofarmacích, postupu vyšetření a radiační ochraně a informace o vyšetření v dětském věku.

REFERENČNÍ SEZNAM

AKAMATSU, G. a kol., 2017. A revisit to quantitative PET with 18 F-FDOPA of high specific activity using a high-resolution condition in view of application to regenerative therapy. *Annals of nuclear medicine* [online]. 31(2), 163-171 [cit. 2021-01-26]. ISSN 18646433. Dostupné z: doi:10.1007/s12149-016-1143-2

ARUSH, M. a kol., 2007. Positron emission tomography/computed tomography with 18fluoro-deoxyglucose in the detection of local recurrence and distant metastases of pediatric sarcoma. *Pediatric blood* [online]. 49(7), 901-5 [cit. 2021-01-27]. ISSN 15455009. Dostupné z: doi:10.1002/pbc.21150 citované In: VOTRUBOVÁ, Jana. *Klinické PET a PET/CT*. Praha: Galén, c2009, xi, 207 s. ISBN 978-80-7262-619-9.

BASU, S. a kol. *Fundamentals of PET and PET/CT imaging*. *Annals of the New York Academy of Sciences* [online]. 2011, 1228, 1-18 [cit. 2021-01-25]. ISSN 17496632. Dostupné z: doi:10.1111/j.1749-6632.2011.06077.x

BARKMANOVÁ, Jaroslava, 2009. Karcinoidy. *Onkologie* [online]. 3(6), 336-342 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.solen.cz/pdfs/xon/2009/06/04.pdf>

BEHESHTI, M. a kol., 2018. 18F-Fluorocholine PET/CT in the assessment of primary hyperparathyroidism compared with 99mTc-MIBI or 99mTc-tetrofosmin SPECT/CT: a prospective dual-centre study in 100 patients. *European Journal of Nuclear Medicine* [online]. 45(10), 1762-1771 [cit. 2021-01-26]. ISSN 16197070. Dostupné z: doi:10.1007/s00259-018-3980-9

BĚLOHLÁVEK, Otakar. *Positron emission tomography with fluorodeoxyglucose (FDG PET): atlas of examples of clinical use = Pozitronová emisní tomografie s fluorodeoxyglukózou (FDG PET): atlas příkladů klinického využití*. 2nd ed. Praha: Agentura Pankrác, 2004. ISBN 80-902873-8-7.

BIELESZ, Petr, 2018. Pracoviště PET/CT ve Fakultní nemocnici Olomouc opět obhájilo evropskou akreditaci [online]. [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <http://marketing.fnol.cz/novinky/pracoviste-pet-ct-ve-fakultni-nemocnici-olomouc-opet-obhajilo-evropskou-akreditaci/>

CUCCURULLO, V. a kol., 2017. Biochemical and Pathophysiological Premises to Positron Emission Tomography With Choline Radiotracers. *Journal of Cellular Physiology* [online]. 232(2), 270-275 [cit. 2021-01-26]. ISSN 00219541. Dostupné z: doi:10.1002/jcp.25478

DALDRUP-LINK, H. a kol., 2001. Whole-body MR imaging for detection of bone metastases in children and young adults: comparison with skeletal scintigraphy and FDG PET. *AJR. American journal of roentgenology* [online]. 177(1), 229-36 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0361803X. Dostupné z: doi:10.2214/ajr.177.1.1770229 citované In: VOTRUBOVÁ, Jana. *Klinické PET a PET/CT*. Praha: Galén, c2009, xi, 207 s. ISBN 978-80-7262-619-9.

FANTI, Stefano, Mohsen FARSAID a L. MANSI. *PET-CT beyond FDG: a quick guide to image interpretation*. Berlin: Springer, [2010]. ISBN 978-3-540-93908-5.

FERDA, Jiří, Boris KREUZBERG a Milan NOVÁK. *Výpočetní tomografie*. Praha: Galén, 2002. ISBN 80-246-0567-8.

FERDA, Jiří a kol., 2011. Hybridní zobrazení PET/CT s 18F-fluorothymidinem (18F-FLT) u maligních nádorů hlavy a krku. *Česká radiologie* [online]. 65(1), 41-50 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: http://www.cesradiol.cz/dwnld/CesRad_1101_41_50.pdf

FERDOVÁ, Eva a kol., 2013. Zobrazení karcinoidních nádorů pomocí PET/CT s podáním 18F-fluorohydroxyfenylalaninu. *Česká radiologie* [online]. 67(1), 52-58 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: http://www.cesradiol.cz/dwnld/CesRad_1301_52_58.pdf

HIRATA, K. a kol., 2019. The Roles of Hypoxia Imaging Using 18F-Fluoromisonidazole Positron Emission Tomography in Glioma Treatment. *Journal of Clinical Medicine* [online]. 8(8), 1088-1088 [cit. 2021-01-26]. ISSN 20770383. Dostupné z: doi:10.3390/jcm8081088

HUBER, G. a kol., 2018. Benefit of 18F-fluorocholine PET imaging in parathyroid surgery. *European Radiology* [online]. 28(6), 2700-2707 [cit. 2021-01-26]. ISSN 09387994. Dostupné z: doi:10.1007/s00330-017-5190-4

HUŠÁK, Václav. *Radiační ochrana pro radiologické asistenty*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2009, 138 s. Skripta. ISBN 978-80-244-2350-0.

CHEN, W. a kol., 2005. Imaging proliferation in brain tumors with 18F-FLT PET: comparison with 18F-FDG. *Journal of nuclear medicine: official publication, Society of Nuclear Medicine* [online]. 46(6), 945-52 [cit. 2021-01-26]. ISSN 01615505.

KLENER, Vladislav, ed. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000, 619 s. ISBN 8023837036.

KLETTER, K., 2010. PET/CT: More than the sum of two established imaging modalities? *European Journal of Radiology* [online]. 73, 449-451 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejrad.2009.12.020

KORANDA, Pavel. *Nukleární medicína*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, 201 s. Skripta. ISBN 978-80-244-4031-6.

KORANDA, Pavel a kol., 2005. Vyšetřovací metody nukleární medicíny v pediatrii. *Pediatric pro praxi* [online]. (6), 310-313 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.solen.cz/pdfs/ped/2005/06/09.pdf>

KRAFT, Otakar a Jan PEKÁREK. *Radiofarmaka: skriptum*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2014. ISBN 978-80-7464-523-5.

KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK. *Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami*. Praha: Grada Publishing, 2018, 304 s. ISBN 978-80-271-0168-9.

KUDLÁČKOVÁ, Šárka a kol., 2016. 18-F CHOLIN PET CT V PRIMODIAGNOSTICE KARCINOMU PROSTATY. *Česká urologie* [online]. 20(1), 57-64 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.czechurol.cz/pdfs/cur/2016/01/09.pdf>

KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína*. 6. přepracované vydání (v Nakladatelství P3K vydání druhé). V Praze: P3K, 2015, 161 s. ISBN 978-80-87343-54-8.

LANG, Otto a Milan KAMÍNEK, 2010. PET/CT v kardiologii. *Cor et Vasa* [online]. 52(9), 506-512 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: doi:10.33678/cor.2010.137

LÁZNÍČEK, Milan a Pavel KOMÁREK. *Základy radiofarmacie*. Praha: Karolinum, 1998. ISBN 80-7184-781-X.

METTLER, Fred A. a Milton J. GUIBERTEAU. *Essentials of nuclear medicine imaging*. 5th ed. Philadelphia, Pa.: Saunders Elsevier, c2006, xi, 577 s. ISBN 0721602010.

OWUNWANNE, Azuwuike, Mohan PATEL a Samy SADEK. *The Handbook of Radiopharmaceuticals*. London: Chapman & Hall, 1995. ISBN 0-412-54880-1.

PAN, T. a O. MAWLAWI, 2008. PET/CT in radiation oncology. Medical physics [online]. 35(11), 4955-66 [cit. 2021-01-26]. ISSN 00942405. Dostupné z: doi:10.1118/1.2986145

PTÁČEK, Jaroslav, 2013. Expertní podpora při hodnocení optimalizace na pracovištích nukleární medicíny: Zhodnocení situace při používání metody PET/CT z hlediska hodnocení dávek pacientům. Fakultní nemocnice Olomouc.

PTÁČNÍK, Václav a Jozef KUBINYI, 2016. PET/CT vyšetření u pacientů s karcinomem prostaty. *Urologie pro praxi* [online]. 17(1), 7-10 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: doi:10.36290/uro.2016.002

PRETZE, M, C WÄNGLER a B WÄNGLER, 2014. 6-[18F]fluoro-L-DOPA: a well-established neurotracer with expanding application spectrum and strongly improved radiosyntheses. *BioMed Research International* [online]. 2014, 674063-674063 [cit. 2021-01-26]. ISSN 23146133. Dostupné z: doi:10.1155/2014/674063

REINERT, C. a kol., 2019. Value of CT iterative metal artifact reduction in PET/CT-clinical evaluation in 100 patients. *The British journal of radiology* [online]. 92(1096), 20180756 [cit. 2021-01-26]. ISSN 1748880X. Dostupné z: doi:10.1259/bjr.20180756

SCHILLACI, O. a N. URBANO, 2019. Digital PET/CT: a new intriguing chance for clinical nuclear medicine and personalized molecular imaging. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging* [online]. 46(1222–1225) [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: doi:10.1007/s00259-019-04300-z

SOLLINI, M. a kol., 2016. Detection of a second malignancy in prostate cancer patients by using [(18)F]Choline PET/CT: a case series. *Cancer imaging: the official publication of the International Cancer Imaging Society* [online]. 16(1), 27 [cit. 2021-01-26]. ISSN 14707330. Dostupné z: doi:10.1186/s40644-016-0085-1

SÚJB: Úvod. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/o-sujb/uvod>

SÚKL. Souhrn údajů o přípravku. SÚKL, 2018. Sukls104271/2017 Dostupné z <http://www.sukl.cz/modules/medication/download.php?file=SPC115683.pdf&type=spc&as=fluorocholine-18f-synektik-spc>

SÚKUPOVÁ, Lucie. Radiační ochrana při rentgenových výkonech - to nej-důležitější pro praxi. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0709-4.

ŠLAMPA, Pavel a Jiří PETERA. Radiační onkologie. Praha: Galén, c2007, xviii, 457 s. ISBN 978-80-7262-469-0

TICHÝ, Lubomír, 2009. Vyšetřovací metoda - PET/CT. *Medicína pro pra-xi* [online]. 6(1), 46-49 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.medicinapropraxi.cz/pdfs/med/2009/01/11.pdf>

ÚZIS. Přístrojové vybavení zdravotnických zařízení ČR v roce 2018. In: ÚZIS [online]. 20. 11. 2019 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.uzis.cz/res/f/008275/ai-2019-06-t1-pristrojove-vybaveni-zz-2018.pdf>

ÚZIS. Stručný přehled činnosti oboru radiologie a zobrazovací metody za období 2007–2018. In: ÚZIS [online]. 08/2019 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.uzis.cz/res/f/008294/nzis-rep-2019-k19-a049-radiologie-a-zobrazovaci-metody-2018.pdf>

VOMÁČKA, Jaroslav. Zobrazovací metody pro radiologické asistenty. Dru-hé, doplněné vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015, 157 s. Odborná publikace. ISBN 978-80-244-4508-3.

VOTRUBOVÁ, Jana. Klinické PET a PET/CT. Praha: Galén, c2009, xi, 207 s. ISBN 978-80-7262-619-9.

Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016. In: Sbírka zákonů č. 422/2016. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/sb0172-2016.pdf>

ZAMRAZIL, Václav, 2007. Neuroendokrinní tumory. Interní medicína pro praxi [online]. 9(11), 514-519 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.internimedicina.cz/pdfs/int/2007/11/08.pdf>

ZIESSMAN, Harvey A., Janis P. O'MALLEY a James H. THRALL. Nuclear medicine: the requisites in radiology. 3rd ed. Philadelphia, Pa.: Mosby-Elsevier, c2006, xii, 580 s. [16] s. obr. příl. Requisites in radiology. ISBN 0323029469.

ZIESSMAN, Harvey A., Janis P. O'MALLEY a James H. THRALL, FAHEY, Frederic H., ed. Nuclear medicine. 4th ed. Philadelphia, Pa.: Elsevier Saunders, c2014, xi, 452 s. Requisites. ISBN 978-0-323-08299-0.

ZOGALA, David, 2020. Možnosti PET/CT v neperfuzní kardiologii. Cor et Vasa [online]. 62(6), 595-601 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: doi:10.33678/cor.2020.036

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
β^+	beta plus
^{11}C	uhlík
^{51}Cr	chrom
cm	centimetr
CT	výpočetní tomografie
3D	trojrozměrný
DRÚ	diagnostická referenční úroveň
EANM	Evropská asociace nukleární medicíny
EU	Evropská unie
^{18}F	fluor
^{18}F – FDG	fluorodeoxyglukóza
^{18}F – FLT	fluorothymidin
^{18}F – DOPA	L - 3,4 - dihydroxy – 6 - [^{18}F] - fluorofenylalanin
^{18}F – FMISO	fluoromisonidazol
g	gram
HD	Hodgkinova choroba
hod.	hodina
Hp	osobní dávkový ekvivalent
^{131}I	jód
^{111}In	indium
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
ICRP	Mezinárodní komise pro radiační ochranu
i.v.	intravenózní
IZ	ionizující záření
JKL	jodová kontrastní látka
keV	kiloeletronvolt
^{99}Mo	molybden
$^{99\text{m}}\text{Tc-MIBI}$	methoxyisobutylisonitril
MBq	megabecquerel
ml	mililitr
mm	milimetr

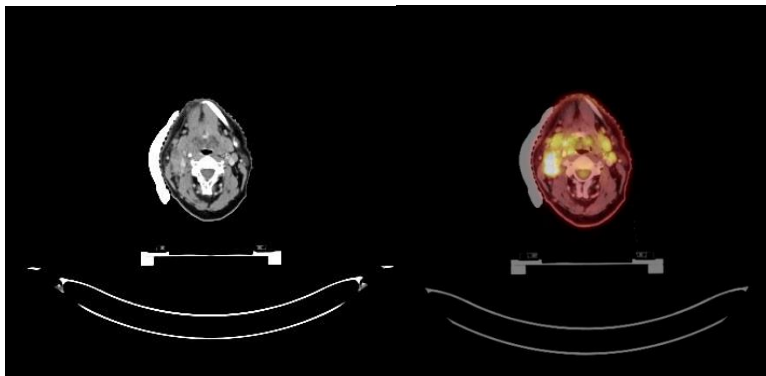
min	minuta
mmol/l	jednotka milimol na litr
MP – MRI	multiparametrická magnetická rezonance
mSV	milisievert
¹³ N	dusík
NET	neuroendokrinní tumory
NHD	nehodgkinský lymfom
ng	nanogram
ns	nanosekunda
¹⁵ O	kyslík
³² P	fosfor
PSA	prostatický specifický antigen
²³⁹ PU	plutonium
PET	pozitronová emisní tomografie
PET/CT	kombinace pozitronové emisní tomografie a výpočetní tomografie
PET/MRI	kombinace pozitronové emisní tomografie a magnetické rezonance
PN	Parkinsonova nemoc
resp.	respektive
SPECT	jednofotonová emisní tomografie
SÚKL	Státní ústav pro kontrolu léčiv
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
^{99m} Tc	izotop metastabilního technecia
T _{1/2}	poločas přeměny
²³⁵ U	uran
ÚZIS	Ústav zdravotnických informací a statistiky

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty obecných limitů, limitů pro radiační pracovníky a limitů pro žáky a studenty.....	31
---	----

PŘÍLOHY

Příloha 1:



CT

fúze

PET

Obr. 1: ^{18}F – FDG PET/CT vyšetření pacienta s karcinomem orofaryngu vpravo provedené před radioterapií.



PET s ^{18}F – FDG



PET s ^{18}F – FMISO
před terapií



PET s ^{18}F – FMISO
po 15ti ozařovacích
frakcích

Obr. 2:

Text:

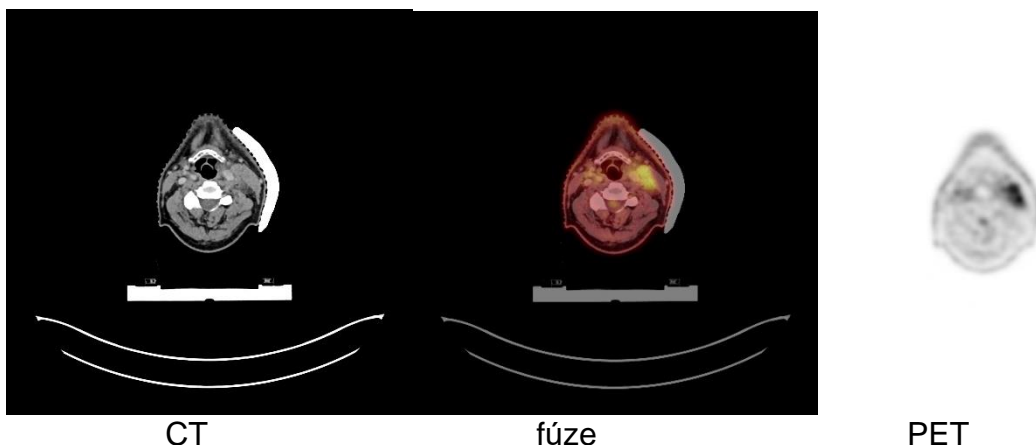
^{18}F – FDG - patologická akumulace glukózy v paketu lymfatických uzlin vpravo na krku

^{18}F – FMISO (před terapií) – patologická akumulace v části paketu lymfatických uzlin

^{18}F – FMISO (po terapii) – bez patologické akumulace, tzn. došlo k regresi hypoxie

(zdroj: archiv KNM FNOL)

Příloha 2:



Obr. 3: Vyšetření ^{18}F – FDG PET/CT u pacienta se spinocelulárním karcinomem tonzilly vlevo pro plánování radioterapie.



PET s ^{18}F – FDG



PET s ^{18}F – FMISO

Obr. 4

Text:

^{18}F – FDG – glukózuakumulující paket lymfatických uzlin vlevo na krku

^{18}F – FMISO – bez patologické akumulace, tzn. bez přítomnosti hypoxických okrsků v nádorové tkáni, což znamená, že tkáň by neměla být radiorezistentní

(Zdroj: archiv KNM FNOL)