

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH STUDIÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Vojtěch Kubín

Univerzita Pardubice
Fakulta zdravotnických studií

Systém radiální ochrany pro pracovníky oddělení PET/CT

Bakalářská práce

2022

Vojtěch Kubín

Univerzita Pardubice
Fakulta zdravotnických studií
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Kubín**
Osobní číslo: **Z19044**
Studijní program: **B5345 Specializace ve zdravotnictví**
Studijní obor: **Radiologický asistent**
Téma práce: **Vzdělávací systém radiační ochrany pro pracovníky oddělení PET/CT**
Téma práce anglicky: **Education system of radiation protection for PET/CT employees**
Zadávací katedra: **Katedra klinických oborů**

Zásady pro vypracování

1. Studium literatury, sběr informací a popis současného stavu řešené problematiky.
2. Stanovení cílů a metodiky práce.
3. Příprava a realizace výzkumného šetření dle stanovené metodiky.
4. Analýza a interpretace získaných dat.
5. Zhodnocení výsledků práce.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

FILIPOVÁ A., PEJCHAL J., ŠINKOROVÁ Z., TICHÝ A., ZÁRYBNICKÁ L., 2016. Radiační ochrana při radiační mimořádné události. [Hradec Králové]: Univerzita obrany. ISBN 978-80-7231-366-2.
HRABAL, V., PAVELKOVÁ, I., 2010. Jaký jsem učitel? Praha: Portál. ISBN 978-80-7367-755-8.
HUŠÁK, V., 2009. Radiační ochrana pro radiologické asistenty. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-244-2350-0.
KUBINYI, J., SABOL, J., VONDRÁK, A., 2019. Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami. Praha: Grada. ISBN 978-80-271-0168-9.
ŠVEC, J., 2014. Radiační ochrana. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě. ISBN 978-80-7464-571-6.

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Pavel Pešat, Ph.D.**
Katedra klinických oborů

Datum zadání bakalářské práce: **1. prosince 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. dubna 2022**

L.S.

doc. Ing. Jana Holá, Ph.D. v.r.
děkanka

Mgr. Jan Pospíchal, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. března 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA

Prohlašuji:

Práci s názvem Vzdělávací systém radiační ochrany pro pracovníky oddělení PET/CT jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše. Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 28. 04. 2022

Vojtěch Kubín v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce RNDr. Pavlu Pešatovi, Ph.D., že mi byl po celou dobu nápomocen se zpracováním mé práce, obzvlášť za doporučení velmi vhodné literatury.

ANOTACE

Práce se skládá ze dvou částí, teoretické a výzkumné. V teoretické části budou popsány základní pojmy nukleární medicíny. Budou vyloženy principy zobrazovacích metod využívajících jevu pozitronové emisní tomografie. Další část bude věnována edukaci radiačního pracovníka.

Ve výzkumné části je vytvořen dotazník, který bude cílit na pojmy, jež souvisí a jsou důležité v radiační ochraně.

KLÍČOVÁ SLOVA

PET/CT, Radiační ochrana, Nukleární medicína

TITLE

Education System of Radiation Protection for PET/CT Department's Staff.

ANNOTATION

This work consists of two separate parts, the theoretical one and the research one. The fundamental terms of nuclear medicine will be described in the theoretical part. The basic principles of diagnostical methods using the positron emission tomography effect will be described as well. The next part will be devoted to the education of radiation operative.

A questionnaire will be made for the research part. This questionnaire is targeting on terms which are yet connected with the radiation protection and yet significant for it.

KEYWORDS

PET/CT, Radiation protection, Nuclear medicine

OBSAH

Úvod.....	13
1 Cíl práce.....	14
1.1 Dílčí cíl.....	14
TEORETICKÁ ČÁST	15
2 Pozitronová emisní tomografie.....	15
2.1.1 Hybridní PET/CT.....	15
3 Zdroje ionizujícího záření.....	16
3.1 Základní pojmy	16
3.2 Vlastnosti zdrojů ionizujícího záření	16
3.3 Radioaktivita	18
3.3.1 Radioaktivní přeměna	19
3.4 Aktivita.....	19
3.5 Poločas přeměny	20
3.6 Radionuklidy používané v nukleární medicíně.....	21
3.7 Pole ionizujícího záření.....	22
3.8 Interakce ionizujícího záření s látkou	24
3.9 Interakce nabitých částic	25
3.10 Interakce nepřímo ionizujícího záření	26
3.11 Dozimetrie ionizujícího záření	28
3.11.1 Expozice.....	28
3.11.2 Absorbovaná dávka.....	29
3.12 Veličiny v radiační ochraně.....	30
3.12.1 Dávkový ekvivalent	31
3.12.2 Orgánová dávka	32
3.12.3 Ekvivalentní dávka	32
3.12.4 Efektivní dávka	33

3.12.5	Kolektivní efektivní dávka.....	34
3.12.6	Operační veličiny	35
3.13	Biologické účinky záření	36
3.13.1	Přímé a nepřímé účinky záření	37
3.13.2	Fáze působení	38
3.13.3	Stochastické a deterministické účinky	39
3.14	Zásady radiační ochrany	43
3.14.1	Zajištění radiační ochrany a monitorování ionizujícího záření	45
VÝZKUMNÁ (PRAKTICKÁ) ČÁST		49
4	Metodika výzkumné (praktické) části.....	49
4.1	Charakteristika kvízu	49
4.2	Zpracování a prezentace dat.....	51
4.3	Výsledky	51
4.3.1	Otázka 1	52
4.3.2	Otázka 2	53
4.3.3	Otázka 3	54
4.3.4	Otázka 4	55
4.3.5	Otázka 5	56
4.3.6	Otázka 6	57
4.3.7	Otázka 7	58
4.3.8	Otázka 8:	59
4.3.9	Otázka 9:	60
4.3.10	Otázka 10:	61
4.3.11	Otázka 11:	62
4.3.12	Otázka 12	63
4.3.13	Otázka 13	64
4.3.14	Otázka 14	65

4.3.15	Otázka 15	66
4.3.16	Otázka 16	67
4.3.17	Otázka 17	68
4.3.18	Otázka 18	69
4.3.19	Otázka 19	70
4.3.20	Otázka 20	71
4.3.21	Popisné shrnutí informací respondentů.....	72
5	Diskuze	74
6	Závěr	79
7	Použitá literatura	81
7.1	Primární zdroje.....	81
7.2	Sekundární zdroje.....	81
7.3	Internetové zdroje.....	81
8	Přílohy.....	82

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1 - Schéma scintilačního detektoru (KUCHAŘÍKOVÁ, 2019).....	17
Obrázek 2 - Jednoduché schéma anihilace (WIKISKRIPTA, 2018).....	17
Obrázek 3 - moderní dozimetr (VF NUCLEAR, 2022)	29
Obrázek 4 - Rolf Sievert (KUBINYI et al., 2018).....	31
Tabulka 1 - Přehled používaných radionuklidů v NM (KUBINYI et al., 2018)	22
Tabulka 2 - Vlastnosti různých druhů záření (KUBINYI et al., 2018)	24
Tabulka 3 - Výsledné produkty hlavních interakcí fotonů s látkou (KUBINYI et al., 2018) ..	27
Tabulka 4 - Vývoj tkáňových faktorů (KUBINYI et al., 2018)	33
Tabulka 5 - vztah operačních a hlavních veličin radiační ochrany (KUBINYI et al., 2018) ...	36
Tabulka 6 - radiosenzitivita tkání a orgánů (KUBINYI et al., 2018).....	41
Tabulka 7 - riziko smrti při různých činnostech (KUBINYI et al., 2018).....	44
Tabulka 8 - ozáření zdroji různých kategorií a jejich deterministické účinky (KUBINYI et al., 2018)	46
Tabulka 9 - četnosti otázky 1	52
Tabulka 10 - četnosti otázky 2	53
Tabulka 11 - četnosti otázky 3	54
Tabulka 12 - četnosti otázky 4	55
Tabulka 13 - četnosti otázky 5	56
Tabulka 14 - četnosti otázky 6	57
Tabulka 15 - četnosti otázky 7	58
Tabulka 16 - četnosti otázky 8	59
Tabulka 17 - četnosti otázky 9	60
Tabulka 18 - četnosti otázky 10	61
Tabulka 19 - četnosti otázky 11	62
Tabulka 20 - četnosti otázky 12	63
Tabulka 21 - četnosti otázky 13	64
Tabulka 22 - četnosti otázky 14	65
Tabulka 23 - četnosti otázky 15	66
Tabulka 24 - četnosti otázky 16	67
Tabulka 25 - četnosti otázky 17	68
Tabulka 26 - četnosti otázky 18	69

Tabulka 27 - četnosti otázky 19	70
Tabulka 28 - četnosti otázky 20	71
Tabulka 29 - délka praxe respondentů	72
Tabulka 30 - kategorie radiačních pracovníků	72
Tabulka 31 - délka pracovní doby na oddělení NM	73
Tabulka 32 - pohlaví respondentů	73

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CT	Počítačová tomografie
DNA	Deoxyribonukleová kyselina
DSB	Double strand break
DRÚ	Diagnostické referenční úrovně
IXRCP/ICRP	Mezinárodní komise radiologické ochrany
MR	Magnetická rezonance
NM	Nukleární medicína
PET	Pozitronová emisní tomografie
SPECT	Jednofotonová emisní tomografie
SSB	Single strand break
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost

ÚVOD

Držitel povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření musí zajišťovat systém průběžného vzdělávání radiačních pracovníků tak, aby pracovníci znali obecná pravidla a postupy radiační ochrany, opatření týkající se radiační ochrany při výkonu radiační činnosti při běžném provozu, za předvídatelných odchylek od tohoto provozu nebo při vzniku radiační mimořádné události a vnitřní předpisy a dokumentaci pro povolovanou činnost. Radiační ochrana na pracovišti nukleární medicíny je o to složitější, že se zde využívají jak generátory záření (např. výpočetní tomografie), tak radionuklidové zdroje (zejména radiofarmaka). Na pracovišti pozitronové emisní tomografie (PET) je pak třeba zohlednit vysokou pronikavost anihilačního záření gama.

Je žádoucí, aby radiační pracovníci rozuměli také fyzikálním jevům, které se uplatňují při vzniku ionizujícího záření a při jeho interakci s tkáněmi. Rozsah informování, průběžného vzdělávání a ověřování znalostí radiačních pracovníků je výslovně uveden v § 50 Vyhlášky č. 422/2016 Sb. Závěrečná práce je specificky zaměřena na problematiku vzdělávání pracoviště PET/CT, jež je nutné zajistit pro radiační pracovníky.

Kvalifikace a znalosti jaderně-fyzikální problematiky se u nich výrazně liší: lékaři, zdravotní sestry, radiologičtí asistenti a také pomocný personál. Jako vhodný se jeví víceúrovňový model obtížnosti s jednoduchými zpětnovazebními prvky, např. kvízy, které umožňují pracovníkům ověřit si své znalosti ještě před absolvováním evidovaných zkoušek.

Cílem vzdělávání radiačních pracovníků je nejen splnění legislativních požadavků, ale také skutečné zvýšení jejich znalostí a důvěry v účinnost radiační ochrany tak, aby nevnímali na pracovišti nukleární medicíny obavy z ohrožení svého zdraví.

1 CÍL PRÁCE

Cílem je vytvořit vzdělávací obsah k zajištění vzdělávání radiačních pracovníků v oblasti radiační ochrany na pracovišti PET/CT. Radiační ochrana na oddělení nukleární medicíny všeobecně je složitější. Používají se tu generátory záření a zároveň radionuklidové zdroje. Především pak na pracovišti PET nebo PET/CT je třeba zohlednit vysokou pronikavost anihilačního záření. V zásadě je tedy třeba aby radiační pracovníci rozuměli všem fyzikálním jevům, na které mohou narazit.

1.1 Dílčí cíl

Dílčím cílem je zjistit, jak jsou radiační pracovníci seznámeni s fyzikálními jevy, které se uplatňují při diagnostice metodami nukleární medicíny. Šetření je prováděno pomocí kvízu/testu, který obsahuje základní otázky, týkající se jaderně–fyzikální problematiky. Pomocí testu jsou pak odhalena slabá místa ve vzdělanosti radiační ochrany, které je možné posílit nově vzniknutým vzdělávacím materiálem.

TEORETICKÁ ČÁST

2 POZITRONOVÁ EMISNÍ TOMOGRAFIE

Pozitronová emisní tomografie (PET) je vyšetřovací metoda používaná v nukleární medicíně. Oproti klasické scintigrafii jsou využívány jen radiofarmaka s pozitronovými zářiči. Při PET jsou v detektoru zaznamenávány v koincidenci dva fotony anihilačního záření gama, které vyletují od místa anihilace na opačné strany. Z údajů o místě a čase detekce lze zpětně určit místo anihilace pozitronu v těle pacienta, tj. lokalizovat tkáň, v níž se atom radionuklidu nacházel. PET doplňuje několik výhod, které scintigrafické vyšetření nemá. Především je to lepší rozlišení, vyšší citlivost a možnost sledovat určitá radiofarmaka, která scintilační kamerou snímat nelze (KUBINYI et al., 2018).

Diagnostické využití pozitronové emisní tomografie spočívá ve zkoumání fyziologických a biochemických procesů v lidském těle. Pomocí PET je tedy možné sledovat například metabolismus glukózy, metabolismus aminokyselin, perfuze tkání atd (KUBINYI et al., 2018).

Detailní princip PET spočívá v anihilaci pozitronu. Ten na své dráze, cca 0,5 – 2mm, ztrácí veškerou svou energii, spojuje se s elektronem a zaniká. Poté je jejich energie vyzářena v podobě dvou anihilačních fotonů. Každý foton disponuje energií o hodnotě 0,511 MeV. Tyto dva fotony zachytávají detektory, které jsou zapojeny v tzv. koincidenčním obvodu. Fotony jsou tedy detekovány pouze tehdy, když oba mají energii 0,511 MeV, směřují po přímce od sebe a dopadají na detektory v protilehlých stranách (KUBINYI et al., 2018).

V dnešní době patří PET mezi nejlepší a nejvíce se rozvíjející zobrazovací modalitty. Má velký klinický přínos zejména v oblasti diagnostiky nádorů. Nejvíce rozšířené radiofarmakum je ^{18}F -fluoro-deoxy-glukóza, dále pak radiofarmaka s ^{68}Ga (KUBINYI et al., 2018).

2.1.1 Hybridní PET/CT

V oblasti diagnostického zobrazování probíhá intenzivní výzkum a vývoj. Samostatné PET přístroje už prakticky nevyrábějí. Kombinují se např. s výpočetním tomografem CT do hybridních přístrojů PET/CT, nebo s přístroji magnetické rezonance MR do hybridního PET/MR. Hybridní přístroj vzniká přidáním „další gantry“ s CT přístrojem, což je vnější rozdíl patrný na první pohled. Tento způsob slučování obrazů eliminuje nedostatky výrazně horší kvality anatomické informací poskytované PET. V praxi to znamená, že přístroj dokáže provést CT a PET vyšetření ve stejných časových i geometrických podmínkách. Díky fúzi obrazu z CT

i PET je možné přesné sledování metabolismu radiofarmaka (PET) doplněné o detailní anatomické informace (CT).

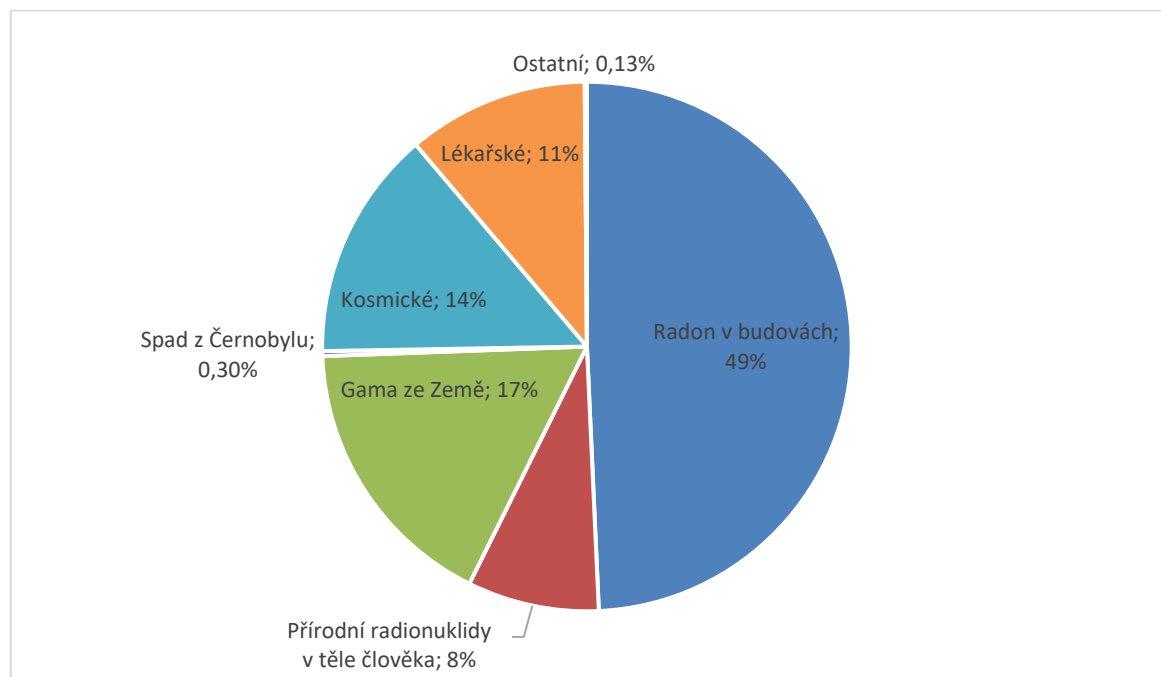
Nevýhody PET/CT přístroje spočívají ve vysoké pořizovací ceně a také ve větší radiální zátěži pro pacienta než u ostatních zobrazovacích modalit (KUBINYI et al., 2018).

3 ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

3.1 Základní pojmy

Z přírodních zdrojů a z kosmického záření jsme stále vystavováni ionizujícímu záření, toto záření nelze do jisté míry ovlivnit. Dále jsme vystavováni ionizujícímu záření z umělých zdrojů, které už ovlivnitelné je. Využívá se především v oblasti medicíny, ale můžeme jej najít i v oblasti průmyslové. Z toho důvodu je také nutné počítat s výskytem nehod v podobě nechtěného ozáření osob nebo úniku do životního prostředí. Veškeré manipulace s ionizujícím zářením proto podléhají kontrole, která má za cíl, co nejvíce omezit jejich škodlivý dopad.

Graf 1 - Zdroje ionizujícího záření

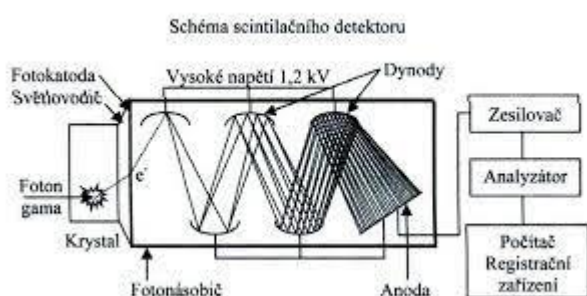


3.2 Vlastnosti zdrojů ionizujícího záření

Zdroje ionizujícího záření, které se využívají v NM, je možné řadit do tří skupin:

- radionuklidové zariadené otevřené,
- generátory záření (urychlovače, rentgenové lampy),
- jaderné reaktory.

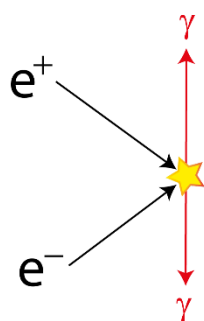
V oboru NM mají zásadní význam **radiofarmaka**. Jsou to složité chemické sloučeniny, které se zapojují do metabolismu člověka. Molekuly nosiče radiofarmaka jsou značeny vhodným radionuklidem, jehož rozpadové produkty, nejčastěji záření gama, umožňují zjistit, jak se radiofarmakum v různých orgánech a tkáních metabolizuje. Distribuci radiofarmaka zjišťujeme pomocí speciálních detektorů záření gama, které umožňují záření nejen detekovat, ale také stanovit místo, ve kterém záření vzniklo. Základním zobrazovacím přístrojem je tzv. gamakamera, která četnosti detekovaného záření gama převádí na dvourozměrný obraz. Zaostření gamakamery na tělo pacienta se provádí vycloněním (kolimací), při které jsou propouštěny a detekovány pouze ty fotony záření gama, které prolétly po přímce spojující místo rozpadu radioaktivního atomu v radiofarmaku, kolimátor a detektor (viz. **Obrázek 1**). Kolimátor také potlačuje šum vytvářený rozptýleným zářením. Třírozměrný obraz pak vytváří



Obrázek 1 - Schéma scintilačního detektoru (KUCHAŘÍKOVÁ, 2019)

složitější zařízení SPECT, ve kterém se gamakamera pohybuje kolem pacienta. Při zpracování obrazu využívá SPECT výpočetní tomografické metody, jejímž výsledkem je 3D zobrazení orgánů a tkání v těle pacienta. Sofistikovanější a technicky náročnější metodou tvorby 3D obrazu distribuce radiofarmaka je detekce anihilačního záření

gama, které vzniká při anihilaci pozitronu uvolněného po rozpadu pozitronového radionuklidu, tzv. pozitronová emisní tomografie PET. Dva anihilační fotony se pohybují z místa anihilace od sebe a jsou detekovány ve speciálním detektoru umístěném v tubusu, který obklopuje tělo



Obrázek 2 - Jednoduché schéma anihilace (WIKISKRIPTA, 2018)

pacienta (tzv. gantry). Místo anihilace pozitronu a oba detektory, které zaregistrovaly anihilační fotony na opačných stranách těla pacienta leží opět na přímce a analýzou geometrie detekované anihilace lze opět stanovit místo, ve kterém k anihilaci došlo (viz. **Obrázek 2**). Výpočetním tomografickým zpracováním velkého počtu takových anihilací můžeme pak vytvořit 3D obraz distribuce radiofarmaka v těle pacienta. Při PET zobrazování je tedy místo kolimátoru a detektoru jednofotonové SPECT metody použita koincidenční detekce dvou fotonů vznikajících při anihilaci pozitronu. Výhodou PET modality vůči SPECT je lepší rozlišení

výsledného obrazu, které však stále ještě nedosahuje rozlišení výpočetního tomografu CT. Proto se zobrazovací metody SPECT a PET kombinují s zobrazením metodou CT do metod SPECT/CT, resp. PET/CT, při kterých jsou obrazy obou modalit snímány současně a které jsou následně spojeny (fúzovány) do kombinovaného obrazu. Ve vzniklém fúzovaném 3D obrazu je tedy spojena jak diagnostická informace o metabolismu radiofarmaka, tj. funkci orgánů, tak i diagnostická informace o jejich anatomii.

Hybridní přístroje kombinující modalitu nukleární medicíny a rentgenové, resp. MR tomografické modalitu patří v současné době k nejdokonalejším 3D zobrazovacím diagnostickým přístrojům. Výpočetní tomografie využitá ve SPECT/CT, PET/CT nebo PET/MR hybridní modalitě značně vylepšuje informaci o anatomických poměrech ve vyšetřované oblasti, ale také doplňuje poznatky získané pomocí samotného vyšetření SPECT nebo PET. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.3 Radioaktivita

Radioaktivita je charakteristická vlastnost nestabilních atomových jader. Jde o přeměnu atomového jádra jednoho prvku na atomové jádro jiného prvku za současné emise částic nebo fotonů. Každé atomové jádro obsahuje určitý počet protonů Z a neutronů N . Součet počtu protonů a neutronů vyjadřuje tzv. nukleonové číslo A , pro které tedy platí (KUBINYI et al., 2018, HUŠÁK, 2009):

$$Z + N = A$$

Pro každý prvek je charakteristický počet protonů v jádře, kterému odpovídá počet elektronů kolem jádra obíhajících.

Nuklid je atom s přesně definovaným počtem protonů a neutronů v jádře. Většina prvků má několik různých izotopů, tj. atomů, které se liší počtem neutronů v atomovém jádře a počet protonů, který charakterizuje chemickou identitu prvku, mají stejný. Některá atomová jádra mají příliš velký počet neutronů nebo protonů (případně přebytek vnitřní energie) a díky tomu jsou nestabilní, samovolně se přebytečných částic zbavují tak, že se rozpadají, přebytečné částice se z jádra uvolňují a odnášejí s sebou také část přebytku energie. Radionuklid je tedy nuklid, který podléhá takové samovolné radioaktivní přeměně. (KUBINYI et al., 2018; ŠVEC, 2014)

Radionuklidy jsou produktem jaderných reakcí nebo jaderného štěpení těžkých nestabilních atomových jader, které se velmi často štěpí na dvě lehčí jádra, která jsou většinou opět nestabilní – vznikají dceřiné radionuklidy řazené postupně do tzv. rozpadové řady.

Umělé radionuklidy jsou vyráběny v urychlovačích, jaderných reaktorech a jaderných generátorech. Cílená výroba radionuklidu v jaderném reaktoru začíná vložením neradioaktivního materiálu, tzv. terče. Ten se po určité době (hodiny až dny) ozařuje proudem neutronů. Urychlovače částic, tj. zejména cyklotrony, mohou vhodnými nabitými částicemi „ostřelovat“ neradioaktivní prvek, terč, ve které postupně jadernými reakcemi vznikají atomová jádra radionuklidu. Tímto způsobem se připravují např. pozitronové zářiče. Konkrétně ^{18}F , hojně využívaný v nukleární medicíně v metodách využívajících jevu pozitronové emise, tj. PET a PET/CT. Další možností, jak získat radionuklidy – obzvláště ty, které mají krátký poločas rozpadu – je použít radionuklidový generátor. Radionuklidové generátory obsahují obvykle dva radionuklidy, mateřský a dceřiný. Mateřský radionuklid se přeměňuje na dceřiný, který je produktem radioaktivní přeměny probíhající přímo v generátoru. Mateřský radionuklid vyráběný v jaderném reaktoru musí mít výrazně delší poločas rozpadu než dceřiný. Typickým příkladem je $^{99\text{m}}\text{Tc}$ vyráběné pro tvorbu radiofarmak v NM z ^{99}Mo . (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009)

3.3.1 Radioaktivní přeměna

Každý rozpad nebo radioaktivní přeměna může probíhat několika způsoby a s různou pravděpodobností. Nejčastější způsob radioaktivního rozpadu je rozpad alfa. Mateřské jádro vyzařuje částici **alfa**, kterou tvoří dva protony a dva neutrony. Dále existuje radioaktivní přeměna **beta**, při které je emitována částice beta minus (**elektron**) nebo beta plus (**pozitron**). Radioaktivní rozpad beta se ale neomezuje jen na emisi elektronů a pozitronů. Při ději, kdy se energeticky excitované jádro dostává do stabilního stavu bez emise alfa nebo beta částice pozorujeme emisi záření **gama**. Tento jev se nazývá **izomerický přechod**. Zvláštním případem je pak děj, kdy pozorujeme záchyt orbitálního elektronu atomovým jádrem – elektronový záchyt (KUBINYI et al., 2018).

3.4 Aktivita

Aktivita je jednou z hlavních veličin v radiační ochraně. Charakterizuje radionuklid z hlediska jeho radioaktivních přeměn, které probíhají za jednotku času.

$$A = -dN/dt \cong -\Delta N/\Delta t \quad (1)$$

Jednotkou aktivity je 1 Becquerel (1 **Bq**). Jednotka byla pojmenována po Henrim Becqueurelu, což byl vědec a průkopník v oblasti radioaktivity (**1Bq = 1 rozpad/1 sekunda**). Tato jednotka je ale pro praktické použití příliš malá, proto obvykle užíváme její násobky (například 1MBq = jeden megabecquerel = 10^6 Bq). Starší jednotkou, se kterou se ještě můžeme setkat a která se

používá např. v USA, je jednotka 1 Curie (1 Ci). Pro převod mezi jednotkami Becquerel a Curie platí vztah $1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$ (KUBINYI et al., 2018).

Aktivita vyjadřuje počet radioaktivních přeměn za jednotku času, pomocí ní lze také určit množství radioaktivní látky a počet emitovaných částic. Aktivita radionuklidu vyjadřuje počet rozpadů za sekundu a při známém způsobu rozpadu z ní lze určit také počet vyzářených částic. Úhlové rozdělení částic emitovaných při rozpadu je **izotropní**, což znamená, že částice jsou vyzařovány stejnoměrně do všech směrů. Aktivita je veličina související s radioaktivní přeměnou a nelze ji tedy aplikovat na jiné než radioaktivní zářiče.

Existuje řada zdrojů záření, u kterých je vhodné použít obecnější veličinu, a to **emisi zdroje** (N_z), která je definována jako počet částic emitovaných zdrojem záření do okolního prostředí za jednotku času. Emise zdroje je tedy veličina, kterou je možné použít jako univerzální v případě jakýchkoli zdrojů záření, její jednotkou je s^{-1} . Protože některé zdroje ionizujícího záření neemitují částice stejnoměrně do všech směrů (lineární urychlovač, rentgenka) a úhlové rozdělení emitovaných částic tedy není izotropní, zavádí se úhlová distribuce emitovaných částic $N = N(\Delta\Omega)$, kde $\Delta\Omega$ je element prostorového úhlu, do nějž jsou částice emitovány. Graficky se tato distribuce vyjadřuje ve formě tzv. směrové vyzařovací charakteristiky zdroje. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.5 Poločas přeměny

Pokud hovoříme o přeměnové konstantě, je třeba také zmínit poločas přeměny. Je to doba, během které dojde k poklesu aktivity na polovinu výchozí hodnoty.

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \cong 0,693 / \lambda \quad (2)$$

kde poločas přeměny $T_{1/2}$ se vyjadřuje v jednotkách času. S ohledem na vztah (1) uvádím řešení s rozpadovou konstantou. Odvození vzorce (2) je pak snadné.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (3)$$

U krátkodobých radionuklidů mluvíme řádově o desítkách sekund, zatímco radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu se mohou rozpadat i tisíce let. Jednotky pro poločas rozpadu a pro přeměnovou konstantu musí být konzistentní, tedy poločas přeměny v s, přeměnová konstanta v s^{-1} . (KUBINYI et al., 2018).

Pokles aktivity radionuklidu je charakterizován jeho fyzikálním poločasem rozpadu ($T_{1/2}$). Pokud je však radionuklid navázán na radiofarmakum, které se v těle účastní metabolismu,

uplatňuje se ještě vylučování radionuklidu např. močí, potem, dechem apod. Rychlost tohoto vylučování charakterizuje **biologický poločas přeměny** (T_b). Biologický poločas přeměny vyjadřuje, za jakou dobu se z těla vyloučí polovina z původního množství radioaktivní látky a je tedy důležitou veličinou např. pro nukleární medicínu a obory, ve kterých hraje důležitou roli příjem a výdej radiofarmak z těla. Skutečnou situaci poklesu koncentrace radioaktivní látky v lidském těle charakterizuje **efektivní poločas přeměny** (T_{ef}), který je stejný jako doba, během níž se celková aktivita radionuklidu podaného do organismu zmenšila na polovinu. Pro efektivní poločas přeměny platí vztah:

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_b} \quad (4)$$

V praxi je vždy tato veličina kratší než fyzikální poločas rozpadu (KUBINYI et al., 2018).

Ozáření osob v nukleární pracovníků, ale i dalších osob pracujících na oddělení NM, pochází, mimo jiné, i z otevřených radioaktivních zdrojů záření. Ozáření pracovníků způsobuje zejména ionizující záření vznikající při rozpadu radiofarmak, se kterými se dostávají do kontaktu při manipulaci s nimi a při komunikaci s pacientem, jemuž bylo radiofarmakum aplikováno. U pacientů toto ozáření nelze nijak eliminovat, proto je součástí vyšetření nebo léčby. Toto tvrzení platí pouze u aplikací v NM. Pokud jde o eliminaci ozáření, může indikující lékař zvolit jinou vyšetřovací modalitu, např. magnetickou rezonanci. Samozřejmě je snahou toto záření a jeho účinky minimalizovat. K tomu slouží především princip radiační ochrany ALARA. V NM při diagnostických nebo terapeutických výkonech jde především o správnou distribuci do cílené oblasti tak, aby okolní tkáň byly ozářeny co nejméně. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.6 Radionuklidy používané v nukleární medicíně

V nukleární medicíně se využívá více jak 50 radionuklidů, avšak některé se používají jen zřídka. Seznam nejpoužívanějších radionuklidů pro zobrazování či terapii uvádím v **Tabulce 1**. Tyto radionuklidy jsou převážně vyráběny v urychlovačích nebo specializovaných jaderných reaktorech a řadíme je tedy mezi umělé radionuklidy.

Tabulka 1 - Přehled používaných radionuklidů v NM (KUBINYI et al., 2018)

Radio-nuklid	Typ přeměny	Energie fotonů (keV)	Energie β^{-1} , resp. β^{+1} (keV)		Poločas přeměny	Hlavní aplikace
			maximální	střední		
^{11}C	β^{+1} (100 %)	511 (200 %)	960 (100 %)	385	20,4 min	zobrazení
^{13}N	β^{+1} (100 %)	511 (200 %)	1 199	492	9,97 min	zobrazení
^{15}O	β^{+1} (100 %)	511 (200 %)	1 732	735	2,04 min	zobrazení
^{18}F	β^{+1} (97 %)	511 (200 %)	634 (97 %)	250	110 min	zobrazení
^{32}P	β^{-1} (100 %)	–	1 710	694	14,3 d	terapie
^{51}Cr	EC	320 (9,8 %)	–	–	27,7 d	zobrazení
^{67}Ga	EC	93 (39%) 185 (21 %) 300 (17 %)	–	–	3,26 d	zobrazení
$^{81\text{m}}\text{Kr}$	IT (66 %)	190	–	–	13,6 s	zobrazení
^{82}Rb	β^{+1} (95,5 %)	776 (13,4 %)	3 360	1 500	1,25 min	zobrazení
^{89}Sr	β^{-1}	–	1 492	583	50,7 d	terapie
^{90}Y	β^{-1} (100 %)	–	2 284	835	2,67 d	terapie
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	IT (89,1 %)	140,5 (89 %)	–	–	6,02 h	zobrazení
^{111}In	EC (100 %)	171 (90 %) 245 (94 %)	–	–	2,80 d	zobrazení
^{123}I	EC	159 (83,3 %)	–	–	13,2 h	zobrazení
^{125}I	EC	27–30 keV (záření X)	–	–	60,0 d	zobrazení
^{131}I	β^{-1}	365 (82 %) 637 (7,2 %)	606 (90 %) 334 (7,2 %)	–	8,04 d	zobrazení/ terapie
^{152}Sm	β^{-1}	41; 103	–	–	46,7 h	terapie
^{186}Re	β^{-1}	137 (9 %)	1 077 (72 %) 939 (22 %)	–	3,78 d	terapie
^{201}Tl	EC	68–80 keV (záření X)	–	–	3,04 d	zobrazení

3.7 Pole ionizujícího záření

V blízkosti zdroje záření se vytváří prostor vyplněný ionizujícím zářením, tj. radiační pole, které popisuje směrové vlastnosti záření a jeho dalšími parametry. Prostor kolem zdroje záření je obvykle vyplněn látkou, se kterou emitované ionizující záření interaguje. Tyto interakce určitým způsobem mění charakter radiačního pole a při některých interakcích může dokonce vznikat další, sekundární ionizující záření. Pole záření může být generováno různými druhy zdrojů ionizujícího záření (radionuklidové zdroje ionizujícího záření tvořené jedním nebo více různými radionuklidy, generátory ionizujícího záření). Takto vytvořená pole mají ve většině případů složitý časový i prostorový průběh a k jeho popisu se zavádí několik veličin. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Výchozí veličinou popisující radiační pole je tzv. **fluence částic $\Phi(\mathbf{r})$** , která vyjadřuje tok ΔN částic plochou ΔS umístěnou v bodě \mathbf{r} o souřadnicích x, y, z :

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi(x, y, z) = \frac{\Delta N}{\Delta S} \quad (5)$$

přičemž o přírůstcích ΔN a ΔS předpokládáme, že jsou dostatečně malé. Jednotkou fluence částic $\Phi(\mathbf{r})$ je m^{-2} , představující počet částic, které v uvažovaném bodě prostoru dopadají na povrch koule o jednotkové ploše hlavního řezu. Vzhledem k tomu, že fluence částic se může mezi různými body prostoru rychle měnit, je praktičtější vztahovat jednotku fluence k 1 cm^{-2} s převodním vztahem $1 \text{ cm}^{-2} = 1/10000 \text{ m}^{-2}$. **Příkon fluence částic φ** pak vyjadřuje časovou změnu (rychlost růstu nebo poklesu) fluence

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{d\Phi(x,y,z)}{dt} \quad (6)$$

kde $d\Phi$ je změna fluence částic vztahující se k časovému intervalu dt . Jednotkou příkonu fluence částic je $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (KUBINYI et al., 2018).

Kvantifikace radiačního pole je výchozím konceptem pro zavádění dalších veličin. To platí obzvláště pro interakci záření s látkou a také dalších veličin, které jsou potřebné v radiační ochraně a dozimetrii. V okolí různých zářičů může být radiační pole poměrně odlišné, zejména ve směrové či úhlové závislosti a také v závislosti na energetickém spektru. Emise záření, ale také materiály nebo stínění v prostoru kolem zdroje, jsou značně ovlivňovány rozložením pole (KUBINYI et al., 2018).

Pokud uvažujeme osamocený nestíněný radioaktivní zdroj emitující určitý druh záření, je možné příkon fluence částic φ v dané vzdálenosti d vyjádřit pomocí jednoduchého vztahu:

$$\varphi = A/\pi d^2 \quad (7)$$

kde φ je tedy fluence částic udávaná v jednotkách $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ve vzdálenosti d udané v metrech od radionuklidového zdroje, který má aktivitu A udanou v Bq. Ve vztahu (5) je však zanedbán rozptyl vyzářených částic v daném prostředí, kterým obvykle bývá vzduch. Radioaktivní zářič, který je ve volném prostoru, vytváří symetrické pole, protože pravděpodobnost vyzařování částic do prostoru a jakéhokoliv směru je vždy stejná (KUBINYI et al., 2018).

Pole záření, které pochází z jednoho bodového zdroje a nacházející se ve volném prostoru, lze snadno kvantifikovat – na rozdíl pole pocházející od více zdrojů, tedy radionuklidů, které jsou rozloženy na povrchu či uvnitř látky, což je poměrně složité. Ale i pole tohoto typu lze aproximovat určitými vztahy a poté z nich určit další veličiny související s rozložením pole v daném bodě (KUBINYI et al., 2018).

3.8 Interakce ionizujícího záření s látkou

Interakční procesy, k nimž dochází při průchodu záření látkou, jsou základem pro porozumění a správné používání veličin radiační ochrany a dozimetrických veličin. Pokud uvažujeme interakční procesy u ionizujícího záření, v podstatě téměř všechny probíhají s **elektronovým obalem** atomu. Výjimkou jsou neutrony, které interagují převážně s jádry atomů. Výsledek interakce je tedy fyzikální, chemický nebo biologický. (HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Na základě hustoty ionizace lze posuzovat schopnost různých druhů záření. Hustota ionizace lze interpretovat jako počet iontových párů, který byl vytvořen na jednotku dráhy ionizující částice. Jak vidíme z údajů **Tabulky 2**, je značný rozdíl mezi alfa zářením a elektrony. Pro porovnání a ucelenost uvádím i přímou ionizaci vyvolanou fotonovým zářením, které ionizuje své prostředí zejména skrze sekundární elektrony (KUBINYI et al., 2018).

Tabulka 2 - Vlastnosti různých druhů záření (KUBINYI et al., 2018)

Záření	Dosah ve vzduchu (cm)	Rychlost (km.s ⁻¹)	Specifická ionizace (cm ⁻¹)
Alfa	5–6	3200-32000	20000-50000
Beta	200–800	75000-198000	50-500
Gama	polotloušťka	300000	5-8

Střední energie ionizace má velký význam u všech výpočetních i měřících metod, které souvisí s ionizací látky. S pomocí střední energie ionizace lze poté přejít od ionizace vyvolané zářením k záření, které je deponované tímto zářením v určitém materiálu.

Ionizace je proces, při kterém se z elektricky neutrálního atomu stává iont. Ionty vznikají tak, že ionizující částice interaguje s elektronem v atomovém obalu a předá mu dostatek energie potřebný k tomu, aby se elektron z atomového obalu uvolnil. Aby se elektron z neutrálního atomu uvolnil, je třeba určité minimální ionizační energie nalétávající částice, tzv. ionizační potenciál. Pokud jde o vytvoření kladného iontu, tedy kationtu a elektronu, je vždy třeba větších energií. Oproti tomu anionty, tedy záporně nabitě částice, vznikají záchytem volného elektronu v elektronovém obalu. Tento děj probíhá snáze u atomů, jejichž elektronový obal není uzavřený. Při posouzení ionizačních schopností, jež mají nabitě částice, je důležitá **střední energie ionizace** W_i , kterou definujeme jako podíl počáteční kinetické energie E nabitě částice, jež je úplně zabrzděna v určité látce a celkové ionizační schopnosti N_i této částice.

$$W_i = E/N_i \quad (8)$$

Celková ionizační schopnost částice N_i je střední počet iontových párů, které byly vytvořeny jednou částicí při jejím úplném zastavení v určité látce. Při definování střední energie ionizace je třeba upozornit na fakt, že ionty, které jsou vyvolané brzděním záření, se do celkové ionizační schopnosti částice nezapočítávají. Totiž fotony tohoto záření vyvolávají ionizaci nepřímou – v relativně vzdálenější oblasti od dráhy částice (KUBINYI et al., 2018).

Fyzikální mechanismus interakce různých druhů záření s látkou je do jisté míry odlišný. Těžké nabitě částice, například alfa, jsou charakteristické svým krátkým doletem ve vzduchu (jednotky cm). Oproti tomu záření beta, které je mnohem „lehčí“, dosahuje daleko větších vzdáleností, ve vzduchu to mohou být až metry. Fotony elektromagnetického záření v rentgenové či gama oblasti se liší od předchozích dvou a jsou nejpronikavější.

Záření alfa, jak je výše zmíněno, má krátký dosah. Jejímu šíření lze zabránit listem papíru. Záření beta je pronikavější, na odstínění ovšem postačí několik milimetrů tlustý plast. Pozitrony a elektrony se při interakci s látkou chovají prakticky stejně, jediným rozdílem je to, že pozitrony zanikají anihilací s elektronem. Anihilaci je jev, při kterém elektron interaguje s pozitronem takovým způsobem, že oba zaniknou a jejich klidová hmotnost se přemění na energii, kterou odnesou dva fotony o energii 511 keV každý (KUBINYI et al., 2018).

3.9 Interakce nabitých částic

Při interakci nabitých částic jsou důležitými charakteristikami energie, náboj a hmotnost částice. U nabitých částic se hmotnosti značně liší, proton má cca 2000× větší hmotnost než elektron.

Pokud nabitě částice procházejí určitým prostředím či látkou, dochází k interakci a následně ztrátě energie, kterou můžeme makroskopicky považovat za kontinuální. Na konci své dráhy se hodnota jejich energie blíží k nule a částice je nakonec zachycena v látce. Pokud mají dvě částice stejnou energii, ale velmi rozdílnou hmotnost, mají také výrazně rozdílnou rychlost, což ovlivní dosah i charakter jejich dráhy (KUBINYI et al., 2018).

Charakter interakce částic, které mají různou hmotnost a náboj, je zcela odlišný. U těžkých nabitých částic, jejichž část energie se přemění na brzděcí záření, je nevýznamná. Radiační ztráty energie těžkých nabitých částic tedy lze zanedbat. Naopak u lehkých částic, především elektronů, jsou radiační ztráty energie významné a musíme s nimi počítat. Tyto ztráty mohou dosahovat i vysokých hodnot, a to i v případě, že částice má relativně nízkou energii.

V praxi tento lze pozorovat na oddělení nukleární medicíny, a to konkrétně v prostorách, které jsou určeny ke skladu farmak. Radiofarmakum, které je beta zářičem, je nejčastěji uzavřeno ve skleněné nebo plastové lahvi, která stíní samotné záření beta. Celá láhev je pak následně uzavřena do olověného pouzdra, jež stíní brzdné záření v podobě gama.

Pro radiační ochranu je velice důležitý projev interakce nabitých částic. Pokud jde o těžké nabitě částice, postačí k odstínění materiál o tloušťce stejné, jako je dosah záření. U lehké částice s vysokou energií je však nutné použít dva typy stínění. V případě brzdného záření je ovšem potřeba vědět, že se záření stíněním pouze zeslabí. To znamená, že lze toto záření pouze redukovat, nikoli však zcela eliminovat (KUBINYI et al., 2018).

3.10 Interakce nepřímo ionizujícího záření

Do nepřímo ionizujících částic spadají neutrony, jež mají v NM jen okrajový význam, avšak jsou důležité pro tvorbu některých radionuklidů. Patří sem fotony (gama a RTG záření, anihilační fotony). Fotony a ani neutrony samy prostředí přímo neionizují. Ionizaci prostředí mají na svědomí **sekundární nabitě částice**. Sekundární nabitě částice se uvolňují při jejich interakci s jádrem atomu určitého prostředí. Pomocí těchto částic (tvořených při interakcích) lze tedy nepřímo ionizující záření detekovat či měřit. Mimo jiné tyto nabitě částice vyvolávají radiobiologické účinky, jež mají pro radiační ochranu zásadní význam.

Je známa existence devíti interakčních procesů při průchodu fotonů danou látkou. V oblasti NM mají však význam zejména Comptonův rozptyl, fotoefekt a tvorba elektron-pozitronových párů.

Fotoefekt, známý také jako fotoelektrický jev, je děj, při němž dochází k absorpci energie fotonu, jež směřuje k určitému atomu. Foton následně zaniká a absorbovaná energie je využita na vyražení jednoho z orbitálních elektronů v atomu, obvykle ze slupky K. Děj fotoelektrického jevu je zpravidla doprovázen emisí fotonu charakteristickým zářením – nebo také Augerovým elektronem. Tento jev by se dal připodobnit k ionizaci nabitou částicí. Pro nuklidy s nízkým Z se tento proces stává prakticky nevýznamným, avšak u těžkých prvků, kde se vazebná energie pohybuje v desítkách keV až do 100 keV, má svůj význam (KUBINYI et al., 2018).

Comptonovým rozptylem se rozumí interakce, která probíhá mezi fotonem a volně vázaným elektronem v orbitální vrstvě atomu. K rozptylu dochází tehdy, kdy je energie fotonu mnohem vyšší než vazebná energie elektronů. Výsledkem tohoto děje je odražený elektron, comptonovský elektron a rozptýlený foton. V momentě, kdy dochází k interakci, se část energie

primárního fotonu přechází na comptonovský elektron. Energie, která zůstane, připadne rozptýlenému fotonu (KUBINYI et al., 2018).

Tvorba elektron-pozitronových párů je interakcí fotonu s látkou, jež nastává v elektrickém poli jádra a dochází tedy k vytvoření páru elektron-pozitron. Tento děj je charakteristický zmizením fotonu, jenž interaguje, zatímco jeho energie je vynaložena na tvorbu páru a zbývající energie se projeví jako kinetická energie těchto vzniklých částic. Klidovou hmotností elektronu a pozitronu je hodnota 511 keV. Z toho vyplývá, že pro začátek interakce je zapotřebí energie větší než 2×511 keV. Charakteristickým jevem této interakce je anihilace elektronu a pozitronu. K anihilaci dochází, pokud pozitron ztratí svou kinetickou energii. Výsledkem této interakce je tedy vznik dvou anihilačních fotonů o energii 511 keV a zároveň zánik elektronu a pozitronu. Specifickou vlastností těchto dvou fotonů je „vyzáření opačným směrem“ (KUBINYI et al., 2018).

Pokud bychom měli shrnout interakce nepřímo ionizujících částic, lze tedy říci, že pokud interagují fotony s danou látkou či prostředím, jsou doprovázeny dalšími částicemi (sekundární fotony a sekundární elektrony). Výsledkem těchto dějů je zeslabení svazku fotonů, následné předání energie fotonů nabitým částicím a absorpci energie. V **Tabulce 3** jsou pro zajímavost uvedeny produkty hlavních interakcí fotonů s látkou.

Tabulka 3 - Výsledné produkty hlavních interakcí fotonů s látkou (KUBINYI et al., 2018)

Interakce	Sekundární fotony	Sekundární elektrony
Fotoefekt	Charakteristické záření	Fotoelektron
		Augerův elektron
Comptonův rozptyl	Rozptýlený foton	Rozptýlený elektron
Tvorba páru	Anihilační fotony	Pár elektron-pozitron

Interakce neutronů mají pro NM malý význam, ale nejsou určitě zanedbatelné. Charakteristické jevy pro interakci neutronů jsou především: emise nabitých částic, pružný a nepružný rozptyl, radiační záchyt a štěpení jádra. Pokud neutrony interagují s jádry atomů okolního prostředí, interakční proces závisí na složení a energii látky.

Děj, kdy interagují rychlé neutrony a jádra lehkých prvků nazýváme pružný rozptyl. Na rozdíl **radiační záchyt** se vyznačuje interakcí pomalých neutronů. Ty jsou zachyceny jádry atomů,

následně jádra atomů se dostávají do excitovaného stavu a poté se deexcitací emitují fotony a záření gama (KUBINYI et al., 2018).

Při ději, jež nazýváme **pružný rozptyl**, dochází k transformaci, části nebo veškeré, energie na energii kinetickou zasaženého jádra. Moderaci atomů nazýváme proces, kdy neutrony prochází látkou a postupně ztrácejí svou energii až na hodnoty tepelných neutronů (KUBINYI et al., 2018).

Nepružný rozptyl je charakteristický pro excitaci zasažených jader zachyceným neutronem a následné tvorbě jaderných reakcí, při které dochází k vyzáření nabitě částice a také ke štěpení těžkých jader. Produktem štěpení je obrovské množství energie. V praxi se štěpení těžkých jader využívá v jaderných reaktorech, nebo jaderných zbraních, kdy dochází k uvolnění velkého množství energie, v důsledku nekontrolovatelného štěpení k tomu určených izotopů (KUBINYI et al., 2018).

3.11 Dozimetrie ionizujícího záření

Od doby, co bylo ionizující záření objeveno, vznikaly stále nové a nové pokusy, jak záření kvantifikovat a detekovat. Zpočátku k detekci byly používány fotografické desky, ty byly poté nahrazeny filmem a emulzí. Přes všechna zařízení a čidla se dostáváme až k elektroskopům, spintariskopům a kalorimetrům, jenž sledovaly tepelné vlastnosti záření. Postupem času se ukázalo, že sledovat ionizující účinky záření je nejlepší cestou. Postupně se ionizace vzduchu stala jakýmsi „měřítkem množství“ fotonového záření. Pokud se tedy jedná o ionizující záření, je možné se v té době bavit pouze o paprscích X či rentgenovém záření, jež se postupem času začalo hojně užívat, a to převážně v lékařství. (HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Dozimetrie začíná postupným vývojem zkoumat účinky záření – především fyzikální – a také množství a míru, aby bylo dále možné stanovit hranice pro ochranu osob. Ve 40. a 50. letech dvacátého století se toto odvětví dozimetrie mění a vytváří nový systém zásad, nařízení a zákonů, které v dnešní době známe jako **radiační ochranu**. Dále již byly zaváděny dávkové limity, referenční úrovně, efektivní a ekvivalentní dávka tak, jak je dnes známe. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.11.1 Expozice

Prvním pokusem, co nejpřesněji určit míru ozáření, bylo definování jednotky rentgen (R). Tato jednotka určovala množství určitého záření, které je schopné vytvořit v 1cm³ vzduchu náboj, jenž se bude rovnat 1 elektrostatické jednotce. Později na toto téma navázalo další zkoumání

a byla vytvořena veličina **expoze**. S tím se i zrušila jednotka R. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)



Obrázek 3 - moderní dozimetr (VF v objemovém elementu vzduchu o hmotnosti dm).“ (KUBINYI et al., 2018)

Základními dozimetrickými veličinami jsou tedy dávka, kerma a expoze. Od nich jsou pak dále odvozovány další veličiny, které se užívají v radiační ochraně. Odvozené veličiny se pak konkrétněji používají na stanovení kvantifikace biologických účinků záření.

Expozice je definována vztahem:

$$X = (|dQ|)/dm \cong (|\Delta Q|)/\Delta m \quad (9)$$

„Vzorec představuje v daném místě radiačního pole podíl absolutní hodnoty celkového elektrického náboje dQ iontů jednoho znaménka vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony

Pro definici expoze platí, pokud z ní budeme co nejpřesněji vycházet, že není jako veličina přímo měřitelná. Tento jev je spojován s tvrzením, že za normálních podmínek nelze vzít náboj, který se vytvořil ionizací elektronů, jež pocházejí z interakcí fotonů, v prostředí, jež uvažujeme, a od náboje, který je vyvolán sekundárními elektrony, jež vstupují do tohoto prostředí. Definicí lze za určitých podmínek aproximovat, k tomu je ovšem nutná tzv. **elektronová rovnováha**. Elektronové rovnováhy lze dosáhnout na určitém bodě v prostoru a to v případě, že je ionizace tvořena interakcí fotonů v objemovém elementu souhlasná s ionizací, která by byla vytvořena elektrony. Tato ionizace by probíhala po celé délce dráhy těchto elektronů. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.11.2 Absorbovaná dávka

V teorii je možné pozorovat, že je vzorec či koncept absorbované dávky do jisté míry spjatý se **sdělenou energií** ionizujícího záření látky v určitém prostředí. Jednotkou této veličiny je 1 J.

Na rozdíl od ostatních veličin je sdělená energie veličinou stochastickou. V praxi to znamená, že pokud dochází k předávání energie, ve většině případů nejsou její konkrétní hodnoty významné. Její rozdělení popisující tyto jevy však důležité je. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Nejdůležitější veličinou v dozimetrii a zároveň veličinou výchozí pro radiační ochranu je **absorbovaná dávka**. Pokud budeme uvažovat běžné případy, je absorbovaná dávka vždy spojena s určitým bodem v daném prostředí. Absorbovaná dávka je určena pro jakékoliv záření a stejně tak látku. Její jednotkou je 1 Gy. Zajímavostí je, že první jednotkou pro absorbovanou dávku byl 1 rad, přepočítání je však jednoduché, 1 rad = 0,01 Gy. Při zapisování této veličiny, stejně tak jako kermy, je nutné zapisovat i prostředí, ke kterému se dávka vztahuje. Například D_{vzd} , dávka ve vzduchu (KUBINYI et al., 2018).

Další veličinou, se kterou je absorbovaná dávka spjata, je **měrná sdělená energie**, defacto je to její „stochastický ekvivalent“. Pokud provádíme velký počet měření, výsledky se budou blížit k dávce. Přesněji se dá vyjádřit limitou:

$$\lim_{\tau}(m \rightarrow 0) \bar{z} = D \quad (10)$$

Aby nedošlo k omylu, je třeba zmínit, že při výpočtech je výsledkem vždy **měrná sdělená energie**, nikoli dávka (KUBINYI et al., 2018).

3.12 Veličiny v radiační ochraně

Základem radiační ochrany jsou tři pojmy: zdůvodnění, limitování a optimalizace. Pro zavedení omezení a doporučení je nutné znát míru ozáření osob či skupin na pracovištích a v životním prostředí, kde je důležité kontrolovat radioaktivní kontaminaci. V návaznosti na tyto ustanovení byla Mezinárodní radiologickou komisí (ICRP) zavedena hlavní veličina – **efektivní dávka**. Efektivní dávka slouží ke stanovení hodnot a k její kontrole. Tyto hodnoty jsou tzv. referenční úrovně, uplatňují se v rámci stochastických účinků a také mají zajistit optimalizaci ozáření v praxi. Efektivní dávka vyjadřuje střední hodnotu dávky v určitých orgánech či tkáních. Tato hodnota je díky radiosenzitivitě tkání a druhu záření proměnlivá. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Konkrétní hodnoty váhových faktorů udává ICRP. Při stanovení váhových faktorů určitých tkání a orgánů se přihlíží také k pohlaví, průměrnému věku, lineárnímu přenosu energie a hodnotám každého orgánu či tkáně, která přispěje k projevům stochastických účinků. Každých deset let ICRP aktualizuje a vydává nové hodnoty pro tkáňové a radiační váhové faktory. Aktualizované hodnoty jsou vždy podloženy nejnovějšími výzkumy na poli radiační biologie a radiační epidemiologie. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

V praxi má využití radiačních a jaderných technologií velký význam. Avšak při využívání těchto technologií je také patřičně velké riziko v důsledku ozáření osob či kontaminaci

životního prostředí. Jakákoliv manipulace s nebezpečnými látkami je přísně posuzována s ohledem na velké riziko, tj. přínos musí být vždy větší než uvažované riziko a případné důsledky. V této době je už riziko srovnatelné s ostatními odvětvími průmyslu.

Díky zavádění přísných nařízení v radiační ochraně, je třeba se obávat pouze stochastických účinků – pokud vše probíhá, jak by mělo. Do projevů stochastických účinků patří na první místo zvýšená pravděpodobnost výskytu rakoviny a genetické poškození, jež se projeví u jejich potomků. Efektivní dávka poměrně dobře koresponduje s pravděpodobností stochastických účinků, avšak stanovit ji přímo nelze. V případě ozáření je možné ji s pomocí početních úkonů aproximovat. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.12.1 Dávkový ekvivalent

Pro určení biologických účinků záření nelze expozici nebo absorbovanou dávku samostatně použít. Tyto veličiny je nutné doplnit dalšími faktory, poté dostáváme vhodnou odezvu lidského těla na různé druhy ionizujícího záření. V případě fotonového a beta záření se stala vhodnou veličinou dávka dobře vyjadřující biologické poškození záření; pro jiné druhy záření to je komplikovanější – je tedy nutné uvažovat další faktory. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Při prvních pokusech, jak zohlednit biologické účinky záření, byla zavedena veličina dávkový ekvivalent H , vztahem:

$$H = DQ_F(L) \quad (11)$$

kde H je dávkový ekvivalent v daném místě tkáně a Q_F bezrozměrný jakostní faktor. Hodnotou bezrozměrného jakostního faktoru je v tomto případě funkce lineárního přenosu energie L . Dávkový ekvivalent (i další veličiny z něho odvozené) byl vytvořen pouze jako nástroj, jenž



Obrázek 4 - Rolf Sievert (KUBINYI et al., 2018)

slouží radiační ochraně před zářením, tedy veličiny s dávkovým ekvivalentem spojené. Nelze jej tedy užívat pro odhady účinků vysokých dávek. Pokud je v konkrétním případě dávka uváděna v Gy, bude jednotkou dávkového ekvivalentu Sv. Jednotky pro tuto veličinu byly pojmenovány po prvním předsedovi Mezinárodní radiologické komise, Rolfu Sievertovi.

Hodnoty jakostního činitele byly vztaženy k lineárnímu přenosu energie, ten se však uplatňuje pouze u nabitých částic. V případě záření nepřímo ionizujícího bereme v úvahu sekundární nabitě částice, které byly uvolněny primárními nenabitými částicemi (KUBINYI et al., 2018).

3.12.2 Orgánová dávka

Parametr hodnotící stochastické účinky se nazývá orgánová dávka. Je možné ji charakterizovat jako střední hodnotu dávky v prostředí, které uvažujeme (tkáň, orgán). Matematicky ji lze vyjádřit jako podíl energie ε_T sdělené tkáni nebo orgánu T a hmotnosti m_T daného orgánu nebo tkáně.

$$D_T = \varepsilon_T / m_T \quad (12)$$

Pokud uvažujeme ozařování vnějšími zdroji, je střední dávka, spojená s tkání, spjata s okolním radiačním polem a závisí na orientaci a velikosti těla.

Trasa absorbované dávky spojené se zářením, která má nízkou pronikavost či omezený dosah, bývá ve tkáni nestejnorodá. Pokud dojde k zasažení zářením a lidské tělo se nachází v parciální expozici, může dojít k poškození tkání – a to i tehdy, když střední váhová spolu s orgánovou dávkou nedosahují kritického limitu. Tento děj může nastat v případě, kdy dojde k ozáření kůže zářením málo pronikavým. Tedy aby se zabránilo poškození kůže, byl stanoven speciální limit pro lokální kožní dávku (KUBINYI et al., 2018).

3.12.3 Ekvivalentní dávka

Stochastické účinky v určité tkáni nebo orgánu lze vyjádřit ekvivalentní dávkou. Značí se $H_{T,R}$ a její jednotkou je Sv, avšak jak je již zmiňováno v předchozích částech práce, v praxi se užívají tisícinny této dávky.

Při výpočtech je ve vzorci zahrnut také radiační váhový faktor, což je bezrozměrná veličina. Jeho hodnoty jsou nastaveny tak, že charakterizují biologické účinky daného záření v souladu se stochastickými účinky. Hodnoty radiačního váhového faktoru jsou ve většině případů spjata s lineárním přenosem energie, ale není tomu tak vždy. Pokud budeme uvažovat nepřímo ionizující záření, hlavními činiteli jsou sekundární nabitě částice. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.12.4 Efektivní dávka

Jednou z velice důležitých veličin v radiační ochraně je efektivní dávka, která dokáže s velice dobrou mírou pomocí matematických operací odhadovat stochastické účinky. Jak bylo již zmíněno, projevy stochastických účinků jsou spojeny s celkovým ozářením těla, tkání, orgánů a jejich radiosenzitivitou. To byl důvod pro zavedení nové veličiny odvozené z ekvivalentní dávky a byla by co nejvíce spojena s dávkami ve tkáních a orgánech a stochastickými účinky. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Mezi první pokusy řadíme vytvoření nové veličiny, a to **efektivního dávkového ekvivalentu**. V pozdějších letech prošla veličina několika úpravami a v roce 1991 na ni navázalo zavedení zcela nové veličiny – efektivní dávky, která vychází z ekvivalentní dávky a tkáňového váhového faktoru. Jednotkou efektivní dávky je opět Sv. Co se týká praxe, není vhodné jednotku používat pro stanovení deterministických účinků. Postupem času procházely tkáňové váhové faktory zkoumání a dalším vývojem, který sledovala a poté zaznamenávala ICRP. Výsledky po zkoumání byly analyzovány a porovnávány s nejnovějšími poznatky v radiobiologii. Dále pak byly publikovány v obecných doporučeních. Pro zajímavost je v **Tabulce 4** uvedeno, jak se během let měnily tkáňové váhové faktory, ale také tkáně a orgány, pro který byl w_T stanoven.

Tabulka 4 - Vývoj tkáňových faktorů (KUBINYI et al., 2018)

Tkáň nebo orgán	Tkáňový váhový faktor		
	ICRP 26	ICRP 60	ICPR 103
gonády	0,25	0,20	0,08
mléčná žláza	0,15	0,05	0,12
červená kostní dřeň	0,12	0,12	0,12
plíce	0,12	0,12	0,12
štítná žláza	0,03	0,05	0,04
povrch kostí	0,03	0,01	0,01
tlusté střevo	-	0,12	0,12
močový měchýř	-	0,05	0,04
játra	-	0,05	0,04

jícen	-	0,05	0,04
kůže	-	0,01	0,01
žaludek	-	0,12	0,12
mozek	-	-	0,01
slinné žlázy	-	-	0,01
zbytek tkání a orgánů	0,03	0,05	0,12
Σ_{WT}	1	1	1

Pro ucelení – „zbytek tkání a orgánů“ v případě **Tabulky 4** znamená shrnutí nadledvinek, horních cest dýchacích, žlučníku, srdce, ledvin, lymfatických uzlin, svalstva, sliznice dutiny ústní, slinivky, prostaty, tenkého střeva, brzlíku a děložního hrdla (KUBINYI et al., 2018).

Vzhledem k úpravám tkáňových váhových faktorů, došlo k nejvýznamnějším změnám u gonád, kde se hodnota změnila z původní 0,25 na 0,08. Toto doporučení bylo vydáno ICRP v roce 2007.

Hodnoty činitelů tkáňových váhových faktorů jsou úzce spjaty s druhem záření a jeho energií. Avšak pokud uvažujeme ozáření orgánu nebo tkáně, hodnoty činitelů a druhy záření naprosto rozchází.

Z textu již vyplývá, že ekvivalentní a efektivní dávku, tak jak byly zavedeny, nemůžeme v praxi zcela přesně změřit či určit. Pokud dojde ke vnějšímu ozáření na pracovišti, tedy ozáření pracovníků, hodnoty, které chceme znát, stanovujeme pomocí monitorování ozáření a operačních veličin. Pokud dojde k ozáření vnitřnímu, zaměříme se na příjem aktivity dané radioaktivní látky. V případě ozáření radionuklidy a pro výpočet dávkových koeficientů se vždy užívají biokinetické modely pro radionuklidy, referenční fyziologická data a výpočtové fantomy. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.12.5 Kolektivní efektivní dávka

Tuto veličinu lze charakterizovat jako součet efektivních dávek osob, které se společně nacházely v určitém prostoru a v průběhu určitého časového úseku. Je nutné, aby počet osob a doba v případě, kdy se dávky sčítají, byly známy. Jednotkou této veličiny je tzv. man sievert (man Sv). (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

K zavedení veličiny kolektivní efektivní dávky byla podnětem optimalizace. Šlo konkrétně o porovnávání technologií způsobujících ozáření, ale také způsoby ochrany, zvláště v případech, kdy se jednalo o ozáření pracovníků a částečně také obyvatelstva. Tato veličina je do jisté míry specifická, nelze ji tedy považovat za nástroj sloužící k hodnocení rizik, ani není možné ji použít na odhad rizik v budoucnosti. (HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Při použití této veličiny by mělo jít zejména o hodnocení ozářených osob a kontrolu možného výskytu stochastických účinků. Při zpětném zjišťování již ozářených osob slouží k odhadu efektivní dávky posouzení radiační ochrany. Lze také zjistit, zda byly v určité oblasti překročeny dávkové limity. Hlavním úkolem kolektivní efektivní dávky je zaznamenávat radiační situaci s ohledem na platné předpisy. Je tedy cílem, aby efektivní dávky byly stlačeny pod úroveň dávkových limitů příslušících určitému pracovišti, a aby byly zároveň co nejnižší. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Při použití efektivní dávky, která má za úkol hodnotit expozice pacientů, je třeba brát na vědomí jisté hranice této veličiny. Efektivní dávka je cenný činitel při srovnávání dávek z diagnostických vyšetření, jež nastaly za pomoci stejných technologií a postupů v různých nemocnicích a zemích a také při srovnávání postupů pro stejná lékařská vyšetření.

Při lékařském ozáření pacientů za pomoci vnějších zdrojů je zasažená oblast jen částečná. Je tedy důležité, aby si lékaři plně uvědomovali dávky v normální tkáni v ozářených polích. Kůže má nízký tkáňový váhový faktor, pokud tedy dojde k ozáření na určitém místě těla, může docházet ke značným ekvivalentním dávkám daných tkání, i když je efektivní dávka odpovídající tomuto ozáření velice malá. Podobné události nastávají i v případech, kdy dojde ke kontaminaci radionuklidy (KUBINYI et al., 2018).

3.12.6 Operační veličiny

Jak už bylo výše v textu uvedeno, důležité veličiny v radiační ochraně není možné přímo měřit, ale pomocí tzv. operačních veličin, které lze stanovit měřením, je možné se ke kýženému výsledku dopracovat. Pro ucelenost: operační veličiny vhodně aproximují výsledné hodnoty radiačních veličin. Pokud uvažujeme ozáření vnější, dopracujeme se při použití operačních veličin se aproximací k výsledkům (efektivní dávka). Pokud jde ovšem o záření, které zapříčiňuje látka v lidském těle, je postup zcela jiný. V případě vnitřní kontaminace je tedy nutné zjistit, jakým množstvím bylo tělo kontaminováno, což lze provést pomocí měření kontaminace vzduchu, potravin či vody. Těmito jednotlivými kroky se za pomoci konverzních

faktorů a znalostí dalších parametrů postupně dostáváme až ke ekvivalentní a efektivní dávce (KUBINYI et al., 2018).

Definice operačních veličin jsou poměrně složité. Je nutné brát v úvahu, že tyto veličiny platí pouze za určitých podmínek. Konkrétně jsou to tyto veličiny:

- prostorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$,
- směrový dávkový ekvivalent $H'(d)$,
- osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$.

Pro představu jsou v **Tabulce 5** uvedeny souvislosti mezi veličinami operačními a veličinami užívanými v radiační ochraně pro limitování ozáření.

Tabulka 5 - vztah operačních a hlavních veličin radiační ochrany (KUBINYI et al., 2018)

Charakter pole záření	Odpovídající veličina radiační ochrany	Operační veličiny	
		Monitorování prostředí	Monitorování osob
Silně pronikavé záření	Efektivní dávka	$H^*(10)$	$H_p(10)$
Slabě pronikavé záření	Ekvivalentní dávka na kůži	$H'(0,07)$	$H_p(0,07)$
	Ekvivalentní dávka na čočku oka	$H'(3,\Omega)$	$H_p(3)$

Z obecného hlediska může být záření slabě pronikavé či silně. Tyto dva typy záření rozlišujeme podle toho, který dávkový ekvivalent je blíže ke své limitní hodnotě. Pro záření, které je málo pronikavé, má smysl dávkový ekvivalent pro oční čočku či kůži. Pro záření, které je silně pronikavé, je vhodnou veličinou efektivní dávka (KUBINYI et al., 2018).

3.13 Biologické účinky záření

Rentgenové záření, které W. C. Röntgen objevil, se začalo brzy využívat. Je neodmyslitelným pomocníkem při nahlížení do lidského těla. Zprvu nebyly známy žádné vedlejší či negativní účinky tohoto záření. Už v roce 1896 byl ale zaznamenán první případ dermatitidy kůže na ruce. K nešťastnému úmrtí došlo necelých deset let po objevení záření. Obětí byl pomocník Thomase Edisona, který zemřel na rakovinu vyvolanou velkým množstvím záření. Počet nehod spojených se zářením X byl stále vyšší. V roce 1928 byly Mezinárodním výborem pro ochranu

před zářením X a rádiem (IXRCP) vydány první nařízení a doporučení, jak bezpečně používat toto záření (KUBINYI et al., 2018).

Tato nevědomost vedla k neznalosti negativních účinků záření. Pracovníci z počátku nerozlišovali akutní a chronické účinky. Od roku 1950 se masivně rozrůstalo používání radiačních přístrojů a začala se rozvíjet také radiační ochrana. Byly vytvořeny čtyři skupiny: pracovníci, obyvatelstvo, pacienti a životní prostředí.

Kolem roku 2000 proběhla rozsáhlá studie zabývající se odezvou organismu ozářeného nízkými dávkami. Z výsledků vyplynulo, že po molekulární buněčné a tkáňové reakce jsou po ozáření odlišné od reakcí, které proběhnou po jednorázovém ozáření vysokou dávkou. Při ozařování nízkými dávkami byly pozorovány tři děje: bystander efekt, adaptivní ochranná reakce a genomická nestabilita. Výzkum tedy prokázal, že pokud dojde k ozáření nízkými dávkami, molekulární a buněčné procesy jsou do jisté míry spojeny s ochrannými mechanismy. Oproti tomu ozáření vysokou dávkou nedoprovází žádný reparační mechanismus, dochází tedy k rozsáhlému poškození, narušení tkáně, vyvolání zánětlivých reakcí nebo také ke smrti buňky (KUBINYI et al., 2018).

Výzkum tedy v podstatě potvrzuje konzervativní směr radiační ochrany, tedy i nejnižší dávky nejsou žádoucí. Zejména v lékařství jsou tyto dávky tak malé, že je možné je při porovnání rizik s přínosem vyšetření tolerovat. Na to navazuje zásada: pokud má být proveden jakýkoliv výkon, který je spojen s ozářením pacienta, je vždy nutné postupovat tak, aby byl přínos maximální a dávky obdržené pacientem minimální. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.13.1 Přímé a nepřímé účinky záření

Pokud dochází k interakci mezi ionizujícím zářením a tkání lidského těla, pozorujeme ukládání energie, které způsobují nabitě částice. Výsledkem tohoto děje je malé zvýšení teploty v místě, kde k ukládání energie dochází. Teplotní změna je však tak malá, že ji lze považovat za zanedbatelnou. Mechanismus, který v podstatě vytváří negativní účinky tohoto záření, je odvozen od ionizujících účinků záření. V praxi to znamená, že ionizující záření ionizací, **přímo** nebo **nepřímo** poškozuje kyselinu **deoxyribonukleovou** (DNA). Tato poškození se projevují jako stochastické nebo deterministické účinky. Při přímém poškození deoxyribonukleové kyseliny dochází k ionizaci její molekuly. Tento děj je doprovázen řadou chemických změn a nakonec vede k narušení funkcí celé struktury. Podrobněji dochází k zasažení velice důležitého místa, jež se nachází uvnitř jádra buňky. Poté dochází ke chemickým změnám ve vazbě molekul, které jsou nenahraditelnými činiteli v metabolismu a genetice buněk.

Při poškození deoxyribonukleové kyseliny je důležité rozlišovat, k jakému poškození došlo. V první řadě to může být poškození pouze jednoho vlákna DNA, tzv. **single strand break** – SSB. Poškození jediného ramene je porucha poměrně rychle opravitelná. Biologické mechanismy organismu totiž využijí druhé vlákno jako vzor a chybějící část doplní. Tento děj je možný díky komplementárnosti bází DNA. Je dobré si také uvědomit, že k těmto poruchám, kdy dochází k poškození části dna pouze na „jedné straně“, může dojít, i když organismus nebyl vystaven ionizujícímu záření. Těchto zlomů může být ovšem několik. Pro lidské tělo jsou však tato poškození, i ve větších počtech, poměrně snadno opravitelná. Problém nastává tehdy, kdy dochází k poškození obou vláken DNA, jež se vyskytnou blízko sebe (DSB – **double strand break**). Tyto poruchy jsou charakteristické svou nezvratností, jsou totiž neopravitelné a dochází k následnému odumření buňky. V prázdném místě DNA poté vzniká místo pro vytvoření mutací. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Pro ucelení je třeba zmínit, že poruchy SSB mají na svědomí záření s nízkým LET a nízkou hustotou ionizace. Pokud by mělo dojít k poruše DSB, je nutné uskutečnit těmito zářeními několik tisíců zásahů ve stejném čase, aby došlo k porušení obou vláken DNA. Zatímco u záření alfa s vysokým LET stačí pouze jeden zásah a dochází k porušení obou částí vláken. Poté nastává nekróza buňky.

Pokud tedy dojde k poškození tkáně ionizujícím zářením, je poté možné tato poškození využít k odvození účinků na tkáň a její přežití. Tyto pokusy se provádějí ozařováním tkáňových kultur. Je tedy patrné, že pokud dochází ke zvyšování dávky, vzrůstá také počet usmrcených buněk.

Je třeba také zmínit, jaký je výsledný děj při zásahu nepřímém. Při nepřímém zásahu dochází k radiolýze vody, načež vznikají volné radikály H a OH a produkty schopné oxidace, které jsou vysoce reaktivní. Částice, které vzniknou, poté narušují normální chod metabolických procesů – buňka je však schopna se proti těmto útokům bránit pomocí tzv. „pufrovacích ochranných mechanismů“ (KUBINYI et al., 2018).

Poškození buněk zářením je dočasné nebo trvalé. Pokud je poškození dočasné, opravuje se pomocí rekombinace nebo restituce (chemická oprava a následná obnova molekuly a enzymatická oprava).

3.13.2 Fáze působení

Při interakci záření s buňkou dochází k určitým dějům. Tyto děje vykazují určitou časovou kontinuitu a dále zahrnují několik fází, každou jinak dlouhou.

- **Fyzikální** fáze je první a pozorujeme ji ihned po začátku ionizace atomů molekul DNA.
- **Fyzikálně-chemická** fáze zahrnuje mezimolekulární interakce v postižené buňce.
- **Biochemická** fáze je charakteristická tvorbou radikálů ovlivňujících okolní molekuly.
- **Biologická** fáze je spojena s reakcemi produktů formovaných v reakcích předchozích a je nejdéle trvající oproti ostatním.

V první fázi, **fyzikální**, dochází k depozici energie v buňce, také se vyznačuje velice krátkou dobou trvání. Dochází k tvorbě kladného iontu H_2O a elektronu (KUBINYI et al., 2018).

V průběhu fáze **fyzikálně-chemické** dochází k reakcím mezi vodou a kladnými ionty. Tyto reakce vedou k tvorbě nových produktů. Dále pak dochází k disociaci kladného iontu a následně na to vznik iontu záporného zachycením elektronu. Výslednými produkty reakcí ve fázi fyzikálně-chemické jsou H^+ , OH^- , H a OH . Skupina OH^- a iont H^+ jsou běžně se vyskytující se částice ve vodě, nemají pro nás tedy zásadní význam. Naopak H a OH jsou v tomto případě volné radikály s vysokou reaktivitou. Posledním vzniklým produktem je peroxid vodíku, jenž představuje velice silné oxidační činidlo (KUBINYI et al., 2018).

Během fáze **biochemické** se produkty z předchozích reakcí dostávají do dalších reakcí s důležitými molekulami buňky. Volné radikály či oxidační činidla mají tendenci „napadat“ části chromozomů a jiné orgány buňky.

Poslední a poměrně složitou fází je **biologická**. Tato fáze není přesně časově vymezená, její trvání může být v rozsahu několika minut až po desítky let. Výše zmíněné chemické změny mohou buňku negativně ovlivnit dvěma způsoby. Buď jde o **smrt buňky**, která nastává při dělení, anebo o **změnu cytogenetické informace** – jedná o poruchu, která v budoucnu může ovlivnit buněčné dělení. Dochází při ní ke změně genetické informace, vzniká zde „prostor“ pro tvoření mutací. Změna cytogenetické informace se může v pozdějším věku projevit v podobě **somatických mutací**, zpravidla se objevují u ozářené osoby, nebo **genetických mutací** po ozáření zárodečných žláz, které postihne další generaci postižené osoby. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

3.13.3 Stochastické a deterministické účinky

Stochastické a deterministické účinky jsou jevy, jenž hodnotíme z hlediska celkového vlivu na lidské tělo. Z předchozích informací je již patrné, že při ozáření dochází k vyvolání negativních účinků na lidský organismus. Stochastické účinky jsou charakteristické svým pozdním projevem a také úměrností pravděpodobnosti výskytu mutací a dávky – tedy čím vyšší dávka,

tím vyšší je riziko stochastických účinků. Ty se ovšem do jisté míry nemusí ani projevit. Zajímavostí je, že pro stochastické účinky není stanovena prahová dávka.

Stochastické účinky lze vysvětlit jako působení záření na část DNA. Samotné působení záření se projevuje jako poškození a následná ztráta části DNA. Ztracená část se poté nahrazuje částí jinou (substituce), může také dojít k otečení celého řetězce DNA (inverze). Většina těchto poškození je pomocí obraného systému těla rozpoznána a poté odstraněna. V některých případech se nepodaří poruchy rozpoznat v časném stádiu, to může vést ke karcinogenezi a k mutacím DNA. (KUBINYI et al., 2018; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Oproti stochastickým účinkům jsou deterministické definovány podle určitých hodnot. Lze tedy říci, že pokud dojde k překročení prahové dávky, dostaví se odpovídající efekt. Deterministické účinky jsou charakteristické svým projevem ihned po ozáření, avšak ve mnoha případech s latentním obdobím. Tak jako u stochastických účinků, kde se s rostoucí dávkou zvyšuje pravděpodobnost, i u účinků deterministických se s rostoucí dávkou se zvětšuje závažnost poškození. (KUBINYI et al., 2018; FILIPOVÁ et al. 2016; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Je vhodné zmínit, že se při používání radiačních přístrojů nebo jaderných technologií v průmyslu či zdravotnictví nelze vyhnout ozáření pracovníků, pacientů ale i osob mimo konkrétní pracoviště. To je způsobeno skutečností, že nepřimo ionizující záření není možné zcela odstínit. Využívání různých aplikací, vyšetření a zákroků, jež jsou prováděny za pomoci radiačních přístrojů, jsou přísně kontrolovány z důvodu nepřekročení stanovených hodnot. Tyto hodnoty jsou nastaveny tak, že pokud nedojde k porušení či překročení, je možné je vzhledem k přínosu tolerovat (KUBINYI et al., 2018).

Podle různých spekulací je možné, že mohou biologické účinky zasahovat i do oblasti účinků tzv. prospěšných. Termínem pro označení prospěšných účinků je **radiační hormeze**. Laicky řečeno: radiační hormeze je děj, který lze vyjádřit jako urychlení či „natrénování“ opravných mechanismů. V důsledku toho by pak měla mít pozitivní efekt, pokud dojde k dalšímu ozáření nebo jakémukoli poškození.

Existují tři modely hodnotící ozáření lidského těla:

- **Lineární bezprahový model** je využíván radiační ochranou, jeho tvrzení je založeno na škodlivosti jakéhokoliv ozáření, přičemž riziko se lineárně zvyšuje s dávkou.
- Stanovisko **prahového modelu** spočívá v riziku ozáření, které je přímo úměrné dávce, avšak až tehdy, kdy je dosaženo určité hodnoty (prahová hodnota).

- Základem **hormezového modelu** je nízká dávka – do této dávky má záření prospěšný efekt, škodlivé účinky se objevují až po překročení prahu nízké dávky.

Co se týká vyvolání rakoviny ozářením, v dnešní době je mnohem více informací o tomto tématu než o nežádoucích účincích nebezpečných látek. Data, která byla nashromážděna za posledních 20 let vypovídají o tom, že procesy probíhající na úrovni DNA v každé buňce mají obrovský vliv na vznik rakoviny po ozáření (KUBINYI et al., 2018).

Tabulka 6 - radiosenzitivita tkání a orgánů (KUBINYI et al., 2018)

Citlivost některých orgánů a tkání na vyvolání rakoviny		
Vysoká	Střední	Nízká
Kostní dřev	Žaludek	Mozek
Prs	Vaječníky	Kost
Štítná žláza	Tračník	Děloha
Plíce	Močový měchýř	Ledvina
Gonády	Kůže	Jícen
Výstelka střev		Játra

3.13.3.1 Akutní nemoc z ozáření

Projeví se vždy, když dojde k jednorázovému ozáření celého těla vysokou dávkou. Nejpravděpodobnější místo pro setkání s tímto jevem je prostředí jaderných elektráren po havárii. První zkoumání a popsání akutní nemoci z ozáření u člověka bylo provedeno při bombardování Japonska během druhé světové války. Poznatky a záznamy se dále shromažďovaly vždy po jaderných haváriích. (FILIPOVÁ et al. 2016; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

Akutní nemoc z ozáření je charakteristická svým projevem – a to do 24 hodin po ozáření. Dochází k poškození důležitých struktur uvnitř buněk a DNA. První příznaky se objevují hodinu po ozáření, mohou však trvat i několik měsíců. Veškeré příznaky závisí na dávce. Relativně malé dávky způsobují poškození krvetvorných buněk v kostní dřevě, gonády a výstelku střev. Důsledkem tohoto poškození je nevolnost, zvracení a průjem –

gastrointestinální účinky. Po odeznění nastupují infekce, krvácivost nebo anemie. Vysoké dávky pak způsobují poškození CNS a končí rychlou smrtí. Léčba akutní nemoci z ozáření vyžaduje komplexní přístup a je velice složitá. (FILIPOVÁ et al. 2016; HUŠÁK, 2009; ŠVEC, 2014)

V praxi je možné „vysoké dávky“ rozdělit do dvou skupin – na **subletální** a **letální**. Subletální je taková dávka, která neusmrtí ani jednoho člověka z uvažované skupiny; naopak letální dávka usmrtí minimálně jednoho a maximálně všechny ze skupiny. Letální dávka je nejčastěji vyjadřovaná jako výskyt usmrčených jedinců ve skupině v procentech vztažený k určitému časovému úseku. Velice častým vyjádřením pak bývá tzv. střední letální dávka charakterizovaná jako dávka, která usmrtí 50 % jedinců ke třicátému či devadesátému dni od ozáření ($LD_{50/30}$; $LD_{50/90}$). Minimální absolutní letální dávkou rozumíme dávku, která usmrtí všechny subjekty ve skupině (KUBINYI et al., 2018).

Zajímavostí je fakt, že pokud se při ozáření nachází v ozařované tkáni kyslík, dochází ke zvýšení účinků záření. Při porovnání ozáření buňky jednorázově určitou dávkou a poté stejnou dávkou rozdělenou do několika frakcí se výsledek liší. Frakcionace dávky má pozitivní vliv na usmrcení buněk, takže je ve výsledku počet přeživších buněk vyšší než při jednorázovém ozáření. Tento jev je připisován většímu časovému intervalu, který tak poskytuje delší dobu pro opravující mechanismy. Na přežití buněk má zásadní vliv také **dávkový příkon** při ozařování. Toho je využíváno v radioterapii, kde se minimalizuje poškození okolní tkáně v místě nádoru. Nádory totiž bývají ve většině případů na záření citlivější než zdravá tkáň.

Z obecného hlediska lze rozdělit poškození, které je způsobeno zářením, na **akutní** a **chronické**. Pokud nepočítáme akutní nemoc z ozáření, patří do akutních poškození zejména akutní lokální poškození některých orgánů (především kůže). Do poškození chronických nebo dlouhodobých řadíme především zhoubné nádory, zákal oční čočky, chronický zánět kůže a jiných orgánů a v neposlední řadě také genetické účinky, jež se vyskytnou až na dalších generacích.

Důležité je se poškození z ozáření nějakým způsobem bránit. Ke zmírnění a k částečné ochraně proti deterministickým účinkům slouží tzv. **radioprotektiva**, která mohou významným způsobem redukovat projevy ozáření v lidském těle. Podstatné je zmínit, že musí být podány v určitou dobu, a to ještě před ozářením. Pokud posuzujeme radioprotektiva z hlediska nejvýznamnějších pozitivních účinků, řadí se na první příčky látky obsahující **sulphydrylovou** skupinu (-SH), například cystamin. Mechanismus zodpovědný za ochranný účinek této látky

spočívá ve „**vyřazení**“ volných radikálů, které vznikají radiolýzou vody, skupinou **-SH**. Dalšími radioprotektivy může být například jód ve formě tablet sloužící jako profylaxe před ozáření štítné žlázy radioaktivním jódem (KUBINYI et al., 2018).

Závažný problém vzniká v případě požití či vnitřní kontaminaci. Zde se využívá tzv. **antidot**, jež pomáhají odstranit nebo urychlit odstranění zářiče z organismu. Je však potřeba mít paměti, že žádná látka, jak antidotum, tak radioprotektivum, neochrání lidské tělo dokonale. Jednak vždy dojde k nějakému poškození, jednak od určité hranice dávky nepomáhá žádná ochraňující látka – a nastává smrt (KUBINYI et al., 2018).

3.14 Zásady radiační ochrany

Radiační ochrana je obor, který existuje již nějakou dobu. Proto také prodělala několik formovacích změn, než se její filozofie dostala tam, kde je dnes. Jde tedy o ochranu před účinky ionizujícího záření jak externího, tak interního.

Rovněž bylo třeba zredukovat, omezit a udržet hodnoty ozáření na vyhovující úrovni. Proto byly vyvinuty přístroje a nástroje se schopností záření měřit a monitorovat. Důležitost opatření je možné spatřit v případě, kdy porovnáváme data z USA z roku 1980 a data z nynější doby. Je patrné, že nárůst prováděných vyšetření a dalších aplikací v medicíně je více než znatelný. V roce 1980 byla v USA hodnota dávky pracovníka naměřená na pracovišti s radiačními přístroji 0,53 mSv. Z přírodního pozadí pak jedinec obdržel dávku 2,3 mSv. Vše ostatní pak činilo dávku 0,05 mSv. Po sečtení je tedy výsledná hodnota cca 3 mSv za rok. Data z dnešní doby hovoří jasně – medicína 3 mSv, přírodní pozadí 2,4 mSv, spotřební předměty 0,005 mSv, jaderné elektrárny 0,0005 mSv, ostatní 0,005 mSv. Celková dávka na jedince pak připadá asi **5,6 mSv** ročně. Tyto hodnoty však nelze vztáhnout na každého člověka, v některých případech bude nižší a v některých vyšší. V USA se lékařské ozáření stává polovinou příjmu ozáření za celý rok a tato hodnota stále roste. Je tedy nevyhnutelné, aby tak obrovský nárůst především diagnostických vyšetření vedl k vyšší incidenci rakoviny (KUBINYI et al., 2018).

Systém radiační ochrany byl zaveden proto, aby bylo dosaženo možnosti využívat všechny jaderné a radiační technologie a také, aby při jejich používání nebyl nikdo vystaven dávkám, které by mohly vyvolat deterministické účinky a zároveň aby riziko stochastických účinků bylo stlačeno na minimum, jak to jen ekonomická a sociální hlediska dovolí. Principy radiační ochrany se odvozují od vědeckých bádání v radiobiologii a také z hodnot, které jedinec obdrží při vyšetření. Tyto principy jsou následně aplikovány v praxi. Radiační ochrana se s postupem

času vyvíjí – zejména díky příjmu nových poznatků z praxe. Tento vývoj se nejvíce promítl do zpřísňování kvantifikace ozáření.

Další částí radiační ochrany, která je poměrně upozaděna, je její složitost pro laickou veřejnost. Vzhledem k používaným veličinám je mnohdy nesrozumitelná – je tedy nezbytné k porozumění používat vhodného srovnání, nejčastěji radiační nebezpečí s nebezpečím, jemuž čelíme v jiných situacích. Pro správné porozumění je v **Tabulce 7** několik příkladů.

Tabulka 7 - riziko smrti při různých činnostech (KUBINYI et al., 2018)

Činnost nebo důvod	Celoživotní riziko
Všechny druhy zhoubných nádorů	4
Kouření 10 cigaret denně	5
Nehoda při řízení automobilu	350
Nehoda v domácnosti	400
Nehoda chodce	652
Udušení	894
Náhodná otrava	1030
Utopení	1127
Oheň nebo kouř	1181
Pád na schodech	2024
Rakovina vyvolaná PET vyšetřením s ^{18}F	2700
Nehoda na kole	4734
Rakovina vyvolaná vyš. kostí s $^{99\text{m}}\text{Tc}$	4760
Náhodný výstřel ze zbraně	6333
Nehoda při cestování letadlem	7059
Zásah bleskem	84388

Hodnoty uvedené v **Tabulce 7** jsou vztaženy k poměru jedné události a určitému počtu událostí, tedy například jeden ze 350 řidičů automobilu je za celý svůj život vystavený jen jednou smrtelnému nebezpečí. (KUBINYI et al., 2018, HUŠÁK, 2009)

Při diagnostických vyšetřeních se vždy snažíme provádět výkony tak, aby ozáření pacienta bylo co nejmenší a aby bylo zároveň dosaženo optimálního výsledku. Naproti tomu v radioterapii jde o to co nejpřesněji zasáhnout určitý objem tkáně v těle, tedy zničit nejčastěji tumor a co nejméně postihnout zářením okolní tkáně a orgány. Ozáření vedlejších tkání se však nelze vyhnout. Pokud uvažujeme riziko v podobě stochastických účinků vyvolané radioterapií, je třeba také posoudit riziko, které by vzniklo, pokud by výkon nebyl proveden.

Po diagnostické aplikaci radionuklidu je třeba mít na paměti, že se pacient stává radioaktivním zdrojem – tedy emituje záření. Proto je tedy nezbytné, aby pacient na určitou dobu omezil kontakty s jinými osobami, aby se zabránilo nežádoucímu ozáření. Především aby se nestýkal s dětmi či těhotnými ženami. Dávky, které pacient vyzařuje, jsou sice malé, ale podle zásad radiační ochrany – udržet všechny nežádoucí dávky na nejnižší úrovni – je třeba vyčkat, dokud tělo nevyloučí veškeré množství radioaktivní látky. Doba, po kterou se pacient nesmí s týkat s osobami, jež jsou citlivé na jakékoliv dávky, se v zásadě moc neliší. Ve většině případů je to do konce téhož dne, kdy proběhlo vyšetření, nebo do druhého dne. (FILIPOVÁ et al. 2016, SÚJB 2000, HUŠÁK, 2009)

Díky dalšímu vývoji v oblasti detekčních zařízení, jež vykazují vyšší citlivost, jsou používané hodnoty spojené s radiačními výkony stále přehodnocovány. Výsledkem tedy je, že pacient obdrží nižší dávku. Tyto konkrétní změny dávek, v podstatě jejich snížení, vedou k optimalizaci radiační zátěže pacienta.

Na druhou stranu se například v USA i jiných zemích objevuje tzv. obranná medicína. Indikující lékař žádá o vyšetření pacienta převážně z důvodu své ochrany proti nespokojenosti, která často vyústí v soudní pře či žaloby s pacientem či jeho rodinou. (KUBINYI et al., 2018, HUŠÁK, 2009)

3.14.1 Zajištění radiační ochrany a monitorování ionizujícího záření

Hlavní aspekty radiační ochrany a zabezpečení vycházejí z tzv. atomového zákona. Tento zákon je využíván především k ochraně osob proti nežádoucím účinkům záření a také ke kontrole ozáření, které proběhlo v rámci nukleární medicíny, pomocí radionuklidů. (FILIPOVÁ et al. 2016, SÚJB, 2000)

Tabulka 8 - ozáření zdroji různých kategorií a jejich deterministické účinky (KUBINYI et al., 2018)

Kategorie zdroje	Důsledky vnějšího ozáření osob, nacházejících se v těsné blízkosti	Vnitřní ozáření vyvolané disperzí radioaktivní látky požárem či výbuchem
1	Extrémně nebezpečný: zdroj záření způsobuje permanentní zdravotní poškození nebo i smrt v průběhu několika minut či hodin.	Pokud se osoba či osoby nacházejí v těsné blízkosti zářiče, může dojít k výraznému poškození včetně fatálních následků, avšak jen při vnitřní kontaminaci. Poškození zdraví jedinců, jež se nacházejí několik metrů od zářiče, nebude významné. Zasažená oblast bude vyžadovat nákladnou dekontaminaci.
2	Velmi nebezpečný: projevy poškození zdraví jsou závažné, může nastat i smrt a to v případě, že by osoba byla vystavena záření několik hodin.	Výskyt závažných účinků je možný, avšak málo pravděpodobný.
3	Nebezpečný: projevy závažných účinků jsou možné jen v případě, kdy dojde k manipulaci s nestíněným zářičem, která bude trvat několik dní	Pravděpodobnost výskytu závažných účinků je velice malá. Zasažená oblast se omezí na 100m ² .
4	Nebezpečný zdroj záření s malou pravděpodobností: závažné účinky se dostaví u osob, jež byly vystaveny nestíněnému zdroji po několik týdnů	Nedochází k trvalému poškození zdraví.
5	Velmi nízká pravděpodobnost účinků na zdraví člověka: nedochází k trvalému poškození.	Nedochází k trvalému poškození.

Dohled a správu nad mírovým využíváním jaderné energie vykonává SÚJB. Do pravomocí tohoto orgánu spadá také stanovování základních podmínek a požadavků k zajištění radiační ochrany, jaderné bezpečnosti a reakci na radiační mimořádnou událost. (KUBINYI et al., 2018, HUŠÁK, 2009)

Státní úřad pro jadernou bezpečnost je povinen se zabývat i jinými úkoly. Především je to zajištění radiační ochrany na pracovištích, kde je využíváno ionizující záření pro diagnostické a také terapeutické účely.

V této oblasti se nejvíce uplatňuje princip optimalizace. Jednou z částí jsou diagnostické referenční úrovně. **DRÚ** jsou nástrojem pro optimalizace, avšak do jisté míry. Samotné stanovení a dodržování je jako optimalizace nedostatečné. DRÚ jsou tedy úrovně dávek, které se používají pro běžně prováděné vyšetření pomocí RTG systémů. Diagnostické referenční úrovně se používají pouze pro skupinu pacientů, nikoliv pro jednotlivce. (FILIPOVÁ et al., 2016, SÚJB, 2000, HUŠÁK, 2009)

Zdroje ionizujícího záření se podle míry ohrožení zdraví osob a životního prostředí řadí jako **nevýznamné, drobné, jednoduché, významné, velmi významné**. Také pracoviště, kde se provádí radiační činnosti, jsou řazeny, a to do **I., II., III., IV.** kategorie. Radiační pracovníci jsou rozděleni do kategorie **A** a **B**. (KUBINYI et al., 2018, HUŠÁK, 2009)

Rozdělení pracovišť závisí nejvíce na tom, jaká jaderná zařízení jsou na pracovišti využívána a s jakými zdroji ionizujícího záření se pracuje.

- Nevýznamné zdroje – požární hlásič,
- drobné zdroje – více než 20 ionizačních hlásičů požáru,
- jednoduché zdroje – zubní rentgen,
- významné zdroje – generátory záření, urychlovače částic,
- velmi významné zdroje – jaderný reaktor.

Dále je důležité zaměření pracoviště a rozsah využívaných zdrojů.

- I. kategorie – kostní denzitometry imunologická laboratoř;
- II. kategorie – diagnostická nukleární medicína;
- III. kategorie – terapie v NM, ozařovače, urychlovače částic;
- IV. kategorie – sklady radioaktivního odpadu, jaderné reaktory;

Pracoviště lze také dále rozdělit na **sledované** a **kontrolované pásmo**.

Sledované pásmo je vymezeno v prostorách, kde by mohlo dojít k ozáření, které překročuje efektivní dávku **1 mSv** za kalendářní rok, nebo kde by mohlo dojít k překročení ekvivalentní dávky, a to 1/10 příslušného dávkového limitu pro oční čočku, končetiny a kůži. **Kontrolované pásmo** je vymezeno ve všech prostorách, kde by za určitých podmínek mohlo dojít k překročení efektivní dávky **6 mSv** za kalendářní rok nebo 15 mSv ekvivalentní dávky pro oční čočku nebo 3/10 limitů ekvivalentní dávky pro pracovníky. (KUBINYI et al., 2018, SÚJB, 2000)

Pro účely lékařského dohledu a monitorování a také podle ohrožení na zdraví se radiační pracovníci dělí do dvou skupin, kategorie **A** a **B**. Radiační pracovník **kategorie A** je takový pracovník, který by mohl na pracovišti obdržet efektivní dávku vyšší než **6 mSv** za kalendářní rok. Může pracovat v kontrolovaném i sledovaném pásmu. Ostatní radiační pracovníci spadají do kategorie **B**. Ti pracují pouze v pásmu sledovaném, kde je možnost překročení limitu 1/10. (KUBINYI et al., 2018, FILIPOVÁ et al., 2016, SÚJB, 2000, HUŠÁK, 2009)

VÝZKUMNÁ (PRAKTICKÁ) ČÁST

4 METODIKA VÝZKUMNÉ (PRAKTICKÉ) ČÁSTI

V praktické části práce byly formou kvízu zjišťovány znalosti radiačních pracovníků z oboru radiační ochrany a v širším kontextu také jejich porozumění fyzikálním jevům, které se uplatňují při diagnostice metodami nukleární medicíny. Tento kvíz byl vytvořen pro zjištění aktuálních znalostí radiačních pracovníků, resp. proto, aby pomohl nalézt slabá místa jejich přípravy v radiační ochraně. V návaznosti na výsledky kvízu byl vytvořen jednoduchý vzdělávací materiál, ze kterého bude mít každý možnost čerpat. Vzhledem k počtu otázek v kvízu, jsou cílem pouze vybraná témata.

4.1 Charakteristika kvízu

Vlastní kvíz obsahoval část s obecnými popisnými položkami a část znalostní, která obsahovala 20 položek s volbou jedné nebo více správných odpovědí. V popisné části bylo zjišťováno pohlaví respondenta a pracovní zařazení ve vztahu k radiační ochraně a délka praxe ve zdravotnictví.

Příklad znalostní otázky s jednou správnou odpovědí.

1. Přírodní zdroje ionizujícího záření způsobují na území České republiky ozáření lidí, které:
 - a. Je prakticky nulové a nelze je změřit
 - b. Způsobuje za rok tzv. osobní dávkový ekvivalent cca jednotek mikroSievert
 - c. Způsobuje při ozáření za rok tzv. osobní dávkový ekvivalent cca jednotek miliSievert**
 - d. Způsobuje při ozáření za rok tzv. osobní dávkový ekvivalent v cca jednotek Sievert
 - e. Nevím

Zde je možné vybrat jen jednu správnou odpověď.

V uvedeném příkladu je správnou odpovědí alternativa C. Odpověď E je doplňková, aby respondenti nemuseli hádat; vždy je však považována za nesprávnou odpověď. Při statistickém zpracování byla za správnou odpověď považována odpověď C, četnost správných odpovědí je tedy rovna jejich počtu. Četnost nesprávných odpovědí byla stanovena

jako rozdíl počtu respondentů a počtu správných odpovědí alternativy C, relativní počet správných a nesprávných odpovědí byl vztažen k celkovému počtu možných odpovědí, tj. 50.

Příklad znalostní otázky s více správnými odpověďmi.

2. Umělé zdroje ionizujícího záření v medicíně jsou:

- a. **Radiofarmaka**
- b. **Zobrazovací přístroje se zdrojem rentgenového ionizujícího záření**
- c. **Terapeutické přístroje se zdroje rentgenového ionizujícího záření**
- d. **Terapeutické zdroje s radionuklidovým zdrojem ionizujícího záření**
- e. Nevím

Zde je možné vybrat více správných odpovědí.

V tomto příkladu jsou správné odpovědi alternativy A, B, C i D. Odpověď E je doplňková, aby respondenti nemuseli hádat; vždy je však považována za nesprávnou odpověď. Při statistickém zpracování byly za správnou odpověď považovány samostatně alternativy A, B, C i D, jeden respondent tedy mohl odpovědět max. 4× správně a celková maximální četnost správných odpovědí této položky pro 50 respondentů činí 200. Relativní četnost správných odpovědí byla vypočtena pro jednotlivé alternativy i pro celou položku. Četnost nesprávných odpovědí byla stanovena jako rozdíl počtu respondentů a počtu správných odpovědí pro jednotlivé alternativy A, B, C a D. Relativní četnost nesprávných odpovědí pro alternativu byla stanovena jako poměr četnosti nesprávných odpovědí pro alternativu ku součtu všech nesprávných odpovědí alternativ A, B, C a D.

Příklad popisné otázky

1) Ve zdravotnictví pracuji:

- a) Méně než 5 let
- b) 5 až 10 let
- c) 11 až 20 let
- d) Déle než 20 let
- e) Nechci odpovědět

U popisných otázek byly stanoveny absolutní a relativní četnosti.

Kvíz byl vytvořen ve formě online dotazníku v prostředí Google Forms. Pro pracovníky, kteří nechtěli kvíz vyplňovat on-line, byla vytvořená tištěná verze s totožným obsahem (viz. https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScKbNC-xIM_7hXHIVMMAtEPCOHaA_QdoZs0t-ceL-Iq-TnBlg/viewform?usp=sf_link a **Příloha B**).

Kvíz byl anonymní, jedinými sbíranými daty byly odpovědi zvolené v dotazníku. V případě on-line kvízu se data s výsledky automaticky ukládala na Google Disku. Odpovědi u kvízu v papírové formě byly shromažďovány na recepci oddělení, kde je měl každý po vyplnění odevzdat. Počet oslovených respondentů byl 50. Sběr dat probíhal od 10.2. – 28.4.2022.

Vzhledem k tomu, že žádost o zveřejnění jména nemocnice a oddělení nebyla kladně vyřízena, je celý tento výzkum anonymní.

4.2 Zpracování a prezentace dat

Získaná data byla zpracovávána jednak automaticky v Google Forms, kde je možné ihned po odeslání výsledků respondenta vidět automaticky generované grafy (platí pouze pro on-line formu) a jednak z větší části byly výsledky ihned zanášeny do tabulek v programu Excel. Vzhledem k délce vět jsou odpovědi v tabulkách označeny písmeny A až F.

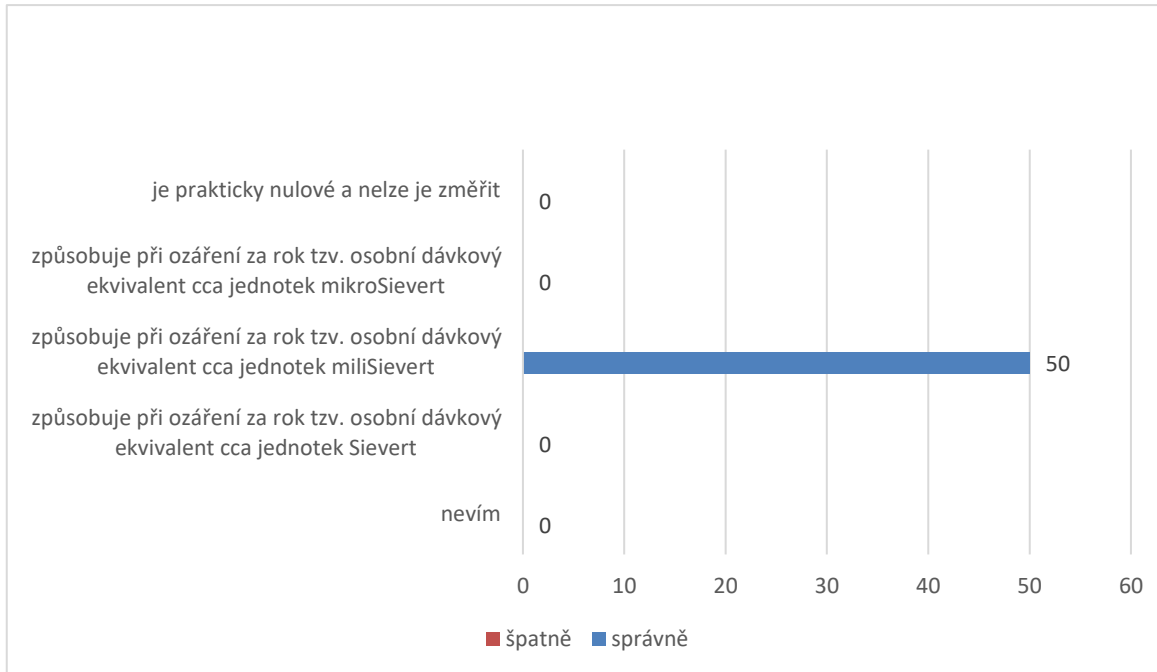
4.3 Výsledky

V tomto oddíle jsou uvedeny výsledky jednotlivých kvízových položek znalostní části v pořadí, ve kterém byly zařazeny do kvízu. U každé položky je v tabulce uvedena absolutní a relativní četnost. Vzhledem k délce vět jsou odpovědi v tabulkách označeny písmeny A až F. Např. místo odpovědi *je prakticky nulové a nelze je změřit*, je v tabulce písmeno A.

4.3.1 Otázka 1

Přírodní zdroje ionizujícího záření způsobují na území České republiky ozáření lidí, které:

Graf 2 - Otázka 1



U této otázky byla stoprocentní úspěšnost. Všichni respondenti odpověděli správně a tedy ví, jaké jednotky má osobní dávkový ekvivalent.

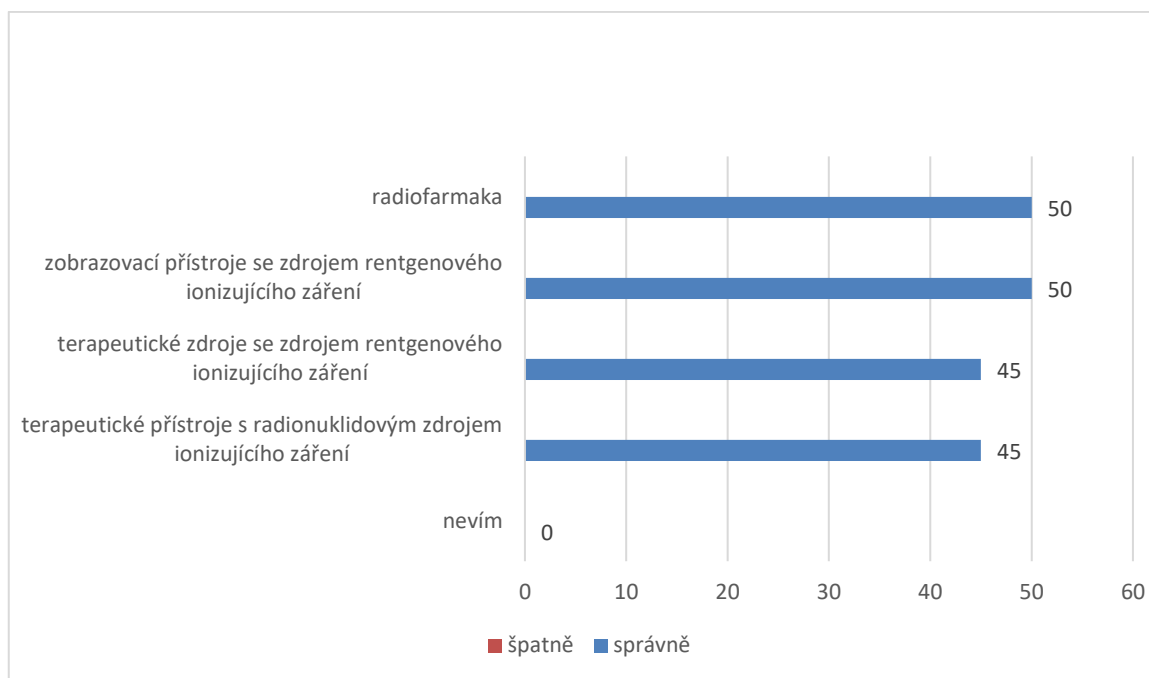
Tabulka 9 - četnosti otázky 1

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	50	0	50
Četnost správně rel. [%]	0	0	100	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	0	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	0	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	50				
Četnost celkem správně rel. [%]	100				

4.3.2 Otázka 2

Umělé zdroje ionizujícího záření používané v medicíně jsou:

Graf 3 - Otázka 2



U otázky č.2 nebyly vybrány všechny správné odpovědi. Přesto je výsledek dobrý, celkem nevybralo možnost C a D 10 respondentů. Možnost Nevím, tedy E, nikdo nevyužil.

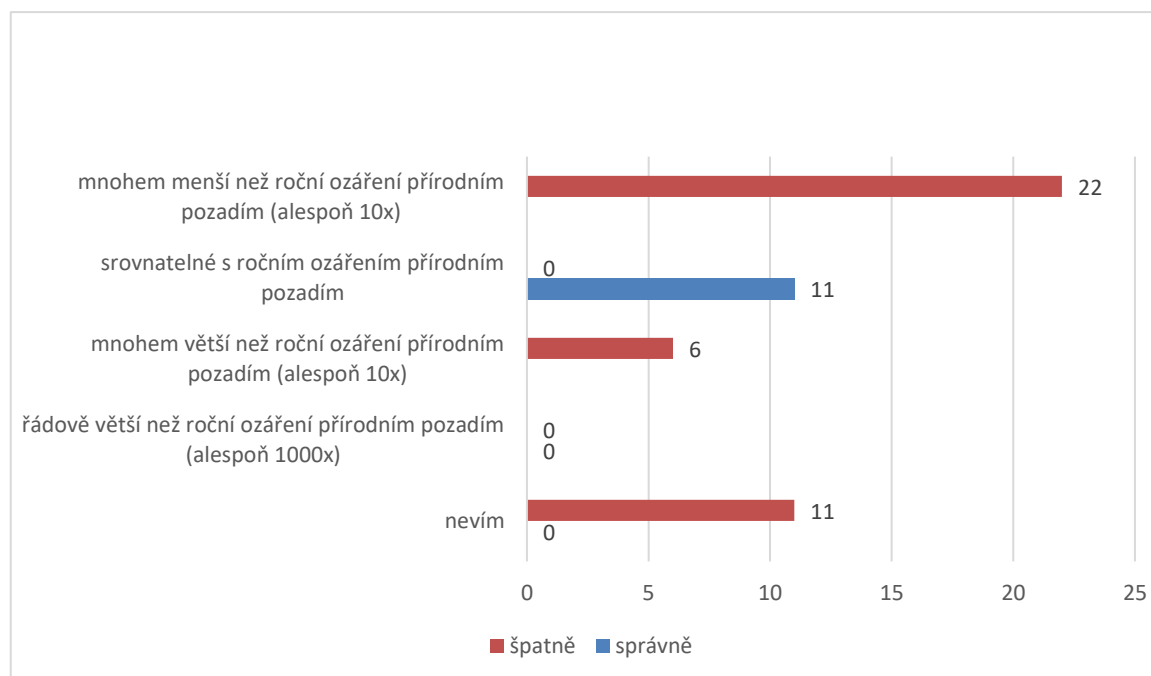
Tabulka 10 - četnosti otázky 2

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	50	50	45	45	50
Četnost správně rel. [%]	100	100	90	90	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	5	5	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	10	10	0
Četnost celkem správně abs. [N]	190				
Četnost celkem správně rel. [%]	95				

4.3.3 Otázka 3

Běžné skiagrafické vyšetření bederní páteře (RTG snímek) způsobí pacientovi ozáření, které je:

Graf 4 - Otázka 3



U třetí otázky je vidět, že jen 22 % respondentů ví, jaké je zhruba ozáření pacienta při běžném skiagrafickém vyšetření (B). Ve větší míře také respondenti volili možnost Nevím (E). Stojí také za pozornost, že téměř polovina zúčastněných vybrala první možnost.

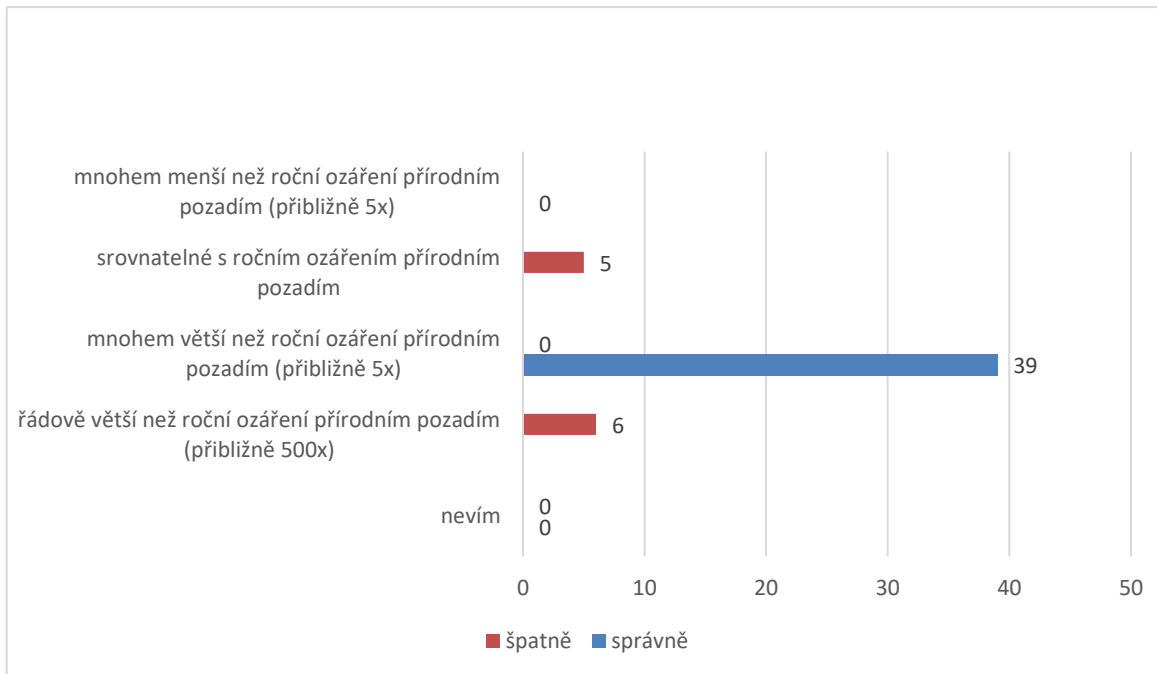
Tabulka 11 - četnosti otázky 3

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	11	0	0	0
Četnost správně rel. [%]	0	22	0	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	22	39	6	0	11
Četnost nesprávně rel. [%]	56	78	15	0	28
Četnost celkem správně abs. [N]	11				
Četnost celkem správně rel. [%]	22				

4.3.4 Otázka 4

Běžné CT vyšetření bederní páteře (výpočetní tomografie) způsobí pacientovi ozáření, které je:

Graf 5 - Otázka 4



Otázka 4 je na tom opět lépe. Z dat lze vyčíst, že více jak polovina respondentů ví, jaké ozáření pacientovi způsobí CT vyšetření bederní páteře.

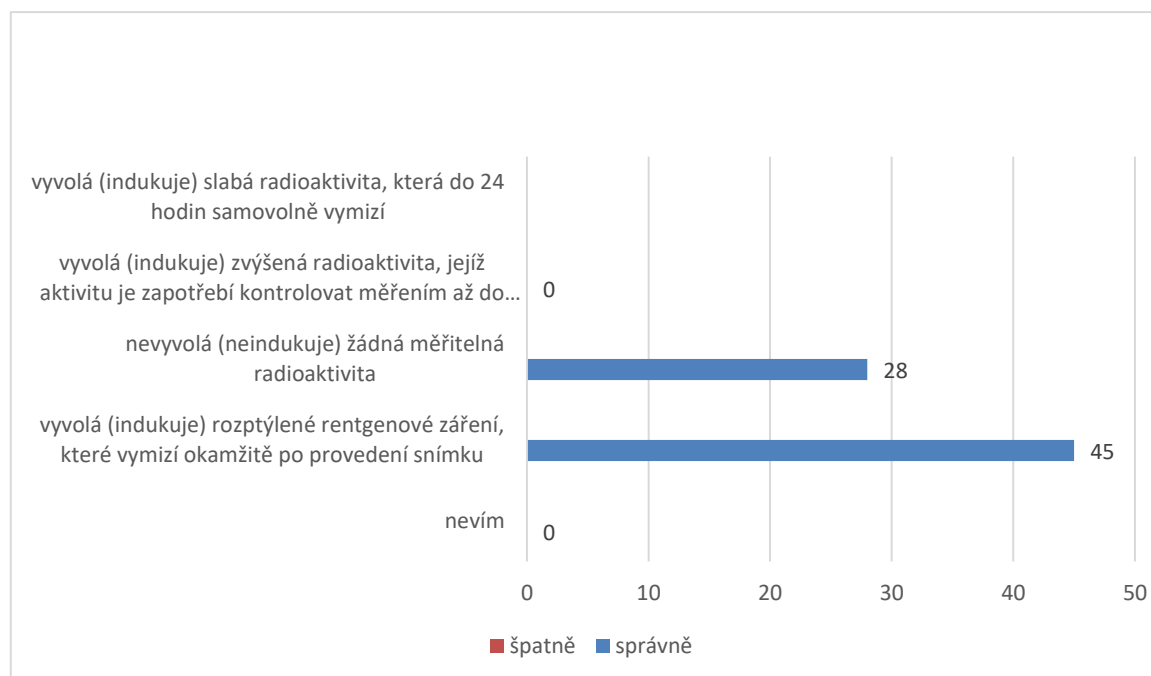
Tabulka 12 - četnosti otázky 4

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	39	0	50
Četnost správně rel. [%]	0		78		100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	5	11	6	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	45	22	54	0
Četnost celkem správně abs. [N]	39				
Četnost celkem správně rel. [%]	78				

4.3.5 Otázka 5

Při skiaskopickém nebo skiagrafickém vyšetření (rentgenovém snímkování) se v těle pacienta:

Graf 6 - Otázka 5



Otázka 5 je zajímavá tím, jaké odpovědi respondenti nevybrali, tedy podle dat si 22 respondentů myslí, že se v těle indukuje měřitelná radioaktivita.

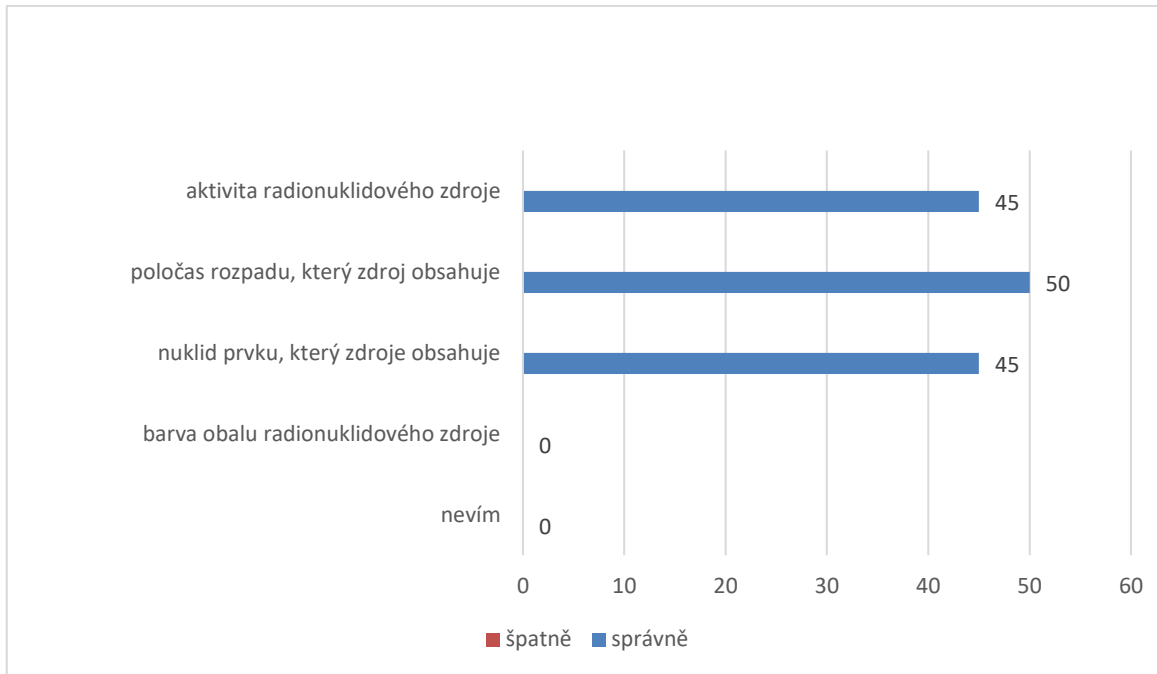
Tabulka 13 - četnosti otázky 5

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	28	45	50
Četnost správně rel. [%]	0	0	56	90	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	22	5	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	44	10	0
Četnost celkem správně abs. [N]	73				
Četnost celkem správně rel. [%]	73				

4.3.6 Otázka 6

Důležitou charakteristikou radionuklidového zdroje je:

Graf 7 - Otázka 6



Vybrané odpovědi u otázky 6 jsou správné, ale 10 respondentů nevybralo všechny odpovědi (A) a (C). Jak vyplývá z **Tabulky 14** i grafu, poločas rozpadu znají respondenti velice dobře.

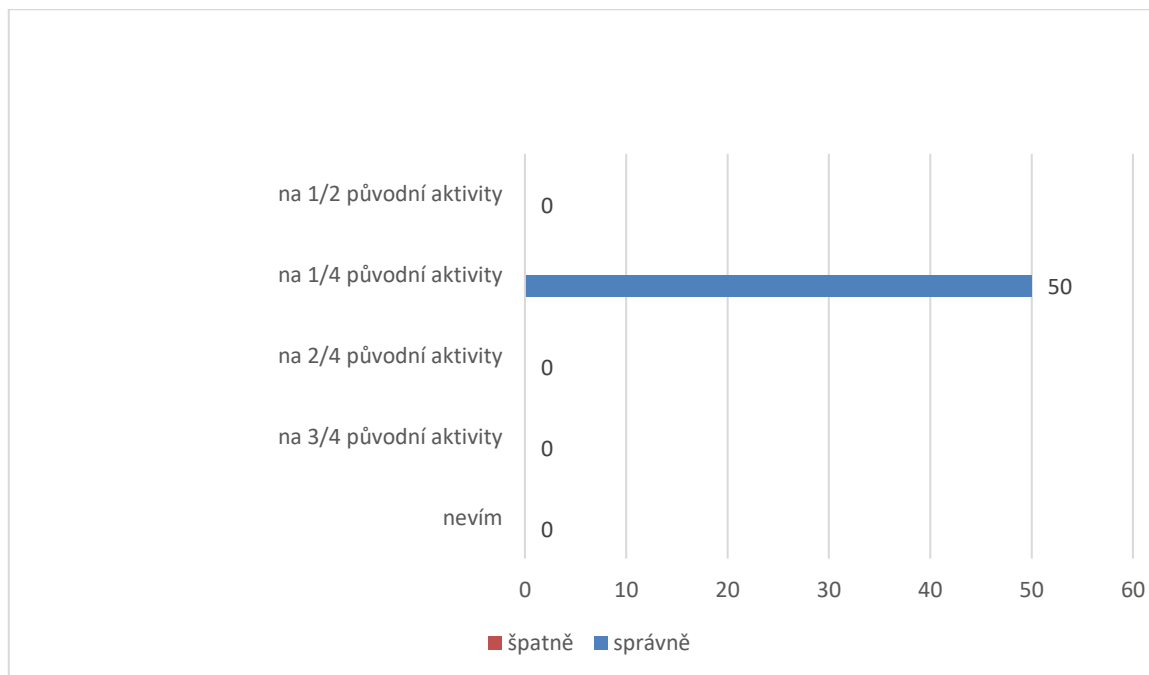
Tabulka 14 - četnosti otázky 6

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	45	50	45	0	50
Četnost správně rel. [%]	90	100	90	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	5	0	5	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	10	0	10	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	140				
Četnost celkem správně rel. [%]	93				

4.3.7 Otázka 7

Poločas rozpadu izotopu daného prvku je doba, za kterou se samovolně rozpadne polovina jeho jader. Za dva poločasy rozpadu se aktivita daného radionuklidového zdroje sníží:

Graf 8 - Otázka 7



V otázce 7 všichni vybrali správnou odpověď. Správně vybrané odpovědi svědčí o tom, že pojem poločas rozpadu všichni znají a umí ho prakticky použít.

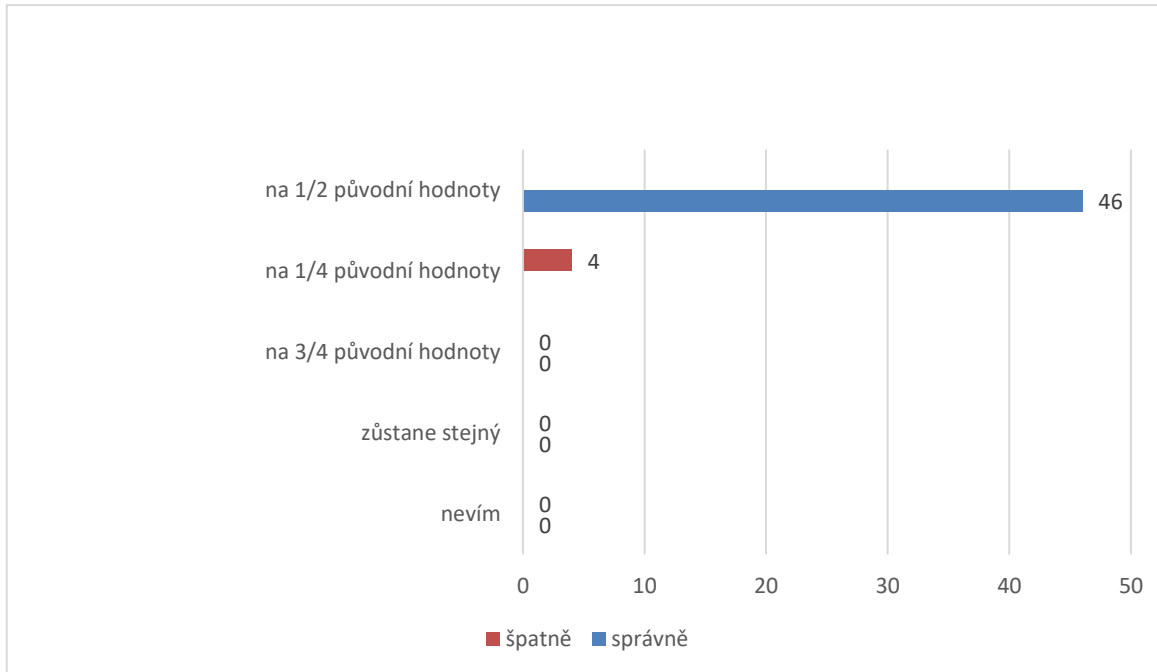
Tabulka 15 - četnosti otázky 7

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	50	0	0	50
Četnost správně rel. [%]	0	100	0	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	0	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	0	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	50				
Četnost celkem správně rel. [%]	100				

4.3.8 Otázka 8:

Při zkrácení doby expozice ionizujícímu záření na $\frac{1}{2}$ se změní osobní dávkový ekvivalent (při zachování ostatních parametrů expozice stejných):

Graf 9 - Otázka 8



V otázce 8 téměř všichni odpověděli správně. Lze tedy říci, že většina respondentů zná způsob ochrany časem.

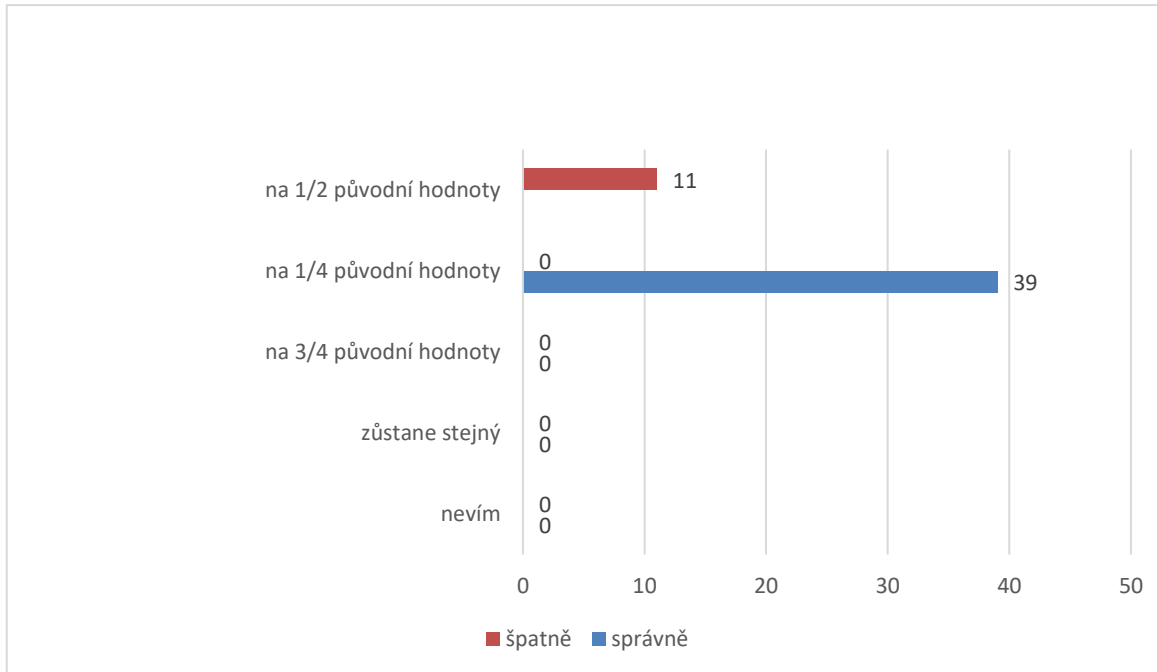
Tabulka 16 - četnosti otázky 8

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	46	0	0	0	0
Četnost správně rel. [%]	92	0	0	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	4	4	0	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	8	100	0	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	46				
Četnost celkem správně rel. [%]	92				

4.3.9 Otázka 9:

Při zvětšení vzdálenosti od lékovky s radionuklidem na dvojnásobek se změní osobní dávkový ekvivalent (ozáření, při zachování ostatních parametrů expozice stejných):

Graf 10 - Otázka 9



Otázka 9 dopadla také poměrně dobře. V této otázce se uplatňuje princip ochrany vzdáleností. Většina respondentů tedy ví, co to pro ně v praxi znamená.

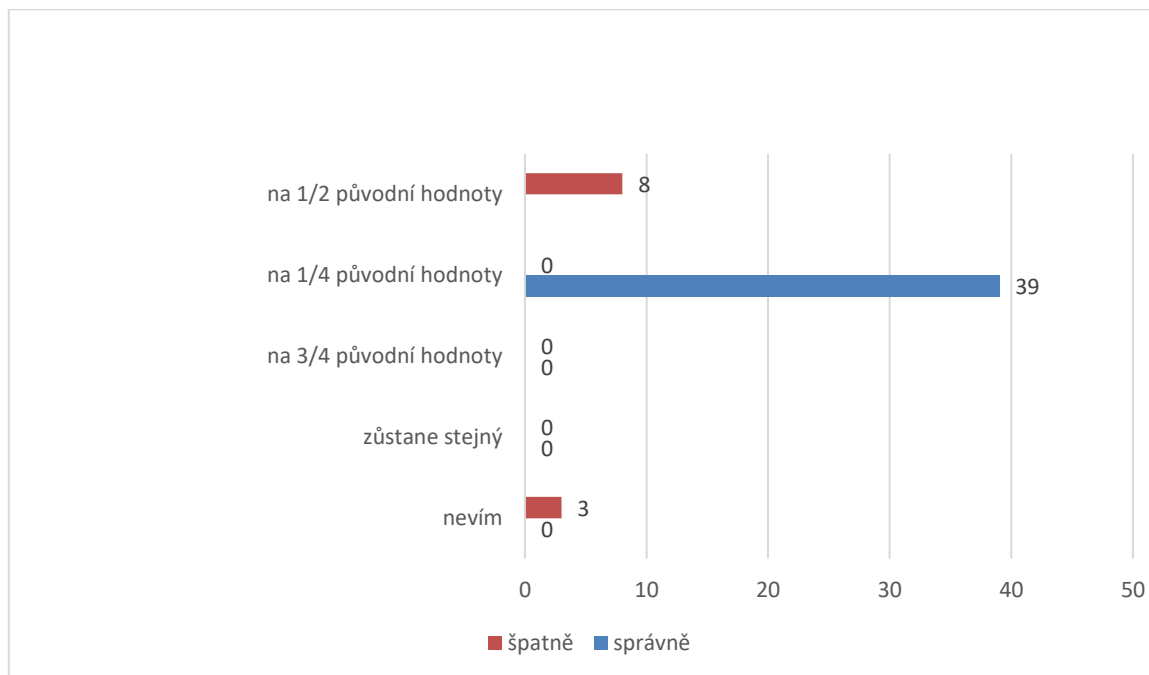
Tabulka 17 - četnosti otázky 9

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	39	0	0	50
Četnost správně rel. [%]	0	78	0	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	11	11	0	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	100	22	0	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	39				
Četnost celkem správně rel. [%]	78				

4.3.10 Otázka 10:

Po umístění lékovky s radionuklidem vyzařujícím gama do kontejneru o tloušťce stěny rovné dvěma polotloušťkám se změní osobní dávkový ekvivalent (ozáření, při zachování ostatních parametrů expozice stejných):

Graf 11 - Otázka 10



Otázka 10 je zaměřena na ochranu personálu stíněním. Opět většina odpověděla správně. Podle dat, 3 respondenti pravděpodobně neví co je to polotloušťka, nebo tuto veličinu neumí aplikovat na příklad z praxe.

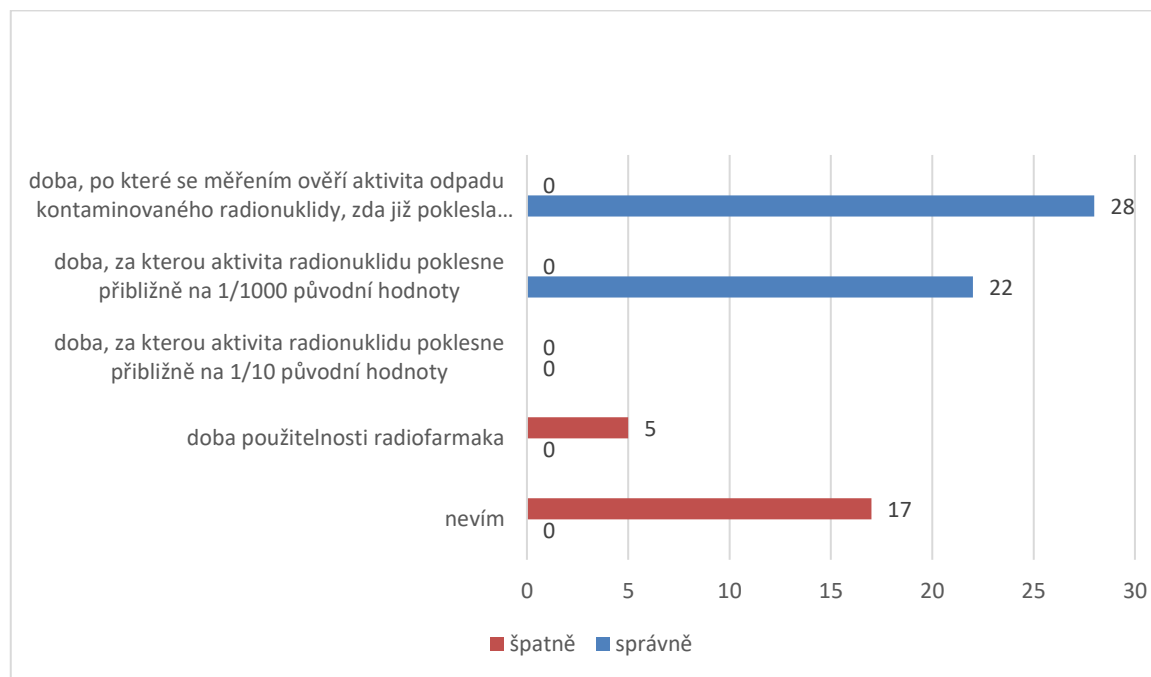
Tabulka 18 - četnosti otázky 10

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	39	0	0	0
Četnost správně rel. [%]	0	78	0	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	8	11	0	0	3
Četnost nesprávně rel. [%]	72	22	0	0	27
Četnost celkem správně abs. [N]	39				
Četnost celkem správně rel. [%]	78				

4.3.11 Otázka 11:

Co znamená pravidlo „deseti poločasů“?

Graf 12 - Otázka 11



Otázka 11 svědčí o tom, že větší část respondentů ví, co je to pravidlo „deseti poločasů“. Lze tedy říci, že většina respondentů ví, kdy zhruba není zdroj ionizujícího záření nebezpečný pro životní prostředí.

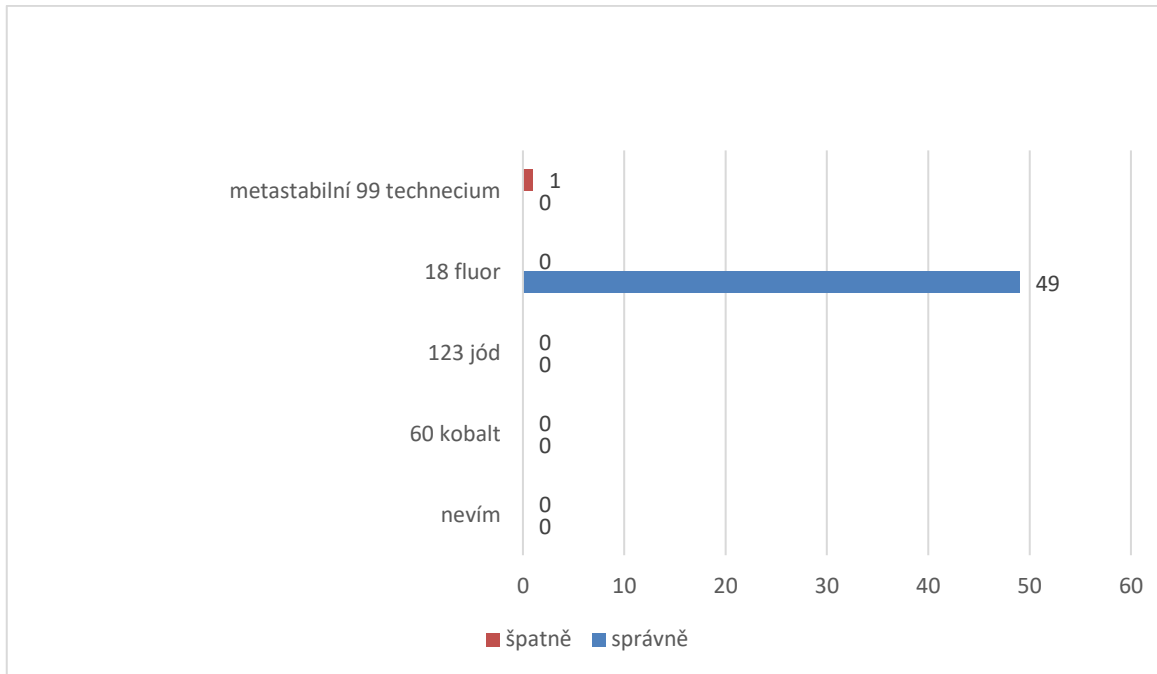
Tabulka 19 - četnosti otázky 11

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	28	22	0	0	0
Četnost správně rel. [%]	56	44	0	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	22	28	0	5	17
Četnost nesprávně rel. [%]	44	56	0	10	34
Četnost celkem správně abs. [N]	50				
Četnost celkem správně rel. [%]	50				

4.3.12 Otázka 12

Jaký radionuklid obsahuje nejčastěji používané radiofarmakum pro PET?

Graf 13 - Otázka 12



U otázky 12 odpověděli skoro všichni správně (98 %). Patrně jeden z respondentů si špatně přečetl otázku a špatně odpověděl. Podle hodnot je jasné, že téměř všichni vědí, jaké radiofarmakum je používáno nejvíce na PET.

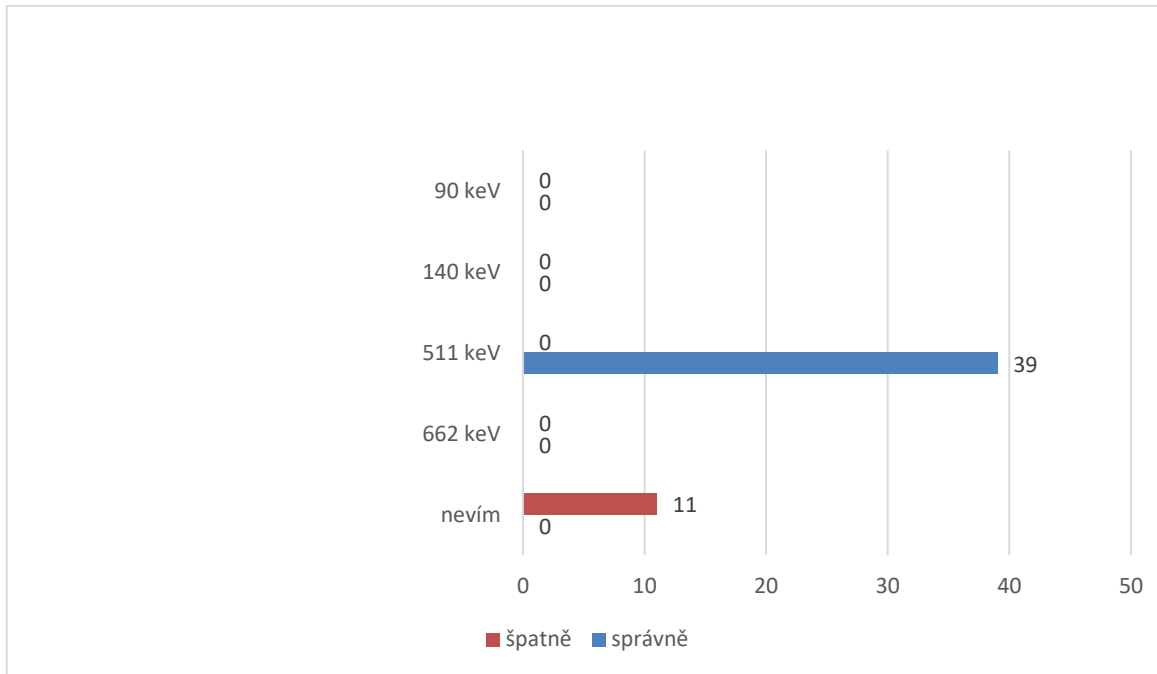
Tabulka 20 - četnosti otázky 12

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	49	0	0	50
Četnost správně rel. [%]	0	98	0	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	1	1	0	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	100	2	0	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	49				
Četnost celkem správně rel. [%]	98				

4.3.13 Otázka 13

Jakou nejvyšší energii mají fotony záření gama detekované při PET?

Graf 14 - Otázka 13



Z otázky 13 vyplývá, že většina dotázaných zná princip PET a to i podrobně. Správně tedy odpovědělo 78 % respondentů.

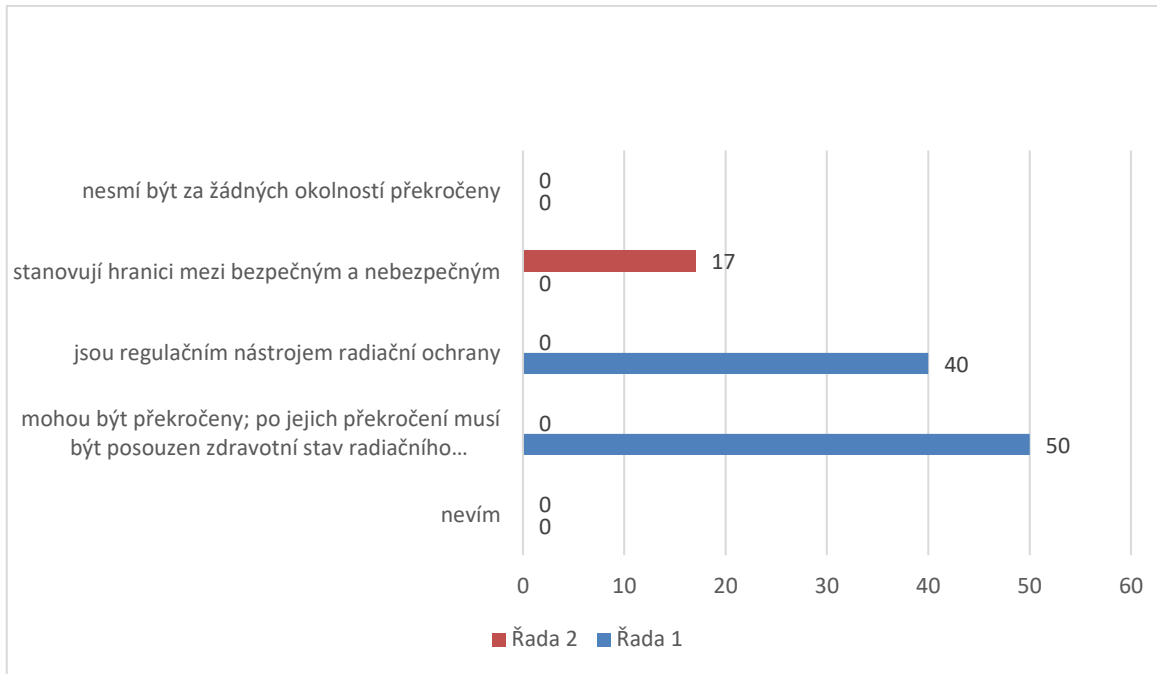
Tabulka 21 - četnosti otázky 13

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	39	0	0
Četnost správně rel. [%]	0	0	78	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	11	0	11
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	22	0	100
Četnost celkem správně abs. [N]	39				
Četnost celkem správně rel. [%]	78				

4.3.14 Otázka 14

Legislativa stanoví limity pro ozáření pro radiační pracovníky. Tyto limity:

Graf 15 - Otázka 14



V otázce 14 lze vidět, že vzdělanost respondentů v legislativě je poměrně dobrá. Jednu ze správných odpovědí dokonce vybralo 100 % respondentů.

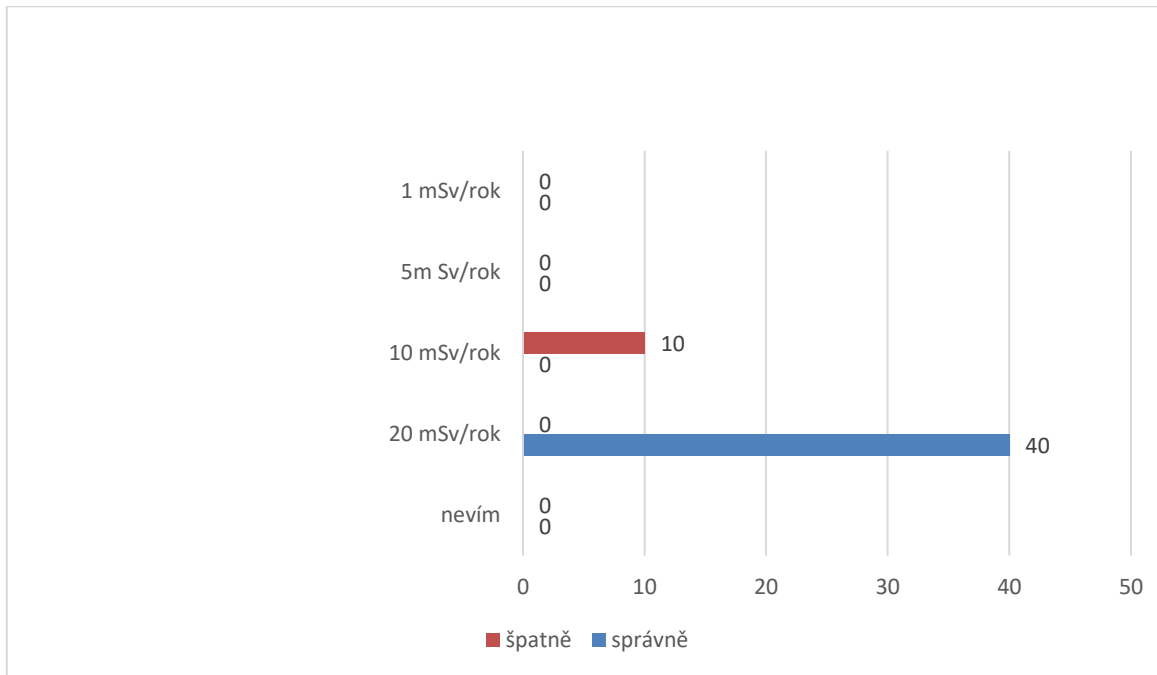
Tabulka 22 - četnosti otázky 14

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	40	50	50
Četnost správně rel. [%]	0	0	80	100	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	17	10	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	30	20	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	90				
Četnost celkem správně rel. [%]	90				

4.3.15 Otázka 15

Legislativa stanoví roční limity ozáření pro radiační pracovníky. Limit ročního součtu efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků z efektivních dávek vnitřního ozáření činní:

Graf 16 - Otázka 15



Otázka 15 se také týká legislativy. V tomto případě už konkrétně cílí na limity pracovníků. Výsledky jsou také dobré, 80 % respondentů vybralo správnou odpověď. Z dat plyne, že většina respondentů má znalosti ohledně limitů správné a ucelené.

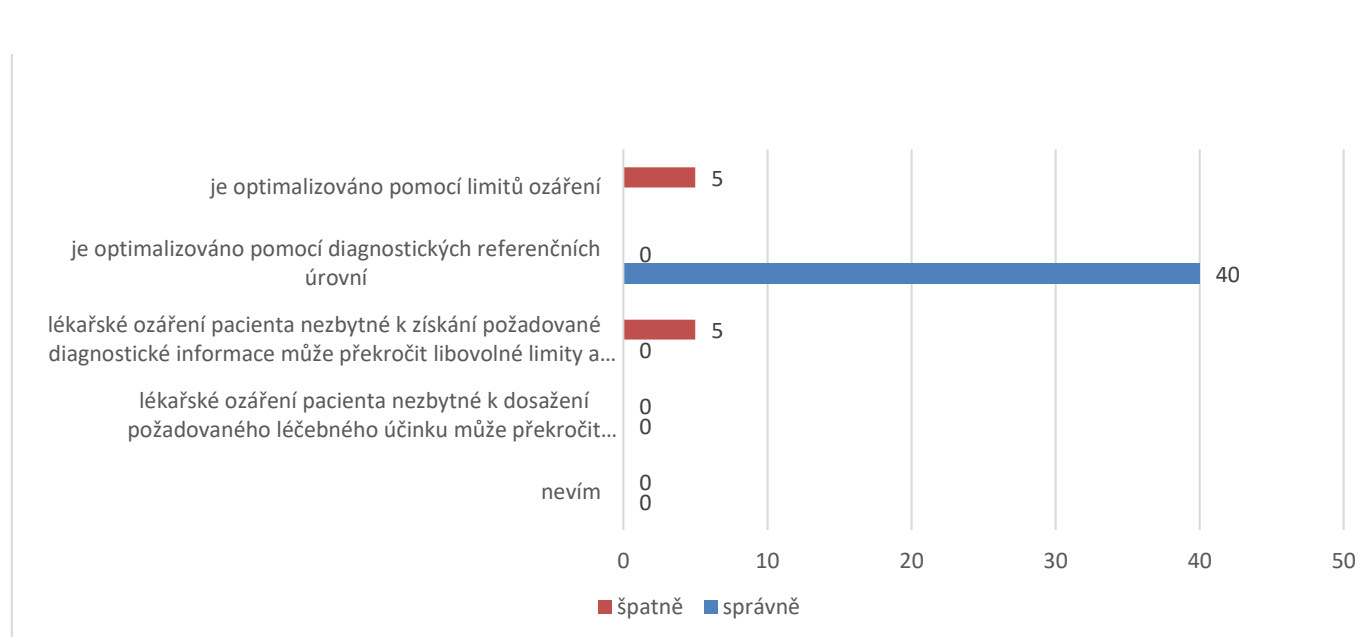
Tabulka 23 - četnosti otázky 15

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	0	40	50
Četnost správně rel. [%]	0	0	0	80	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	10	10	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	100	20	0
Četnost celkem správně abs. [N]	40				
Četnost celkem správně rel. [%]	80				

4.3.16 Otázka 16

Ozáření pacientů při diagnostickém nebo terapeutickém využití ionizujícího záření

Graf 17 - Otázka 16



Otázka 16 se zaměřuje na optimalizaci lékařského ozáření. Je opět vidět, že respondenti tuto oblast znají. Správnou odpověď B vybralo 80 % respondentů. Vzhledem k délce odpovědí C a D je zde uvádím celé: C – lékařské ozáření pacienta nezbytné k získání požadované diagnostické informace může překročit libovolné limity a neoptimalizuje se, D – lékařské ozáření pacienta nezbytné k dosažení požadovaného léčebného účinku může překročit libovolné limity a neoptimalizuje se (viz. **Příloha B**).

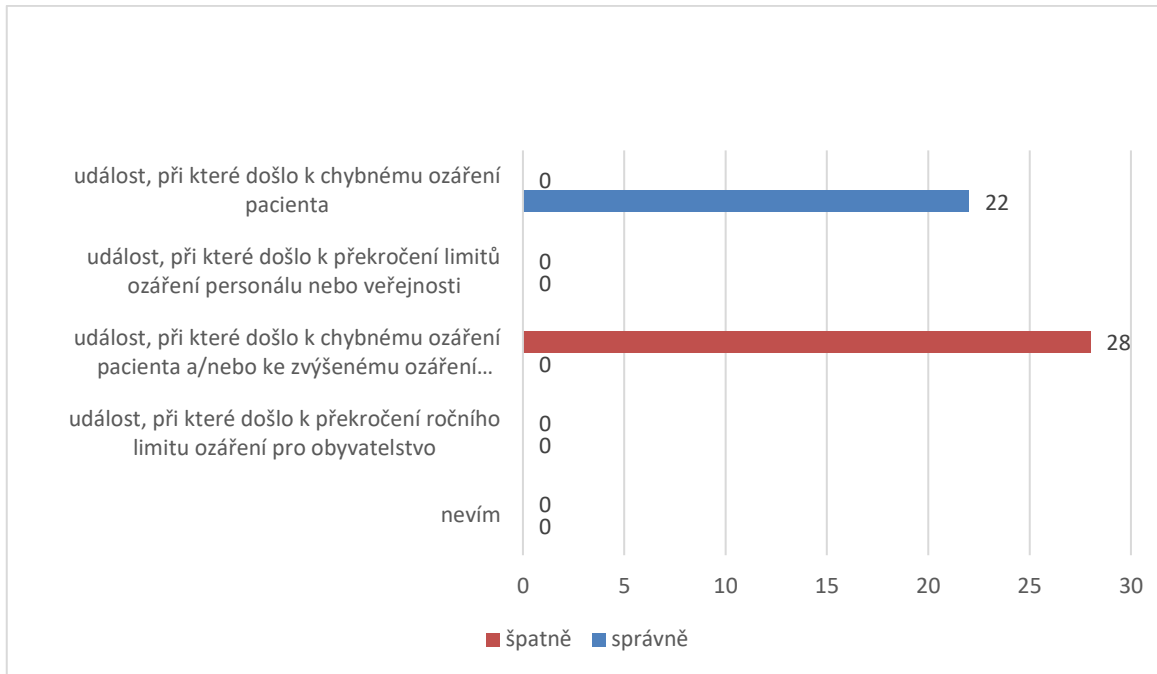
Tabulka 24 - četnosti otázky 16

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	40	0	0	50
Četnost správně rel. [%]	0	80	0	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	5	10	5	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	50	0	50	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	40				
Četnost celkem správně rel. [%]	80				

4.3.17 Otázka 17

Radiologickou událostí rozumíme:

Graf 18 - Otázka 17



Otázka 17 dopadla poměrně špatně. Je mnohem více špatných odpovědí než správných, avšak všichni respondenti alespoň tušili, co by radiologická událost mohla být. Správně odpovědělo pouze 44 % respondentů. Lze předpokládat, že víc respondentů nezná přesnou formulaci definice radiologické události, je to tedy jen chybné ozáření pacienta.

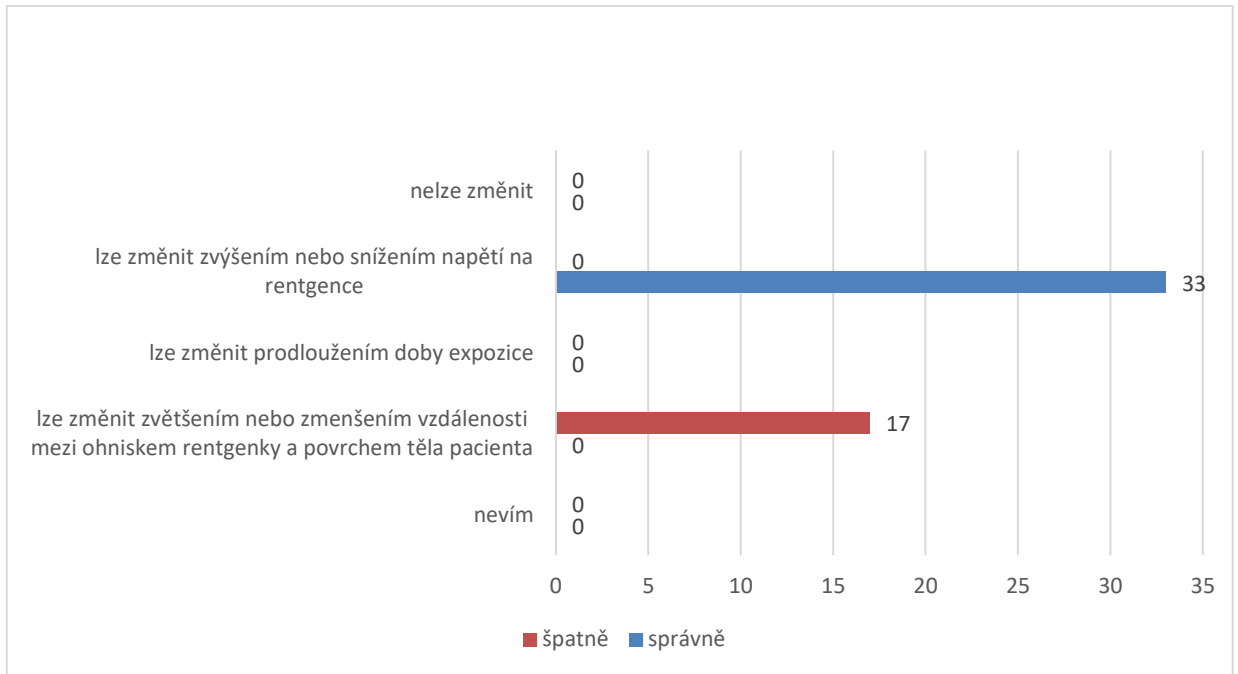
Tabulka 25 - četnosti otázky 17

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	22	0	0	0	50
Četnost správně rel. [%]	44	0	0	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	28	0	28	0	0
Četnost nesprávně rel. [%]	56	0	100	0	0
Četnost celkem správně abs. [N]	22				
Četnost celkem správně rel. [%]	44				

4.3.18 Otázka 18

Maximální energii záření produkovaného generátorem záření (např. rentgenkou):

Graf 19 - Otázka 18



U otázky 18 správně odpovědělo 33 respondentů. Podle **hodnot** lze říci, že většina respondentů ví, jak měnit energii záření produkovaného např. rentgenkou. Při např. RTG vyšetření je na každý objem těla je nastaveno napětí na průměrného člověka. Pokud podstupuje vyšetření velký člověk (s hmotností přes 120 kg), je zvykem, že napětí se zvýší. Při ponechání standartního nastavení by výsledný snímek byl nekvalitní a vyšetření by se patrně muselo opakovat.

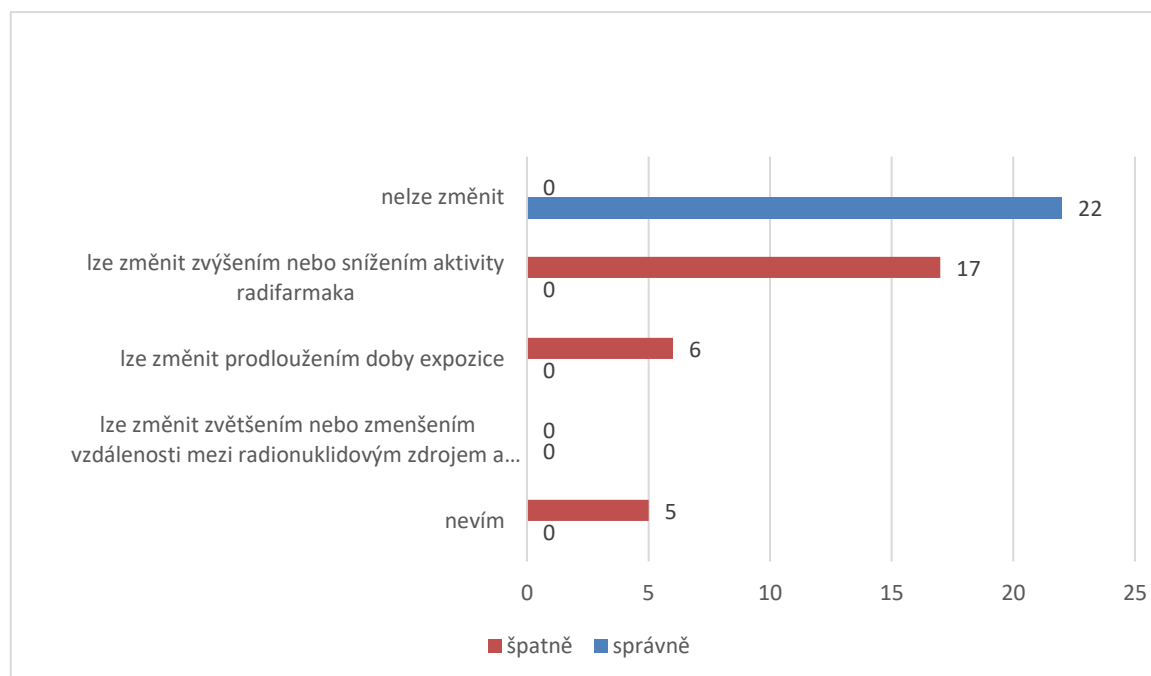
Tabulka 26 - četnosti otázky 18

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	33	0	0	50
Četnost správně rel. [%]	0	66	0	0	100
Četnost nesprávně abs. [N]	0	17	0	17	0
Četnost nesprávně rel. [%]	0	34	0	100	0
Četnost celkem správně abs. [N]	33				
Četnost celkem správně rel. [%]	66				

4.3.19 Otázka 19

Maximální energii ionizující záření produkovaného radionuklidovým zdrojem (např. radiofarmakem):

Graf 20 - Otázka 19



U otázky 19 převažují špatné odpovědi. Podle nich jde usuzovat, že většina respondentů netuší, že např. u radiofarmaka nelze měnit maximální energii produkovaného záření, protože jde přímo o jeho vlastnost, proto expozicí, změnou aktivity ani vzdáleností nelze měnit maximální energii zdroje. Pokud je třeba jiných energií, vybere se jiný radionuklidový zdroj.

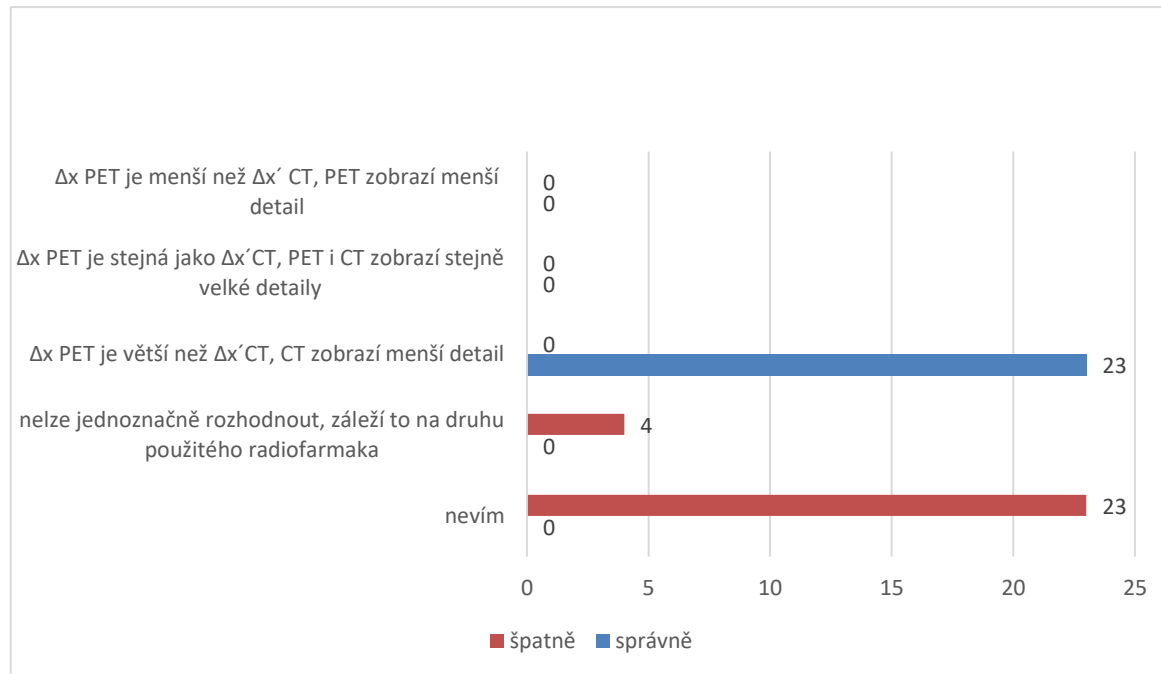
Tabulka 27 - četnosti otázky 19

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	22	0	0	0	0
Četnost správně rel. [%]	44	0	0	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	28	17	6	0	5
Četnost nesprávně rel. [%]	56	60	21	0	17
Četnost celkem správně abs. [N]	22				
Četnost celkem správně rel. [%]	44				

4.3.20 Otázka 20

Pro prostorovou rozlišovací schopnost Δx částic hybridního zobrazovacího zařízení PET/CT platí:

Graf 21 - Otázka 20



Otázka 20 vyšla ne moc dobře. Pouze 23 respondentů vybralo správnou odpověď. Z výsledků lze tedy říci, že více jak polovina respondentů nevěděla, jakou má PET/CT prostorovou rozlišovací schopnost.

Tabulka 28 - četnosti otázky 20

Odpovědi	A	B	C	D	E
Četnost správně abs. [N]	0	0	23	0	0
Četnost správně rel. [%]	0	0	46	0	0
Četnost nesprávně abs. [N]	0	0	27	4	23
Četnost nesprávně rel. [%]	0	0	54	14	85
Četnost celkem správně abs. [N]	23				
Četnost celkem správně rel. [%]	46				

4.3.21 Popisné shrnutí informací respondentů

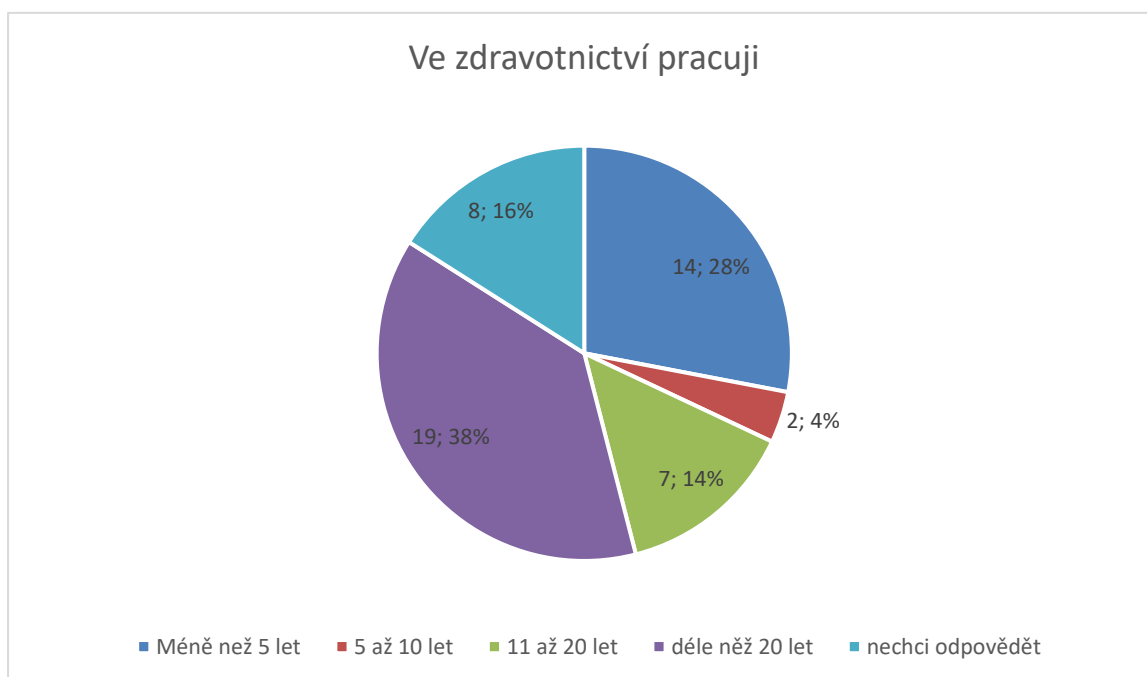
Tato krátká část je věnována doplňujícím tzv. popisným informacím o respondentech. Informace jsou přehledně uvedeny v **Tabulkách 29 až 32**.

Tabulka 29 - délka praxe respondentů

	Ve zdravotnické práci				
	Méně než 5 let	5 až 10 let	11 až 20 let	déle než 20 let	nechci odpovédět
Četnost [N]	14	2	7	19	8
Četnost rel. [%]	28	4	14	38	16

Podle hodnot z tabulky vidíme, že nejvíce respondentů pracuje ve zdravotnictví více jak 20 let. Nejmenší však jsou hodnoty 5 až 10 let a 11 až 20 let. Z toho lze usuzovat, že před těmito lety byl nejmenší přírůstek zdravotnických pracovníků. Je také možné, že z těchto ročníků také nejvíce pracovníků odešlo. Pro přehlednost je **Tabulka 29** doplněna grafem.

Graf 22 - délka praxe respondentů



Tabulka 30 - kategorie radiačních pracovníků

	Jsem radiační pracovník podle § 61 zákona č. 263 / 2016 sb., atomový zákon			
	Kategorie A	Kategorie B	Nejsem radiační pracovník	Nevím
Četnost [N]	34	8	8	0
Četnost rel. [%]	68	16	16	0

Kvízu se zúčastnilo nejvíce radiačních pracovníků kategorie A, v menší skupině jsou pak zastoupeni pracovníci kategorie B. Další skupinou jsou respondenti, kteří vybrali, že radiačními pracovníky nejsou. Zde je možné tipovat, jaké profese to byli, ale byli by to pouze dohady.

Tabulka 31 - délka pracovní doby na oddělení NM

	Pracuji (alespoň část své pracovní doby) na oddělení nukleární medicíny		
	ano	ne	nechci odpovědět
Četnost [N]	12	35	3
Četnost rel. [%]	24	70	6

Hodnoty z **Tabulky 31** byly překvapující. Většina respondentů na oddělení nukleární medicíny, ani z části své pracovní doby, nepracuje. Lze tedy do jisté míry chápat, některé špatně zodpovězené otázky.

Tabulka 32 - pohlaví respondentů

	Jsem		
	Muž	Žena	Nechci odpovědět
Četnost [N]	20	27	3
Četnost rel. [%]	40	54	6

V poslední otázce celého kvízu byly respondenti dotazováni na jejich pohlaví. Výsledek je tedy ten, že se účastnilo více žen než mužů. Podle hodnot lze tedy říci, že i ve zdravotnictví pracuje více žen. Opět je tu malá skupina, která nechtěla odpovědět.

5 DISKUZE

Cílem této práce bylo připravit informační materiál z vybraných témat radiační ochrany. V návaznosti na to byl vytvořen kvíz, který sloužil ke zjištění slabých míst ve vzdělání. Dále sloužil jako podklad pro zhotovení informačního materiálu, který bude sloužit pro doplnění informací, na kterých byl kvíz stavěn.

Dle výsledků je však úroveň horší, než bylo před jejich vyhodnocením uvažováno – skutečná úroveň vzdělanosti pracovníků PET/CT v oblasti radiační ochrany je spíše nadprůměrná

Tento výsledek mohl být zapříčiněn několika faktory – mohlo se jednat o nepozornost při testu, nedostatečné pochopení otázky anebo technické problémy. Velkou roli ovšem mohl hrát faktor psychologický z hlediska přístupu k danému tématu. Radiační ochrana je obecně velmi komplexním tématem, jímž se musí radiační pracovník zabývat, a tato komplexnost může potenciálně vzbuzovat určitou nejistotu, která nakonec negativně ovlivní odpovědní schopnost respondenta. Tento fakt potom probouzí námět k otázce, zda je systém radiační ochrany tak, jak je koncipován nyní, pro pracovníky vhodný, srozumitelný a snadno přijatelný. Nabízí podnět k jeho rozvoji – nebo spíše zjednodušení – a k jeho úpravě. Tato úprava může mít mnoho forem, z nichž není správná pouze jedna – v takovém případě by bylo vhodné vytvořit několik variant a navzájem je porovnat a vysvětlit v dalším výzkumu. Tato práce je jakýmsi odrazovým můstkem v dalším rozvoji radiační ochrany, může poskytnout námět k jejímu zlepšení a jejímu lepšímu přístupu k radiačním pracovníkům několika cestami a návrhy, které jsou výše a také ještě níže zmíněny.

Samotné výsledky jsou ovšem nadprůměrné – problém celkové úrovně vzdělání tak nespočívá v nedostatečné obecné znalosti, nýbrž v úrovni znalosti právě radiačního pracovníka, u něž je požadovaná úroveň znalostí bezpochyby vysoká a odpovídá požadavkům na vykonávanou práci.

Obecně nejmenší potíží činily respondentům otázky zabývající se tématy, se kterými se setkávají prakticky denně – problematika jednotlivých radiofarmak a jejich využití; problematika diagnostických referenčních úrovní; obecné informace o přírodních a umělých zdrojích ionizujícího záření a teorie radionuklidových zdrojů. Naopak velké problémy se vyskytly při otázkách fyzikálních a otázkách zaměřených na legislativou stanovené limity ozáření. Tyto slabší výsledky mohou být způsobeny tím, že se s těmito otázkami toto rozložení může být

způsobeno nedostatečným využitím témat hůře zodpovězených v praxi, jejichž principy a teorii pracovníci PET/CT v takové míře nevyužívají.

Původní předpoklad výsledku práce a její reálný výsledek se do jisté liší. Důvody, které toto mohly způsobit, jsou uvedeny výše. V informačním materiálu jsou objasněny veškeré otázky týkající se témat mého kvízu. Lze tedy říci, že po prostudování krátkého informačního letáku, by měli případní respondenti bezchybně kvíz vyplnit. Správně by pak především měli odpovědět v otázkách, kde úspěšnost byla nízká.

První dvě otázky byly zodpovězeny ve 100 % případech správně – lze tedy usoudit, že otázky týkající se zdrojů ionizujícího záření nečinily respondentům větší potíže – jedná se o všeobecně známá a běžně používaná fakta, s kterými se radiační pracovník prakticky denně setkává. Tím zůstávají snáze v paměti a radiační pracovník je schopen s nimi efektivně pracovat.

Otázky 3 a 4 se věnovaly způsobenému ozáření při vyšetření pomocí RTG a CT. U těchto otázek se respondenti často dopouštěli chyb – u výpočetní tomografie však méně. To může být způsobeno postupným vstupováním CT vyšetření do popředí a současným „ústupem“ využívání RTG metod, tím nechci říci, že RTG přístroje jako takové, se přestávají používat. CT navíc nabízí oproti RTG širší možnosti zobrazení a tudíž i diagnostiky, proto je možné pozorovat nárůst zájmu o tuto metodu.

V páté otázce byly testovány základní fyzikální a biologické vlastnosti ionizujícího záření. Pro svou „trivialitu“ byla otázka zodpovězena ve všech případech správně a potvrzuje hypotézu, že si radiační pracovníci z velké míry dobře pamatují základní fakta, s kterými se seznamují již v úvodu radiační ochrany a která denně využívají při své práci. Šestou otázkou týkající se charakteristiky radionuklidového zdroje zodpověděli všichni respondenti rovněž správně – a to ze stejných důvodů jako v případě páté.

U otázky sedmé byl důvod stoprocentní úspěšnosti víceméně totožný – jednalo se o otázku využívající triviální fakta a zákony týkající se radiační ochrany a jaderné fyziky, s nimiž se pracovníci setkávají již od začátku svého vzdělávání – a tudíž umí tyto informace efektivně zpracovávat a využívat v praxi.

Následující tři otázky, tj. otázka 8-11, a otázka třináctá, byly věnované ryze fyzikálním tématům směřujícím k zákonu č. 263/2016 Sb., Atomovému zákonu, u nichž bylo za cíl otestovat jednak logické myšlení respondentů a jednak znalost fyzikální oblasti radiační ochrany vázanou na Atomový zákon. Jednalo se o změnu osobního dávkového ekvivalentu při zkrácení doby

expozice, při zvětšení vzdálenosti od lékovky s radionuklidem a při umístění lékovky vyzařující gama záření do kontejneru o tloušťce stěny rovné dvěma polotloušťkám. Jedná se o jeden ze základních a stěžejních principů aplikovaných v oboru radiační ochrany a je vázán na Atomový zákon, jehož znalost je pro pracovníky oddělení PET/CT nezbytně nutná a vyžadovaná. Bylo tedy předpokládáno, že budou tyto otázky zodpovězeny správně a počet správných odpovědí bude statisticky vyšší než výsledky otázek jiných. K chybným odpovědím mohlo dojít především z důvodu možné „fyzikální intervence“ ovlivňující psychologický faktor při zodpovídání těchto otázek anebo nedostatečné pozornosti při čtení zadání.

Otázka dvanáctá nečinila respondentům až na jednu výjimku potíže, zejména proto, že se jedná o běžnou problematiku, se kterou se denně setkávají při své práci, a kterou tak dobře znají.

Otázky 14 až 16 se věnovaly opět legislativě, konkrétně limitům pro ozáření pro radiační pracovníky a ozáření pacienta. V prvním tématu byla pak jedna z otázek rozšířena o znalost ročního limitu, tj. ročního součtu efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků z efektivních dávek vnitřního ozáření. U obou otázek byla projevována jistá neznalost či nepřesnost odpovědí. Toto mohlo být znovu způsobeno psychologickým vlivem složitosti legislativy na pracovníky. Tato legislativa se tedy o to víc stává podnětem k mírné úpravě vzdělávacího systému, ve které by byla přístupnější a přehlednější pro radiační pracovníky. Existuje možnost vytvoření jakési osnovy či přehledného materiálu, možná i výukové aplikace, které by zapamatování si klíčových oblastí Atomového zákona pracovníkům usnadnil a umožnil jim se v něm lépe orientovat.

Otázka sedmnáctá se potom věnuje pojmu radiologická událost. Tento pojem je definován v § 60 odst. 2 písm. e) zákona č. 263/2016 Sb., Atomového zákona, jako událost při lékařském „ozáření, která způsobuje chybné ozáření pacienta“. Problematikou radiologické události se zabývá § 87 toho stejného zákona; ten se věnuje prevenci radiologické události jako takové, následnému postupu, pokud tato událost proběhne a jejímu pozdějšímu prověření, zjištění příčin a zajištění opatření, které potenciální budoucí událost eliminují. Dále je v paragrafu uvedena povinnost informování o události a související prováděcí předpisy. Neznalost pojmu je tudíž opět relativní neznalostí výše zmíněného zákona. Jednotlivá znění byla formulována podobně s cílem ověřit, zda radiační pracovníci znají jednotlivé pojmy, s kterými Atomový zákon pracuje. Tyto jsou vypsány v § 60 – Vymezení některých pojmů v oblasti zajišťování radiační ochrany. Pro jejich přehledné shrnutí a lepší přístupnost k pracovníkům doporučuje autor

vytvoření stručného výukového materiálu. Radiologickou událost zmiňuje také § 71 odst. 2 písm. e) zákona č. 373/2011 Sb., Zákona o specifických zdravotních službách.

Poslední tři otázky jsou opět věnovány tématům fyzikálním – maximální energii záření produkovaného generátorem záření a maximální energii ionizujícího záření produkovaného radionuklidovým zdrojem. Poslední otázka byla věnována prostorové rozlišovací schopnosti částic zařízení PET/CT. Pro tyto otázky platí totéž, co pro předchozí otázky zaměřené na fyzikální problematiku – jednak je zasáhla vysoká míra neúspěšnosti způsobená výběrem špatných odpovědí a jednak je spojuje jistý zastrášující faktor samotné jaderné fyziky. V tomto případě je z větší míry nepozornost při čtení otázky nebo výběru odpovědí vyloučena, a to i přes fakt, že se nacházely na samém konci testu. Tento fakt je ovšem vzhledem k náročnosti otázek a jejich charakteru (fyzikální oblast) zanedbatelný.

Pro porovnání těchto výsledků jako celku byla vytvořena tabulka (viz Tabulka 30), která ukazuje procentuální poměr správných a špatných odpovědí. Správných odpovědí bylo 75,29 %, zatímco špatných 25,71 %. Z těchto čísel tedy vyplývá, že téměř tři čtvrtiny otázek byly zodpovězeny správně a jedna čtvrtina špatně. To je vzhledem k vysoké odbornosti pracovníků, kteří tento test vyplňovali, výsledek horší, než autor očekával.

Obecně nejmenší potíží činily respondentům otázky zabývající se tématy, se kterými se setkávají prakticky denně – teorie jednotlivých radiofarmak a jejich využití; teorie diagnostických referenčních úrovní; obecné informace o přírodních a umělých zdrojích ionizujícího záření a teorie radionuklidových zdrojů. Naopak velké problémy se vyskytly při otázkách fyzikálních a otázkách zaměřených na legislativou stanovené limity ozáření. Toto rozložení může být způsobeno nedostatečným využitím témat hůře zodpovězených v praxi, jejichž principy a teorii pracovníci PET/CT v takové míře nevyužívají.

Zároveň tak tyto výsledky vytváří podněty k úpravě systému radiační ochrany. Pro přesnější analýzu by však bylo nutné zavést jednotné testování ve všech nemocnicích a na všech pracovištích, které se do jisté míry setkávají s radiační ochranou. Toto jednotné testování by poskytlo objektivní pohled na úroveň vzdělání v oblasti radiační ochrany odpovídající reálné situaci. Následným zhodnocením správných a špatných odpovědí a jejich analýzou by bylo možné vytipovat jednotlivé oblasti, jímž by bylo zapotřebí se ve vzdělávacím systému věnovat, ať už některými změnami anebo zavedením nových metod a způsobů její výuky. Takový podrobný přehled by přímo reagoval na potřeby výuky pro radiační pracovníky a cílil by na

oblasti, které pracovníkům činí potíže. Tímto stylem by se mohl vzdělávací systém radiační ochrany mohl pracovníkům více „zpřístupnit“ a byl by pro ně snáze přijatelný.

Původní předpoklad výsledku práce a její reálný výsledek se do jisté liší. Důvody, které toto způsobily, jsou zmíněny výše – stejně jako námět k dalšímu rozvoji zlepšení této problematiky.

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit a zhodnotit úroveň vzdělanosti radiačních pracovníků oddělení PET/CT pomocí jednotného teoretického testu, případně vytvořit jednoduchý vzdělávací materiál. V teoretické části této práci byly shrnuty vybrané teoretické poznatky z oboru radiační ochrany, které jsou pro porozumění a pochopení této problematiky nezbytné. Výsledky práce dokumentují silná a slabá místa ve vzdělávání radiačních pracovníků a otevírají další možné cesty k jeho rozšiřování a prohlubování.

Z výsledků předložené práce vyplývá, že v některých oblastech radiační ochrany se radiační pracovníci orientují lépe a v jiných spíše hůře. Z hlediska komplexnosti tohoto oboru, jeho složitosti a náročnosti pro radiační pracovníky by bylo vhodné jejich vzdělávací systém doplnit a upravit tak, aby lépe odpovídal požadavkům na pracovníky a zároveň jim umožnil se v něm lépe a s pochopením orientovat.

Taková změna se může uskutečnit několika způsoby. Může to být například zlepšení úrovně kurzů radiační ochrany (financování zaměstnavatelem, benefity, kurzy pořádané v týdnu namísto víkendu, kratší výukové bloky, ...); přehlednější vzdělávací materiály; již v úvodu zmíněný víceúrovňový model obtížnosti s možností zpětnovazebních prvků; „zlidštění“ fyzikální stránky radiační ochrany pro pracovníky formou logického vysvětlení dané problematiky namísto strohého prezentování složitých zákonitostí. Takový způsob vylepšení by mohl zároveň přinést nejen zlepšení znalostí radiačních pracovníků, ale také úroveň jejich důvěry v radiační ochranu a její vliv na vlastní zdraví.

K realizaci této změny v potřebném rozsahu by bylo zřejmě zapotřebí více sil a prostředků, než poskytuje současná praxe. Autor práce přispěl k takovému rozvoji vlastním **návrhem letáku (viz Příloha A)**, ve kterém je stručně vysvětlena problematika zahrnutá do vypracovaného kvízu, kterého se respondenti účastnili. Letáková forma rozšiřování povědomí o radiační ochraně se určitě jeví jako jednou z vhodných variant, kterou lze zahrnout do systému vzdělávání radiačních pracovníků. Nijak ovšem nenahrazuje nutnost ze stran pracovníků věnovat radiační ochraně další čas a úsilí. Její plné pochopení je bezpochyby náročné a snahy o její zjednodušení vzdělávání v radiační ochraně by mohlo být ze stran radiačních pracovníků vítáno – nelze to však pokládat za správnou cestu, při vzdělávání je třeba lépe využívat poznatky pedagogické vědy a zefektivnit ho. Tato potřeba však nemůže vycházet jen z vnitřní motivace radiačních pracovníků, ale musí být náležitě reflektována také ze strany zodpovědných institucí a orgánů, které ji zajišťují. Několik návrhů na takové zlepšení bylo v této práci uvedeno. Tím

– spolu se shrnutím výsledků aktuálního stavu – byl cíl práce naplněn. Současně se ukázalo, že rozsah problematiky je široký a nabízí další možnosti jak v oblasti pedagogického výzkumu, tak i v oblasti vzdělávání radiačních pracovníků.

7 POUŽITÁ LITERATURA

7.1 Primární zdroje

HUŠÁK, V., 2009. Radiační ochrana pro radiologické asistenty. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-244-2350-0.

KUBINYI, J., SABOL, J., VONDRÁK, A., 2019. Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami. Praha: Grada. ISBN 978-80-271-0168-9.

ŠVEC, J., 2014. Radiační ochrana. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě. ISBN 978-80-7464-571-6

7.2 Sekundární zdroje

FILIPOVÁ A., PEJCHAL J., ŠINKOROVÁ Z., TICHÝ A., ZÁRYBNICKÁ L., 2016. Radiační ochrana při radiační mimořádné události. [Hradec Králové]: Univerzita obrany. ISBN 978-80-7231-366-2.

SÚJB, 2000. Principy a praxe radiační ochrany, sujb.cz [online]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/index.php?id=802>

7.3 Internetové zdroje

ČESKO. Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon - znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 2022-4-11]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263>

ČESKO. Zákon č. 373/2011 Sb., O specifických zdravotních službách - znění od 1. 1. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 21. 4. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-373>

SÚJB, 2002. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost ze dne 13. června 2002 o radiační ochraně. In: *Sagit* [online]. © 1996–2022 Nakladatelství Sagit [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.sagit.cz/info/sb02307>

SÚKUPOVÁ Lucie, 2019, Diagnostická referenční úroveň jako nástroj optimalizace? In: *sukupova.cz* [online]. 2011 - 2022 © Lucie Súpová. [cit. 2022-03-20] Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/diagnosticka-referencni-uroven-jako-nastroj-optimalizace/>

8 PŘÍLOHY

Příloha A – *Leták radiační ochrany*82

Příloha B – *Radiační ochrana*83

Příloha A – *Leták vybraných problémů radiační ochrany*

Radiační ochrana

1. Přírodní zdroje ionizujícího záření na území České republiky způsobují ozáření, které je zaznamenáváno jako osobní dávkový ekvivalent v jednotkách milisievert.
2. Mezi umělé zdroje ionizujícího záření, které se používají v medicíně, řadíme radiofarmaka, terapeutické přístroje s radionuklidovým zdrojem ionizujícího záření, zobrazovací a terapeutické přístroje se zdrojem ionizujícího záření.
3. Běžné skiagrafické vyšetření bederní páteře způsobí pacientovi ozáření, které je srovnatelné s ozářením, jež obdrží v průběhu jednoho roku.
4. Běžné CT vyšetření bederní páteře způsobí pacientovi ozáření, které je mnohem větší než roční ozáření přírodním pozadím. Dávka je přibližně pět krát větší.
5. Při skiaskopickém nebo skiagrafickém vyšetření, tedy rentgenovém snímkování, se v těle pacienta neindukuje žádná měřitelná radioaktivita. Zároveň se ale indukuje rozptýlené rentgenové záření, které vymizí okamžitě po provedení snímku.

Informace vycházejí z dotazníkového šetření

6. Důležitou charakteristikou radionuklidového zdroje je jeho aktivita, poločas rozpadu a také nuklid prvku, který zdroj obsahuje.
7. Poločas rozpadu izotopu daného prvku je doba, za kterou se samovolně rozpadne polovina jeho atomových jader. Za dva poločasy rozpadu se aktivita takového radionuklidového zdroje sníží na $\frac{1}{4}$ původní aktivity.
8. Při zkrácení doby expozice ionizujícímu záření na jednu polovinu se změni osobní dávkový ekvivalent (při zachování ostatních parametrů expozice stejných) na $\frac{1}{2}$ původní hodnoty.
9. Při zvětšení vzdálenosti od lékovky s radionuklidem na dvojnásobek se změni osobní dávkový ekvivalent (ozáření, při zachování ostatních parametrů expozice stejných) na $\frac{1}{4}$ původní hodnoty.
10. Po umístění lékovky s radionuklidem vyzařujícím záření gama do kontejneru o tloušťce stěny rovné dvěma polotloušťkám se změni osobní dávkový ekvivalent (ozáření, při zachování ostatních parametrů expozice stejných) na $\frac{1}{4}$ původní hodnoty.
11. Pravidlo „deseti poločasů“ znamená, dobu, po které se měřením ověří aktivita radioaktivního odpadu, zda klesla pod uvolňovací úroveň a také, dobu, kdy aktivita radioaktivního odpadu klesla přibližně na jednu tisícinu původní hodnoty.

12. Nejčastěji používaný radionuklid v radiofarmacích, které se užívají na PET, je ^{18}F Fluor.

13. Nejvyšší energie fotonů detekovaných pomocí PET je 511 keV.

14. Limity ozáření pro radiační pracovníky jsou regulačním nástrojem radiační ochrany a mohou být překročeny za předpokladu, že po jejich překročení musí být posouzen zdravotní stav radiačního pracovníka a jeho způsobilost k další činnosti.

15. Limit ozáření pro radiační pracovníky za jeden kalendářní rok je 20 mSv.

16. Ozáření pacientů při diagnostickém nebo terapeutickém využití ionizujícího záření je optimalizováno pomocí systému DRÚ.

17. Radiologickou událostí rozumíme událost, při které došlo k chybnému ozáření pacienta.

18. Maximální energii ionizujícího záření produkovaného např. rentgenkou lze změnit zvýšením nebo snížením napětí na rentgence.

19. Maximální energii ionizujícího záření produkovaného např. radiofarmakem nelze změnit.

20. Pro prostorovou rozlišovací schopnost Δx části hybridního zobrazovacího zařízení PET/CT platí, že Δx PET je větší než Δx CT, tedy CT zobrazí menší detail.

Radiační ochrana – test

Vážení pracovníci pardubické nemocnice, jsem student třetího ročníku FZS v Pardubicích a pracuji na své bakalářské práci. K dokončení je třeba malého průzkumu znalostí z oblasti radiační ochrany. Proto Vás prosím, vyplňte tento kvíz/test moc mi tím pomůžete. Výsledky jsou anonymní. Test je složen z otázek, kde je jedna správná odpověď a z otázek, kde je možné správných odpovědí vybrat více. Moc Vám všem děkuji.

- 1 Přírodní zdroje ionizujícího záření způsobují ozáření lidí, které:
 - a) prakticky nelze změřit,
 - b) způsobuje při ozáření za rok tzv. osobní dávkový ekvivalent cca 1–2 mikroSieverty,
 - c) způsobuje při ozáření za rok tzv. osobní dávkový ekvivalent cca 1–2 miliSieverty,
 - d) způsobuje při ozáření za rok tzv. osobní dávkový ekvivalent cca 1–2 Sieverty,

- 2 Běžné skiaskopické vyšetření trupu (rentgenový snímek) způsobí ozáření, které je:
 - a) mnohem menší než roční ozáření přírodním pozadím (alespoň 10×),
 - b) srovnatelné s ročním ozářením přírodním pozadím,
 - c) mnohem větší než roční ozáření přírodním pozadím (alespoň 10×),
 - d) řádově větší než roční ozáření přírodním pozadím (alespoň 1000×),

- 3 Běžné CT vyšetření trupu (výpočetní tomografie) způsobí ozáření, které je:
 - a) mnohem menší než roční ozáření přírodním pozadím (přibližně 5×),
 - b) srovnatelné s ročním ozářením přírodním pozadím,
 - c) mnohem větší než roční ozáření přírodním pozadím (přibližně 5×),
 - d) řádově větší než roční ozáření přírodním pozadím (přibližně 500×),

- 4 Umělé zdroje ionizujícího záření používané v medicíně jsou:
 - a) radiofarmaka
 - b) zobrazovací přístroje se zdrojem rentgenového ionizujícího záření,
 - c) terapeutické přístroje se zdrojem rentgenového ionizujícího záření,
 - d) terapeutické přístroje s radionuklidovým zdrojem ionizujícího záření.

- 5 Při skiaskopickém vyšetření (rentgenovém snímkování) se v těle pacienta
- a) indukuje (vyvolá) slabá radioaktivita, která do 24 hodin samovolně vymizí,
 - b) indukuje (vyvolá) zvýšená radioaktivita, jejíž aktivitu je zapotřebí kontrolovat měřeními až do vymizení,
 - c) neindikuje (nevyvolá) žádná měřitelná radioaktivita,
 - d) indukuje (vyvolá) rozptýlené rentgenové záření, které vymizí okamžitě po ukončení snímkování.
- 6 Důležitou charakteristikou radionuklidového zdroje je:
- a) aktivita radionuklidového zdroje,
 - b) poločas rozpadu radionuklidu, který zdroj obsahuje,
 - c) nuklid prvku, který zdroj obsahuje,
 - d) barva pouzdra (obalu) radionuklidového zdroje.
- 7 Poločas rozpadu izotopu daného prvku je doba, za kterou se samovolně rozpadne polovina jeho atomových jader. Za 2 poločasy rozpadu se aktivita takového radionuklidového zdroje sníží:
- a) na jednu polovinu původní aktivity,
 - b) na jednu čtvrtinu původní aktivity,
 - c) na dvě čtvrtiny původní aktivity,
 - d) na tři čtvrtiny původní aktivity.
- 8 Při zkrácení doby expozice ionizujícímu záření $2\times$ se změní osobní dávkový ekvivalent (při zachování ostatních parametrů expozice stejných):
- a) na $1/2$ (jednu polovinu) původní hodnoty,
 - b) na $1/4$ (jednu čtvrtinu) původní hodnoty,
 - c) na $3/4$ (tři čtvrtiny) původní hodnoty,
 - d) zůstane stejný.

- 9 Při zvětšení vzdálenosti od lékovky s radionuklidem 2× se změní osobní dávkový ekvivalent (ozáření, při zachování ostatních parametrů expozice stejných):
- a) na 1/2 (jednu polovinu) původní hodnoty,
 - b) na 1/4 (jednu čtvrtinu) původní hodnoty,
 - c) na 3/4 (tři čtvrtiny) původní hodnoty,
 - d) zůstane stejný.
- 10 Po umístění lékovky s radionuklidem vyzařujícím záření gama do kontejneru o tloušťce stěny rovné 2 (dvěma) polotloušťkám se změní osobní dávkový ekvivalent (ozáření, při zachování ostatních parametrů expozice stejných):
- a) na 1/2 (jednu polovinu) původní hodnoty,
 - b) na 1/4 (jednu čtvrtinu) původní hodnoty,
 - c) na 3/4 (tři čtvrtiny) původní hodnoty,
 - d) zůstane stejný.
- 11 Co znamená pravidlo "deseti poločasů"?
- a) doba, po které se měřením ověří aktivita odpadu kontaminovaného radionuklidu, zda již poklesla pod uvolňovací úroveň,
 - b) doba, za kterou aktivita radionuklidu poklesne přibližně na 1/1000 (jednu tisícinu) původní hodnoty,
 - c) doba, za kterou aktivita radionuklidu poklesne přibližně na 1/10 (jednu desetinu) původní hodnoty,
 - d) doba použitelnosti radiofarmaka.
- 12 Jaký radionuklid obsahuje nejčastěji používané radiofarmakum pro PET (pozitronovou emisní tomografii)?
- a) metastabilní ^{99m}technecium
 - b) ¹⁸fluor
 - c) ¹²³jód
 - d) ⁶⁰kobalt

- 13 Jakou nejvyšší energii mají fotony záření gama detekované při PET (pozitronové emisní tomografii)?
- a) 90 keV
 - b) 140 keV
 - c) 511 keV
 - d) 662 keV
- 14 Legislativa (atomové právo) stanoví limity ozáření pro radiační pracovníky. Tyto limity:
- a) nesmí být za žádných okolností překročeny,
 - b) stanovují hranici mezi bezpečným a nebezpečným,
 - c) jsou regulačním nástrojem radiační ochrany,
 - d) mohou být překročeny; po jejich překročení musí být posouzen zdravotní stav radiačního pracovníka a jeho způsobilost k další radiační činnosti.
- 15 Legislativa (atomové právo) stanoví roční limity ozáření pro radiační pracovníky. Limit ročního součtu efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků z efektivních dávek vnitřního ozáření činí:
- a) 1 mSv / rok,
 - b) 5 mSv / rok,
 - c) 10 mSv / rok,
 - d) 20 mSv / rok.
- 16 Ozáření pacientů při diagnostickém nebo terapeutickém využití ionizujícího záření:
- a) je optimalizováno pomocí limitů ozáření,
 - b) je optimalizováno pomocí systému diagnostických referenčních úrovní,
 - c) lékařské ozáření pacienta nezbytné k získání požadované diagnostické informace může překročit libovolné limity a neoptimalizuje se,
 - d) lékařské ozáření pacienta nezbytné k dosažení požadovaného léčebného účinku může překročit libovolné limity a neoptimalizuje se.

- 17 Radiologickou událostí rozumíme
- a) událost, při které došlo k chybnému ozáření pacienta,
 - b) událost, při které došlo k překročení limitů ozáření personálu nebo veřejnosti,
 - c) událost, při které došlo k chybnému ozáření pacienta a/nebo ke zvýšenému ozáření personálu nebo veřejnosti,
 - d) událost, při které došlo k překročení ročního limitu ozáření pro obyvatelstvo.
- 18 Maximální energii ionizujícího záření produkovaného generátorem záření (např. rentgenkou):
- a) nelze změnit,
 - b) lze změnit zvýšením nebo snížením napětí na rentgence,
 - c) lze změnit prodloužením doby expozice,
 - d) lze změnit zvětšením nebo zmenšením vzdálenosti mezi ohniskem rentgenky a povrchem těla pacienta.
- 19 Maximální energii ionizujícího záření produkovaného radionuklidovým zdrojem (např. radiofarmakem):
- a) nelze změnit,
 - b) lze změnit zvýšením nebo snížením aktivity radiofarmaka,
 - c) lze změnit prodloužením doby expozice,
 - d) lze změnit zvětšením nebo zmenšením vzdálenosti mezi radionuklidovým zdrojem a povrchem těla pacienta.
- 20 Pro prostorovou rozlišovací schopnost částí hybridního zobrazovacího zařízení PET/CT platí:
- a) Δx pozitronového emisního tomografu (PET) je menší než $\Delta x'$ výpočetního tomografu (CT), PET zobrazí menší detail
 - b) Δx pozitronového emisního tomografu (PET) je stejná jako $\Delta x'$ výpočetního tomografu (CT), PET i CT zobrazí stejně velké detaily
 - c) Δx pozitronového emisního tomografu (PET) je větší než $\Delta x'$ výpočetního tomografu (CT), CT zobrazí menší detail
 - d) nelze jednoznačně rozhodnout, záleží to na druhu použitého radiofarmaka.

