



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Hodnocení radiační zátěže rukou personálu při vybraných manipulacích s radionuklidy na základě měření a Monte Carlo simulací

Disertační práce

Ing. Jana Hudzietzová

Doktorský studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínská a klinická technika

Školitel: doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc.

Školitel specialista: prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA

Kladno 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem „Hodnocení radiační zátěže rukou personálu při vybraných manipulacích s radionuklidy na základě měření a Monte Carlo simulací“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k disertační práci. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne

.....
Jana Hudzietzová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému školiteli doc. Ing. Jozefu Sabolovi, DrSc. za odborné vedení a cenné rady v rámci celého doktorského studia a školiteli specialistovi prof. MUDr. Jozefu Rosinovi, Ph.D., MBA za konzultace a cenné rady při tvorbě mé disertační práce.

Dále bych ráda poděkovala Ing. Marku Fülöpovi, CSc. za cenné rady. Rovněž děkuji kolektivu na pracovištích Slovenskej zdravotníckej univerzity v Bratislave, která mi umožnila přístup k jejich hardwarovému i softwarovému vybavení. Cenné rady mi rovněž poskytla doc. RNDr. Denisa Nikodémová, PhD, RNDr. Pavol Ragan, PhD a RNDr. Daniel Baček, PhD.

Mé velké poděkování taktéž patří všem pracovníkům a pracovištím nukleární medicíny, kde byla prováděna měření, za jejich vstřícnost a pochopení.

Tato disertační práce byla podpořena granty Studentské grantové soutěže (SGS) SGS13/161/OHK4/2T/17, SGS15/114/OHK4/1T/17, SGS17/113/OHK4/1T/17, SGS18/100/OHK4/1T/17 a dále podporou Nadace „Nadáni Josefa, Marie a Zdenky Hlávkových“.

Abstrakt

Práce se zabývá hodnocením radiační zátěže rukou personálu nukleární medicíny při manipulacích s vybranými radionuklidy na základě měření a Monte Carlo simulací.

Pro stanovení ozáření kůže ruky byly použity termoluminiscenční dozimetry, pomocí kterých se stanovil osobní dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$ ve 12 předem definovaných pozicích. U monitorovaných pracovníků bylo zjištěno nehomogenní ozáření kůže ruky s nejčastějším lokálním maximem na konečcích prstů. Velikost lokálního ozáření kůže ruky byla hodnocena na základě faktorů, které mohly ovlivnit výsledky tohoto ozáření (doba praxe, technologické vybavení, pracovní návyky) a rovněž bylo analyzováno toto ozáření vzhledem k příslušnému limitu ekvivalentní dávky zprůměrované na 1 cm^2 kůže. Pro vybrané operace s vybraným radiofarmakem byly vypočteny korekční faktory, protože monitorování ozáření kůže na rukou se ve většině případů z praktických důvodů nemůže provádět v místě maximálního ozáření požadovaného současnou legislativou. Na základě výsledků měření a jejich analýzy byl koncipován návrh na sjednocení umístění prstového dozimetru. Pro perspektivní novou pozici prstového dozimetru na druhém článku ukazováku byl stanoven korekční faktor o hodnotě 1,8. Doporučuje se nošení prstových dozimetrů na obou rukách po dobu sledování s cílem zjistit, která ruka je při rutinní práci více ozářena.

Pomocí simulací provedených metodou Monte Carlo bylo u vybraných případů vypočteno ozáření v lokálním bodě nebo na více místech na povrchu ruky. Tyto výsledky vhodně doplnily a zpřesnily informace získané na základě monitorování.

Klíčová slova: *radiační ochrana, radiofarmaka, ozáření kůže, limit ekvivalentní dávky, korekční faktor*

Abstract

The thesis is aimed at the evaluation of the radiation burden of the personnel engaged in specific manipulations with selected radionuclides in nuclear medicine based on the measurements and Monte Carlo simulations.

For the evaluation of the worker's skin exposure, thermoluminescent dosimeters were used to determine the personal dose equivalent $H_p(0.07)$ in 12 predefined positions. In the workers monitored, immunogenic exposure of the skin of the hand with the most common local peak at the fingertips was observed. The level of the local exposure of the skin on the hand was evaluated considering factors that could affect the results of this exposure (experience, technological equipment, work habits), moreover, the exposure was analyzed with respect to the respective dose equivalent limit averaged over the area of 1 cm^2 of the skin. For the selected operations with the selected radiopharmaceuticals, the correction factors have been calculated since in most cases, due to practical reasons, the monitoring of the hand cannot be performed at the most exposed location as required by the current legislation. Based on the results of the measurements and their analysis, a proposal was made to unify the position of the finger dosimeter. For the prospective new location of the finger dosimeters, the correction factor of 1.8 was specified for the second segment of the index finger. It is advisable to wear the finger dosimeters on both hands for the duration of the pilot monitoring to determine which hand is more exposed during a routine work.

Using Monte Carlo simulations, the exposure in a local position or in more positions on the surface of the hand were calculated. These results were appropriately complemented and refined the information obtained through the monitoring.

Key words: *radiation protection, radiopharmaceuticals, skin exposure, equivalent dose limit, correction factor.*

Obsah

Prohlášení	7
Poděkování	8
Abstrakt	9
Abstract.....	10
Obsah	11
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	16
Seznam symbolů a zkratk.....	18
1 Úvod	19
1.1 Motivace práce	19
1.2 Cíl práce	20
2 Současný stav řešené problematiky	22
2.1 Kůže	22
2.1.1 Anatomie kůže.....	22
2.1.2 Biologické účinky ionizujícího záření.....	24
2.1.3 Radiační dermatitida.....	24
2.2 Dozimetrie a radiační ochrana.....	25
2.2.1 Základní veličiny dozimetrie a veličiny používané v radiační ochraně ..	25
2.2.2 Dozimetry používané pro monitorování radiační zátěže rukou	28
2.3 Aktuální situace ve světě.....	29
2.4 Současný stav řešené problematiky v ČR	33
2.5 Legislativa radiační ochrany	34
2.5.1 Radiační ochrana v nukleární medicíně	35
2.5.2 Program monitorování.....	36
3 Materiál a metody	38
3.1 Experimentální část.....	38
3.1.1 Sledované radionuklidy.....	38
3.1.2 Sledovaná skupina	39
3.1.3 Metodika monitorování	43
3.1.4 Vyhodnocení ozáření kůže na rukou pracovníků	49

3.1.5	Korekční faktor.....	52
3.1.6	Nejistoty měření	53
3.1.7	Statistické metody	55
3.2	Simulační část.....	58
3.2.1	Vybrané geometrie při manipulaci s radionuklidem ^{18}F a ^{131}I	58
3.2.2	Použité fantomy.....	58
3.2.3	Výpočet dávky pomocí kódu MCNP	60
3.2.4	Verifikace výpočtu metodou Monte Carlo a experimentu.....	60
3.2.5	Simulace vybrané rizikové geometrie u manipulace s ^{131}I a ^{18}F	61
3.2.6	Aplikace simulací metodou Monte Carlo.....	62
4	Výsledky.....	64
4.1	Experimentální část	64
4.1.1	Výsledky kalibrace termoluminiscenčních dozimetrů	64
4.1.2	Nejistoty měření	64
4.1.3	Stanovení maximálního lokálního ozáření rukou pracovníků během manipulace s radiofarmakem značeným ^{18}F a ^{131}I	66
4.1.4	Nejčastější pozice maximálního lokálního ozáření	89
4.1.5	Možné překročení stanoveného limitu ozáření	93
4.1.6	Korekční faktory	95
4.2	Simulační část.....	102
4.2.1	Verifikace MCNP simulace vybrané geometrie ozáření ruky.....	102
4.2.2	Výsledky simulace vybrané rizikové geometrie během manipulace s ^{131}I	103
4.2.3	Výsledky simulace lokální kontaminace ^{18}F	104
4.3	Doporučení pro sledovaná pracoviště.....	106
5	Diskuse.....	107
5.1	Experimentální část	107
5.2	Simulační část.....	118
	Závěr	121
	Citovaná literatura	123
	Příloha 1: Seznam publikací autora k tématu disertační práce	132

Seznam obrázků

Obrázek 1 Stavba kůže [4].....	23
Obrázek 2 Zapojená pracoviště nukleární medicíny v rámci evropského projektu ORAMED [46]	30
Obrázek 3 Příklad automatického zařízení pro dávkování radiofarmaka.....	40
Obrázek 4 Manuální aplikace (bez použití kanyly a infuzní trubičky).....	40
Obrázek 5 Způsoby manuální aplikace radiofarmaka (s použitím kanyly a infuzní trubičky).....	41
Obrázek 6 Automatické zařízení provádějící aplikaci radiofarmaka.....	41
Obrázek 7 Příklady digestoří pro přípravu roztoku značeného ^{131}I	42
Obrázek 8 Způsob podání roztoku značeného ^{131}I a kapsle značené ^{131}I	42
Obrázek 9 Kalibrační zařízení	44
Obrázek 10 Použité termoluminiscenční dozimetry	44
Obrázek 11 TLD reader	45
Obrázek 12 Umístění termoluminiscenčních dozimetrů na rukavicích.....	47
Obrázek 13 Schéma situací při manipulaci s radiofarmakem.....	51
Obrázek 14 Dotyk s nestíněnou částí stříkačky obsahující radiofarmakum značené ^{18}F	51
Obrázek 15 Styk s nestíněnou částí zářiče (^{131}I).....	52
Obrázek 16 Parafínové fantomy ruky [110]	59
Obrázek 17 Pryskyřicové fantomy ruky	59
Obrázek 18 Odpověď dozimetrů typu MCP-7.....	65
Obrázek 19 Odpověď dozimetrů typu MCP-Ns	65
Obrázek 20 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – příprava pozitronového radiofarmaka	67
Obrázek 21 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – aplikace pozitronového radiofarmaka	68
Obrázek 22 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – příprava radiofarmaka značeného ^{131}I	69

Obrázek 23 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – podání radiofarmaka značeného ^{131}I	69
Obrázek 24 Porovnání maximálního lokálního ozáření kůže ruky z hlediska prováděné činnosti a použitého radionuklidu.....	72
Obrázek 25 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků ze sledovaných pracovišť s různou technologií – příprava pozitronového radiofarmaka.....	74
Obrázek 26 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků ze sledovaných pracovišť s různou technologií – aplikace pozitronového radiofarmaka.....	74
Obrázek 27 Srovnání maximálního $H_p(0,07)$ v závislosti na prováděné činnosti a technologickém vybavení daného pracoviště	75
Obrázek 28 Porovnání maximálního ozáření u přípravy pozitronové radiofarmaka - rozdělení do kategorií dle doby praxe.....	77
Obrázek 29 Porovnání maximálního ozáření u aplikace pozitronové radiofarmaka - rozdělení do kategorií dle doby praxe.....	78
Obrázek 30 Velikost maximálního lokálního ozáření kůže rukou na základě rozdělení pracovníků do kategorií dle doby praxe	78
Obrázek 31 Porovnání maximálního ozáření u pracovníků připravujících radiofarmakum značené ^{131}I na základě doby praxe.....	80
Obrázek 32 Porovnání maximálního ozáření u pracovníků podávajících radiofarmakum značené ^{131}I na základě doby praxe	80
Obrázek 33 Nestandardní pracovní úkony – příprava pozitronového radiofarmaka.....	81
Obrázek 34 Nestandardní pracovní úkony – aplikace pozitronového radiofarmaka.....	82
Obrázek 35 Nestandardní pracovní úkony – příprava a aplikace radiofarmaka značeného ^{131}I	82
Obrázek 36 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony – příprava ^{18}F	84
Obrázek 37 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony – příprava ^{131}I	85
Obrázek 38 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony – aplikace ^{18}F nebo ^{131}I	86
Obrázek 39 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony obou rukou – příprava ^{18}F	87
Obrázek 40 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony obou rukou – příprava ^{131}I	87

Obrázek 41 Poměr 3 cyklů měření s nestandardními pracovními úkony pracovníka 10 a průměru cyklů měření se standardními pracovními úkony jeho kolegů na pravé a levé ruce – aplikace ^{18}F	88
Obrázek 42 Poměr 3 cyklů měření s nestandardními pracovními úkony pracovníka 11 a průměru cyklů měření se standardními pracovními úkony jeho kolegů na pravé a levé ruce – aplikace ^{18}F	89
Obrázek 43 Nejčastější pozice s maximální hodnotou $H_p(0,07)$ na kůži během manipulace s ^{18}F	90
Obrázek 44 Nejčastější pozice s maximální hodnotou $H_p(0,07)$ na kůži během manipulace s ^{131}I	90
Obrázek 45 Umístění prstového dozimetru pracovníků (PET pracoviště).....	91
Obrázek 46 Umístění prstového dozimetru pracovníků připravujících ^{131}I	92
Obrázek 47 Simulace držení kelímku s radiofarmakem 2 cm nad hladinou radiofarmaka $^{131}\text{I-NaI}$	103
Obrázek 48 Vliv uchopení kelímku s radiofarmakem značeným ^{131}I na ozáření ruky [112].....	104
Obrázek 49 Geometrie držení stíněné stříkačky s radiofarmakem [113]	105
Obrázek 50 Znárodnění kontaminace na břišku ukazováku [113]	105
Obrázek 51 Faktory mající vliv na ozáření rukou pracovníků	107
Obrázek 52 Možné postupy při zohlednění korekčního faktoru.....	116

Seznam tabulek

Tabulka 1 Limity ozáření pro radiační pracovníky [86].....	36
Tabulka 2 Monitorovací úrovně [86].....	37
Tabulka 3 Vybrané vlastnosti sledovaných radionuklidů [59, 89, 90].....	39
Tabulka 4 Počet monitorovaných pracovníků a počet provedených měření	43
Tabulka 5 Parametry vyhodnocovacího zařízení Harshaw 3500.....	46
Tabulka 6 Označení pozic termoluminiscenčních dozimetrů a jejich umístění na rukavicích.....	47
Tabulka 7 Použité statistické metody u sledovaných parametrů	57
Tabulka 8 Srovnání parafinového fantomu ruky a reálné situace při manipulaci s radiofarmakem značeným ^{131}I	62
Tabulka 9 Srovnání pryskyřicových fantomů ruky a reálných situací při manipulaci s radiofarmakem značeným ^{18}F	63
Tabulka 10 Ozařovací podmínky kalibrace TLD a nazářené hodnoty [100]	64
Tabulka 11 Výsledky statistického testu - velikost maximálního ozáření na dominantní a nedominantní ruce (^{18}F)	68
Tabulka 12 Výsledky statistického testu – velikost maximální ozáření na dominantní a nedominantní ruce (^{131}I).....	70
Tabulka 13 Výsledky korelační analýzy mezi maximálním ozářením a ostatními sledovanými pozicemi	70
Tabulka 14 Výsledky statistického testu – velikost maximálního ozáření z hlediska prováděné činnosti s vybraným radionuklidem	72
Tabulka 15 Výsledky statistického testu - velikost maximálního ozáření u různého technologického vybavení pracovišť	75
Tabulka 16 Výsledky statistického testu – velikost maximálního ozáření u sledovaných činnostech z hlediska technologického vybavení.....	76
Tabulka 17 Výsledky statistických testů – velikost maximálního ozáření u pracovníků s rozdílnou dobou praxe.....	79
Tabulka 18 Nesystematické nestandardní úkony.....	83
Tabulka 19 Shoda ruky s maximálním lokálním ozářením a rukou, kde je umístěn prstový dozimetr	92
Tabulka 20 Odhad pracovníků překračující 3/10 limitu ozáření H_T kůže či limit ozáření H_T kůže	93

Tabulka 21 Odhad možného překročení limitů ozáření při shodném pracovním vytížení	94
Tabulka 22 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice - příprava ^{18}F	95
Tabulka 23 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice - aplikace ^{18}F	96
Tabulka 24 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice - jednotlivá PET pracoviště	97
Tabulka 25 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice – sledované činnosti (^{18}F)	97
Tabulka 26 Hodnota korekčního faktoru pro vybrané pozice - sledovaná PET pracoviště	98
Tabulka 27 Odhad případů možného překročení limitu ozáření H_T kůže při zohlednění doporučeného korekčního faktoru v pozici C na jednotlivých pracovištích za standardních situací.....	99
Tabulka 28 Odhad případů možného překročení limitu ozáření H_T kůže při zohlednění doporučeného korekčního faktoru v pozici C za systematicky nestandardních situací	100
Tabulka 29 Hodnota korekčního faktoru vztahujícího se na vybrané pozice pro přípravu radiofarmaka značeného ^{131}I na pracovišti 5	101
Tabulka 30 Srovnání výsledků získaných měření pomocí TLD a MCNP simulace [111].....	103
Tabulka 31 Vliv použití 0,5 mm PE na ozáření kořenu prsteníku [112]	104
Tabulka 32 Lokální ozáření kůže na břichu ukazováku v důsledku kontaminace ^{18}F [113].....	105
Tabulka 33 Porovnání výsledků mezinárodních studií s výsledky disertační práce - manuální aplikace ^{18}F	109
Tabulka 34 Porovnání výsledků mezinárodních studií s výsledky disertační práce - automatická aplikace ^{18}F	109
Tabulka 35 Výsledky dosažené v rámci disertační práce s v rámci projektu ORAMED (^{18}F).....	110
Tabulka 36 Porovnání výsledků mezinárodních studií s výsledky disertační práce (příprava ^{131}I)	111

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
$H_p(0,07)$	Osobní dávkový ekvivalent
H_T	Ekvivalentní dávka
AEGIS	Advanced Extremity Gamma Instrumentation System
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
CONRAD	Coordinated Network for Radiation Dosimetry
CT	Výpočetní tomografie
ČMI	Český metrologický institut
ČR	Česká republika
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DR	Dominantní ruka
EU	Evropská unie
FVZ SZU	Fakulta veřejného zdravotnictví, Slovenská zdravotnícka univerzita
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
KF	Korekční faktor
LO	Limit ozáření
MC	Monte Carlo
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MO	Monitorovací období
MÚ	Monitorovací úroveň
NM	Nukleární medicína
NR	Nedominantní ruka
ORAMED	Optimization of Radiation Protection of Medical Staff
PE	Polyetylen
PET	Pozitronová emisní tomografie
PMMA	PolyMethylMethAcrylate
RF	Radiofarmakum
TLD	Termoluminiscenční dozimetr
ZIZ	Zdroj ionizujícího záření

1 Úvod

Zdroje ionizujícího záření (ZIZ) se rozsáhle využívají v různých oborech lidské činnosti. Jedním z nich je medicína, kde na některých pracovištích, jakými jsou nukleární medicína (NM) či intervenční radiologie, může dojít k překročení limitů ozáření kůže reprezentovaného ekvivalentní dávkou (H_T) zprůměrovanou na 1 cm^2 kůže rukou. Tento problém se týká také některých pracovišť ve státech Evropské unie (EU), což ukazují především výsledky evropského projektu Optimization of Radiation Protection of Medical Staff (ORAMED) [1], který byl zaměřen na nukleární medicínu a na intervenční radiologii.

1.1 Motivace práce

Na pracovištích NM je během práce s radiofarmaky (RF) častým limitujícím faktorem lokální ozáření kůže ruky. Stanovení maximálního ozáření kůže rukou je složité, neboť poloha maximálního ozáření kůže rukou závisí na technologickém vybavení pracoviště a na konkrétních postupech a operacích, které nejsou obecně u všech pracovníků jednotné. Samotné monitorování pracovníků ve více polohách ruky pomocí termoluminiscenčních dozimetrů (TLD) je časově náročné a na pracovištích NM se neprovádí rutinně. Oproti monitorování pomocí prstového dozimetru by v praxi toto podrobné mapování distribuce ozáření kůže ruky mohlo vést k přesnějšímu odhadu maxima H_T kůže, protože prstový dozimetr na kořeni prstu je zpravidla vzdálený od místa maximálního ozáření. Z tohoto důvodu je zapotřebí použití korekčních faktorů (vztah mezi údajem prstového dozimetru a lokálním ozářením kůže v místě maxima). Velikost a přesnost určení korekčních faktorů (KF) závisí na poloze prstového dozimetru a proto by bylo vhodné sjednotit polohu umístění prstového dozimetru. Stejně tak by dané výsledky mapování mohly sloužit jako podklady pro Monte Carlo (MC) simulace ozáření rukou pro daný rizikový úkon, který má základ v měření. V případě využití MC simulací nebude zapotřebí manipulace s RF a též dojde při využití matematických nebo voxelových fantomů ruky k rychlejšímu odhadu maximálního ozáření při rizikových úkonech oproti měření s TLD. Další výhodou MC simulací je podrobnější iterační krok v hledání polohy lokálního maxima ozáření ve srovnání s měřením pomocí TLD.

Motivací ke vzniku tohoto tématu disertační práce byla adekvátní potřeba zodpovězení otázky, zda může dojít při manipulacích s RF k překročení limitu H_T kůže ruky pracovníků také na pracovištích NM v České republice (ČR). Dalším problémem, kterému je zapotřebí se věnovat, je vztah mezi údajem prstového dozimetru (často bývá na kořenu prstu) a lokálním ozářením kůže v místě maxima (nejpravděpodobnější pozice na špičce ukazováku).

1.2 Cíl práce

Na základě motivace byly stanoveny cíle disertační práce:

1. stanovit ozáření kůže rukou pracovníků během činností s vybranými radiofarmaky na vybraných pracovištích nukleární medicíny;
2. stanovit vliv vybraných faktorů, které mohou ovlivňovat velikost lokálního ozáření kůže ruky vybraných pracovníků a zhodnotit toto ozáření kůže rukou vzhledem k limitům ozáření reprezentované ekvivalentní dávkou kůže;
3. na základě naměřených dat navrhnout korekci údaje prstového dozimetru na hodnotu $H_p(0,07)$ v místě maximálního ozáření kůže (tzv. korekční faktor) pro vybrané činnosti s vybraným radiofarmakem;
4. navrhnout sjednocení umístění polohy prstového dozimetru a pro tuto polohu navrhnout vybraným pracovištím nukleární medicíny hodnotu korekčního faktoru pro vybrané činnosti s vybraným radiofarmakem;
5. tam, kde to výpočet a měření vykonané v rámci této práce umožní, taktéž navrhnout i opatření radiační ochrany vedoucí ke snížení radiační zátěže kůže na rukách;
6. u vybraných úkonů použít výpočetní metodu Monte Carlo pro stanovení ozáření ve vybraných místech na povrchu ruky při vybraném úkonu.

Pro dosažení jednotlivých cílů disertační práce bylo zapotřebí provést následující kroky:

1. výběr pracovišť nukleární medicíny (především z hlediska velikosti pracoviště, používaných radiofarmak a lokalitního umístění);
2. realizování samotných experimentů s TLD pro stanovení hodnoty osobního dávkového ekvivalentu $H_p(0,07)$ ve vybraných 12 místech na povrchu ruky na vybraných pracovištích nukleární medicíny;

3. shromáždit informace týkající se aktivity příslušného radiofarmaka, druhu použitého radionuklidu, druhu prováděné činnosti (příprava či aplikace radiofarmaka), technologického vybavení pracoviště, doby praxe pracovníka a umístění prstového dozimetru na prstu dané ruky;
4. na základě mapování osobního dávkového ekvivalentu $H_p(0,07)$ ve 12 pozicích ruky stanovit polohu místa s maximální hodnotou ozáření $H_p(0,07)$ a poté uskutečnit odhad ročního ozáření kůže ruky;
5. na základě vyhodnocení a interpretace výsledků monitorování ozáření kůže ruky pracovníků během manipulace s vybraným radiofarmakem navrhnout pro tuto činnost korekční faktor převodu a doporučit jednotnou polohu prstového dozimetru, na kterou by byla vztažena hodnota korekčního faktoru;
6. pomocí kódu MCNP stanovit u vybraného úkonu velikost ozáření v lokálním bodě, případně ve více místech na povrchu ruky.

2 Současný stav řešené problematiky

V současné době jsou kladeny čím dál větší nároky na zajištění adekvátní radiační ochrany pracovníků, pacientů a pracoviště se zdroji ionizujícího záření v souladu s platnou legislativou a mezinárodními standardy. Důvodem je, mimo jiné, i narůstající radiační zátěž populace související s použitím radiačních technologií v medicíně. Týká se to především zvýšené frekvence vyšetření a změněné skladby použitých technik.

Cílem radiační ochrany je zabránit vzniku deterministických účinků ionizujícího záření (tkáňové reakce) a omezit stochastické účinky na co možnou nejmenší míru tak, jak lze rozumně dosáhnout s aplikací principu ALARA (As Low As Reasonably Achievable). K naplnění těchto cílů slouží principy radiační ochrany, přičemž jeden z nich je dodržování limitů ozáření.

2.1 Kůže

2.1.1 Anatomie kůže

Kůže (*cutis, derma*) je největší plošný orgán lidského těla, který má plochu přibližně 1,7 - 2 m², hmotnost samotné kůže činí asi 3 kg [2]. Tloušťka kůže se pohybuje od 0,5 mm – 4 mm v závislosti na části těla, kde se nachází [3]. Vlastní kůže je složena z několika vrstev - povrchové pokožky (*epidermis*) a škáry (*dermis*). Pod kůží se ještě nachází vrstva podkožního vaziva (*tela subcutanea*). Nejvíce namáhaná je kůže na rukou a nohou.

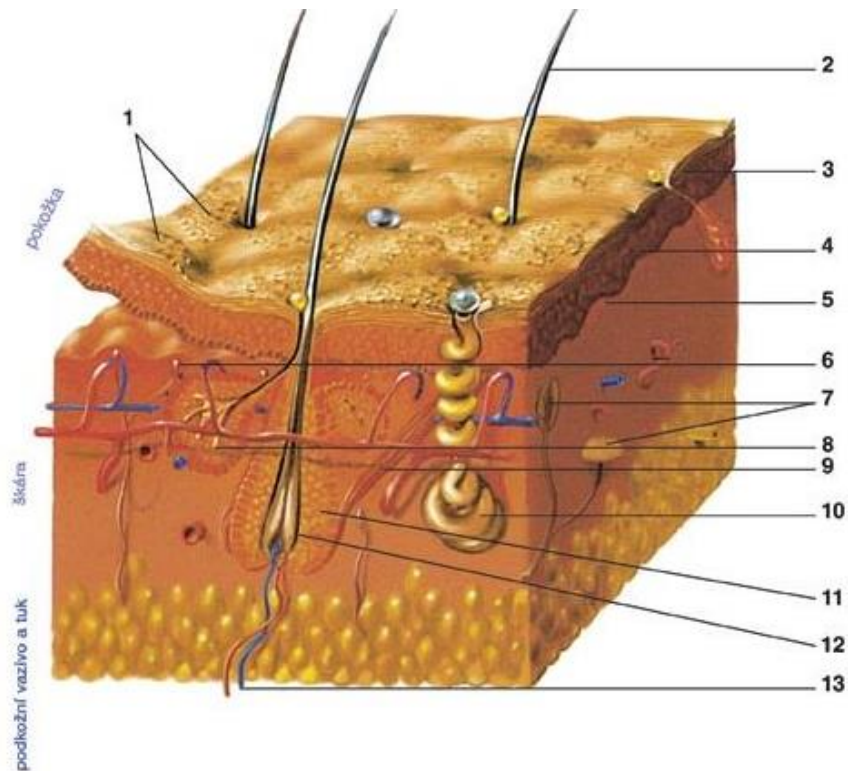
Pokožka je povrchová část kůže, která je tvořena několika vrstvami plochých buněk (hlubší buněčné vrstvy mají schopnost dělení a doplňují odumřelé buňky povrchové vrstvy, které se olupují [2]). Další část kůže (škáru) tvoří vazivová tkáň, ve které probíhají nervy a cévy. Ve škáře jsou též uloženy potní a mazové žlázy spolu s vlasovými kořeny. Podkožní vazivo je potenciální tuková tkáň, která je schopna ukládat tukové kapénky v buňkách. [2]

Kůže je důležitá z několika hledisek, neboť má funkci [3]:

- ochrannou (chemická, fyzikální, mikrobiologická a mechanická);
- termoregulační (regulace tepelných ztrát pomocí odpařování přes potní žlázy a změnu průtoku krve v cévním řečišti kůže);

- smyslového vnímání (jsou zde uloženy důležité receptory - Meissnerova tělíska (hmat), Krauseho tělíska (vnímání chladu), Ruffiniho tělíska (vnímání tepla), Vater – Paciniho tělíska (dotyk a tlak);
- látkové výměny (účastní se dýchání, exkrece pomocí potních a mazových žláz);
- zásobní (podkožní vazivo je tvořeno z tukových buněk).

Schéma stavby kůže je znázorněno na obrázku 1.



- | | |
|--|---|
| 1. Keratinizované šupiny odlupující se z povrchu kůže
<i>Karneoocyty</i> | 7. Tělíska kožní citlivosti
<i>Mechanoreceptory</i> |
| 2. Vlasy, chlupy
<i>Capilli, pili</i> | 8. Mazová žláza
<i>Glandula sebacea</i> |
| 3. Rohová vrstva pokožky
<i>Stratum corneum</i> | 9. Hladký sval – napřimovač chlupů
<i>m. arrector pili</i> |
| 4. Záradečná vrstva pokožky
<i>Stratum germinativum</i> | 10. Potní žláza
<i>Glandula sudorifera</i> |
| 5. Pigmentová vrstva v kaudální části zárodečné vrstvy pokožky
<i>Stratum pigmentosum</i> | 11. Pochva vlasu
<i>Vagina capilli</i> |
| 6. Volná nervová zakončení – receptory pro bolest | 12. Vlasová cibulka
<i>Bulbus capilli</i> |
| | 13. Cévy |

Obrázek 1 Stavba kůže [4]

Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (ICRP - International Commission on Radiological Protection) doporučuje, aby dávka na kůži byla hodnocena v nominální hloubce 70 μm , jelikož se tloušťka bazální vrstvy pokožky na většině částí těla pohybuje od 50 - 100 μm [5, 6].

2.1.2 Biologické účinky ionizujícího záření

Pro stanovení principů a kritérií radiační ochrany, ze kterých je následně odvozen systém limitování dávek (limity pro radiačního pracovníka, limity pro obyvatele, limity pro žáka a studenta) je důležitá znalost biologických účinků záření [7].

Na základě vztahu účinku a dávky lze rozlišit dva základní typy radiobiologických účinků – stochastické účinky a tkáňové reakce (dříve nazývány jako deterministické účinky).

Stochastické účinky jsou významné při nízkých dávkách ozáření. Na základě reparačních procesů je většina takto poškozených biologicky aktivních látek opravena. Na druhou stranu je zde však určitá míra pravděpodobnosti, že některá poškození zůstanou neopravena, což může vyústit v mutaci. V případě, že dochází u mutovaných buněk k dělení, mohou vzniknout pozdní trvalé následky (genetické změny, nádory) [8]. V populaci se však genetické změny a zhoubné nádory vyskytují i bez vlivu ionizujícího záření a klinický obraz těchto onemocnění se neliší od poškození, které je způsobeno jiným rizikovým faktorem [9]. Stochastické účinky mají pravděpodobnostní charakter (nelze je předvídat, neboť jsou náhodné), pravděpodobnost výskytu poškození se zvyšuje s rostoucí dávkou.

Tkáňové reakce se klinicky projevují až po překročení prahové dávky (pod tímto „dávkovým prahem“ se tento účinek neprojeví), která se pro jednotlivé tkáně a orgány liší (např. prahová dávka pro kůži je přibližně 3 Gy [8]). Tyto účinky lze předvídat. Se zvyšující se dávkou roste závažnost poškození [8].

2.1.3 Radiační dermatitida

Z hlediska účinků ionizujícího záření na lidský organizmus je zapotřebí věnovat zvláštní pozornost kůži, protože kůže je při jakékoliv zevní expozici vystavena působení dopadajícímu záření [7]. Stupeň poškození kůže závisí na několika parametrech (především na dávce, druhu záření, velikosti ozářeného pole a na lokalizaci [7]). Radiační dermatitida může být akutní či chronická.

Akutní radiační dermatitida

Akutní radiační dermatitida se řadí mezi časné účinky záření na lidský organizmus, které se klinicky projeví v krátkém čase po ozáření většími jednorázovými dávkami [7].

U akutní radiační dermatitidy lze rozlišit tři stupně poškození [7, 8]:

- 1. stupeň – vzniká při ozáření kůže dávkami většími než 3 Gy. Pro tento stupeň poškození je charakteristický erytém (zrudnutí kůže) a depilace (ztráta ochlupení). Při dávkách větších než 6 Gy nastává epilace (trvalá ztráta ochlupení);
- 2. stupeň – rozvíjí se při ozáření kůže dávkami většími než 10 Gy. Nejčastějším projevem tohoto stupně poškození jsou puchýře (vznikají v důsledku oddělení pokožky od pojivového podkladu tekutinou, která vychází z cévy);
- 3. stupeň - vzniká při větší poruše cév, která vede k tvorbě vředu, popř. nekróze.

Chronická radiační dermatitida

Z hlediska účinků záření na lidský organismus se chronická radiační dermatitida řadí mezi nenádorová pozdní poškození, která vznikají v průběhu let za podmínek protražovaného ozařování a je pro ně typický tzv. „dávkový práh“ [7]. Chronická radiační dermatitida byla pozorována zejména u pracovníků, kteří prováděli skiaskopická rentgenová vyšetření bez dostatečné stínící ochrany.

2.2 Dozimetrie a radiační ochrana

Dozimetrie ionizujícího záření je fyzikálním podkladem pro hodnocení účinků záření na lidský organismus jako celek, resp. jeho jednotlivé orgány a tkáně. Pro spolehlivou představu o ozáření během různých situací jsou používány specifické veličiny, na základě kterých je možná kvantifikace stupně nebezpečí a pomocí kterých je možná kontrola rizika v souladu s platnými předpisy a nařízeními [10].

2.2.1 Základní veličiny dozimetrie a veličiny používané v radiační ochraně

Veličiny používané v radiační ochraně zohledňují míru biologických účinků záření na lidský organismus. Tyto veličiny vychází z fyzikálních veličin, které jsou příslušným způsobem modifikovány váhovými faktory tak, aby výsledná veličina co nejlépe postihla biologické důsledky ozáření.

Absorbovaná dávka

Nejdůležitější dozimetrickou veličinou je absorbovaná dávka D , která je definována jako podíl střední energie sdělené $d\bar{\epsilon}$ zářením v objemovém elementu látky a hmotnosti tohoto elementu dm .

Tato veličina v určitém bodě dané látky je stanovena jako [10]:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Základní fyzikální jednotkou veličiny absorbovaná dávka je $J \cdot kg^{-1}$, pro který se v praxi používá název gray (Gy). Veličinu absorbovaná dávka (dále už jen jako dávka) nelze použít pro účely hodnocení ozáření z hlediska radiační ochrany, neboť tato veličina nedokáže při stejné dávce zohlednit různý biologický účinek od různých druhů záření a rovněž tato veličina nezohlední různou radiosenzitivitu ozářených tkání a orgánů. Z tohoto důvodu byly zavedeny specifické veličiny pro radiační ochranu, které se však z veličiny absorbovaná dávka odvíjí.

Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (ICRP) vydává základní doporučení, která se považují za výchozí pro další rozpracování standardů radiační ochrany. Poslední takovéto doporučení vydala ICRP v roce 2007 [6].

Dávkový ekvivalent

Veličina dávkový ekvivalent H je definována součinem dávky D v daném bodě ve tkáni a jakostního faktoru Q . Jakostní faktor zohledňuje vliv mikroskopické distribuce dávky na biologické poškození [10]. Dávkový ekvivalent lze stanovit na základě vztahu:

$$H = Q \cdot D$$

Jakostní faktor je bezrozměrná veličina, přičemž jeho hodnoty se liší v závislosti na druhu záření (např. pro fotony a elektrony má jakostní faktor hodnotu 1).

Jednotkou veličiny dávkový ekvivalent je Sv (sievert).

Ekvivalentní dávka

Veličina ekvivalentní dávka H_T patří mezi stěžejní veličiny radiační ochrany, pomocí které jsou definovány limity ozáření. Tato veličina je dána jako součin radiačního

váhového faktoru w_R pro záření typu R a střední hodnoty dávky $D_{T,R}$ v dané tkáni T způsobené zářením typu R . Ekvivalentní dávka je definována následujícím vztahem [10]:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Radiační váhový faktor w_R je bezrozměrná veličina a je určena pro zohlednění účinků vyvolaných různými druhy záření (např. pro fotony a elektrony je hodnota w_R rovna 1).

Jednotkou ekvivalentní dávky je Sv.

Efektivní dávka

Stejně jako veličina ekvivalentní dávka, tak i veličina efektivní dávka E patří mezi veličiny radiační ochrany, pomocí které jsou definovány celotělové limity ozáření.

Pomocí veličiny efektivní dávka se hodnotí celotělové ozáření z hlediska stochastických účinků. Tato veličina je definována jako součet ekvivalentních dávek ve vybraných orgánech a tkáních vážených tkáňovým váhovým faktorem w_T [10].

Velichina efektivní dávka je stanovena jako:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

Bezrozměrný tkáňový váhový faktor w_T odráží relativní radiosenzitivitu daných orgánů a tkání (např. pro kůži je w_T roven 0,01).

Jelikož stěžejní veličiny radiační ochrany (ekvivalentní dávka, efektivní dávka) lze pouze vypočítat (dané veličiny nelze stanovit přímým měřením), byly zavedeny tzv. operační veličiny, které se principiálně dají stanovit měřením.

Operační veličiny pro hodnocení vnějšího ozáření

Operační veličiny mají za cíl poskytnout konzervativní odhad veličin radiační ochrany [11]. V případě vnějšího ozáření jsou jako operační veličiny používány:

- osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$ pro monitorování osob;
- prostorový dávkový ekvivalent $H_p^*(d)$ a směrový dávkový ekvivalent $H_p'(d)$ pro monitorování prostředí.

Pro monitorování osob z hlediska vnějšího ozáření se nejčastěji užívá veličina osobní dávkový ekvivalent, který je vztažen k určité hloubce d pod povrchem těla [10, 11]:

- pro aproximaci efektivní dávky slouží operační veličina $H_p(10)$ – osobní dávkový ekvivalent v hloubce $d = 10$ mm;
- pro aproximaci ekvivalentní dávky na kůži, ruce a nohy slouží osobní dávkový ekvivalent v hloubce $d = 0,07$ mm, $H_p(0,07)$;
- pro aproximaci ekvivalentní dávky na oční čočku je použit osobní dávkový ekvivalent v hloubce $d = 3$ mm, $H_p(3)$.

Pro osobní monitorování vnějšího ozáření slouží osobní dozimetry. V běžné praxi se používá několik druhů osobních dozimetrů (osobní filmový dozimetr, termoluminiscenční dozimetr, opticko – luminiscenční dozimetr, osobní neutronový dozimetr a elektronický dozimetr).

2.2.2 Dozimetry používané pro monitorování radiační zátěže rukou

Pro monitorování radiační zátěže rukou pracovníků během manipulace se zdrojem záření se používají prstové termoluminiscenční dozimetry, které slouží pro stanovení veličiny osobní dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$. Prstovými dozimetry mohou být vybaveni např. pracovníci na pracovišti nukleární medicíny (manipulace s radiofarmakem) či na pracovišti intervenční radiologie (např. z důvodu manipulace s jehlou v primárním svazku záření [12]).

Stěžejní výhody termoluminiscenčního dozimetru jsou: tkáňová ekvivalentnost, větší radiační citlivost a přesnost oproti filmovým dozimetrům, možnost přesného měření odezvy, poměrně široká oblast lineární závislosti mezi dávkou a odezvou dozimetru, možnost většího rozsahu měřených dávek, malá citlivost na vnější vlivy, malé rozměry dozimetru, opakované použití dozimetru a cenová dostupnost [13, 14, 15].

Nevýhodou termoluminiscenčních dozimetrů je jejich citlivost na světlo [14], a fading (samovolné snižování záznamu s časem), který je však menší než 5 % za rok [16].

Mezi nejčastěji používaný termoluminiscenční materiál patří LiF, dále také materiál CaF_2 a CaSO_4 [13].

Používaná radiofarmaka v nukleární medicíně jsou především zářiče gama, zářiče beta a pozitronové zářiče. V běžné klinické praxi se proto pro rutinní monitorování rukou často používají ultra tenké termoluminiscenční dozimetry [17, 18].

Detektory s tenkou vrstvou (MCP – Ns) jsou vhodné pro spolehlivé stanovení $H_p(0,07)$ při manipulování s pozitronovými radiofarmaky [19, 20], respektive k selektivnímu monitorování v širokém rozsahu smíšených beta – gama polí [21]. Příspěvek od pozitronů na $H_p(0,07)$ nelze zanedbat, neboť při těsném kontaktu nebo krátké vzdálenosti od pozitronového zářiče vzhledem k ruce může být příspěvek dávky na kůži od pozitronů řádově 50 % [22]. Tenké dozimetry typu LiF: Mg, Cu, P jsou rovněž oproti dozimetřům typu $Al_2O_3:C$ tkáňově ekvivalentní a necitlivé na světlo [23].

Podhodnocení „tlustších“ dozimetrů (např. typ MCP – 7) se projevuje zejména u zářiče ^{18}F kvůli pozitronovému příspěvku, který významně přispívá k dávce v případě nestíněné stříkačky s radiofarmakem [17, 24]. Pokud nejsou v tomto případě použity tenké detektory (např. MCP – Ns), může být toto podhodnocení řádově 30 – 50 % [19, 22].

Monitorování ozáření rukou však nemusí být založeno jen na použití termoluminiscenčních dozimetrů. V nukleární medicíně se setkáváme s aplikacemi, kde jsou ruce ozářeny více než tělo pracovníka. V některých případech jsou vhodné elektronické dozimetry [25], kde jsou příslušná čidla umístěna na prstech pracovníka (např. elektronický dozimetr AEGIS (Advanced Extremity Gamma Instrumentation System) [26, 27]), pomocí kterých je rovněž možné určit ozáření jednotlivých pracovníků během odlišných pracovních úkonů.

2.3 Aktuální situace ve světě

Problematikou radiační zátěže rukou pracovníků v nukleární medicíně se zabývala celá řada autorů [28 - 33], stejně jako projekt CONRAD (Coordinated Network for Radiation Dosimetry (doba řešení projektu 2005 - 2007) [34]) nebo část projektu ORAMED, do kterého bylo v letech 2008 – 2011 zapojeno 7 zemí v Evropě (obrázek 2). Řada autorů [1, 34 - 45], kteří se tohoto projektu účastnili, se věnovala ozáření rukou pracovníků na vybraných pracovištích nukleární medicíny,

kteří prováděli přípravu a aplikaci radiofarmak značených pomocí radionuklidů ^{99m}Tc , ^{18}F a ^{90}Y , v menší míře pak ^{131}I , ^{153}Sm a ^{186}Re .



Obrázek 2 Zapojená pracoviště nukleární medicíny v rámci evropského projektu ORAMED [46]

Hodnocení ozáření kůže ruky bylo v různých publikacích sledováno na základě různého počtu a typu dozimetrů. Lokální ozáření kůže na ruku personálu bylo v projektu ORAMED měřeno v 11 bodech na každé ruce pomocí TLD. Většina pracovišť použila především TLD typu MCP (LiF: Mg, Cu, P) [1]. TLD byly umístěné na bavlněných rukavicích (většina měření) či přímo na kůži ruky [37, 39]. Jiné práce hodnotily ozáření kůže rukou pracovníků pomocí nalepených TLD typu MCP (LiF: Mg, Cu, P) v 18 bodech ruky [32, 47] nebo 19 bodech ruky [37]. Práce [39, 40], které se věnovaly stanovení radiační zátěže rukou během manipulace s radiofarmakou ^{90}Y si vybraly jen některé pozice na prstech ruky (dozimetry typu MCP – Ns byly nalepeny na špičce a kořenu palce, špičce ukazováku a druhém článku ukazováku, špičce prostředníku). Jiné publikace si pro monitorování zvolily pouze špičky prstů [48 - 50]. Existují však publikace, kde byla radiační zátěž rukou pracovníků na pracovištích NM hodnocena jen na základě prstových dozimetrů [31, 51].

Naměřené hodnoty v rámci výše uvedených prací poukázaly na velký rozsah maximálního lokálního ozáření kůže na rukách monitorovaných pracovníků, s nejčastějším místem maximálního ozáření na špičce ukazováku. Tato pozice však není

z praktických důvodů vhodná pro umístění prstového dozimetru. Proto byl v projektu [1] pro běžné monitorování rukou pracovníků navržen kořen ukazováku nedominantní ruky a korekční faktor s hodnotou 6 (poměr mezi maximální naměřenou dávkou na kůži a dávkou na kůži ve vybraném monitorované pozici), protože použití dozimetrů umístěných na zápěstí se ukázalo jako nevhodné kvůli podhodnocení radiační zátěže rukou až 20krát [1, 46]).

Rovněž bylo v několika publikacích odhadováno, že existují případy, kdy mohou pracovníci překročit roční limit ozáření ve smyslu ekvivalentní dávky kůže rukou (500 mSv/rok) [1, 32, 35, 39].

Na základě provedených měření a simulací pomocí metody Monte Carlo dospěl projekt ORAMED k několika doporučením, která byla rovněž publikována [1, 35 - 42, 46, 52 - 56]. Během manipulace se ZIZ je vhodné používat adekvátní stínění, které hraje důležitou roli při snižování radiační zátěže rukou [1, 35, 39 - 43], neboť pracovat rychle nemusí vést vždy k optimálním výsledkům snížení ozáření [56]. Z hlediska stínění je doporučeno používat [1]:

- u stříkaček stínění, jehož tloušťka a materiál bude v závislosti na použitém radionuklidu (2 mm wolframu pro radionuklid ^{99m}Tc , 5 mm wolframu pro radionuklid ^{18}F a 10 mm PMMA (PolyMethylMethAcrylate) pro radionuklid ^{90}Y);
- u lahviček s radiofarmaky stínění, jehož tloušťka a materiál bude v závislosti na použitém radionuklidu (3 mm Pb v případě radionuklidu ^{99m}Tc , 3 cm Pb v případě ^{18}F a 10 mm PMMA s několika mm Pb pro radionuklid ^{90}Y).

Rovněž je vhodné během práce s radiofarmakem používat manipulační pomůcky prodlužující vzdálenost mezi ZIZ (radiofarmakem) a konečky prstů pracovníka (kleště, pinzety, automatické injektory atd.), což je někdy vhodnější než provádět příslušné operace zrychleně [56].

V neposlední řadě je doporučováno trénování pracovních postupů, než pracovník nabyde náležité dovednosti (zkušenost) a taktéž provádět školení a organizovat kurzy pro pracovníky v radiační ochraně (vhodné materiály pro vzdělávání jsou např. publikace [9, 57 - 59]). Trénink v oblasti radiační ochrany může být rovněž podpořen pomocí elektronické komunikace [60]. Taktéž provádění případných auditů

může u pracovníků zvýšit povědomí o radiační ochraně a tím může dojít k redukci ozáření [49].

Na pracovištích nukleární medicíny se rovněž můžeme setkat s problémem kontaminace rukou pracovníků radiofarmaky [5, 61]. V rámci prací [54, 61] byla kontaminace zjištěna v 9 % případů. Nejčastěji byla lokalizována na špičce ukazováku (70 %), přičemž pracovníci si této kontaminace většinou nebyli ani vědomi.

Řada autorů se rovněž zabývala možnostmi, jak minimalizovat ozáření rukou během příslušných úkonů s radiofarmaky. V některých případech se tento problém řešil rozdělením činnosti mezi více pracovníků [62], což však není zcela v souladu s principy radiační ochrany (tímto způsobem se sice předejde případnému překročení limitu ozáření u některých pracovníků, ale kolektivní dávka zpravidla zůstane na stejné úrovni). V poslední době se k tomuto účelu stále častěji využívá technologické vybavení (automatické rozplňovací stanice, aplikátory a injektory radiofarmaka), díky kterému může být minimalizována expozice rukou [47, 48, 63 - 65].

Ozáření rukou do značné míry závisí na druhu prováděných operací, technologickém vybavení, na zavedených pracovních postupech na pracovištích či na návycích pracovníka. Tyto faktory snadno zakryjí význam použití stínění či účinnost použití dostatečné vzdálenosti od zdroje (např. pomocí kleští či pinzet). Z tohoto důvodu se jeví vhodným prostředkem metoda Monte Carlo, která vyčíslí redukci $H_p(0,07)$ v závislosti na druhu stínění, které je použito a pracovních pomůcek, které prodlužují vzdálenost mezi zdrojem a rukou během manipulace s radiofarmakem [66].

V současné době se při aplikacích metody Monte Carlo používají voxelové fantomy. Jejich nevýhodou však je, že pokud je voxel menšího rozměru než nějaká struktura, nemusí se struktura na snímku zobrazit. Řada autorů používala také matematické fantomy. Matematické modely se týkají zprůměrovaných hodnot lidského těla (resp. orgánů). U matematických modelů je patřičný orgán vyjádřen pomocí matematických rovnic, které popisují geometrická tělesa a pomocí kterých je možné měnit velikost daného orgánu, modifikovat jeho tvar nebo měnit jeho umístění. Nevýhodou matematického modelu ruky (často zjednodušeně reprezentované ve tvaru destičky) je však jeho komplikovanost při detailní simulaci prstů na ruce při vybrané manipulaci.

Výhodou metody Monte Carlo je, že oproti měření pomocí dozimetrů v předem definovaných bodech ruky umožňuje zjistit ozáření v libovolném bodě pro daný úkon. Výpočet pomocí metody Monte Carlo je relativně méně časově náročný a rovněž u něj není zapotřebí manipulace se zdrojem záření (radiofarmakem). Na rozdíl od metody Monte Carlo dávají měření pomocí TLD informaci o integrální dávce za čas, kdy byly termoluminiscenční dozimetry vystaveny účinkům ionizujícího záření během manipulace s radiofarmakem, a tudíž nelze jednotlivé úkony, které pracovník provádí, od sebe „oddělit“ a určit jednotlivý podíl ozáření z dílčích pracovních postupů. Navíc, pomocí výpočtů na základě metody Monte Carlo je možné stanovit dávku nejen ve vybraných či v libovolných bodech, ale také na celou ruku [67]. Pomocí měření s TLD rozmístěnými v určitých bodech ruky je možné určit pouze hodnotu lokálního ozáření v místech, kde se nachází TLD, přičemž tyto pozice nemusí odpovídat místu s maximálním ozářením [68 - 70].

V rámci několika posledních let došlo k výraznému obměňování technologického vybavení, především z důvodu zlepšování radiační ochrany personálu. Proto byl sledován vývoj z hlediska radiační zátěže kůže ruky, především v technologickém vybavení při přípravě a aplikaci pozitronového zářiče [71 - 75] a s tím souvisejícím školením personálu.

2.4 Současný stav řešené problematiky v ČR

Problematikou radiační zátěže rukou pracovníků během manipulace s různými radiofarmaky se v minulosti v ČR zabývaly zejména práce [76 - 78]. Práce [76] poukázala, že při manipulaci s ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generátorem činí poměr dávky v poloze dozimetrů na dlaňové straně ruky k dávce v poloze dozimetru na hřbetové straně ruky přibližně 16. Další práce [77] podala přehled literárních údajů zabývajících se terapií pomocí radiofarmak značených ^{90}Y a již zde byly první zmínky o výrazném podhodnocení dávky v kůži ve srovnání s údajem TLD umístěného na špičce prstu zjištěného z literatury [79]. Rovněž zde bylo poukázáno na možné riziko překročení limitu ekvivalentní dávky kůže u pracovišť, která provádí velké množství aplikací ^{90}Y (na základě zahraniční literatury [80]). Proto je během aplikací ^{90}Y doporučováno použití kanyly, která sníží radiační zátěž rukou až o dva řády.

Radiační ochranou se u pozitronových radiofarmak zabývaly studie [78] a [81]. Práce [78] poskytuje přehled o radiační zátěži rukou farmaceutů a dalších pracovníků

připravujících radiofarmaka značená ^{99m}Tc a ^{18}F . Přehled měření je proveden ve dvou polohách dozimetru (poloha A = konečky prstů, poloha B = kořen prstu), přičemž dávka pomocí dozimetru A není běžně měřena a lze ji pouze odhadnout na základě měření pomocí dozimetru B , který se vynásobí příslušným faktorem. Tato práce rovněž konstatuje, že průměrné dávky na ruce v poloze dozimetru B , nepřekročí při používání ochranných pomůcek 1/5 ročního limitu H_T na kůži pro radiační pracovníky (jen v malých počtech případů by se ročnímu limitu H_T na kůži mohly blížit údaje z dozimetru A) a to jak na pracovištích NM ve světě, tak i v ČR. Avšak pokud při rutinní práci dojde ke kontaminaci rukou, není vyloučeno, že nebude daný limit ozáření H_T překročen.

Práce [82] poukázala na důležitost používání vhodných stínících pomůcek na základě porovnání radiační zátěže rukou pomocí prstových dozimetrů umístěných na malíčcích pravé a levé ruky během dvou variant odběru ^{99m}Tc – pertechnetátu z lékovky s eluátem ^{99}Mo – ^{99m}Tc generátoru pro další zpracování (lavička s eluátem v kontejneru nepřekryta/překryta víčkem).

Závěry práce hodnotící profesionální ozáření pracovníků na nukleární medicíně v ČR [83, 84] mimo jiné poukázaly na případnou možnost překročení limitů průměrné ekvivalentní dávky na 1 cm^2 kůže 500 mSv/rok .

Výše citované práce českých autorů [76 – 78, 81– 84] odrážejí vývoj v letech 1980 – 2007, přičemž za posledních 10 let se touto problematikou u nás nikdo tak intenzivně a komplexně nezabýval. Z dostupných zdrojů publikovaných českými autory a týkající se pracovišť NM v ČR lze říci, že většina publikací od autorů z ČR využívala pro stanovení radiační zátěže kůže na rukou především údaje z prstových dozimetrů.

Projekt ORAMED řešil problematiku radiační ochrany pracovníků při manipulaci s radiofarmaky pro významný počet evropských států a také v širokém rozsahu. Do těchto studií nebyla ČR zařazena, proto vznikla potřeba, aby obdobná studie byla provedena rovněž v ČR, což bylo hlavní motivací ke vzniku této disertační práce.

2.5 Legislativa radiační ochrany

V průběhu disertační práce došlo v ČR ke schválení nového Atomového zákona [85] a navazujících vyhlášek, které upravily limity ozáření (především Vyhláška o radiační

ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje [86]). Výsledky disertační práce byly diskutovány vzhledem k aktuální legislativě, která zohledňuje poslední mezinárodní doporučení a standardy vypracované zejména ICRP, EU, IAEA (International Atomic Energy Agency).

2.5.1 Radiační ochrana v nukleární medicíně

Na pracovištích nukleární medicíny se manipuluje s otevřenými zářiči. Pracovníci na tomto pracovišti často přichází do těsného kontaktu s radioaktivní látkou (např. během přípravy i následné aplikace radiofarmaka). V současné době dochází k rozšíření palety používaných radionuklidů pro přípravu pozitronových radiofarmak, jako jsou třeba radionuklidy ^{11}C či ^{68}Ga , které emitují pozitrony o větší energii, což zvyšuje riziko větší radiační zátěže pracovníků. Proto je zapotřebí této problematice věnovat větší pozornost v oblasti opatření radiační ochrany.

Obzvláště důležité je proto i monitorování radiační zátěže rukou. Prstový dozimetr stanoví hodnotu osobního dávkového ekvivalentu $H_p(0,07)$ pouze v místě, kde je nošen (kořen prstu) a tudíž nemusí podávat informaci o maximálním lokálním ozáření kůže ruky, které může být vzdálené několik cm (špička ukazováku). Monitorování pomocí prstových dozimetrů se doporučuje pracovníkům, u kterých se předpokládá větší ozáření rukou [15], pracovníci přicházející do kontaktu s radiofarmaky by tedy měli být monitorováni prstovým dozimetrem, ostatním profesím je monitorování rukou doporučováno [83, 84].

V současné době není jednoznačně určeno, na jakém konkrétním místě by mělo probíhat monitorování ozáření kůže rukou pracovníků (od konečků prstů až po předloktí), tudíž by se mohlo jevit jako vhodné řešení stanovení referenčního místa pro monitorování rukou. Rozumně realizovatelné umístění prstového dozimetru by však nemělo omezovat pracovníka během pracovních postupů. Rovněž by měla být zajištěna vyhovující reprodukovatelnost měření a porovnatelnost mezi jednotlivými pracovníky. V případě přijetí korekčních faktorů by mohlo být lépe odhadnuto maximální ozáření kůže na rukou, které se ve většině případů nachází na konečcích prstů, které nejsou z praktických důvodů vhodné pro umístění prstového dozimetru. Nezanedbatelným faktorem z hlediska výběru měřicí metody je rovněž jednoduchost a spolehlivost vyhodnocovacího procesu ozáření rukou a cenová dostupnost detektorů i vyhodnocovacího zařízení.

Z hlediska radiační ochrany pracovníků nukleární medicíny je proto důležité dodržení základních principů a způsobů zajištění adekvátní radiační ochrany. To se týká především manipulace s radiofarmaky (technologické vybavení, použití osobních ochranných, manipulačních a stínících pomůcek, přístup pracovníka), dále způsobu přípravy a aplikace radiofarmaka pacientům a metodiky monitorování ozáření kůže ruky tak, aby byla zajištěna správná interpretace naměřených hodnot s dostatečnou přesností vzhledem ke stanovenému limitu.

2.5.2 Program monitorování

Cílem programu monitorování je potvrzení dodržování limitů ozáření, prokázání optimalizace radiační ochrany a včasné upozornění na odchylky od běžného provozu pracoviště [86]. Pro omezení profesního ozáření slouží limity ozáření pro radiační pracovníky, které jsou definovány ve veličinách efektivní a ekvivalentní dávka, které však nelze měřit. Z tohoto důvodu byly zavedeny tzv. odvozené limity, které jsou definovány v principiálně měřitelných veličinách a pokud nejsou tyto odvozené limity překročeny, považují se limity pro radiační pracovníky rovněž jako nepřekročené. Limity pro radiační pracovníky a odvozené limity shrnuje tabulka 1.

Tabulka 1 Limity ozáření pro radiační pracovníky [86]

Základní limit ozáření		Odvozený limit ozáření	
Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
Efektivní dávka ze zevního ozáření	20 mSv/rok	Osobní dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm	20 mSv/rok
Průměrná ekvivalentní dávka na každý 1 cm ² kůže bez ohledu na velikost ozářené plochy	500 mSv/rok	Osobní dávkový ekvivalent v hloubce 0,07 mm	500 mSv/rok
Ekvivalentní dávka na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky	500 mSv/rok	Osobní dávkový ekvivalent v hloubce 0,07 mm*	500 mSv/rok
Ekvivalentní dávka v oční čočce	100 mSv/5 let a současně 50 mSv/rok	Osobní dávkový ekvivalent v hloubce 3 mm	20 mSv/rok

*Podle ICRP 103 [11]

Z hlediska monitorování se rovněž zavádí monitorovací úrovně (MÚ), jejichž dosažení (překročení) je podnětem k předem definovanému postupu (tabulka 2).

Tabulka 2 Monitorovací úrovně [86]

Monitorovací úroveň	MÚ stanovena na úrovni	Dosažení nebo překročené MÚ vede k
Záznamová	1/10 limitů ozáření s ohledem na délku monitorovacího období Nejmenší detekovatelné hodnoty měřené veličiny	Zaznamenání a uchování údaje
Vyšetřovací	3/10 limitů ozáření s ohledem na délku monitorovacího období Horní meze obvykle se vyskytujících hodnot měřené veličiny	Šetření příčin Zjištění důsledků výkyvu sledované veličiny radiační ochrany
Zásahová		Provedení předem stanoveného opatření k nápravě vzniklého stavu Provedení předem stanoveného opatření k zabránění nežádoucího rozvoje vzniklého stavu

3 Materiál a metody

V následující kapitole je popsána příprava experimentů realizovaných v rámci disertační práce, postup provedených experimentů na vybraných pracovištích nukleární medicíny a rovněž způsob vyhodnocování naměřených výsledků.

3.1 Experimentální část

3.1.1 Sledované radionuklidy

Na pracovištích NM se používá pestrá paleta diagnostických radionuklidů (zejména ^{99m}Tc , ^{18}F , ^{111}In , ^{81m}Kr) a terapeutických radionuklidů (^{90}Y , ^{131}I , ^{153}Sm aj.). Pro experimenty v rámci disertační práce byly vybrány dva radionuklidy (^{18}F a ^{131}I) z důvodu dynamického rozvoje počtu vyšetření na PET, ale také s přihlédnutím k dostupnosti experimentálních možností.

Prvním radionuklidem, který byl vybrán pro experimenty, byl ^{18}F , protože v posledních letech dochází k celosvětovému trendu nárůstu počtu pracovišť s PET. Hlavní pozornost proto byla věnována pozitronovému radionuklidu ^{18}F , protože během manipulace s radiofarmaky značenými radionuklidem ^{18}F (^{18}F – FDG, ^{18}F – NaF, ^{18}F – FDOPA, ^{18}F – FCH či ^{18}F – FLT atd. [87]) dochází k několikanásobně větší radiační zátěži (a to jak z hlediska ozáření kůže na rukou, tak i celotělového ozáření) oproti manipulaci s radiofarmaky značenými radionuklidem ^{99m}Tc [35]. Dalším důvodem orientace na radionuklid ^{18}F je též perspektiva intenzivního rozšíření diagnostické modality pozitronové emisní tomografie, s čímž souvisí dynamický rozvoj technologického vybavení pro PET, které má snižovat ozáření kůže rukou.

Druhý radionuklid, který byl v rámci práce řešen, byl radionuklid ^{131}I , který je standardem v ČR pro terapii štítné žlázy a během manipulace s ním dochází k významnějšímu ozáření rukou personálu. Léčba pomocí radionuklidu ^{131}I se může realizovat ve formě izotonického roztoku o požadované aktivitě nebo v podobě želatinové kapsle o předem deklarované aktivitě [88]. Jednotlivé úkony týkající se přípravy a podání různých forem tohoto radiofarmaka značeného radionuklidem ^{131}I jsou odlišné. Na rozdíl od pozitronového zářiče značeného ^{18}F je radionuklid ^{131}I zářič emitující záření beta, které je doprovázeno emisí kvant gama. Vybrané vlastnosti sledovaných radionuklidů shrnuje tabulka 3.

Tabulka 3 Vybrané vlastnosti sledovaných radionuklidů [59, 89, 90]

Radionuklid	Poločas přeměny [h]	Beta zářené E_{\max}		Gama záření
		pozitrony	elektrony	
^{18}F	1,83	634 keV (96,7 %)	-	511 keV (194 %)
^{131}I	193	-	606 keV (90 %)	364 keV (82 %)
		-	248 keV (2 %)	284 keV (6 %)
		-	334 keV (7 %)	637 keV (7 %)
		-	-	723 keV (1,77 %)
-	-	-	-	80,2 keV (2,6%)

3.1.2 Sledovaná skupina

V případě, že nebylo možné na pracovišti monitorovat všechny pracovníky, byl výběr monitorovaných pracovníků konzultován s vedoucím pracoviště a byly vybrány osoby reprezentující dané pracoviště.

Experimenty byly vykonány na pěti pracovištích nukleární medicíny v České republice (3 PET pracoviště a 2 pracoviště poskytující terapii pomocí ^{131}I).

Sledovanou skupinu pracovníků ze třech různých PET pracovišť tvořily osoby manipulující s radiofarmaky, konkrétně pracovníci připravující radiofarmakum (přípravou radiofarmaka se rozumí úkony spojené s natažením radiofarmaka do stříkačky, u této činnosti bylo monitorováno celkem 17 osob) a aplikující radiofarmakum (celkem 13 osob). Každý pracovník byl monitorován 3krát (jeden pracovník byl monitorován 4krát, celkem bylo na PET pracovištích v ČR provedeno 91 měření u 30 osob).

Vybraná PET pracoviště byla vybavena různou technologií. Pro přípravu pozitronového radiofarmaka měla všechna sledovaná PET pracoviště k dispozici automatické zařízení pro dávkování radiofarmaka (dále už jen jako rozplňovací stanice), avšak od různých dodavatelů. Příklad automatického zařízení pro dávkování radiofarmaka je uveden na obrázku 3.



Obrázek 3 Příklad automatického zařízení pro dávkování radiofarmaka

Na jednotlivých PET pracovištích prováděli aplikaci radiofarmaka odlišným způsobem:

- pracoviště 1: aplikovalo pozitronové radiofarmakum dvěma způsoby a to pomocí stříkačky ve wolframovém stínění bez použití kanyly (obrázek 4) či pomocí stříkačky ve wolframovém stínění s použitím kanyly a infuzní trubičky (obrázek 5a);
- pracoviště 2: provádělo aplikaci výhradně pomocí stříkačky ve wolframovém stínění s použitím kanyly a infuzní trubičky (obrázek 5b);
- pracoviště 3: používalo automatické zařízení pro aplikaci radiofarmaka (obrázek 6).

Různé způsoby manuální aplikace mají různý vliv na ozáření rukou. Na obrázku 4 je znázorněna manuální aplikace pomocí stříkačky ve wolframovém stínění bez použití kanyly a infuzní trubičky.



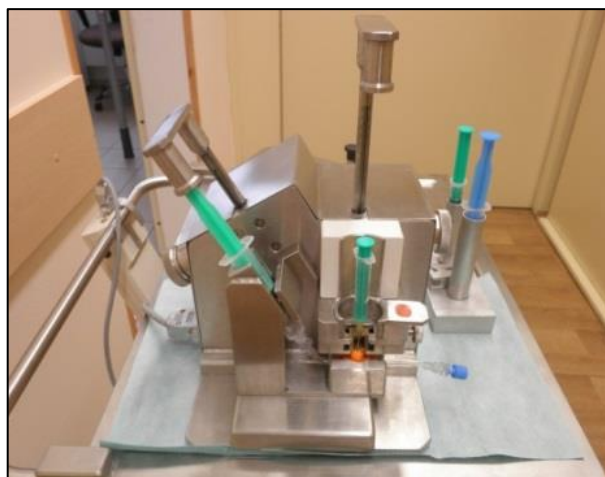
Obrázek 4 Manuální aplikace (bez použití kanyly a infuzní trubičky)

Na obrázku 5 jsou ilustrovány různé způsoby manuální aplikace s použitím kanyly a infuzní trubičky. Z daného obrázku lze rovněž vidět různé geometrie ozáření prstů ruky během těchto aplikací.



Obrázek 5 Způsoby manuální aplikace radiofarmaka (s použitím kanyly a infuzní trubičky)

Na obrázku 6 je znázorněno automatické zařízení provádějící aplikaci radiofarmaka (dále už jen jako aplikátor). Pacient byl na toto zařízení napojen pomocí kanyly a infuzní trubičky.



Obrázek 6 Automatické zařízení provádějící aplikaci radiofarmaka

Na pracovištích poskytujících terapii pomocí radionuklidu ^{131}I byly monitorovány 4 osoby připravující radiofarmakum a 3 pracovníci podávající radiofarmakum, přičemž i v tomto případě se jednotlivá pracoviště lišila způsobem přípravy i podáním radiofarmaka. Celkem bylo realizováno 20 měření u 7 pracovníků (jeden z pracovníků byl monitorován pouze 2x z důvodu ukončení pracovního poměru).

Způsob přípravy a podání radiofarmaka značeného ^{131}I :

- pracoviště 4: příprava radiofarmaka probíhala ve stíněné digestoři s manipulátory. Radiofarmakum bylo podáváno výhradně v podobě roztoku $^{131}\text{I} - \text{NaI}$;
- pracoviště 5: příprava radiofarmaka byla uskutečněna v digestoři bez manipulátorů. Radiofarmakum se podávalo v podobě koloidního roztoku i ve formě kapslí.

Příklady digestoří jsou uvedeny na obrázku 7.



a) Digestoř s manipulátory [91]



b) Digestoř bez manipulátorů

Obrázek 7 Příklady digestoří pro přípravu roztoku značeného ^{131}I

Způsoby podání roztoku značeného ^{131}I jsou ilustrovány na obrázku 8a a podání kapsle na obrázku 8b. V případě podání roztoku značeného radionuklidem ^{131}I je podobná geometrie ozáření ruky jako při podání kapsle značené ^{131}I .



a) Podání roztoku značeného ^{131}I



b) Podání kapsle značené ^{131}I

Obrázek 8 Způsob podání roztoku značeného ^{131}I a kapsle značené ^{131}I

Tabulka 4 shrnuje údaje o počtu monitorovaných pracovníků a provedených měření při manipulaci s vybranými radiofarmaky. Tabulka 4 nezahrnuje údaje o měření pracovníků, kteří měli pouze jeden cyklus měření, nebo u nich docházelo ke střídání obou sledovaných činností, kdy pracovník prováděl přípravu i aplikaci (takovýchto případů bylo asi 9 % měření).

Tabulka 4 Počet monitorovaných pracovníků a počet provedených měření

Radionuklid	¹⁸ F		¹³¹ I	
	Monitorovaných pracovníků	Provedených měření	Monitorovaných pracovníků	Provedených měření
Příprava	17	51	4	11*
Aplikace	13	40**	3	9
Celkem	30	91	7	20

*V jednom případě byly provedeny pouze 2 měření z důvodu ukončení pracovní činnosti

**V jednom případě byl pracovník měřen 4x

Počty provedených měření souvisí s dobou měření, která je závislá na minimálně měřitelné dávce a počtem pacientů vyšetřených na PET, resp. pacientů léčených pomocí radiofarmaka značeného ¹³¹I.

3.1.3 Metodika monitorování

Pro stanovení ozáření kůže byly použity termoluminiscenční dozimetry, na základě kterých byla stanovena lokální hodnota $H_p(0,07)$ v jednotlivých měřicích bodech.

Kalibrace termoluminiscenčních dozimetrů

První experimenty uskutečněné v rámci této disertační práce byly provedeny pomocí TLD, které byly zapůjčeny Oddělením radiační hygieny z FVZ SZU v Bratislavě (Fakulta veřejného Zdravotnictva Slovenské zdravotnícké univerzity) [92], a které byly rovněž použity v rámci projektu ORAMED. Tyto zapůjčené TLD již byly kalibrované na standardních svazcích záření ve Francii.

Průběžně se kalibrace a funkčnost vyhodnocovacího zařízení Harshaw 3500 kontrolovala pomocí interního kalibračního zařízení (dále jen kalibrátor, obrázek 9) se zdrojem ¹³⁷Cs, který byl k dispozici na FVZ SZU v Bratislavě. Ověření správnosti

kalibrátoru (zdroj ^{137}Cs) bylo vykonáno pomocí přenesené kalibrace ze Slovenského metrologického ústavu v Bratislavě.



Obrázek 9 Kalibrační zařízení

Závěrečná kalibrace TLD na $H_p(0,07)$ byla pomocí zdroje záření ^{137}Cs provedena v Českém metrologickém institutu (ČMI).

Použití termoluminiscenční dozimetry

Pro stanovení $H_p(0,07)$ byla v disertační práci použita dvojice termoluminiscenčních dozimetrů (MCP – 7 a MCP – Ns, obrázek 10).



Obrázek 10 Použité termoluminiscenční dozimetry

Dozimetry typu MCP (LiF: Mg, Cu, P) vykazují stabilní chování [93], mají detekční práh pod $100 \mu\text{Gy}$ a jsou 20 – 50krát více citlivé než standardní LiF: Mg, Ti [19].

Na rozdíl od TLD typu MCP – 7 má dozimetr typu MCP – Ns dle technické dokumentace stejnou odezvu na záření gama a záření beta. Předností TLD typu MCP – 7 je reprodukovatelnost, mechanická odolnost a přesnost, proto se tyto TLD používaly přednostně při měření záření gama.

Oba typy dozimetrů mají identickou velikost (průměr 4,5 mm a tloušťka 0,9 mm) i materiálové složení (LiF: Mg, Cu, P). Dozimetr typu MCP – 7 je tvořen jako homogenní peleta z materiálu LiF: Mg, Cu, P. Dozimetr typu MCP – Ns se skládá ze dvou vrstev. První tenká vrstva tohoto TLD je tvořena materiálem LiF: Mg, Cu, P o efektivní tloušťce $8,5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ a na tuto vrstvu je umístěna druhá vrstva dopována grafitem [94 - 96].

Vyhodnocení termoluminiscenčních dozimetrů

Měření a annealing („žihání“) TLD bylo realizováno na zařízení, které bylo na FVZ SZU v Bratislavě. Před každým měřením byly TLD „vyžihány“ ve vysokoteplotní pídce. Annealing TLD probíhal při teplotě $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 10 minut.

Před začátkem vyhodnocování TLD byl vždy 2 hodiny předem zapnut přístroj Harshaw 3500 (obrázek 11), pomocí kterého byly TLD vyhodnocovány.



Obrázek 11 TLD reader

Před samotným vyhodnocováním byl proveden test light. V tabulce 5 jsou uvedeny parametry vyhodnocovacího zařízení pro dozimetry typu MCP – 7 a MCP – Ns.

Tabulka 5 Parametry vyhodnocovacího zařízení Harshaw 3500

Parametr	Hodnota
Teplota předehřátí (preheat temperature) [°C]	135
Akvizice (acquisition rate) [°C · s ⁻¹]	10
Maximální teplota [°C]	240
Čas akvizice (time acquisition) [s]	23

Součástí vyhodnocovacího zařízení byl i počítač, na jehož monitoru se v průběhu vyhodnocování TLD zobrazovala vyhřívací křivka spolu s naměřenou číselnou hodnotou. Tato hodnota byla následně přepočtena na hodnotu osobního dávkového ekvivalentu $H_p(0,07)$.

Od této hodnoty $H_p(0,07)$ byla následně odečtena hodnota „pozadí“ (na základě dozimetrů, které byly vyčleněny pro stanovení korekce na pozadí).

V disertační práci byly pro TLD, které byly použity v rámci projektu ORAMED, nejprve použita kalibrační konstanta stanovená v rámci tohoto projektu. Průběžně se pak hodnota kalibrační konstanty ověřovala na základě přenesené kalibrace z kalibrátoru na FVZ SZU v Bratislavě. V poslední fázi byla použita kalibrační konstanta ověřená na základě nazářených TLD v ČMI.

V Českém metrologickém institutu byly kalibrovány dozimetry typu MCP – 7 i MCP – Ns, avšak při experimentech byla využívána kalibrace TLD MCP – Ns, neboť tyto TLD jsou stejně citlivé na fotony i pozitrony. Rozdíl v kalibrační konstantě z ORAMEDu a ČMI činil přibližně 8 % (pravděpodobně způsobeno častým annealingem TLD, zakoupením nových TLD atd.), což je méně, než 15 %, které byly uvažovány při výběru TLD na experimenty (pro experimenty byly použity TLD, jejichž odezva byla ± 15 % od průměrné hodnoty nazářených dozimetrů na 5 mGy). Z tohoto důvodu bylo považováno, že kalibrační konstanty používané na začátcích experimentů (kalibrace v rámci projektu ORAMED) až do konce experimentů (kalibrace provedená na ČMI) se měnily málo a proto nebylo zapotřebí v průběhu experimentů dělat korekce na změnu citlivosti TLD typu MCP – Ns v důsledku jejich užívání nebo v důsledku jejich navýšení počtu (nákup nových TLD).

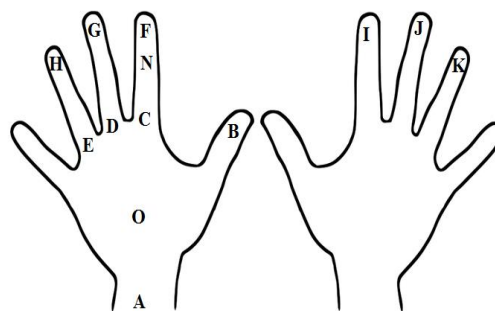
Kalibrace TLD typu MCP – 7 byla ověřována na základě přenesené kalibrace interním kalibrátorem na základě kalibrace TLD typu MCP – Ns (z důvodu, že MCP – 7 nemají stejnou odpověď na pozitrony a fotony).

Umístění termoluminiscenčních dozimetrů

Radiační mapování ozáření kůže bylo provedeno pomocí dvojice TLD, která byla uzavřena v malém mikroténovém obalu a připevněna na bavlněné rukavice náplastí. Jednotlivé pozice pro stanovení $H_p(0,07)$ byly označeny písmeny (tabulka 6). Umístění TLD na rukavicích v rámci experimentů disertační práce je znázorněno na obrázku 12.

Tabulka 6 Označení pozic termoluminiscenčních dozimetrů a jejich umístění na rukavicích

Označení pozice		Umístění
A		Zápěstí
B		Bříško palce
C		Kořen ukazováku
D	Dlaňová strana ruky	Kořen prostředníku
E		Kořen prsteníku
F		Špička ukazováku
G		Špička prostředníku
H		Špička prsteníku
I	Hřbetová strana ruky	Špička ukazováku
J		Špička prostředníku
K		Špička prsteníku
N	Dlaňová strana ruky	Druhý článek ukazováku
O	ruky	Střed dlaně



Obrázek 12 Umístění termoluminiscenčních dozimetrů na rukavicích

Pozice N (druhý článek ukazováku) byla pro měření během manipulace s radiofarmakem značeným ^{18}F nebo ^{131}I zvolena z důvodu zjištění, zda by se mohlo jednat o polohu vhodnou pro umístění prstového dozimetru (tato pozice je blíže k předpokládanému místu maxima).

Pozice *O* (střed dlaně) byla použita pouze v případě měření, která byla prováděna na pracovištích používajících ^{131}I . Tato pozice byla zvolena z důvodu, že během experimentů byla zjištěna geometrie, u které se jevila dlaň jako „riziková“ z hlediska ozáření, neboť mezi hladinou roztoku značeným ^{131}I a dlaní není žádná stínící vrstva – otevřená nádoba (kelímek) naplněná radiofarmakem (obrázek 8a).

Pro měření pomocí TLD byly v disertační práci použity bavlněné rukavice (jejich výhodou je také opětovné použití bez nutnosti „nového“ lepení dozimetřů před zahájením každého měření - pokud monitorování pracovníka probíhá ve více dnech, což je případ naší studie).

Pro každé měření byly vyčleněny termoluminiscenční dozimetry pro měření pozadí a termoluminiscenční dozimetry pro interní kalibraci zdrojem ^{137}Cs .

Doba monitorování pracovníka a protokol měření

Pracovníci na PET pracovištích nosili rukavice s TLD jen během manipulace s radiofarmakem značeným ^{18}F . Pracovníci byli monitorováni po dobu práce s průměrnou aktivitou radiofarmaka 9 GBq v rámci jednoho monitorovacího cyklu. To představuje monitorovací období, které zahrnovalo 25 natažení radiofarmaka do injekční stříkačky či 25 nitrožilních aplikací.

V případě radionuklidu ^{131}I manipulovali pracovníci pouze dvakrát v týdnu (oproti ^{18}F je pomocí ^{131}I prováděna terapie u menšího počtu pacientů) s vysokými aktivitami radiofarmaka až na úrovni 217 GBq. Průměrná aktivita radiofarmaka, se kterou pracovníci manipulovali, byla přibližně 37 GBq v rámci jednoho monitorovacího cyklu.

Doba monitorování jednoho pracovníka byla zvolena s ohledem na dosažení minimální měřitelné hodnoty použitého termoluminiscenčního dozimetru (100 μGy) a v případech, kdy nebylo možné dosáhnout tuto hodnotu dávky, konzervativně se akceptovaly také měření, kdy hodnota užitečného signálu byla 2–3x větší než signál z TLD pro stanovení pozadí (nejistota stanovení výsledku činí asi 10 %).

Během experimentů měly monitorované osoby na rukavicích s TLD nasazeny jednorázové chirurgické rukavice. V případě, že pracovníci nemanipulovali s radiofarmakem, byly rukavice s TLD uschovány mimo dosah ZIZ. Po skončení činnosti s radiofarmakem bylo doporučeno, aby pracovník provedl kontrolní měření

rukavic pomocí přístroje pro měření povrchové kontaminace. Při zjištění kontaminace měla být do protokolu dotyčného pracovníka zaznamenána naměřená hodnota plošné radioaktivní kontaminace ($\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$).

V rámci experimentů obdržel každý pracovník identifikační číslo, které měl uvedené na svém páru rukavic a protokolu měření.

U monitorovaných pracovníků byly do protokolu měření zaznamenány tyto údaje:

- identifikační číslo pracovníka;
- dominantní ruka (pravák nebo levák);
- pracovní činnost (příprava nebo aplikace);
- použitý radionuklid (^{131}I nebo ^{18}F);
- doba praxe v prováděné činnosti;
- umístění prstového dozimetru;
- aktivita radiofarmaka, která byla použita na jeden úkon;
- doba manipulace s radiofarmakem.

Jako doplňkové informace byly během měření zaznamenávány tyto informace:

- přítomnost rozplňovací stanice;
- způsob aplikace:
 - manuální aplikace (aplikace přes kanylu s použitím infuzní trubičky či přímo do žíly);
 - automatická aplikace (aplikátor).
- zjištěná radioaktivní kontaminace;
- používání manipulačních pomůcek (kleště, pinzety, stojan na jehlu při natahování stříkačky v automatickém zařízení pro dávkování radiofarmaka atd.);
- používání stínících pomůcek (ochranný kryt na injekční stříkačku atd.).

3.1.4 Vyhodnocení ozáření kůže na rukou pracovníků

Stanovení maximálního lokálního ozáření kůže ruky

Poloha maximálního lokálního ozáření kůže ruky, které bylo naměřeno pomocí termoluminiscenčních dozimetrů, se může ve skutečnosti lišit od místa, které obdrží při manipulaci s radiofarmakem největší ozáření.

V disertační práci bylo lokální maximum ozáření kůže pracovníka stanoveno následujícím způsobem:

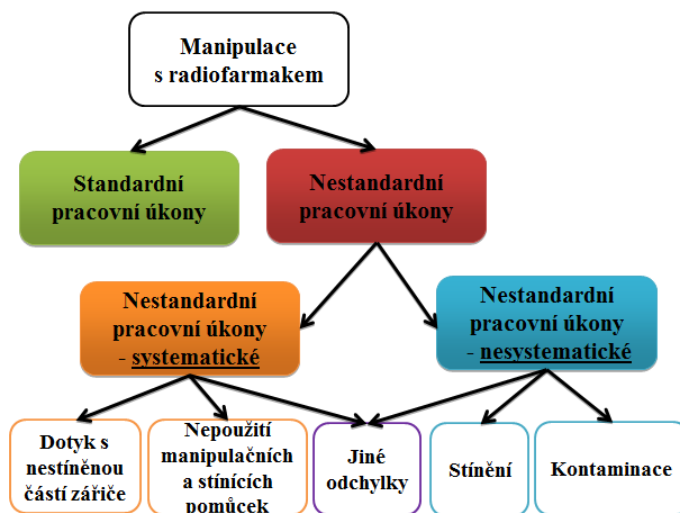
- u každého pracovníka byly provedeny tři cykly měření v pozicích $A - N$ ($A - O$ v případě pracovišť s radionuklidem ^{131}I) pro pravou i levou ruku;
- naměřené hodnoty $H_p(0,07)$ ve třech monitorovaných cyklech se pro každou pozici ($A - N$) zprůměrovaly (zvláště pro pozice $A - N$ na pravé a levé ruce);
- největší zprůměrovaná hodnota $H_p(0,07)$ z pravé a levé ruky byla brána jako maximální lokální ozáření daného pracovníka.

Vliv sledovaných parametrů na velikost maximálního lokálního ozáření kůže ruky

Maximální lokální ozáření kůže ruky pracovníka bylo hodnoceno na základě:

- dominantní a nedominantní ruka;
- doba praxe: rozdělení pracovníků do skupin dle doby praxe v prováděné činnosti:
 - začátečník (1 měsíc – 2 roky);
 - pokročilý (2 roky – 10 let);
 - silně pokročilý (nad 10 let).
- činnost (příprava nebo aplikace);
- technologické vybavení:
 - automatického zařízení pro dávkování radiofarmaka (různý výrobce);
 - manuální a automatický způsob aplikace.
- standardní pracovní úkony (pod 3/10 limitu ozáření ve veličině H_T kůže);
- nestandardní pracovní úkony (úkony odchylovající se od pracovních postupů), při jejich identifikaci byly vzaty v úvahu kritéria:
 - 1. krok – 4násobné překročení jednoho cyklu vůči průměru ze zbylých dvou cyklů;
 - 2. krok – překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže.

U nestandardních pracovních úkonů bylo následně analyzováno systematické („chronické“) a nesystematické (občasné) větší ozáření (obrázek 13). Systematické nestandardní pracovní úkony jsou úkony, u kterých jsou systematicky zjištěny zvýšené hodnoty ozáření rukou pracovníků.



Obrázek 13 Schéma situací při manipulaci s radiofarmakem

U systematicky nestandardních pracovních úkonů byly uvažovány jako možné příčiny zvýšeného ozáření:

- nepoužití manipulačních a stínících pomůcek;
- dotyk s nestíněnou částí zářiče;
- jiné odchylky od předepsaných pracovních postupů.

U nestandardních pracovních úkonů, které byly nesystematické (občasné), přicházely v úvahu jako možné příčiny zvýšeného ozáření:

- dotyk s málo stíněným radiofarmakem (např. obrázek 14 a obrázek 15), např. v důsledku kontaminace;
- jiné odchylky od předepsaných pracovních postupů.

Zvýšené ozáření u nestandardních pracovních úkonů, které byly nesystematické, bylo často zjištěno v prvním kroku hodnocení nestandardních pracovních úkonů.



a) Nasazování jehly na stříkačku



b) Přenos stříkačky ve stínění

Obrázek 14 Dotyk s nestíněnou částí stříkačky obsahující radiofarmakum značené ^{18}F



a) Držení stříkačky bez stínění



b) Manipulace s nestíněnou stříkačkou a vialkou

Obrázek 15 Styk s nestíněnou částí zářiče (^{131}I)

U všech sledovaných parametrů nebylo vždy možné provést podrobnější analýzu (např. čas manipulace s radiofarmakem u podobných úkonů), neboť by byla tato analýza do jisté míry ovlivněna jinými parametry (např. technologickým vybavením pracoviště či způsobem aplikace).

Odhad maximálního ročního lokálního ozáření kůže ruky

Pro odhad ročního ozáření kůže ruky byla vzata v úvahu maximální hodnota lokálního ozáření kůže ruky stanovená na základě třech měření, která byla vztažena na předpokládanou manipulovanou aktivitu radiofarmaka za rok (odhadováno z průměrné aktivity na jednotlivé činnosti a počtu pacientů na jednoho sledovaného pracovníka za rok).

Odhadované roční maximální lokální ozáření kůže bylo následně posouzeno, zda by bylo možné překročení:

- vyšetřovací monitorovací úrovně, která byla v disertační práci stanovená jako 3/10 limitu ozáření pro ekvivalentní dávku kůže (150 mSv/rok);
- limit ozáření pro ekvivalentní dávku kůže (500 mSv/rok).

Podobná interpretace výsledků jako u ^{18}F byla provedena také pro pracovníky manipulující s radiofarmaky značenými ^{131}I .

3.1.5 Korekční faktor

Prstové dozimetry nejsou rutinně nošeny v místě, kde bylo většinou nalezeno maximální ozáření (konečky prstů). Z tohoto důvodu je vhodné použití korekčních faktorů (vztah mezi hodnotou prstového dozimetru a místem s maximálním lokálním

ozáření). Pomocí korekčních faktorů lze odhadnout ozáření na konečcích prstů v případě, že je prstový dozimetr umístěn na kořenu prstu.

V ideálním případě by byly použity korekční faktory (KF) specifické pro každého pracovníka. Tento způsob je náročný a proto se může jevit z praktického hlediska jako vhodnější řešení použití korekčních faktorů pro větší skupinu osob. Větší skupina osob může zahrnovat např.:

- jednotlivé profese pracovníků (příprava, aplikace) ze sledovaných pracovišť;
- všechny sledované pracovníky na jednotlivých pracovištích;
- pracovníky provádějících tutéž činnost ze všech sledovaných pracovišť;
- všechny monitorované pracovníky ze sledovaných pracovišť.

3.1.6 Nejistoty měření

Každé fyzikální měření je vždy ovlivněno a zatíženo chybami. Jelikož tyto chyby nikdy nemohou být sníženy na nulu, je cílem měření tyto chyby postihnout a minimalizovat [97]. Výsledek měření je tedy dán odhadem skutečné hodnoty a určením nejistoty měření.

Nejistota je kvantitativní pojem reprezentující rozsah hodnot, ve kterém se mohou nacházet skutečné hodnoty [98].

Hodnocení nejistoty měření

Rozlišujeme dvě metody hodnocení nejistoty [97]:

- metoda hodnocení nejistoty typu A (statistická analýza série měření);
- metoda hodnocení nejistoty typu B (dána jiným způsobem hodnocení než statistickou analýzou).

Nejistotu typu A lze pomocí střední kvadratické odchylky (chyby) stanovit jako:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

kde n je počet provedených měření, x_i jsou hodnoty jednotlivých měření a \bar{x} je aritmetický průměr všech naměřených hodnot.

Aritmetický průměr se vypočte jako:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Stanovení nejistot měření metodou typu B je založeno na dostupných informacích (nejistoty kalibrace, specifikace stability přístroje od výrobce, zkušenosti a data získaná z předešlých měření atd. [99]).

Kombinovaná standardní nejistota (výsledná střední kvadratická odchylka) je dána součtem všech standardních složek (u_1, u_2, u_3 atd.), které se umocní na druhou, přičemž odmocnina výsledku je brána jako celková standardní nejistota u .

Celková standardní nejistota je dána vzorcem [97]:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

Rozšířená nejistota je dána jako součin výsledné hodnoty celkové standardní nejistoty u a faktorem pro úroveň pravděpodobnosti 95 % (ve většině případů je $k = 2$), která je uvedena v nejistotě výsledku [97].

Určení nejistot v rámci měření s termoluminiscenčními dozimetry

V rámci disertační práce byly uvažovány následující nejistoty měření:

- kalibrace na ČMI;
- výběr TLD;
- reprodukovatelnost;
- energetická závislost;
- dávková homogenita – neurčitost vlastností šarží dozimetrů.

Nejistota měření u kalibrace na ČMI byla udána v protokolu o ozáření [100], součástí dokumentace o TLD (MCP – 7 a MCP – Ns) je informace o reprodukovatelnosti, energetické závislosti a homogenitě šarže [101].

Další faktory

Skutečná poloha TLD se může v rámci experimentu nepatrně měnit kvůli posunu rukavice, na které je TLD připevněn. Stejně tak může dojít k dotyku TLD s nestíněnou částí zdroje (nastává při nestandardních pracovních úkonech). V tomto případě dochází k vysoké nehomogenitě ozáření místa dotyku (vysoký gradient ozáření v místě dotyku – při malé odchylce je velká změna ozáření) a v případě, že v tomto místě není umístěn TLD, může dojít k významnému podhodnocení ozáření. V důsledku toho tak může dojít k podhodnocení korekčního faktoru.

Na druhou stranu se však v běžné praxi můžeme setkat s případy, kdy prstový dozimetr směřuje citlivou částí do dlaně, ale je mírně pootočen, což vede k nadhodnocení korekčního faktoru.

Při uvážení výše zmíněných případů se však jako závažnější jeví podhodnocení KF v důsledku nedostatečného reprezentativního měření na konečcích prstů.

Vzhledem na obtížnost stanovení maximálního ozáření se nejistota faktoru skutečné polohy skutečné TLD a dotyku TLD s nestíněnou částí zdroje nebere do úvahy při výpočtu kombinované nejistoty z důvodu velkého rozptylu jejich příspěvků. Tyto dva faktory se však berou v potaz při celkovém hodnocení a výběru korekčního faktoru, stejně jako „nestandardní“ pracovní úkony, které nebyly do výpočtu KF zahrnuté a rovněž přispívají k větším hodnotám KF (spíše se preferují KF o větší hodnotě).

Další faktory neměly oproti výše uvedeným nejistotám významný vliv, tudíž se mohly zanedbat:

- elektrická a vyhodnocovací stabilita přístroje Harshaw 3500. Stabilita přístroje a jeho funkčnost byla vždy před začátkem měření kontrolována;
- interní kalibrátor na FVZ SZU v Bratislavě;
- fading, linearita odezvy jako funkce dávkového příkonu, zbytkový proud, odolnost vůči otřesům [21].

Všechna měření i vyhodnocení TLD proběhla za standardních podmínek (podobným laboratorním podmínkám).

3.1.7 Statistické metody

Pro statistické zhodnocení výsledků byl použit soubor statistických testů ze softwarového balíku IBM SPSS.

U provedených statistických testů byly porovnávány dvě hypotézy:

- nulová hypotéza (H_0) – která většinou vyjadřuje „žádný rozdíl“ mezi testovanými soubory dat;
- alternativní hypotéza (H_1) – která popírá platnost nulové hypotézy.

Výstupem statistických testů bylo zamítnutí nebo nezamítnutí nulové hypotézy. Za hladinu významnosti byla určena $\alpha = 0,05$.

Neparametrické testy

Soubor dat neměl normální rozdělení, proto byly v práci použity neparametrické testy. Tyto testy testují H_0 , která se týká jen obecných vlastností rozdělení sledované veličiny ve statistických souborech [102].

V práci byly použity tyto neparametrické testy:

- Mann – Whitneyův U test – test slouží pro porovnání nepárových pokusů, kdy se srovnávají dva různé výběrové soubory (pokusný zásah A , B). Tento test testuje hypotézu, že veličina X , která odpovídá pokusnému zásahu A má stejné rozdělení pravděpodobností jako veličina Y , které odpovídá pokusný zásah B [103].
- Kruskal – Wallisův test – test je zobecněním neparametrického Mann – Whitneyho testu pro porovnání více jak dvou výběrů [104], tento test testuje hypotézu, že rozdělení náhodné veličiny je stejné ve všech výběrech;
- Wilcoxonův test – test slouží pro porovnání párových pokusů, které nepochází z normálního rozdělení (srovnává dvě měření, která jsou uskutečněna u jednoho výběrového souboru). Tento test testuje hypotézu rovnosti distribučních funkcí na základě potvrzení symetrického rozložení sledované náhodné veličiny [105].

Tabulka 7 shrnuje statistické metody, které byly v práci použity (označeny symbolem x).

Korelační analýza

V práci byla rovněž provedena korelační analýza, jejímž cílem bylo určit sílu závislosti mezi sledovanými kvantitativními znaky. Byla použita neparametrická korelace (Spearmanův korelační koeficient, r_{S_p}).

Na základě statistického vyhodnocení dat bylo možné potvrzení nebo modifikace předpokládaných závěrů této práce.

Materiál a metody

Tabulka 7 Použité statistické metody u sledovaných parametrů

Parametr	Porovnání	Mann Whitneyův U test	Kruskal Wallisův test	Wilcoxonův test
Činnost	Příprava ^{18}F vůči aplikaci ^{18}F	x	-	-
	Přípravy ^{131}I vůči aplikaci ^{131}I	x	-	-
	Příprava ^{18}F vůči přípravě ^{131}I	x	-	-
	Aplikace ^{18}F vůči aplikaci ^{131}I	x	-	-
Doba praxe	Příprava vůči aplikaci	-	x	-
	Všichni pracovníci manipulující s ^{131}I	-	x	-
	Všichni pracovníci manipulující s ^{18}F	-	x	-
	Aplikace ^{18}F	-	x	-
	Příprava ^{18}F	-	x	-
	Příprava ^{18}F (Z* vůči P**)	x	-	-
	Příprava ^{18}F (Z* vůči S***)	x	-	-
	Příprava ^{18}F (P** vůči S***)	x	-	-
Dominance rukou	Aplikace ^{18}F (P** vůči S***)	x	-	-
	Všichni pracovníci manipulující s ^{18}F a ^{131}I	-	-	x
	Všichni pracovníci manipulující s ^{18}F	-	-	x
	Všichni pracovníci manipulující s ^{131}I	-	-	x
	Příprava ^{18}F	-	-	x
	Aplikace ^{18}F	-	-	x
	Příprava ^{131}I	-	-	x
Technologické vybavení	Aplikace ^{131}I	-	-	x
	Všichni pracovníci manipulující s ^{18}F	-	x	-
	$^1\text{P1}$ vůči $^2\text{P2}$	-	x	-
	$^1\text{P1}$ vůči $^3\text{P3}$	-	x	-
	$^2\text{P2}$ vůči $^3\text{P3}$	-	x	-
	Aplikace ^{18}F (všechna ^{18}F pracoviště)	-	x	-
	Aplikace ^{18}F ($^1\text{P1}$ vůči $^2\text{P2}$)	x	-	-
	Aplikace ^{18}F ($^1\text{P1}$ vůči $^3\text{P3}$)	x	-	-
	Aplikace ^{18}F ($^2\text{P2}$ vůči $^3\text{P3}$)	x	-	-
	Příprava ^{18}F (všechna pracoviště ^{18}F)	x	-	-
	Příprava ^{18}F ($^1\text{P1}$ vůči $^2\text{P2}$)	x	-	-
	Příprava ^{18}F ($^1\text{P1}$ vůči $^3\text{P3}$)	x	-	-
Příprava ^{18}F ($^2\text{P2}$ vůči $^3\text{P3}$)	x	-	-	

*Z – začátečník, **P – pokročilý, ***S – silně pokročilý

$^1\text{P1}$ – pracoviště 1, $^2\text{P2}$ – pracoviště 2, $^3\text{P3}$ – pracoviště 3

3.2 Simulační část

Na základě měření pomocí TLD byly stanoveny hodnoty $H_p(0,07)$ pouze ve vybraných měřících pozicích, které podávaly informaci o integrální hodnotě ozáření během celé doby měření (realizace mnoha úkonů v rámci jednoho cyklu měření).

V disertační práci byla použita simulační metoda Monte Carlo, která patří mezi stochastické metody vycházející z generování náhodných čísel. V disertační práci byl použit kód MCNP [106, 107], který se dá použít pro vybrané geometrie.

MCNP se používá u složitých geometrií ozáření, v rozptýleném poli, u složitých geometrií předmětu ozáření nebo ve vysoce nehomogenních polích atd. MCNP rovněž dokáže rozlišit jemné struktury ozařovaného předmětu. Pomocí MCNP je možné určit ozáření celé ruky jako orgánu v rámci jednoho „rizikového“ úkonu (úkon, který se považuje za významný z hlediska ozáření kůže ruky) a rovněž lze pomocí něj najít přesnou polohu maximálního ozáření na ruce.

3.2.1 Vybrané geometrie při manipulaci s radionuklidem ^{18}F a ^{131}I

Během měření pomocí TLD umístěných na rukavicích byly na pracovištích s PET či pracovištích poskytujících léčbu pomocí ^{131}I vybrány „rizikové“ úkony. Tyto úkony byly voleny na základě:

- pozorování pracovníků během činnosti;
- posouzení vzdálenosti zdroje záření a ruky;
- použití (nepoužitím) ochranných stínících pomůcek.

Na základě výše uvedených kritérií byly vybrány „rizikové“ pracovní úkony, které sloužily jako podklad pro definování geometrie fantomu ruky (uměle vytvořený model) a zdroje záření (např. radiofarmakum ve stříkačce). Pro tyto geometrie pak byly zkonstruovány fantomy ruky z tkáňově ekvivalentního materiálu, z kterých pak byly vytvořeny pomocí CT zobrazení voxelové fantomy rukou.

3.2.2 Použité fantomy

Fyzikální fantom

Fyzikální fantomy byly vyrobeny z tkáňově ekvivalentního materiálu z důvodů, aby se mohla experimentálně ověřit simulace provedená pomocí metody Monte Carlo

pro výpočet dávky na kůži dané pomocí veličiny $H_p(0,07)$. Mezi vhodné tkáňově ekvivalentní materiály pro výrobu fantomů patří např. parafín nebo pryskyřice.

Parafínové fantomy (obrázek 16) jsou tvořeny tkáňově ekvivalentním materiálem, ovšem znázorňují pouze měkkou tkáň (hustota měkké tkáně je přibližně $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, hustota parafínu je $870 - 930\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) [108, 109]. Výroba parafínového fantomu je časově méně náročná, na druhou stranu časem podléhá tvarové deformaci.



Obrázek 16 Parafínové fantomy ruky [110]

Pryskyřicové fantomy (obrázek 17) lze považovat za materiál přibližující se tkáňově ekvivalentnímu materiálu znázorňující kost i měkkou tkáň na prstě (hustota pryskyřice je $1\,150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, hustota kosti je $1\,700 - 2\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, hustota kůže je $850 - 1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) [109]. Na obrázku 17 lze vidět některé geometrie fantomu ruky, které znázorňují časté geometrie pracovních úkonů při aplikaci radiofarmaka (různé způsoby držení stříkačky a infuzní trubičky naplněné radiofarmakem).



a) Fantom ruky č. 1



b) Fantom ruky č. 2



c) Fantom ruky č. 3

Obrázek 17 Pryskyřicové fantomy ruky

Voxelový fantom

Pro Monte Carlo simulace byly použity voxelové fantomy, které byly vyrobeny na základě CT snímku pryskyřicových fantomů ruky (obrázek 17), které byly pořízeny na PET/CT pracovišti. Voxelizace byla provedena ve spolupráci se FVZ SZU v Bratislavě. Pořízené snímky na PET/CT pracovišti byly ve formátu DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Pomocí programu TomoCon Lite byla provedena vizualizace DICOM údajů a řezů jednotlivých fantomů. Tyto snímky byly následně načítány do programu Matlab, kde se vytvořila matice (matice se nejprve ořezala na velikost ruky), a na základě zvolení vhodných intervalů úrovně šedé se tyto matice přetransformovaly na materiály (jeden interval stupňů šedé reprezentoval vzduch, druhý interval reprezentoval pryskyřici). Následně se matice vytvořená v Matlabu přetransformovala na textový soubor pro MCNP.

3.2.3 Výpočet dávky pomocí kódu MCNP

V disertační práci byl použit pro výpočty kód MCNPX. Pro stanovení dávky pomocí MCNP byly využity tallies (předdefinované procedury jejichž výstupem je veličina, která definuje radiační pole v simulované oblasti): tally F6 a tally *F8.

Princip stanovení dávky u výše uvedených tallies je odlišný. V případě tally F6 se stanoví odhad deponované energie na základě délek drah částic procházejících buňkou systému. Hodnota této tally je odvozena od určení funkce ohřevu (v našem případě byly uvažovány pro simulaci fotony). Jelikož tato tally neumí zvláště oddělit energii deponovanou v látce od elektronů (veškerá energie elektronů je uvažována jako deponovaná), byla v práci použita i tally *F8.

V případě tally *F8 je energie deponovaná v buňce stanovena na základě rozdílů energie částic při vstupu (výstupu) buňky.

3.2.4. Verifikace výpočtu metodou Monte Carlo a experimentu

V disertační práci byl ve spolupráci s FVZ SZU v Bratislavě a pracovištěm PET/CT verifikován pryskyřicový fantom ruky (obrázek 17a). Validace Monte Carlo simulace vybrané geometrie ozáření byla provedena na základě srovnání výpočtu pomocí metody Monte Carlo ve vybraných skórovacích místech (pozice C – K) a naměřených hodnot $H_p(0,07)$ pomocí TLD v totožných pozicích (obrázek 12) na pryskyřicovém fantomu ruky.

Na pryskyřicový fantom ruky, na který byly připevněny TLD, byla instalována stříkačka o objemu 10 ml bez stínění naplněná radiofarmakem o aktivitě 6,40 MBq.

V této geometrii byla stříkačka ponechána a TLD byly v dané konfiguraci ozařovány po dobu několik hodin (s ohledem na poločas přeměny ^{18}F). Po ukončení experimentu byly TLD vyhodnoceny na FVZ SZU v Bratislavě společně s termoluminiscenčními dozimetry, které byly vyčleněny pro stanovení korekce na pozadí a dále TLD pro kalibraci na interním kalibrátoru se zdrojem ^{137}Cs . Naměřené hodnoty byly normalizovány na aktivitu 1 GBq.

Tyto naměřené hodnoty byly následně porovnány s hodnotami, které byly vypočteny pomocí metody Monte Carlo pro vybranou geometrii při manipulaci s radiofarmakem značeným ^{18}F v bodech *C – K*. Během simulace se kladl důraz na umístění TLD ve stejné pozici, která byla použita při experimentu. Simulované hodnoty byly taktéž vztaženy na aktivitu použitého radiofarmaka během experimentů.

Rovněž byla stanovena odchylka poměru těchto naměřených a vypočtených hodnot. Základní vstupní parametry použitého radionuklidu ^{18}F jsou uvedeny v tabulce 3.

3.2.5 Simulace vybrané rizikové geometrie u manipulace s ^{131}I a ^{18}F

Výpočty pomocí MCNP byly provedeny pro vybrané rizikové geometrie během manipulace s radiofarmaky značenými ^{131}I nebo ^{18}F .

V MCNP byly na voxelovém fantomu ruky definovány skórovací místa (místo, ve kterém byla vypočtena dávka ozáření) měkké tkáně. Hodnota ozáření byla vypočtena jako průměr vztažený na plochu 1 cm^2 v hloubce $70\text{ }\mu\text{m}$ [1].

V případě simulace s radiofarmakem značeným ^{131}I byl použit voxelový fantom, který byl vyvinutý a ověřený během řešení projektu ORAMED. Při Monte Carlo výpočtech se opět hodnotilo ozáření ve standardních polohách *A - K* během geometrií, kdy pracovník drží nádobku (kelímek) konečky prstů 2 cm nad hladinou roztoku $^{131}\text{I-NaI}$ nebo za situace, kdy je kelímek držen konečky prstů 2 cm pod hladinou roztoku $^{131}\text{I-NaI}$. Další výpočet byl proveden pro stanovení vlivu stínění (víčko kelímku) o tloušťce 0,5 mm polyetylenem (PE) v pozici *E* (kořen prsteníku).

U simulací, kde se jako zdroj záření uvažoval radionuklid ^{18}F , byl použit voxelový fantom vytvořený ve spolupráci se FVZ SZU v Bratislavě. U tohoto sledovaného radionuklidu byla vybrána jako riziková geometrie kontaminace radiofarmakem

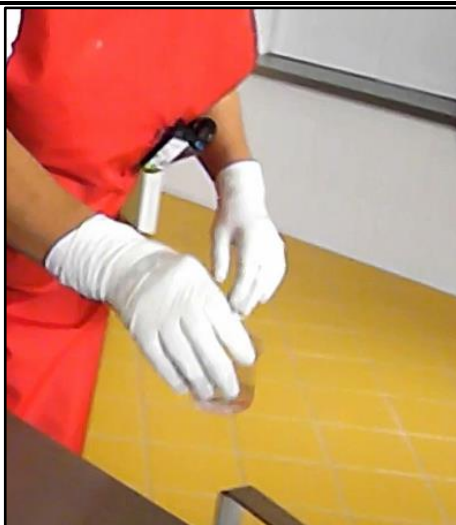

značeným ^{18}F v pozici F (bříško ukazováku). Plocha uvažovaného ozařovaného místa činila 1 cm^2 . Na základě výsledků byl stanoven příspěvek pozitronů k dávce v dané pozici a také byl stanoven vliv použití stínění z PE.

3.2.6 Aplikace simulací metodou Monte Carlo

V disertační práci byly vyšetřovány především „rizikové“ úkony, u kterých se předpokládalo, že si během nich pracovníci mohou významně ozařovat ruce (manipulace s nestíněným kelímkem naplněným ^{131}I a kontaminace bříška ukazováčku radiofarmakem značeným ^{18}F).

Porovnání fyzikálního fantomu ruky (fantom ruky je vyroben z parafínu) s případem reálné geometrie ozáření ruky během manipulace s radiofarmakem značeným ^{131}I lze vidět v tabulce 8.







Tabulka 8 Srovnání parafinového fantomu ruky a reálné situace při manipulaci s radiofarmakem značeným ^{131}I

Úkon	Reálná situace	Parafinový fantom ruky
Podání nestíněného kelímku s radiofarmakem		 Převzato z [46]

Porovnání pryskyřicových fantomů ruky s případy reálných geometrií ozáření během manipulace s radiofarmakem značeným ^{18}F lze vidět v tabulce 9.

Materiál a metody

Tabulka 9 Srovnání pryskyřicových fantomů ruky a reálných situací při manipulaci s radiofarmakem značeným ^{18}F

Činnost	Reálná situace	Pryskyřicový fantom ruky
Držení stříkačky s radiofarmakem ^{18}F -FDG mezi palcem a ukazovákem		
Držení stříkačky s radiofarmakem ^{18}F -FDG mezi ukazovákem a prostředníkem		
Držení infuzní trubičky s radiofarmakem ^{18}F -FDG mezi palcem, ukazovákem a prostředníkem		

4 Výsledky

V průběhu řešení disertační práce byla provedena měření pomocí termoluminiscenčních dozimetrů umístěných na rukavicích, dále verifikace výpočtu metodou Monte Carlo a měření pomocí TLD na pryskyřicovém fantomu ruky a taktéž bylo stanoveno ozáření kůže ruky pomocí výpočetní metody Monte Carlo u vybraných „rizikových“ úkonů. Tyto výsledky jsou shrnuty v následující kapitole.

4.1 Experimentální část

4.1.1 Výsledky kalibrace termoluminiscenčních dozimetrů

Závěrečná kalibrace byla provedena v laboratoři Českého metrologického institutu (ČMI), kde standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 (dokument pro vyjádření nejistoty měření při kalibraci). Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$ [100]. Ozařovací podmínky a nazážené hodnoty shrnuje tabulka 10 [100].

Tabulka 10 Ozařovací podmínky kalibrace TLD a nazážené hodnoty [100]

Zdroj	^{137}Cs
Příkon kermy ve vzduchu	79,65 mGy · h ⁻¹
Vzdálenost od zdroje	3 674 mm
Ozařovací čas	400 s
Kerma ve vzduchu	8,85 mGy
Konverzní koeficient	1,13
$H_p(0,07)$	10 mSv

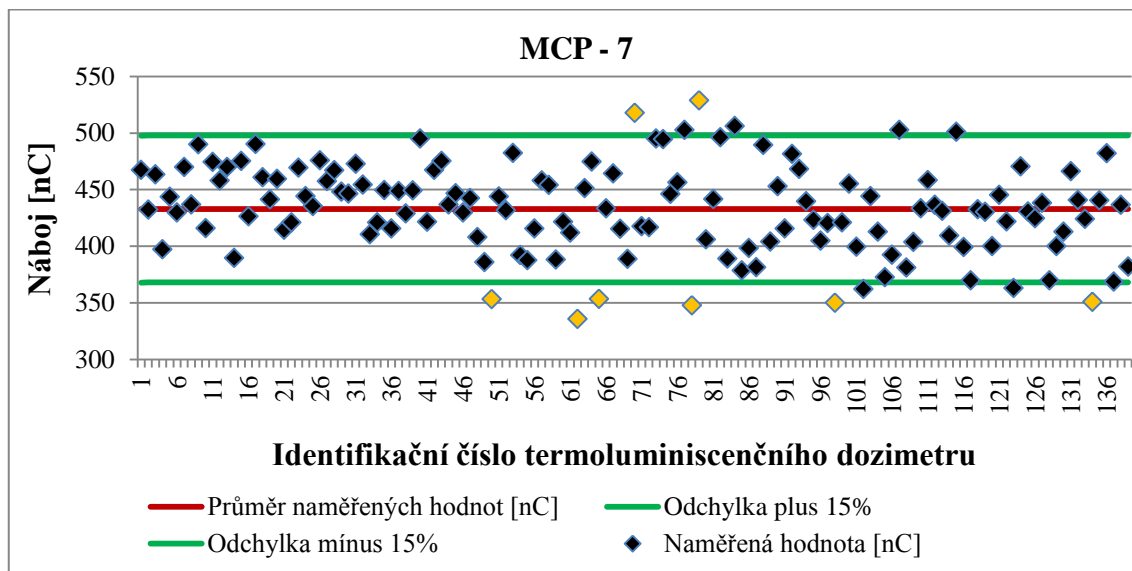
4.1.2 Nejistoty měření

Kalibrace realizována v Českém metrologickém institutu

Relativní rozšířená celková nejistota nazážené dávky (reprezentovaná kermou ve vzduchu) činila 3,5 % ($k = 2$) [100]

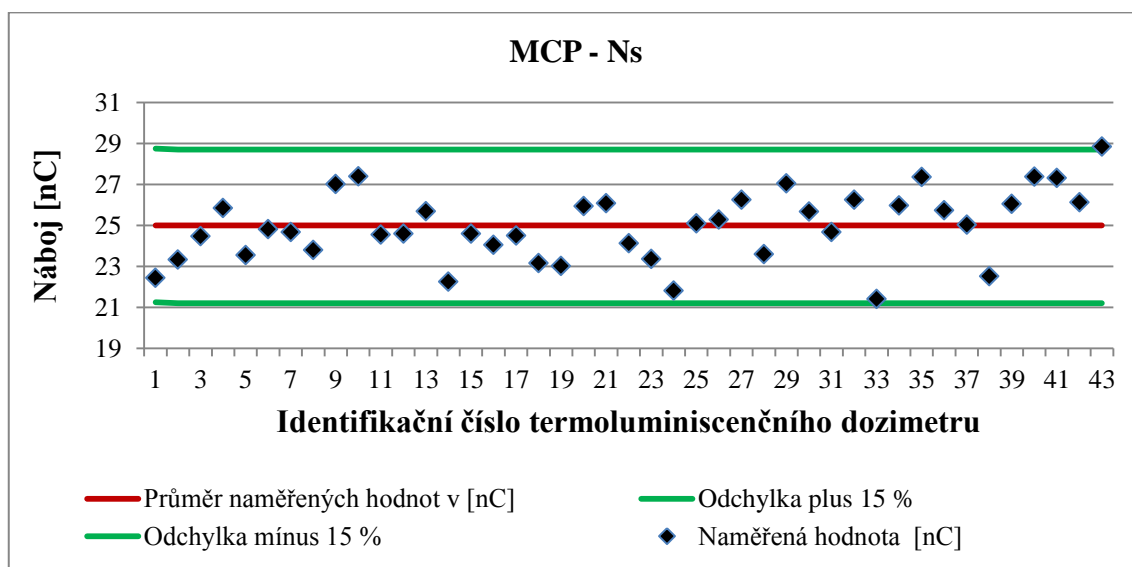
Výběr termoluminiscenčních dozimetrů

Výběr dozimetrů byl proveden na základě kalibrace. Odezva dozimetrů po ozáření dávkou 5 mGy pomocí interního kalibrátoru na FVZ SZU v Bratislavě je ilustrována na obrázku 18 (dozimetry typu MCP-7) a obrázku 19 (TLD typu MCP-Ns).



Obrázek 18 Odpověď dozimetrů typu MCP-7

Z obrázku 18 lze vidět, že pouze 6 % (žlutě označené body) z celkového počtu dozimetrů typu MCP – 7 mají odchylku od průměrné odpovědi TLD větší než ± 15 %. Termoluminiscenční dozimetry, které nebyly v rámci průměrné odpovědi ± 15 %, nebyly pro měření použity.



Obrázek 19 Odpověď dozimetrů typu MCP-Ns

Všechny termoluminiscenční dozimetry typu MCP – Ns (obrázek 19) mají odchylku od průměrné odpovědi TLD v rámci $\pm 15 \%$.

Nejistoty ohledně opakovatelnosti (2 %), energetické závislosti (20 %) a homogenitě šarže byly udány v dokumentaci (5 – 10 %) [101].

Celková standardní nejistota měření

Tato nejistota je dána jako:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2}$$

kde: u_1 = kalibrace na ČMI, u_2 = výběr TLD, u_3 = reprodukovatelnost, u_4 = energetická závislost, u_5 = homogenita šarže použitých dozimetrů.

Celková nejistota měření pro standardní pracovní úkony činí přibližně 27 %.

4.1.3 Stanovení maximálního lokálního ozáření rukou pracovníků během manipulace s radiofarmakem značeným ^{18}F a ^{131}I

Stanovení maximálního lokálního ozáření kůže ruky od vybraných radiofarmak bylo provedeno vzhledem k několika parametrům (faktorům), které jsou popsány v samostatných níže uvedených podkapitolách.

Požadavek na dodržení limitu ekvivalentní dávky kůže se týká maximálního ozáření na ruce bez ohledu na to, zda se jedná o pravou či levou ruku. Proto výsledky začínají určením, která ruka je více ozářena. Rozhodování o dominanci ruky se týká jen rutinní práce (tedy operace, které jsou vykonávány standardními pracovními úkony).

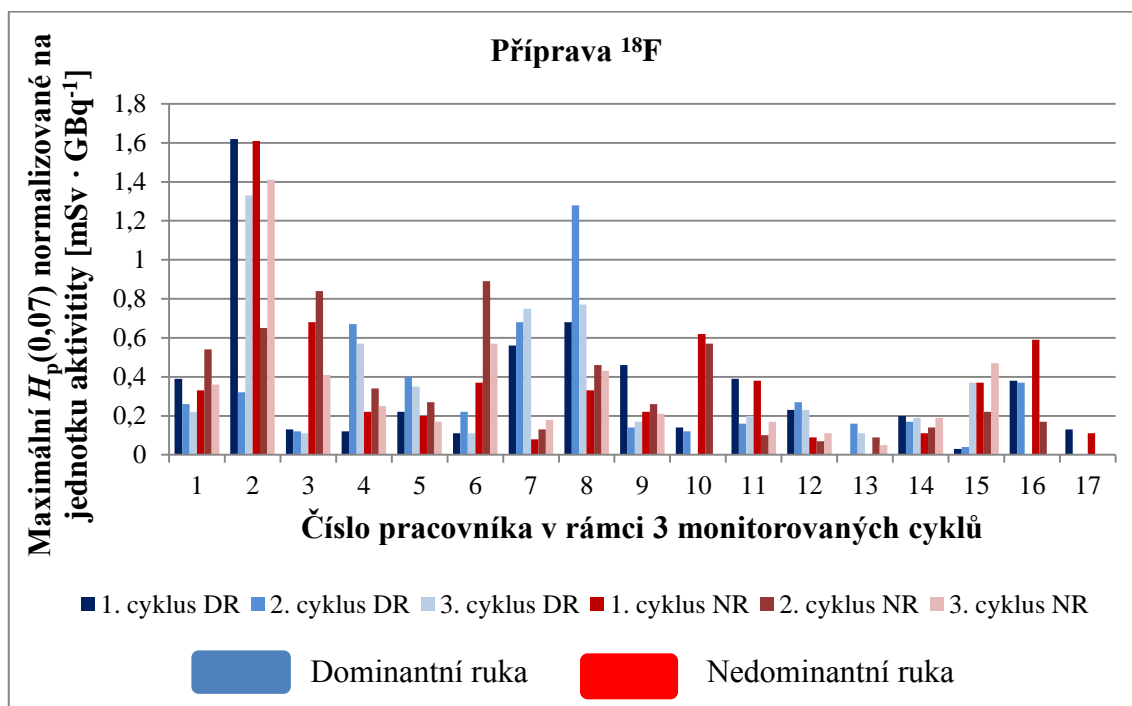
Dominantní a nedominantní ruka

V případě, že byl pracovník pravák, byla jeho dominantní ruka pravá. Pokud byl pracovník levák, byla jeho dominantní ruka levá, pouze v jednom případě udával pracovník píšící levou rukou, že jeho dominantní ruka při pracovní činnosti je pravá.

Hodnoty $H_p(0,07)$ dominantní a nedominantní ruky pracovníků manipulujících s ^{18}F v rámci třech měření, jsou shrnuty na obrázku 20 (příprava ^{18}F), obrázku 21 (aplikace ^{18}F), obrázku 22 (příprava ^{131}I) a obrázku 23 (aplikace ^{131}I).

Nestandardní situace nejsou do obrázku 20 až obrázku 23 zahrnuty a budou řešeny v samostatné kapitole.

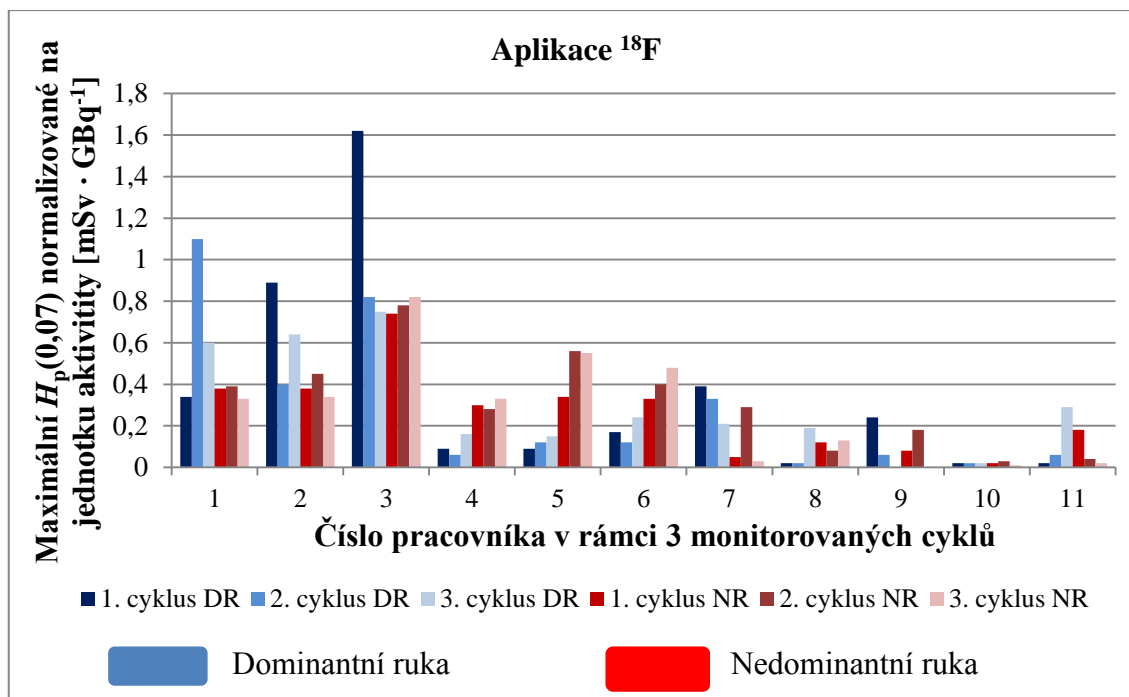
Dominance rukou je barevně odlišena (dominantní ruka (DR) – modrá barva, nedominantní ruka (NR) – červená barva).



Obrázek 20 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – příprava pozitronového radiofarmaka

Pouze dva pracovníci připravující radiofarmakum značené ¹⁸F měli dominantní ruku levou, ostatní pracovníci měli dominantní ruku pravou. Při porovnání naměřených hodnot dominantní a nedominantní ruky pracovníků bylo zjištěno, že větší ozáření mělo přibližně 65 % pracovníků připravujících pozitronové radiofarmakum na dominantní ruce (bráno na základě průměru 3 cyklů měření v pozici s maximálním ozářením bez uvažování nestandardních pracovních úkonů).

Z obrázku 21 lze vidět, že přibližně 62 % pracovníků provádějících aplikaci pozitronového radiofarmaka mělo větší ozáření na dominantní ruce (rovněž bráno na základě průměru třech cyklů měření v pozici s maximálním ozářením). Celkem 11 pracovníků provádějících aplikaci radiofarmaka značeného ¹⁸F mělo dominantní ruku pravou, dva pracovníci měli dominantní ruku levou.



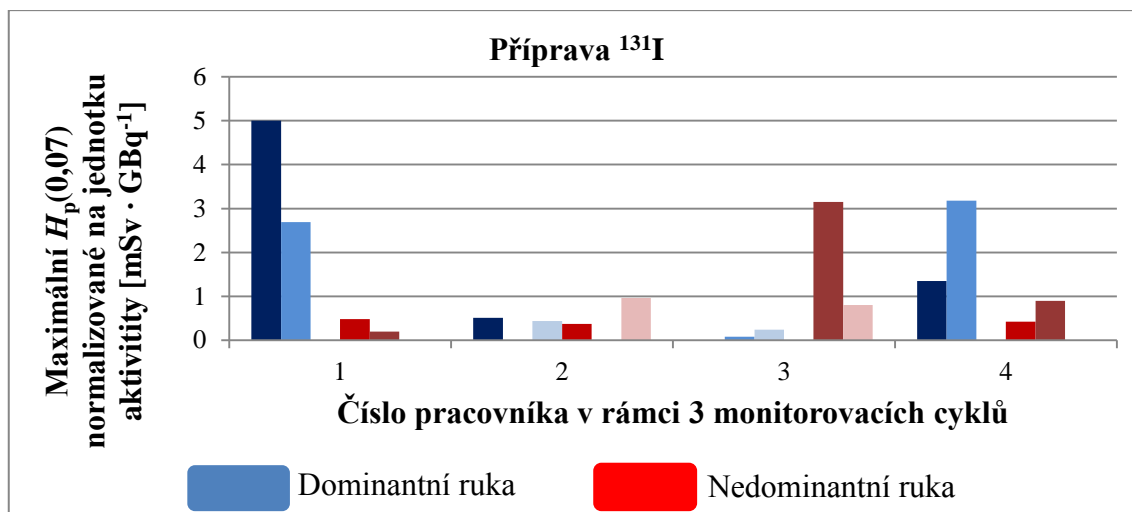
Obrázek 21 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – aplikace pozitronového radiofarmaka

V tabulce 11 jsou uvedeny výsledky statistických testů, které se týkají maximálního lokálního ozáření dominantní a nedominantní ruky u pracovníků, kteří manipulují s pozitronovým radiofarmakem.

Tabulka 11 Výsledky statistického testu - velikost maximálního ozáření na dominantní a nedominantní ruce (¹⁸F)

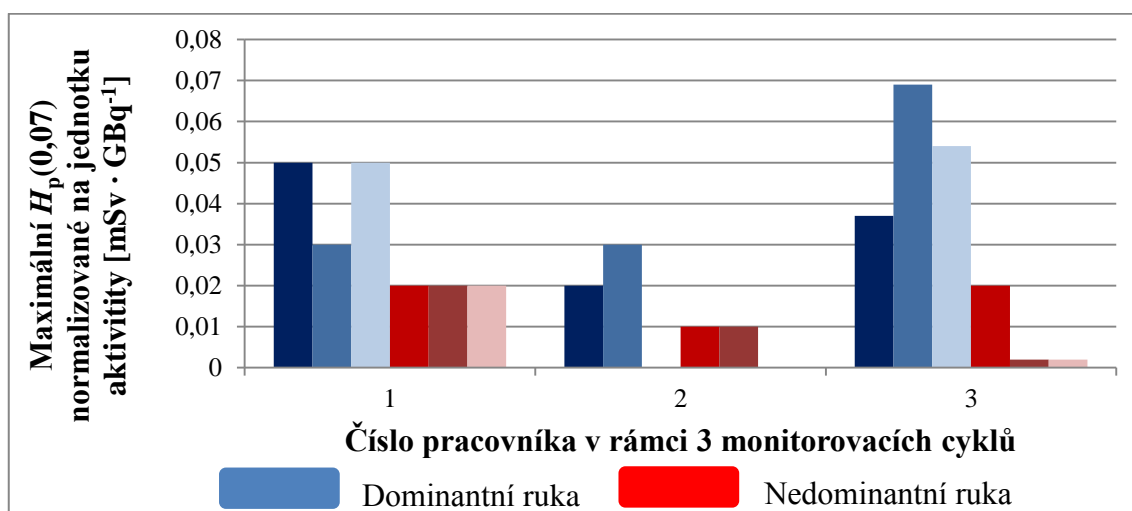
Sledovaný parametr	Wilcoxonův test <i>p</i> hodnota	Nulová hypotéza
Všichni pracovníci manipulující s ¹⁸ F	0,437	Nezamítá se
Příprava ¹⁸ F	0,703	Nezamítá se
Aplikace ¹⁸ F	0,697	Nezamítá se

U sledovaných skupin (tabulka 11) není statisticky významný rozdíl mezi velikostí ozáření kůže na dominantní a nedominantní ruce během manipulace s ¹⁸F.



Obrázek 22 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – příprava radiofarmaka značeného ¹³¹I

Dva pracovníci připravující radiofarmakum značené ¹³¹I měli více ozářenou dominantní ruku a dva pracovníci měli více ozářenou nedominantní ruku (též bráno na základě průměru 3 cyklů měření v pozici s maximálním ozářením). Všichni pracovníci připravující radiofarmakum značené radionuklidem ¹³¹I byli praváci.



Obrázek 23 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků v rámci jednotlivých cyklů měření u dominantní a nedominantní ruky – podání radiofarmaka značeného ¹³¹I

Všichni pracovníci podávající radiofarmakum značené ¹³¹I měli více ozářenou dominantní ruku (všichni pracovníci provádějící tento pracovní úkon byli praváci).

Tabulka 12 shrnuje výsledky statistických testů, které se týkají maximálního lokálního ozáření dominantní i nedominantní ruky pracovníků manipulujících s ¹³¹I.

Výsledky

Tabulka 12 Výsledky statistického testu – velikost maximální ozáření na dominantní a nedominantní ruce (^{131}I)

Sledovaný parametr	Wilcoxonův test <i>p</i> hodnota	Nulová hypotéza
Příprava ^{131}I	0,625	Nezamítá se
Aplikace ^{131}I	0,250	Nezamítá se

Rovněž z tabulky 12 lze vidět, že ani v jednom případě nebyl statisticky významný rozdíl v ozáření kůže dominantní a nedominantní ruky během manipulace s ^{131}I .

V práci byla zkoumána korelace jednotlivých poloh *A – N* (viz tabulka 6), které byly měřeny pomocí TLD umístěných na rukavicích, vůči maximálnímu lokálnímu ozáření kůže ruky. Výsledky korelační analýzy u pracovníků manipulujících s radiofarmaky značenými ^{18}F a ^{131}I jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Výsledky korelační analýzy mezi maximálním ozářením a ostatními sledovanými pozicemi

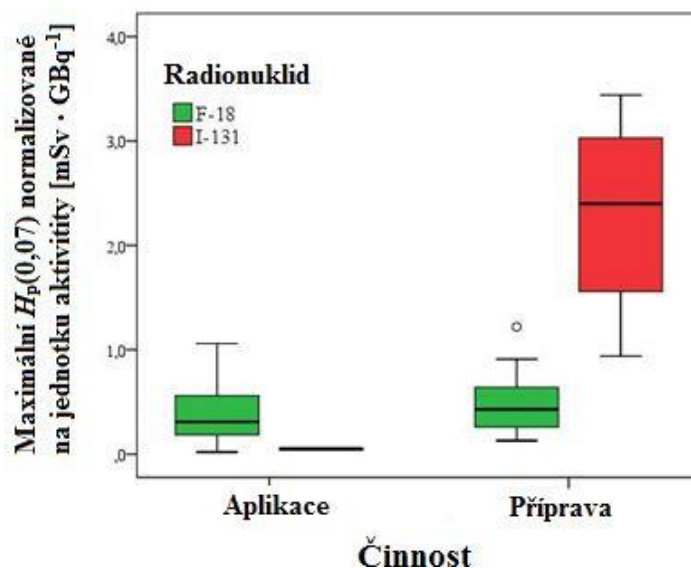
Název pozice a její umístění		Dominantní ruka		Nedominantní ruka		
		Spearmanův korelační koeficient	<i>p</i> hodnota	Spearmanův korelační koeficient	<i>p</i> hodnota	
Dlaň ruky	A	Zápěstí	0,465	0,004	0,493	0,003
	B	Bříško palce	0,927	$p < 0,001$	0,915	$p < 0,001$
	C	Kořen ukazováku	0,828	$p < 0,001$	0,809	$p < 0,001$
	D	Kořen prostředníku	0,742	$p < 0,001$	0,743	$p < 0,001$
	E	Kořen prsteníku	0,728	$p < 0,001$	0,761	$p < 0,001$
	F	Špička ukazováku	0,933	$p < 0,001$	0,921	$p < 0,001$
	G	Špička prostředníku	0,934	$p < 0,001$	0,923	$p < 0,001$
	H	Špička prsteníku	0,604	$p < 0,001$	0,654	$p < 0,001$
Hřbet ruky	I	Špička ukazováku	0,879	$p < 0,001$	0,858	$p < 0,001$
	J	Špička prostředníku	0,855	$p < 0,001$	0,892	$p < 0,001$
	K	Špička prsteníku	0,618	$p < 0,001$	0,673	$p < 0,001$
Dlaň	N	Druhý článek na ukazováku	0,887	$p < 0,001$	0,871	$p < 0,001$

Z tabulky 13 lze vidět, že všechny pozice na dominantní i nedominantní ruce korelují s místem maximálního lokálního ozáření. Korelační koeficienty jsou pro obě ruce pro jednotlivé pozice relativně málo odlišné. Největší korelační koeficienty byly stanoveny na konečcích prstů v pozici *B*, *F* a *G* (tyto pozice patří rovněž k místům s největším ozářením). Z hlediska pozice, na které jsou standardně nošeny prstové dozimetry (pozice *C*, *D*, *E*), je největší korelační koeficient v pozici *C* (pozice *C* je blíže k předpokládanému místu maximálního lokálního ozáření oproti pozici *D* a *E*). V rámci disertační práce byla zkoumána rovněž nová poloha *N*, která by mohla být případně vhodnou polohou pro umístění prstového dozimetru a která vykazuje lepší korelační koeficient oproti pozicím *C*, *D*, *E*.

Jelikož se pro odhad velikosti maximálního lokálního ozáření kůže ruky bere v úvahu ruka s větším ozářením, byla v následujících případech u každého pracovníka brána v potaz jen ruka, kde bylo naměřeno větší ozáření.

Sledovaná činnost a použitý radionuklid

Z výše uvedených obrázků (obrázek 20 – obrázek 23) lze rovněž vidět, že hodnoty maximálního lokálního ozáření kůže na rukou u pracovníků připravujících a aplikujících radiofarmakum značené ^{18}F nebo ^{131}I byly rozdílné a lišily se nejen v rámci třech provedených měření u jednoho pracovníka, ale také mezi pracovníky provádějící tutéž činnost (pracovníci provádějící jen přípravu nebo jen aplikaci radiofarmaka). Rovněž se naměřené hodnoty $H_p(0,07)$ lišily mezi rozdílnými pracovními postupy (příprava versus aplikace), což také ilustruje obrázek 24, kde je uvedeno porovnání maximálního lokálního ozáření kůže ruky z hlediska prováděné činnosti a použitého radionuklidu.



Obrázek 24 Porovnání maximálního lokálního ozáření kůže ruky z hlediska prováděné činnosti a použitého radionuklidu

Rovněž bylo zkoumáno, zda má na velikost lokálního ozáření kůže ruky vliv, jakou činnost pracovník provádí (příprava, aplikace), případně s jakým radionuklidem manipuluje. Výsledky statistických testů shrnuje tabulka 14.

Tabulka 14 Výsledky statistického testu – velikost maximálního ozáření z hlediska prováděné činnosti s vybraným radionuklidem

Sledovaný parametr	Mann – Whitneyův U test <i>p</i> hodnota	Nulová hypotéza
Porovnání příprava ¹⁸ F a aplikace ¹⁸ F	0,353	Nezamítá se
Porovnání příprava ¹³¹ I a aplikace ¹³¹ I	0,057	Nezamítá se
Porovnání příprava ¹⁸ F a příprava ¹³¹ I	<0,001	Zamítá se
Porovnání aplikace ¹⁸ F a aplikace ¹³¹ I	0,038	Zamítá se

Nulová hypotéza se nezamítá v případě porovnání maximálního lokálního ozáření kůže ruky mezi pracovníky, kteří provádí (viz tabulka 14):

- přípravu a aplikaci radiofarmaka značeného ¹⁸F;
- přípravu a aplikaci radiofarmaka značeného ¹³¹I.

V tabulce 14 se nulová hypotéza zamítá v případech:

- přípravy radiofarmaka značeného ^{18}F a přípravy radiofarmaka značeného ^{131}I – statisticky významné větší ozáření bylo stanoveno u přípravy radiofarmaka značeného ^{131}I , což může být dáno zejména technologickým vybavením sledovaných pracovišť, kdy příprava pozitronového radiofarmaka probíhala na vybraných pracovištích vždy za pomoci rozplňovací stanice, kdežto natažení radiofarmaka značeného ^{131}I byla prováděna manuálně.
- aplikace pozitronového radiofarmaka a podání radiofarmaka značené ^{131}I – zde bylo stanoveno větší ozáření u pracovníků manipulujících s pozitronovým radiofarmakem. V případě aplikace pozitronového radiofarmaka jsou vykonávány úkony, které jsou významné z hlediska ozáření kůže ruky a mezi které se může řadit přidržení jehly během aplikace (např. obrázek 4), držení infuzní trubičky s radiofarmakem (např. obrázek 5b) atd.

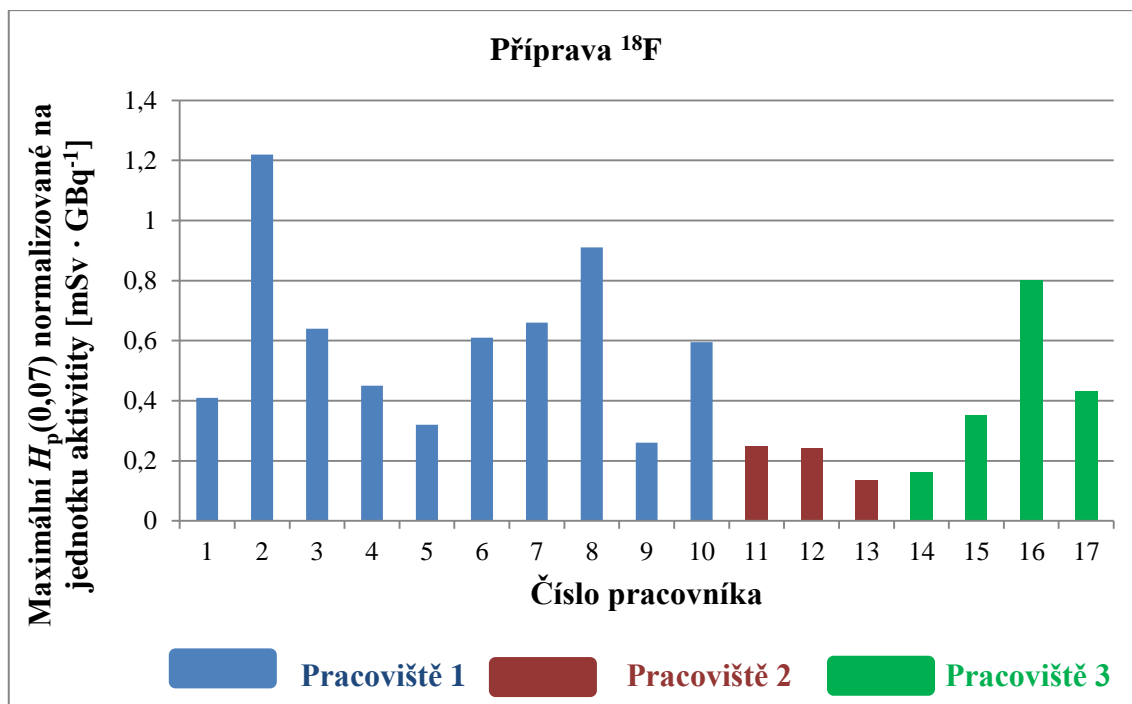
Technologické vybavení během sledovaných činností (příprava a aplikace)

Jelikož na radiační zátěž rukou může mít vliv také technologické vybavení a pracovní postupy na jednotlivých pracovištích, byl tento faktor zkoumán také v rámci disertační práce.

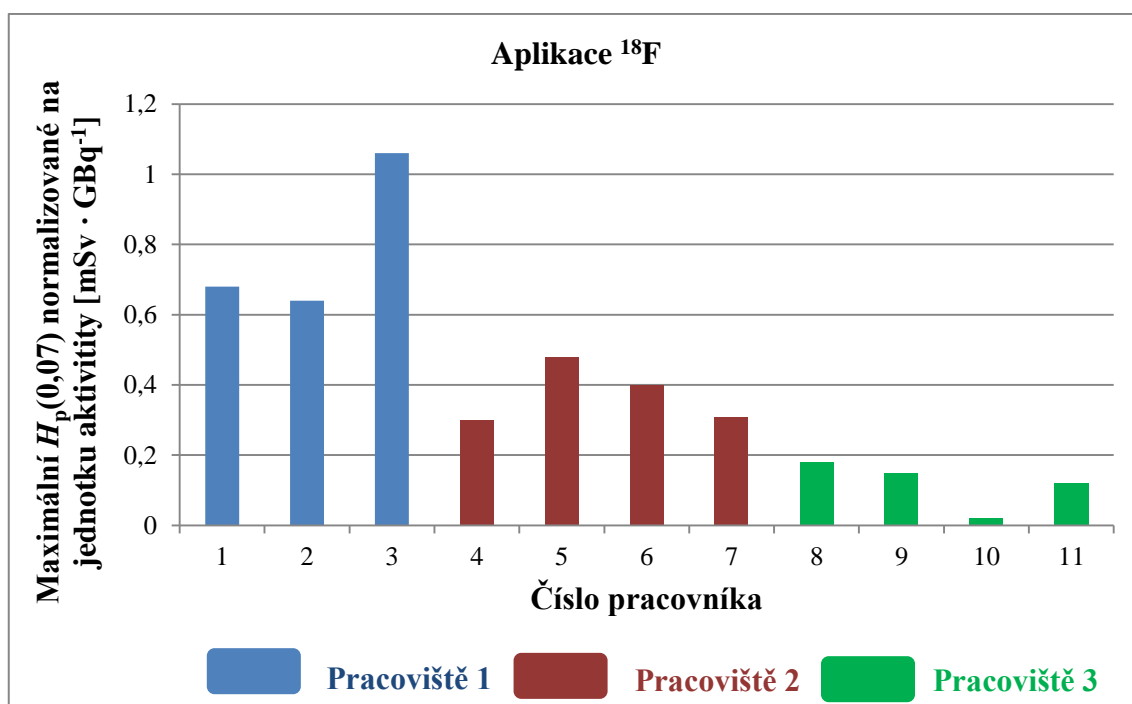
V pozicích A – N byly v rámci třech monitorovacích cyklů u každého pracovníka zjištěny hodnoty $H_p(0,07)$. Tyto hodnoty v jednotlivých cyklech měření byly zprůměrovány v každé pozici a největší zprůměrovaná hodnota byla vynesena do grafu – obrázek 25 (příprava ^{18}F), obrázek 26 (aplikace ^{18}F) a obrázek 27.

Na obrázku 25 a obrázku 26 jsou pracovníci barevně odlišeni dle jejich rozdělení:

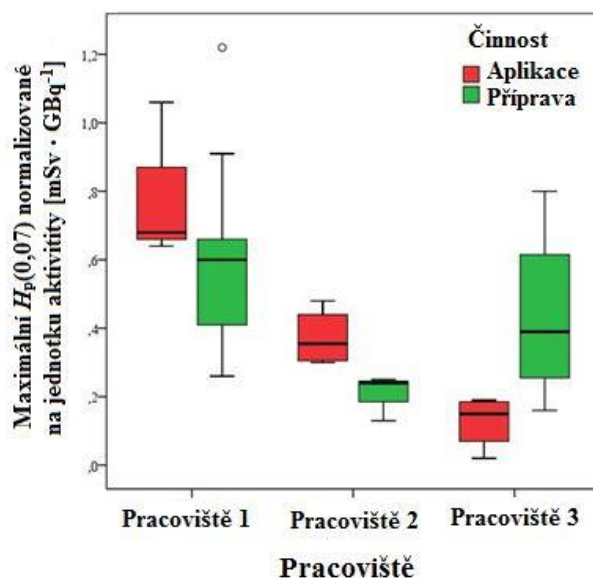
- pracoviště 1 – modrá barva;
- pracoviště 2 – růžová barva;
- pracoviště 3 – zelená barva.



Obrázek 25 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků ze sledovaných pracovišť s různou technologií – příprava pozitronového radiofarmaka



Obrázek 26 Porovnání lokálního ozáření kůže rukou pracovníků ze sledovaných pracovišť s různou technologií – aplikace pozitronového radiofarmaka



Obrázek 27 Srovnání maximálního $H_p(0,07)$ v závislosti na prováděné činnosti a technologickém vybavení daného pracoviště

Z obrázku 25 – obrázku 27 lze vidět rozdílné ozáření kůže rukou pracovníků z hlediska pracovišť, která disponují různým technologickým vybavením. Z hlediska aplikace radiofarmaka se na pracovištích uplatňují odlišné pracovní úkony.

Tabulka 15 shrnuje výsledky statistických testů, kde bylo testováno, zda je mezi jednotlivými pracovišti s různým technologickým vybavením rozdíl ve velikosti maximálního lokálního ozáření kůže rukou pracovníků.

Tabulka 15 Výsledky statistického testu - velikost maximálního ozáření u různého technologického vybavení pracovišť

Sledovaný parametr	Statistický test	p hodnota	Nulová hypotéza
Porovnání technologického vybavení všech 3 pracovišť (příprava ^{18}F + aplikace ^{18}F)	Kruskal – Wallisův test	0,003	Zamítá se
Všichni PP1* vůči všem PP2**	Mann –	0,002	Zamítá se
Všichni PP1* vůči všem PP3***	Whitneyův	0,006	Zamítá se
Všichni PP2** vůči všem PP3***	U test	0,463	Nezamítá se

*PP1 - pracovníci z pracoviště 1, **PP2 - pracovníci z pracoviště 2, ***PP3- pracovníci z pracoviště 3

Statisticky významný rozdíl byl pozorován u technologického vybavení:

- na všech třech sledovaných pracovištích ($p = 0,003$);

Výsledky

- mezi pracovištěm 1 a pracovištěm 2 ($p = 0,002$) - pracoviště 1 mělo oproti pracovišti 2 statisticky významně větší ozáření kůže ruky;
- mezi pracovištěm 1 a pracovištěm 3 ($p = 0,006$) - pracoviště 1 mělo oproti pracovišti 3 statisticky významně větší ozáření kůže ruky.

V práci byla dále analyzována velikost maximálního lokálního ozáření kůže ruky pracovníků ze sledovaných pracovišť s různým technologickým vybavením, kteří provádí vybranou činnost (příprava, aplikace). Výsledky těchto statistických testů jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16 Výsledky statistického testu – velikost maximálního ozáření u sledovaných činností z hlediska technologického vybavení

Sledovaný parametr	Statistický test	p hodnota	Nulová hypotéza
Porovnání všech pracovišť z hlediska příprava ^{18}F	Kruskal-Wallisův test	0,035	Zamítá se
Porovnání všech pracovišť z hlediska aplikace ^{18}F		0,012	Zamítá se
Příprava ^{18}F na P1* vůči P2**	Mann – Whitneyův U test	0,007	Zamítá se
Příprava ^{18}F na P1* vůči P3***		0,374	Nezamítá se
Příprava ^{18}F na P2** vůči P3***		0,229	Nezamítá se
Aplikace ^{18}F na P1* vůči P2**		0,057	Nezamítá se
Aplikace ^{18}F na P1* vůči P3***		0,057	Nezamítá se
Aplikace ^{18}F na P2** vůči P3***		0,029	Zamítá se

*P1 – pracoviště 1, **P2 – pracoviště 2, ***P3 – pracoviště 3

Mezi pracovišti byl nalezen statisticky významný rozdíl v ozáření kůže ruky u jednotlivých činností (příprava, aplikace), pro které měli pracovníci k dispozici různé technologické vybavení.

Statisticky významný rozdíl lze vidět u pracovníků provádějících (tabulka 16):

- přípravu pozitronového radiofarmaka na pracovišti 1 a pracovišti 2 ($p = 0,007$) – větší ozáření bylo stanoveno na pracovišti 1. Obě pracoviště měla k dispozici rozplňovací zařízení, která se lišila přítomností gumových rukavic zabudovaných v rámci rozplňovací stanice (zmiňované rukavice

mělo k dispozici pracoviště 2), a dále byl na daných pracovištích odlišný způsob nasazení jehly na stříkačku;

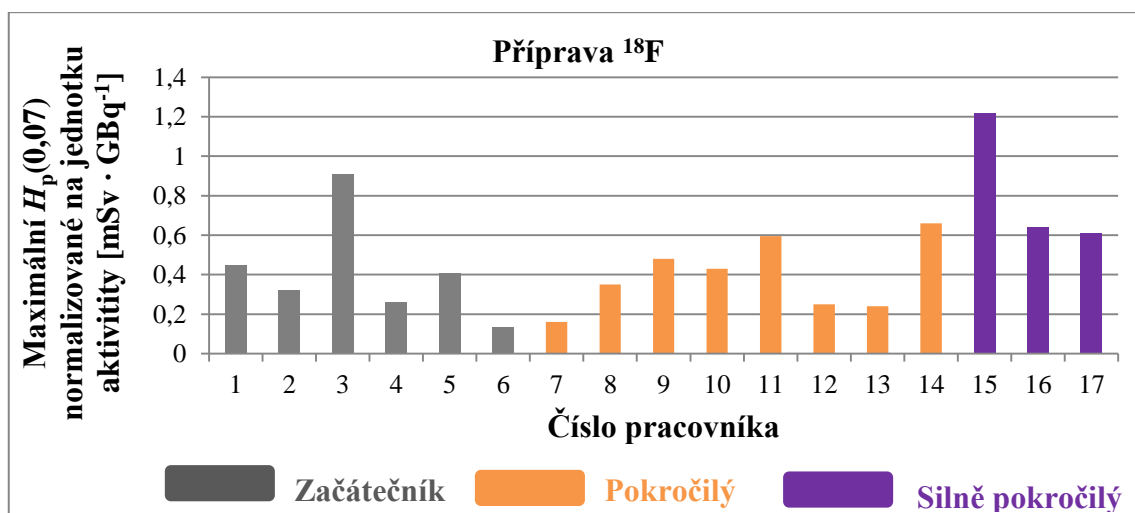
- aplikaci pozitronového radiofarmaka na pracovišti 2 a na pracovišti 3 ($p = 0,029$) – větší ozáření bylo stanoveno na pracovišti 2, které provádělo aplikaci pouze pomocí kanyly s infuzní trubičkou. Pracovišti 3 mělo k dispozici automatický aplikátor radiofarmaka.

Jelikož 6 ze 7 pracovníků monitorovaných během manipulace s radiofarmakem značeným ^{131}I bylo ze stejného pracoviště, nemohly být provedeny statistické testy porovnávající ozáření rukou z hlediska technologie používané na pracovištích s ^{131}I .

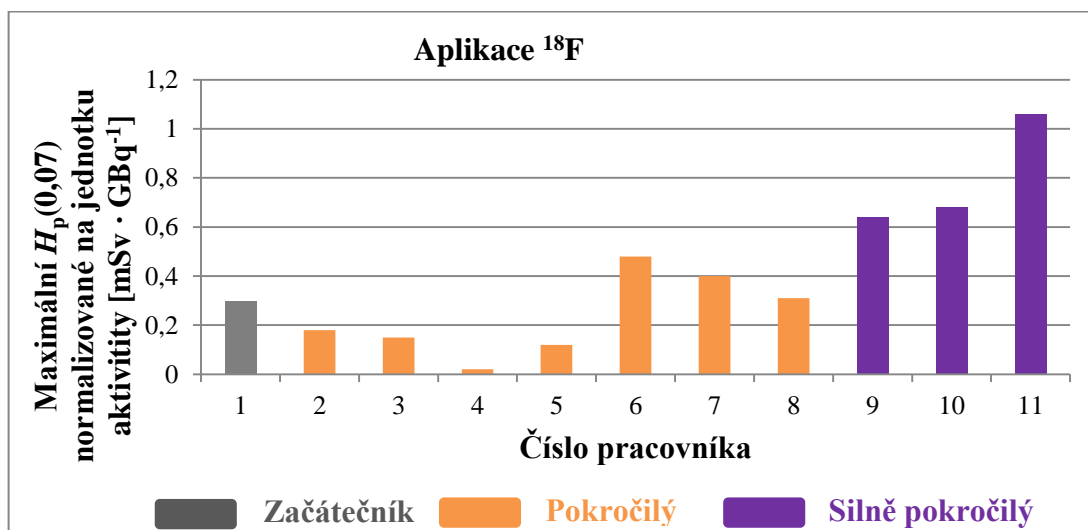
Doba praxe

Rozdílné hodnoty maximálního lokálního ozáření kůže ruky v rámci třech monitorovacích cyklů (obrázek 20 – obrázek 23) lze vidět i u jednotlivých pracovníků, kteří mají shodné náplně práce (pouze příprava nebo jen aplikace) a to i v rámci stejného pracoviště, což mimo jiné poukazuje na specifický přístup každého pracovníka, který může být ovlivněn dobou praxe, zkušeností a zručností daného pracovníka.

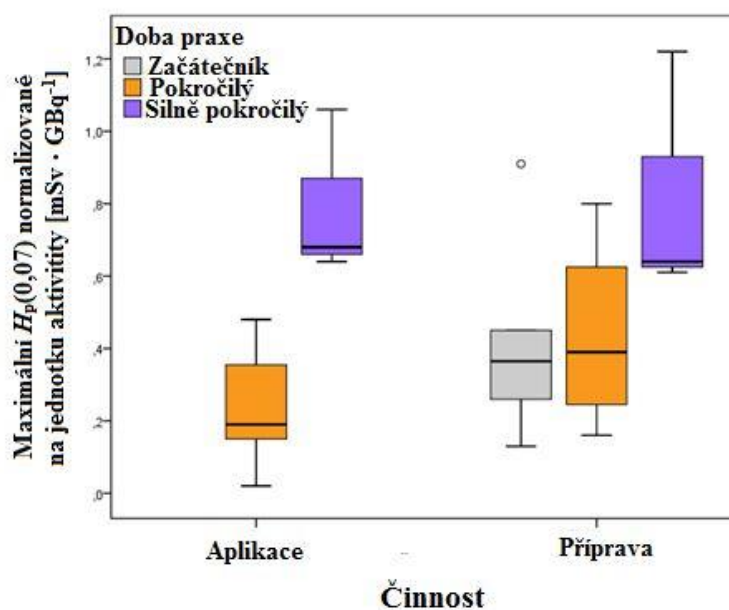
Na obrázku 28 (příprava ^{18}F), obrázku 29 (aplikace ^{18}F) a obrázku 30 jsou ilustrovány opět hodnoty ozáření rukou jednotlivých pracovníků (získané na základě měření $H_p(0,07)$ ve třech cyklech v pozicích A – N, které byly následně zprůměrovány v každé pozici, v potaz byla vzata největší hodnota). Jednotliví pracovníci jsou barevně odlišeni dle doby praxe (začátečník – šedá barva, pokročilý – oranžová barva, silně pokročilý – fialová barva).



Obrázek 28 Porovnání maximálního ozáření u přípravy pozitronové radiofarmaka - rozdělení do kategorií dle doby praxe



Obrázek 29 Porovnání maximálního ozáření u aplikace pozitronové radiofarmaka - rozdělení do kategorií dle doby praxe



Obrázek 30 Velikost maximálního lokálního ozáření kůže rukou na základě rozdělení pracovníků do kategorií dle doby praxe

U jednotlivých kategorií pracovníků rozdělených dle doby praxe (začátečník, pokročilý, silně pokročilý) lze vidět rozdílné hodnoty $H_p(0,07)$.

V tabulce 17 jsou uvedeny výsledky statistických testů, kde byla testována nulová hypotéza, že mezi pracovníky s různou dobou praxe není rozdíl ve velikosti ozáření kůže ruky.

Výsledky

Tabulka 17 Výsledky statistických testů – velikost maximálního ozáření u pracovníků s rozdílnou dobou praxe

Sledovaný parametr	Statistický test	<i>p</i> hodnota	Nulová hypotéza
Porovnání Z^* , P^{**} a S^{***} u všech pracovníků manipulujících s ^{18}F	Kruskal – Wallisův test	0,008	Zamítá se
Porovnání Z^* , P^{**} a S^{***} u přípravy ^{18}F		0,165	Nezamítá se
Porovnání Z^* , P^{**} a S^{***} u aplikace ^{18}F		0,049	Zamítá se
Porovnání Z^* a P^{**} u všech pracovníků manipulujících s ^{18}F	Mann – Whitneyův U test	0,630	Nezamítá se
Porovnání Z^* a S^{***} u všech pracovníků manipulujících s ^{18}F		0,012	Zamítá se
Porovnání P^* a S^{***} u všech pracovníků manipulujících s ^{18}F		0,002	Zamítá se
Porovnání Z^* a S^{***} u přípravy ^{18}F		0,095	Nezamítá se
Porovnání P^{**} a S^{***} u přípravy ^{18}F		0,133	Nezamítá se
Porovnání P^{**} a S^{***} u aplikace ^{18}F		0,017	Zamítá se

Z* - začátečník, *P* - pokročilý, ****S* - silně pokročilý

Z tabulky 17 lze vidět, že statisticky významný rozdíl byl z hlediska doby praxe u sledovaných skupin nalezen u:

- všech pracovníků, kteří manipulují s pozitronovým radiofarmakem ($p = 0,008$);
- všech pracovníků provádějících aplikaci pozitronového radiofarmaka ($p = 0,049$).

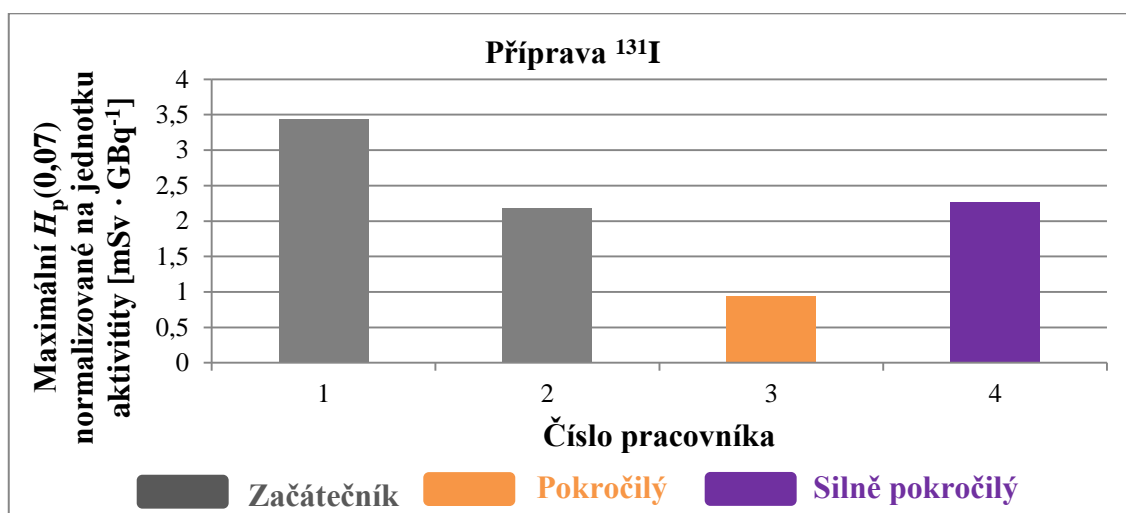
U pracovníků manipulujících s pozitronovým radiofarmakem lze z tabulky 17 vidět statisticky významný rozdíl mezi skupinami pracovníků:

- začátečník a silně pokročilý ($p = 0,012$) - větší ozáření bylo stanoveno u kategorie silně pokročilý;
- pokročilý a silně pokročilý ($p = 0,002$) - větší ozáření bylo opět zjištěno u kategorie silně pokročilý.

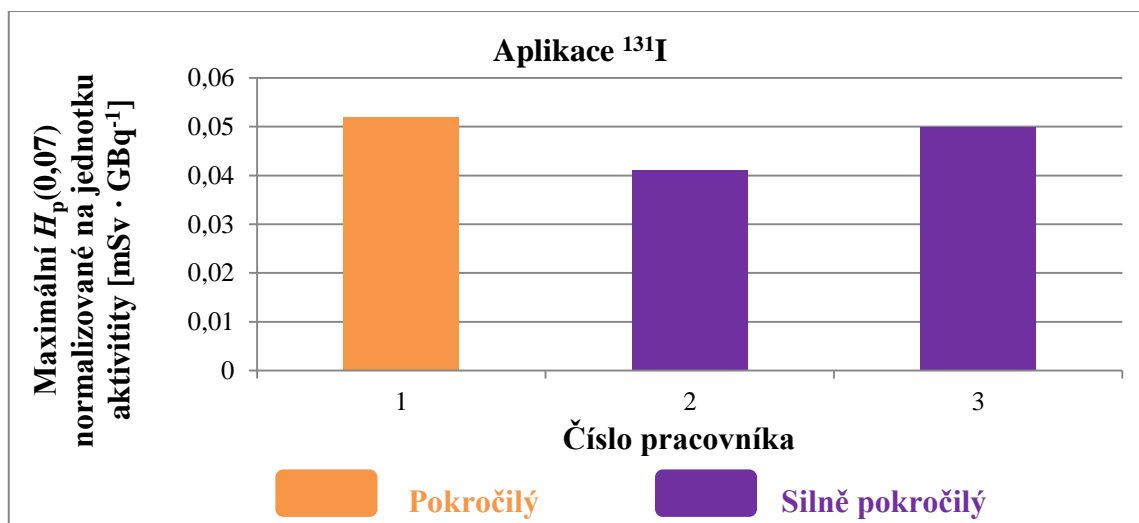
V případě přípravy pozitronového radiofarmaka nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi sledovanými skupinami.

V tabulce 17 je uveden výsledek statistického testu mezi pokročilými a silně pokročilými pracovníky, kteří provádí aplikaci pozitronového radiofarmaka, který vyšel statisticky významný ($p = 0,017$) – větší ozáření bylo zjištěno u silně pokročilých pracovníků. Porovnání z hlediska doby praxe „začátečníka“ vůči ostatním sledovaným skupinám nebylo možné provést, neboť v kategorii „začátečník“ byl pouze jeden pracovník.

Stejně jako u pozitronového radiofarmaka byli rozděleni pracovníci manipulující s ^{131}I do skupin dle doby praxe (začátečník – šedá barva, pokročilý – oranžová barva, silně pokročilý – fialová barva), což je ilustrováno na obrázku 31 (příprava ^{131}I) a obrázku 32 (aplikace ^{131}I).



Obrázek 31 Porovnání maximálního ozáření u pracovníků připravujících radiofarmakum značené ^{131}I na základě doby praxe



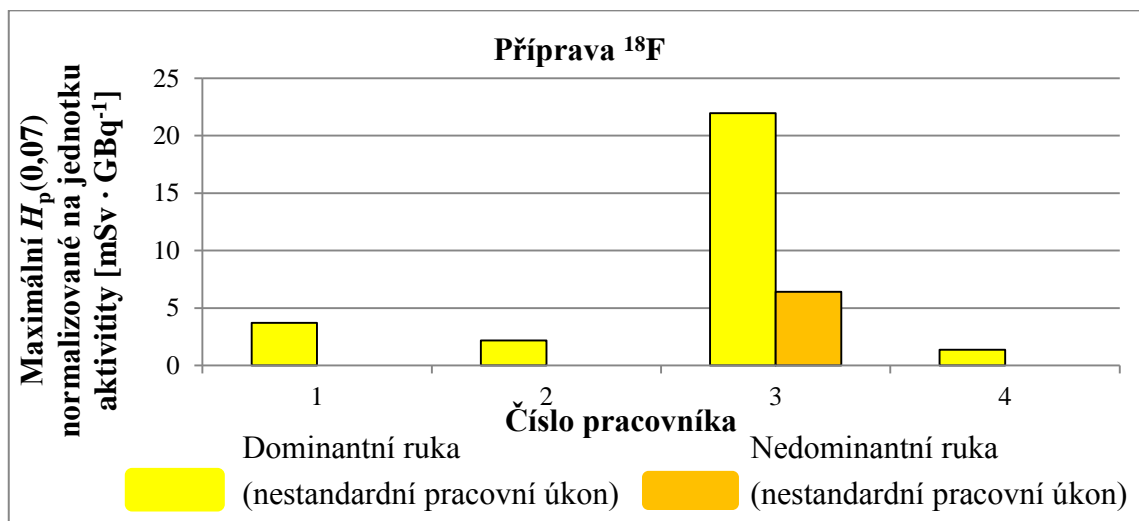
Obrázek 32 Porovnání maximálního ozáření u pracovníků podávajících radiofarmakum značené ^{131}I na základě doby praxe

Z důvodu malého počtu sledovaných pracovníků v jednotlivých kategoriích dle doby praxe (obrázek 31 a obrázek 32) nebylo možné statisticky porovnat tyto skupiny pracovníků manipulující s ^{131}I .

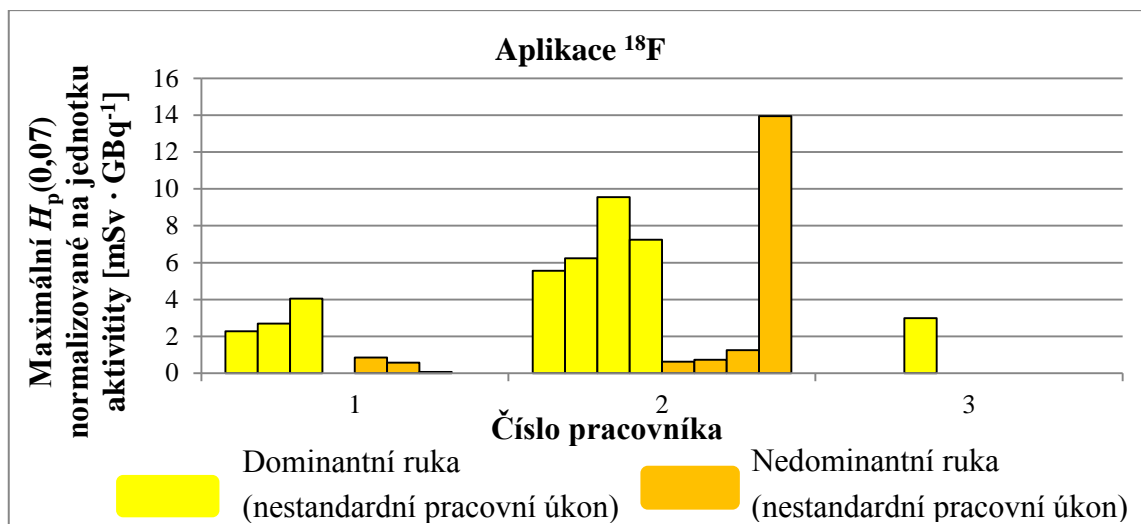
Nestandardní pracovní úkony

Disertační práce se rovněž zabývá nestandardními pracovními úkony (úkony odchylovající se od pracovních postupů), které byly v rámci měření zjištěny.

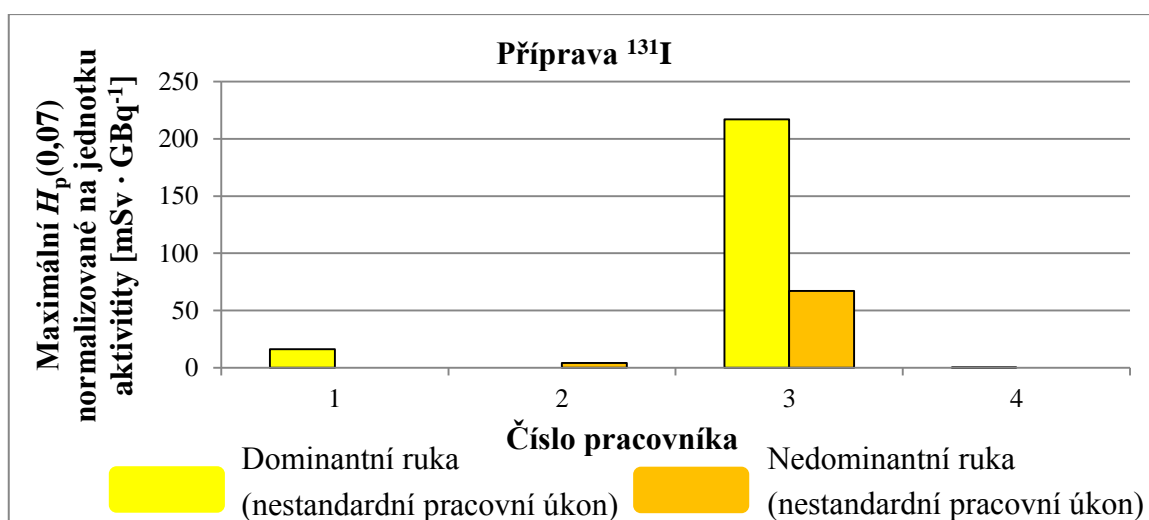
Naměřené hodnoty ozáření během těchto nestandardních pracovních úkonů jsou vyznačeny na obrázku 33 (příprava ^{18}F), obrázku 34 (aplikace ^{18}F) a obrázku 35 (příprava a aplikace ^{131}I), přičemž žlutá barva reprezentuje nestandardní pracovní úkon u dominantní ruky pracovníka a oranžová barva ilustruje nestandardní pracovní úkon u nedominantní ruky. Většina zjištěných nestandardních pracovních úkonů se u pracovníků vyskytla jen v jednom ze tří měření, avšak u některých pracovníků byly zjištěny v rámci všech 3 měření systematické nestandardní pracovní úkony (pracovník 1 a pracovník 2 na obrázku 34).



Obrázek 33 Nestandardní pracovní úkony – příprava pozitronového radiofarmaka



Obrázek 34 Nestandardní pracovní úkony – aplikace pozitronového radiofarmaka



Obrázek 35 Nestandardní pracovní úkony – příprava a aplikace radiofarmaka značeného ^{131}I

Pracovníci na obrázku 35 vykonávají odlišné činnosti během manipulace s radiofarmakem značeným ^{131}I (pracovník 1 až pracovník 3 připravují radiofarmakum značené ^{131}I , kdežto pracovník 4 toto radiofarmakum podává pacientům).

Pokud některý z cyklů měření pracovníka měl 4násobně větší ozáření než průměr zbývajících dvou cyklů měření, byl tento cyklus měření označen jako cyklus měření s „nestandardním pracovním úkonem“. Obrázek 36 – obrázek 42 porovnává cyklus měření s nestandardním pracovním úkonem a zbylé cykly měření se standardními pracovními úkony u vybraných pracovníků. Červená čára v obrázcích představuje „hranici“ mezi cykly měření se standardními pracovními úkony a cykly měření s nestandardními pracovními úkony (naměřené $H_p(0,07)$ v pozicích, které převyšují červenou čáru v obrázcích).

Mezi příčiny nesystematicky většího ozáření se může řadit:

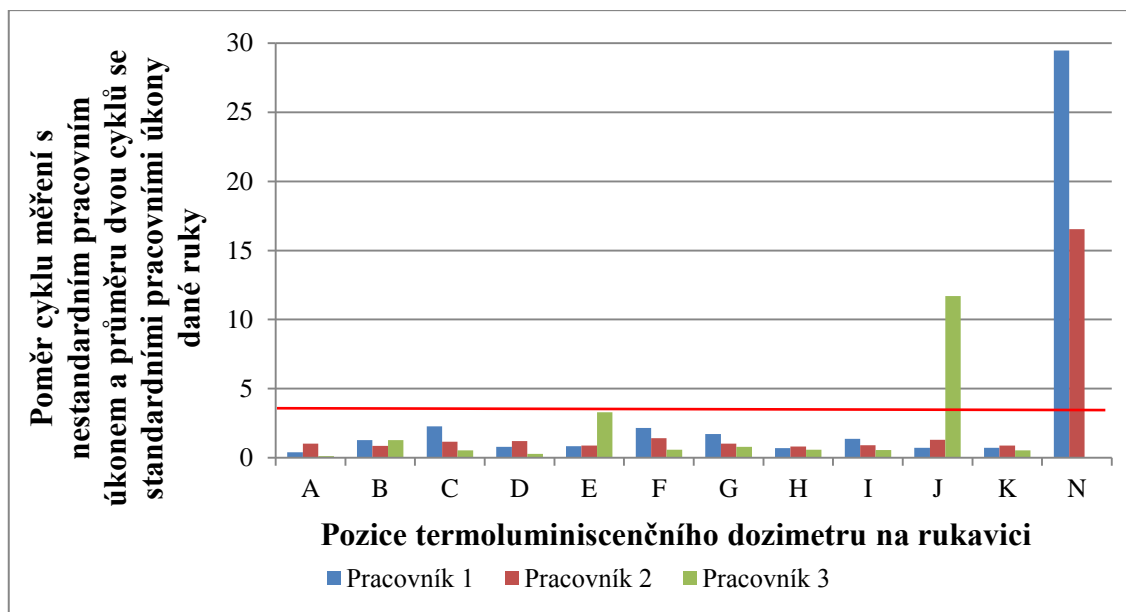
- možná kontaminace, která se může nacházet
 - na konečcích prstů jedné ruky;
 - na různých místech jedné ruky;
 - na obou rukách;
- ozáření s málo stíněným radiofarmakem;
- jiné odchylky (porušení) od předepsaných pracovních postupů.

Všichni pracovníci, u kterých byly zjištěny nestandardní pracovní úkony, měli dominantní ruku pravou. Většina případů výrazně větší hodnoty lokálního ozáření u nestandardních úkonů byla nalezena na pravé ruce, v jednom případě na levé ruce a ve dvou případech na obou rukách (viz tabulka 18).

Tabulka 18 Nesystematické nestandardní úkony

Činnost	Počet odhadovaných případů u nesystematických nestandardních úkonů		
	Pravá ruka	Levá ruka	Obě ruce
Příprava ^{18}F	3	-	1
Aplikace ^{18}F	1	-	-
Příprava ^{131}I	1	1	1
Aplikace ^{131}I	1	-	-
Celkem	6	1	2

Obrázek 36 dokumentuje poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a průměru dvou cyklů se standardními pracovními úkony pracovníků během přípravy radiofarmaka značeného ^{18}F .



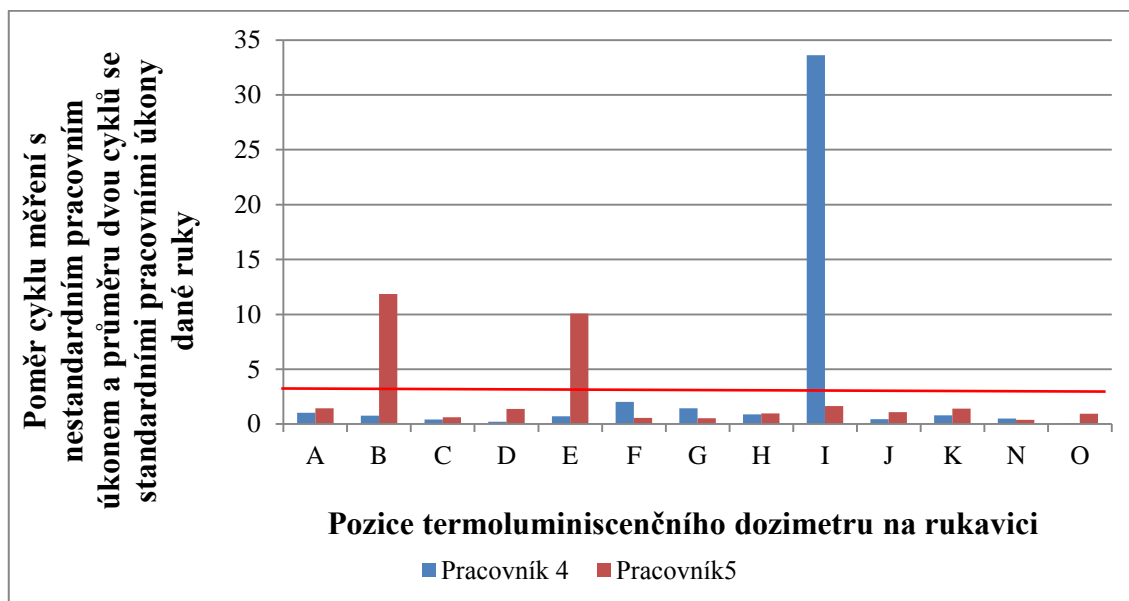
Obrázek 36 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony – příprava ^{18}F

Příprava pozitronového radiofarmaka probíhala na sledovaných pracovištích pomocí automatických rozplňovacích stanic. Přesto mohou během přípravy pozitronového radiofarmaka existovat úkony, během kterých může dojít k případné kontaminaci radiofarmakem či styku s málo stíněnou částí stříkačky s radiofarmakem (např. nasazování jehly na stříkačku). Všichni tři pracovníci z obrázku 36 měli dominantní ruku pravou.

V rámci disertační práce byla pozice *N* pro monitorování přidána z důvodu, že je blíže k pozici *F* (předpokládané místo s maximálním lokálním ozářením kůže ruky), jedná se tedy o pozici, kde je zvýšená citlivost monitorování prstovým dozimetrem. Rovněž bylo uvažováno, že by pozice *N* neměla omezovat pracovníka v práci (především lékaře) během rutinního monitorování pomocí prstového dozimetru. Na základě provedených měření bylo zjištěno, že mohou existovat úkony, během kterých si pracovníci tuto pozici *N* zvýšeně ozařují (např. obrázek 14). Mohlo by se tedy jevit, že pozice *N* je perspektivní polohou pro umístění prstového dozimetru (dozimetr by měl být v ideálním případě nošen v místě maximálního lokálního ozáření kůže ruky, což v případě špičky ukazováku není z praktických důvodů příliš možné).

U pracovníka 3 z obrázku 36 bylo zjištěno větší ozáření během cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem v pozici *J* (nehtová strana špičky prostředníku).

Obrázek 37 ilustruje poměry cyklů měření s nestandardními úkony a cyklů měření se standardními pracovními úkony pracovníků během přípravy radiofarmaka značeného ^{131}I .

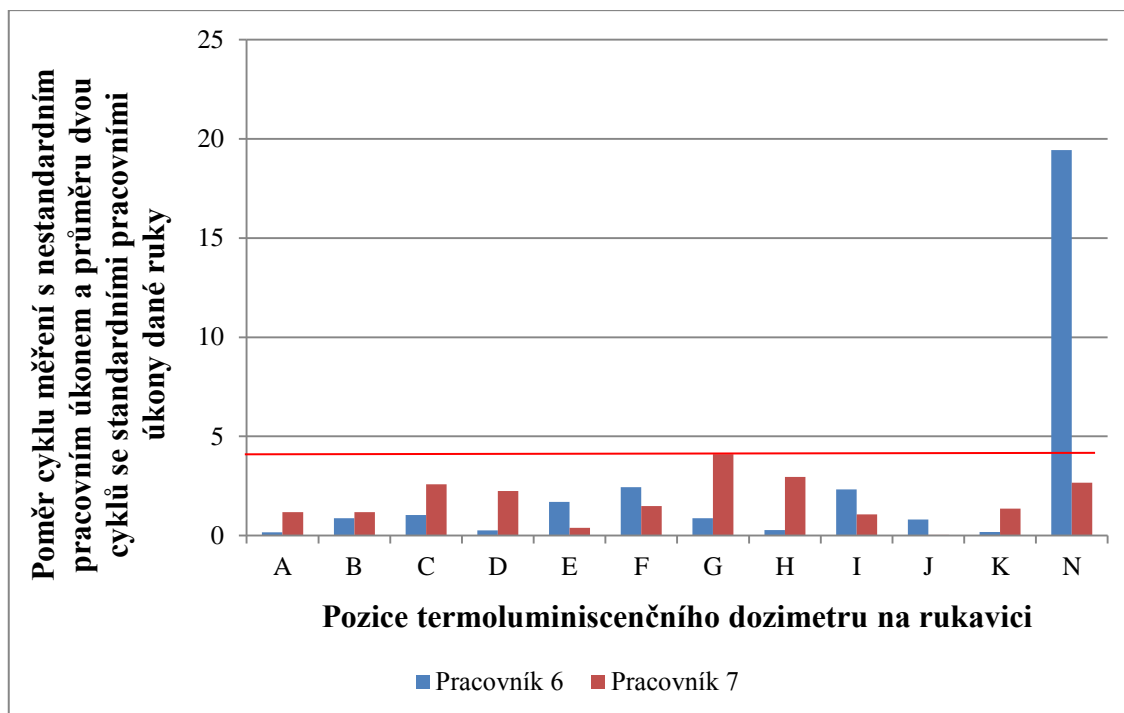


Obrázek 37 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony – příprava ^{131}I

Během přípravy ^{131}I je prováděno několik úkonů (natažení radiofarmaka do stříkačky, příprava požadované aktivity radiofarmaka, přenos radiofarmaka v nestíněné nádobě z měřiče aktivity do stínění atd.), během kterých může dojít k možné kontaminaci radiofarmakem či dotyku s nestíněnou částí stříkačky (např. obrázek 15).

Na obrázku 37 jsou dva pracovníci připravující toto radiofarmakum (oba pracovníci mají dominantní ruku pravou). Přestože oba pracovníci provádí tutéž činnost, byly naměřeny různé pozice se zvýšeným ozářením. Pracovník 4 měl zvýšené ozáření v pozici *I* (nehtová strana špičky ukazováku) na pravé ruce. U pracovníka 5 se jednalo o dvě pozice – pozice *B* (špička prstu) a pozici *E* (kořen prsteníku) na levé ruce.

Na obrázku 38 jsou ilustrovány poměry cyklů měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony u pracovníků provádějících aplikaci radiofarmaka značeného ^{18}F či ^{131}I .

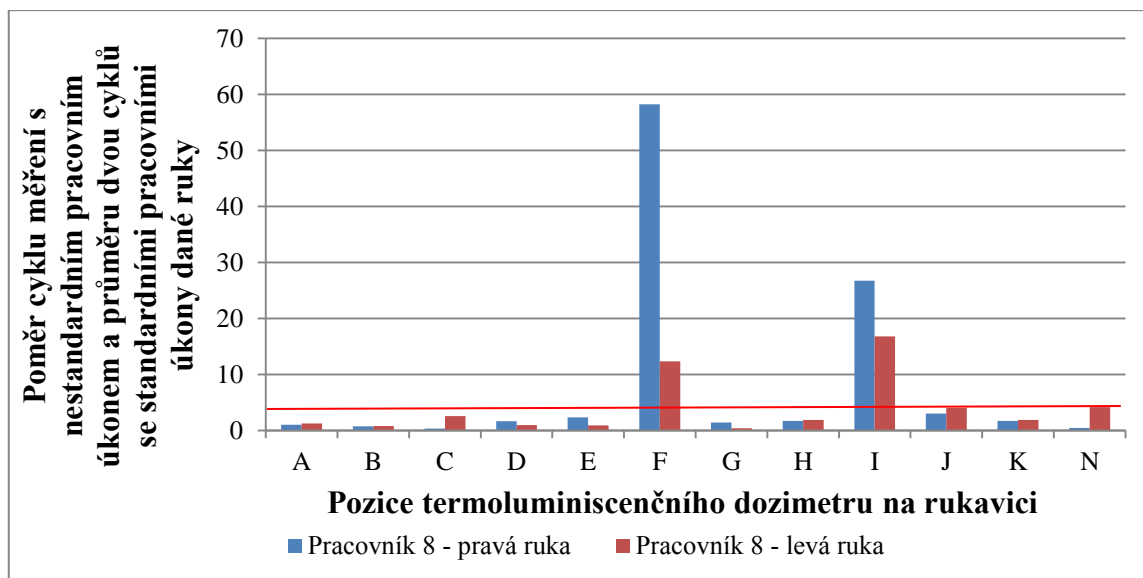


Obrázek 38 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony – aplikace ^{18}F nebo ^{131}I

Aplikace pozitronového radiofarmaka a radiofarmaka značeného ^{131}I probíhala odlišně, tudíž se lišily i jednotlivé úkony, které pracovníci během této činnosti vykonávali. Pracovník 6 (obrázek 38) prováděl aplikaci radiofarmaka ^{18}F , přičemž největší ozáření v rámci cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem bylo zjištěno na pravé ruce v pozici *N*. Pracovník má dominantní ruku pravou.

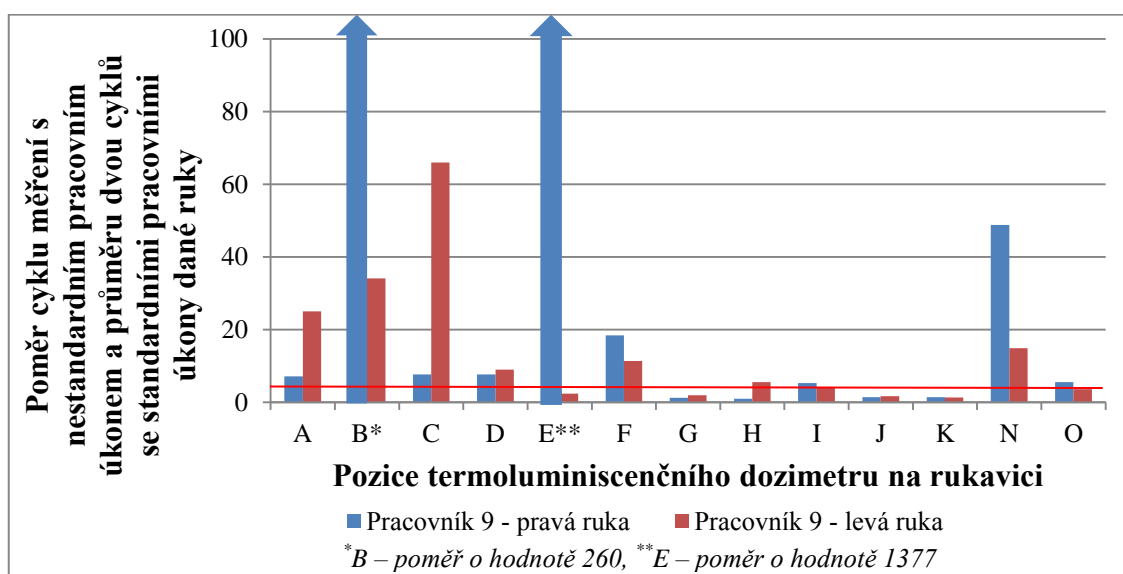
Pracovník 7 aplikoval radiofarmakum značené ^{131}I (podání kelímku s radiofarmakem pacientovi), přičemž největší ozáření v rámci cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem bylo naměřeno v pozici *G* (špička prostředníku na dlaňové straně ruky) na pravé ruce. Pracovník měl dominantní ruku pravou.

V rámci měření této disertační práce byly odhadovány také případy, kdy si pracovníci zvýšeně ozářili v důsledku cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem obě ruce (obrázek 39 a obrázek 40).



Obrázek 39 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony obou rukou – příprava ^{18}F

U pracovníka 8 (příprava pozitronového radiofarmaka) z obrázku 39 byly zjištěny cykly měření s nestandardním pracovním úkonem na pravé i levé ruce. Dominantní ruka tohoto pracovníka je pravá. Poměr hodnot pozice *F/I* na pravé ruce (modré sloupce v pozici *F* a *I* na obrázku 39) je přibližně 2. Rozdílnost většího ozáření na pravé a levé ruce na hřbetové a dlaňové straně lze vysvětlit rozdílnými úkony, které jsou pravou a levou rukou prováděny během manipulace s radiofarmakem. U tohoto pracovníka lze rovněž vidět zvýšené ozáření na více místech ruky, o čemž svědčí větší poměry v pozicích *J* a *N*.



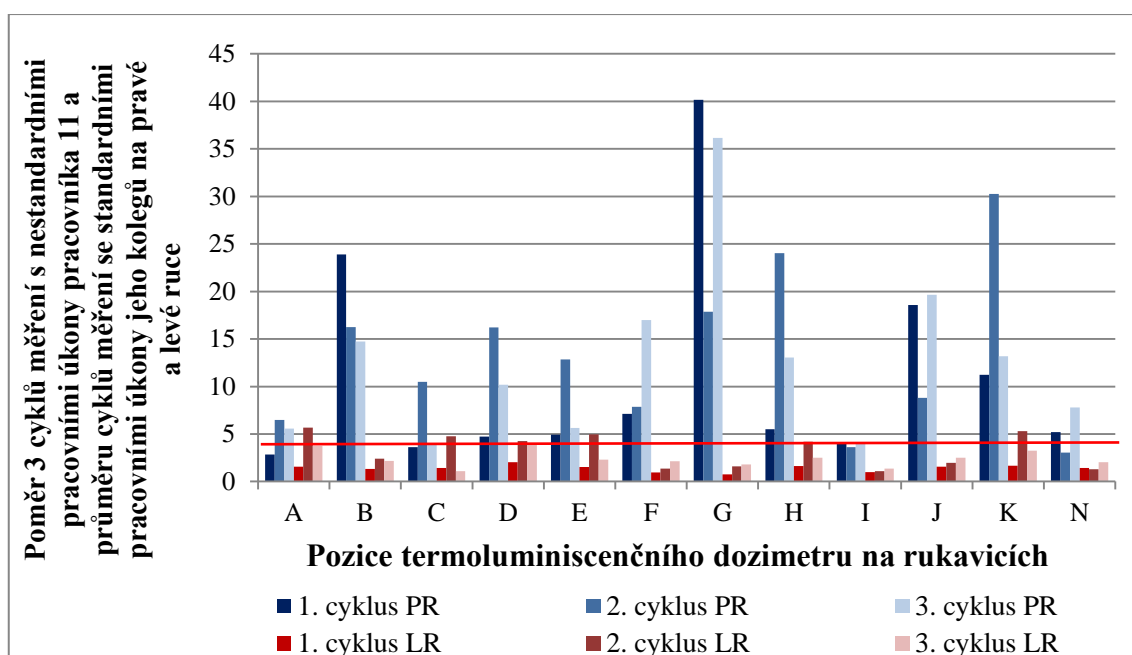
Obrázek 40 Poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem a cyklů měření se standardními pracovními úkony obou rukou – příprava ^{131}I

U pracovníka 9 (příprava ^{131}I) na obrázku 40 lze vidět zvýšené ozáření na obou rukách a to ve více místech (všechny pozice převyšující červenou čáru v obrázku 40), přičemž toto zvýšené ozáření ve více místech pravé ruky by mohlo přispívat významným způsobem k ročnímu ozáření.

V práci bylo u dvou pracovníků provádějících aplikaci pozitronového radiofarmaka zjištěno systematicky větší ozáření v rámci všech monitorovaných cyklů (viz dva pracovníci na obrázku 34). V tomto případě by mohly být možnými příčinami zvýšeného ozáření:

- nepoužití manipulačních a stínících pomůcek;
- dotyk s nestíněnou částí zářiče;
- jiné odchylky (porušení) od předepsaných pracovních postupů.

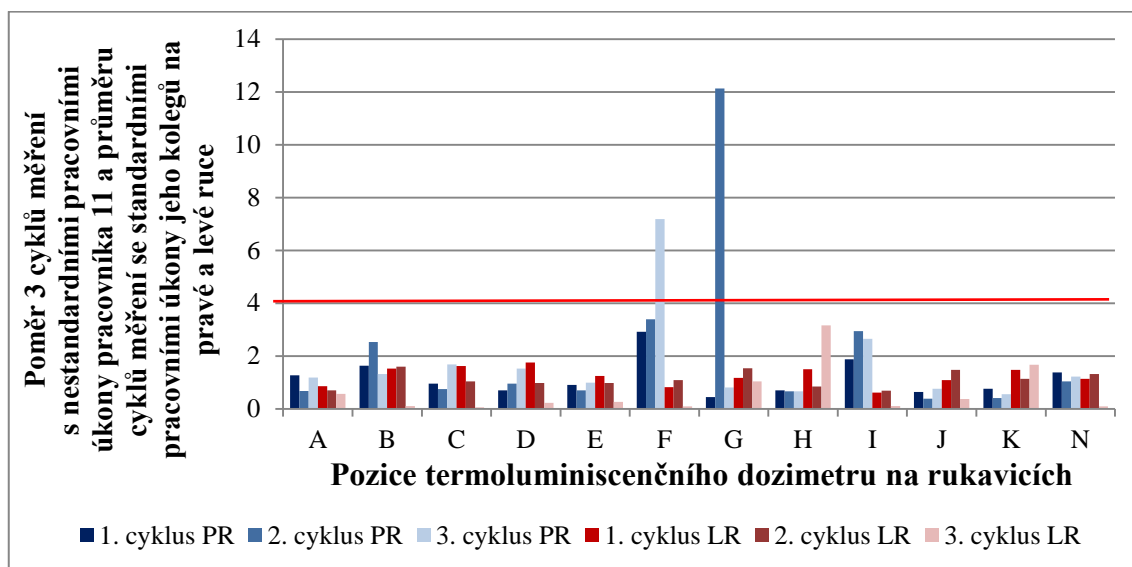
V obrázku 41 a obrázku 42 je vyznačen poměr, který je vypočten z průměrné hodnoty 3 cyklů měření s nestandardními úkony pracovníka 10 (resp. pracovníka 11) a průměru cyklů měření jejich kolegů se standardními pracovními úkony.



Obrázek 41 Poměr 3 cyklů měření s nestandardními pracovními úkony pracovníka 10 a průměru cyklů měření se standardními pracovními úkony jeho kolegů na pravé a levé ruce – aplikace ^{18}F

Obrázek 41 se vztahuje k pracovníkovi 10, který se během aplikace ^{18}F přímo do žíly lišil od svých kolegů ze shodného pracoviště. V jednom případě činí poměr cyklu měření s nestandardním pracovním úkonem pracovníka 10 a průměru cyklů měření se standardními pracovními úkony jeho kolegů hodnotu 40. Z obrázku 41 lze rovněž vidět, že dotyčný pracovník 10 měl intenzivněji ozářenou pravou ruku (pracovník měl

dominantní pravou ruku), na které bylo naměřeno větší ozáření ve více pozicích ruky (pozice, které převyšují červenou čáru v daném obrázku).

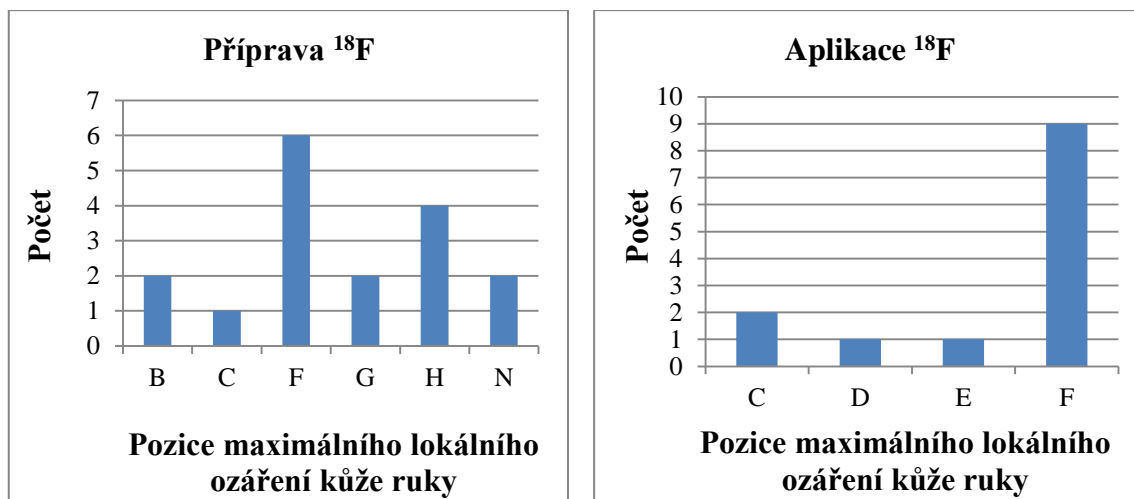


Obrázek 42 Poměr 3 cyklů měření s nestandardními pracovními úkony pracovníka 11 a průměru cyklů měření se standardními pracovními úkony jeho kolegů na pravé a levé ruce – aplikace ^{18}F

Taktéž u pracovníka 11 z obrázku 42 byly předpokládány cykly měření s nestandardními pracovními úkony během manipulace s pozitronovým radiofarmakem z důvodu možného překročení limitu ozáření. Tento pracovník je především zvýšeně ozářen ve dvou pozicích na konečných prstech (pozice převyšující červenou čáru).

4.1.4 Nejčastější pozice maximálního lokálního ozáření

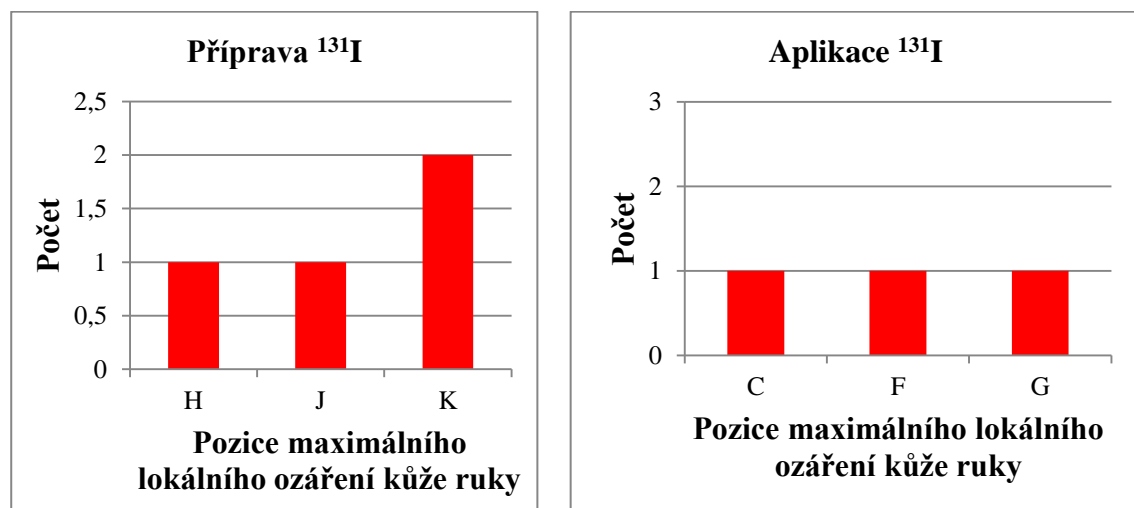
Nejčastější pozice, kde bylo nalezeno maximální lokální ozáření pracovníků manipulujících s pozitronovým radiofarmakem, je znázorněno na obrázku 43. Při vyhodnocování pozice lokálního maxima z pravé a levé ruky nebyly brány v potaz cykly měření, které byly vyhodnoceny jako „nesystematicky nestandardní“ pracovní úkony.



Obrázek 43 Nejčastější pozice s maximální hodnotou $H_p(0,07)$ na kůži během manipulace s ^{18}F

Z obrázku 43 lze vidět, že během manipulace s pozitronovým radiofarmakem bylo lokální maximum ozáření stanoveno nejčastěji v pozici *F* (příprava ^{18}F - 35 % případů, aplikace ^{18}F - téměř 69 % případů).

Na obrázku 44 jsou vidět nejčastější polohy maximálního ozáření kůže ruky v případě manipulace s radiofarmakem značeným ^{131}I . Při vyhodnocování pozice lokálního maxima (pravá i levá ruka) nebyly brány v potaz cykly měření, které byly vyhodnoceny jako „nesystematicky nestandardní“ pracovní úkony.

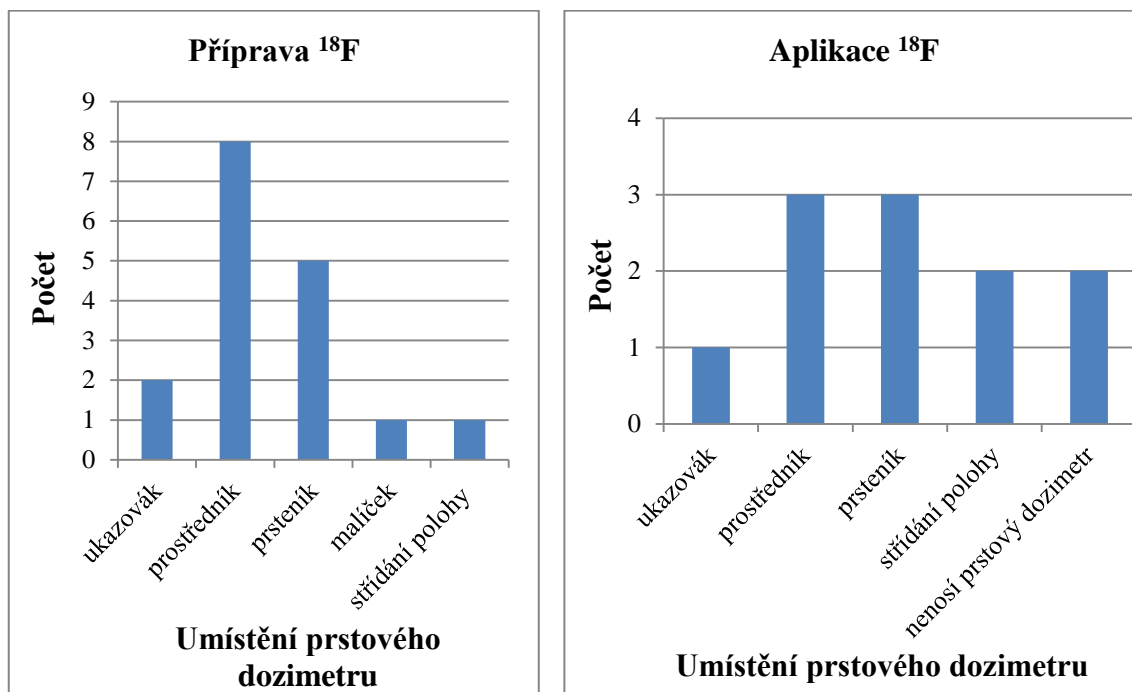


Obrázek 44 Nejčastější pozice s maximální hodnotou $H_p(0,07)$ na kůži během manipulace s ^{131}I

Během přípravy radiofarmaka značeného radionuklidem ^{131}I bylo lokální maximum $H_p(0,07)$ stanoveno v různých pozicích (dva případy byly zjištěny v pozici *K*, po jednom případě v pozici *H* a *J*), stejně jako během podání tohoto terapeutického radiofarmaka (vždy jeden případ výskytu v pozici *C*, *F*, a *G*).

Srovnání pozice naměřeného lokálního maxima ozáření a umístění prstového dozimetru

U každého pracovníka bylo zjištěno, na kterém prstu ruky nosí prstový dozimetr. Na obrázku 45 je vidět umístění prstových dozimetrů od pracovníků z PET pracovišť.

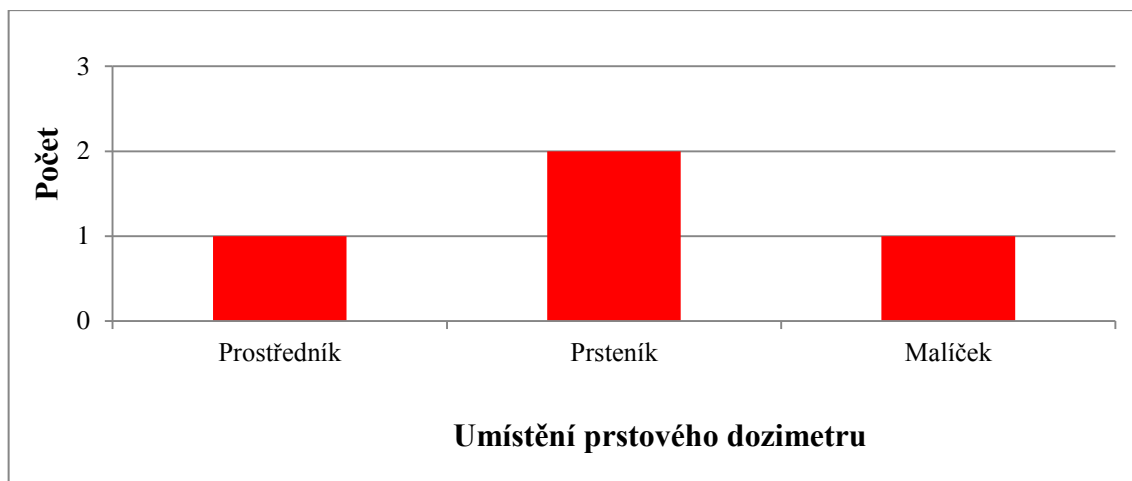


Obrázek 45 Umístění prstového dozimetru pracovníků (PET pracoviště)

V případě přípravy pozitronového radiofarmaka byl prstový dozimetr nošen v 47 % případů na prostředníku, ve 29 % případů na prsteníku, ve 12 % případů na ukazováku a v 6 % případů na malíčku. Polohu prstového dozimetru střídalo 6 % osob.

U osob provádějících aplikaci pozitronového radiofarmaka byl prstový dozimetr nejčastěji nošen na prostředníku a prsteníku (v obou případech 27 %) a v 9 % případech byl prstový dozimetr nošen na ukazováku. Střídání polohy prstového dozimetru udávalo 18 % osob. Prstový dozimetr nenosilo 18 % osob provádějící aplikaci pozitronového radiofarmaka.

Umístění prstového dozimetru u pracovníků připravujících radiofarmakum značené ^{131}I je ilustrováno na obrázku 46. U pracovníků provádějících podání ^{131}I nejsou údaje o poloze prstového dozimetru uvedeny, neboť tyto pracovníci spadají na daném pracovišti do profesní skupiny, která nenosí standardně prstové dozimetry.



Obrázek 46 Umístění prstového dozimetru pracovníků připravujících ^{131}I

V případě přípravy ^{131}I nosili dva pracovníci prstový dozimetr na prsteníku, jeden pracovník na prostředníku a jeden pracovník na malíčku.

U jednotlivých pracovníků byla porovnána ruka s maximálním lokálním ozářením s rukou, kde pracovníci nosili prstový dozimetr (pracovníci často udávali, že nosí prstový dozimetr na dominantní ruce, neboť je tato ruka během jejich pracovní činnosti více ozářena), přičemž nebyly brány v potaz cykly měření, které byly vyhodnoceny jako „nesystematicky nestandardní“ pracovní úkony. Tuto shodu shrnuje tabulka 19.

Tabulka 19 Shoda ruky s maximálním lokálním ozářením a rukou, kde je umístěn prstový dozimetr

Činnost	Shoda ruky s maximálním lokálním ozářením a rukou, kde je umístěn prstový dozimetr
Příprava ^{18}F	53 %
Aplikace ^{18}F	78 %
Příprava ^{131}I	25 %

*2 lékaři (aplikace radiofarmaka značeného ^{18}F) pravděpodobně nenesí prstový dozimetr

Z tabulky 19 lze vidět, že ne všichni pracovníci nosí prstový dozimetr na ruce, kde bylo naměřeno větší ozáření, tudíž informace podávaná jejich prstovým dozimetrem ohledně ozáření rukou může být podhodnocena.

4.1.5 Možné překročení stanoveného limitu ozáření

Se záměrem, zda může dojít u sledovaných osob k dosažení 3/10 limitu ozáření H_T kůže či limitu ozáření H_T kůže byl vypočten odhad roční hodnoty $H_p(0,07)$, který byl založen na znalosti naměřené maximální hodnoty $H_p(0,07)$, počtu vyšetřených (resp. léčených) pacientů za rok a průměrné aktivitě radiofarmaka použité na jeden pracovní úkon na jednotlivých pracovištích.

V úvahu byly brány:

- všechny případy měření (i nestandardní pracovní úkony);
- měření, ve kterých nebyly zahrnuty nesystematické nestandardní pracovní úkony (měření, u kterých se předpokládala možná kontaminace či dotyk s nestíněnou částí zářiče).

Počet pracovníků, u kterých bylo odhadováno, že by mohli překročit 3/10 limitu ozáření H_T kůže (150 mSv/rok) a limit ozáření H_T kůže (500 mSv/rok) je uveden v tabulce 20.

V obou případech byli vzati v úvahu pracovníci se systematicky nestandardními úkony, které byly zjištěny ve všech jejich měřicích cyklech, protože se předpokládá, že tímto způsobem pracovníci pracují v průběhu celého roku.

Tabulka 20 Odhad pracovníků překračující 3/10 limitu ozáření H_T kůže či limit ozáření H_T kůže

Činnost	Vzaty v úvahu i nestandardní pracovní úkony		Standardní pracovní úkony a systematicky nestandardní úkony	
	Nad 3/10 limitu ozáření H_T kůže	Nad limitem ozáření H_T kůže	Nad 3/10 limitu ozáření H_T kůže	Nad limitem ozáření H_T kůže
Příprava ^{18}F	47 %	6 %	41 %	0 %
Aplikace ^{18}F	23 %	15 %	23 %	15 %*
Příprava ^{131}I	25 %	25 %	0 %	0 %
Aplikace ^{131}I	0 %	0 %	0 %	0 %

* v úvahu byli vzati dva pracovníci, u kterých byly předpokládány systematické nestandardní úkony

V prvním případě byly uvažovány i „nestandardní pracovní úkony“, neboť pokud by k nim docházelo častěji (několikrát do roka), mohly by významným způsobem přispívat

k celoročnímu ozáření (u některých pracovníků by mohlo dojít i k překročení limitu ozáření).

Pokud by se však monitorování pracovníci v rámci disertační práce během celého roku těmito „nestandardním pracovním úkonům“ vyvarovali, je odhadováno, že mimo aplikaci pozitronového radiofarmaka by nemělo dojít k překročení limitu ozáření.

K výše uvedené tabulce 20 je však nutno poznamenat, že v běžné praxi jednotliví pracovníci vykonávají během monitorovacího období (1 měsíc) několik různých úkonů (např. na jednom sledovaném pracovišti se jednalo o přípravu radiofarmaka a nastavení pacienta na kameru) nebo manipulují s více radionuklidy, které jsou na jejich pracovišti k dispozici (např. ^{99m}Tc , ^{111}In , ^{81m}Kr , ^{123}I atd.). Ozáření z těchto činností (např. nastavení pacienta na kameru) či manipulace s jinými radionuklidy není pro roční odhad ozáření kůže ruky pracovníků v tabulce 20 zahrnuto (tato tabulka se vztahuje pouze k manipulacím s ^{18}F či ^{131}I).

Tabulka 21 shrnuje údaje, pokud by byl proveden odhad, ve kterém by se předpokládalo, že všechna sledovaná PET pracoviště budou mít shodný počet pacientů (1000 pacientů za rok/1 pracovníka, aktivita radiofarmaka na 1 úkon přípravy by činila 500 MBq a na aplikaci 400 MBq).

Tabulka 21 Odhad možného překročení limitů ozáření při shodném pracovním vytížení

Činnost	Pouze standardní pracovní úkony	
	Nad 3/10 limitu ozáření H_T kůže	Nad limitem ozáření H_T kůže
Příprava ^{18}F	64 %	6 %
Aplikace ^{18}F	38 %	15 %*

* v úvahu byli vzati dva pracovníci, u kterých byly předpokládány systematické nestandardní úkony

Z tabulky 21 lze vidět, že v případě, že je uvažováno 1 000 pacientů na 1 pracovníka za rok (tedy dojde k navýšení počtu pacientů oproti „pracovnímu vytížení“ pracoviště), může dojít u přípravy pozitronového radiofarmaka i za standardních pracovních úkonů k možnému překročení limitu ozáření. Z hlediska možného překročení limitu u aplikací je situace shodná jako v předešlém případě tabulky 20 (u 15 % pracovníků se odhaduje možné překročení limitu ozáření).

4.1.6 Korekční faktory

Pro sledované činnosti s vybraným radiofarmakem na pracovištích monitorovaných v rámci disertační práce byly vypočteny korekční faktory (KF) pro:

- jednotlivá pracoviště, kde jsou pracovníci rozděleni dle profesních skupin (tabulka 22, tabulka 23 a tabulka 29);
- jednotlivá pracoviště zahrnující pracovníky provádějící přípravu i aplikaci (tabulka 24, tabulka 29);
- osoby provádějících tutéž činnost v rámci více pracovišť (tabulka 25);
- všechny pracovníky manipulující s radiofarmakem (tabulka 26).

Korekční faktory jsou uvedeny pro pozice, kde jsou nejčastěji nošeny prstové dozimetry (pozice *C* - kořen ukazováku na dlaňové straně ruky, pozici *D* - kořen prostředníku na dlaňové straně ruky, pozice *E* - kořen prsteníku na dlaňové straně ruky), které jsou vztaženy na pozici, kde bylo nejčastěji nalezeno maximální ozáření kůže ruky (pozice *F* - špička ukazováku). V práci je též uveden korekční faktor pro nově dodanou pozici *N*, která je opět vztažena k pozici *F*.

Při vyhodnocování pozice lokálního maxima z pravé a levé ruky nebyly brány v potaz cykly měření s „nestandardními pracovními úkony“.

Korekční faktory, které by se vztahovaly na jednotlivá monitorovaná pracoviště v rámci disertační práce z hlediska přípravy ^{18}F shrnuje tabulka 22.

Tabulka 22 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice - příprava ^{18}F

Pozice	Pracoviště 1	Pracoviště 2	Pracoviště 3
Poměr <i>F/C</i>	4,4 ± 54 %	2,1 ± 53 %	1,8 ± 64 %
Poměr <i>F/D</i>	5,0 ± 64 %	3,2 ± 29 %	1,2 ± 86 %
Poměr <i>F/E</i>	5,0 ± 64 %	5,8 ± 29 %	3,7 ± 60 %
Poměr <i>F/N</i>	2,2 ± 69 %	1,1 ± 42 %	1,6 ± 61 %

Z hlediska poloh, kde jsou standardně nošeny prstové dozimetry, jsou ve dvou případech přesnější hodnoty KF (z hlediska % odchylky rozptylu) u poměru *F/E*, v jednom případě u poměru *F/C*.

Z tabulky 22 lze rovněž vidět rozdílné hodnoty poměru F/C , F/D , F/E i poměru F/N na jednotlivých pracovištích, což může být pravděpodobně způsobeno odlišnými pracovními úkony na jednotlivých pracovištích.

Korekční faktory, které by se vztahovaly na jednotlivá monitorovaná pracoviště v rámci disertační práce z hlediska aplikace ^{18}F shrnuje tabulka 23.

Tabulka 23 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice - aplikace ^{18}F

Pozice	Pracoviště 1	Pracoviště 2	Pracoviště 3
Poměr F/C	$5,6 \pm 62 \%$	$3,7 \pm 34 \%$	$1,2 \pm 53 \%$
Poměr F/D	$9,8 \pm 35 \%$	$3,8 \pm 36 \%$	$1,2 \pm 79 \%$
Poměr F/E	$13,1 \pm 47 \%$	$4,2 \pm 32 \%$	$1,4 \pm 36 \%$
Poměr F/N	$2,6 \pm 71 \%$	$1,8 \pm 38 \%$	$1,1 \pm 49 \%$

Z hlediska poloh, kde jsou standardně nošeny prstové dozimetry, jsou opět ve dvou případech přesnější hodnoty korekčních faktorů (z hlediska % odchylky rozptylu) u poměru F/E , v jednom případě u poměru F/D .

Hodnoty korekčních faktorů pro lékaře (tabulka 23) nabývají oproti hodnotám KF pro farmaceuty většinou větší hodnoty (platí pro pracoviště 1 a pracoviště 2, které provádí aplikaci manuálně), což může být pravděpodobně způsobeno tím, že farmaceuti mají k dispozici rozplňovací stanice radiofarmaka.

Lékaři mají na pracovišti 3 k dispozici automatický aplikátor, což může být důvodem, proč jsou v tomto případě hodnoty KF pro lékaře menší oproti farmaceutům (i farmaceuti na tomto pracovišti mají k dispozici rozplňovací stanici radiofarmaka, ovšem provádí oproti lékařům jiné pracovní úkony s radiofarmakem).

Při sjednocení hodnoty korekčního faktoru pro pracoviště (příprava a aplikace) dojde ke snížení pracnosti vyhodnocování.

Tabulka 24 uvádí korekční faktory, které by se vztahovaly na sledované činnosti pro jednotlivá monitorovaná pracoviště s ^{18}F , které byly monitorovány v rámci disertační práce (na vybraných pracovištích by tedy byly korekční faktory společné pro pracovníky připravující a aplikující pozitronové radiofarmakum). Uvedené hodnoty korekčních faktorů v tabulce 24 byly odvozeny na základě stanovení poměrů F/C , F/D , F/E a F/N u všech pracovníků z pracoviště 1 a následně byly z jednotlivých poměrů

vypočteny průměrné hodnoty. Tím se stanovily korekční faktory ve vybraných pozicích *C*, *D*, *E* a *N*. Stejný postup byl použit i pro pracoviště 2 a pracoviště 3.

Tabulka 24 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice - jednotlivá PET pracoviště

Korekční faktor	Pracoviště 1	Pracoviště 2	Pracoviště 3
Pozice <i>C</i>	4,7 ± 57 %	3,0 ± 46 %	1,5 ± 63 %
Pozice <i>D</i>	6,1 ± 62 %	3,6 ± 34 %	1,2 ± 80 %
Pozice <i>E</i>	7,9 ± 70 %	4,8 ± 34 %	2,4 ± 79 %
Pozice <i>N</i>	2,3 ± 69 %	1,5 ± 45 %	1,3 ± 60 %

Z hlediska % odchylky byly stanoveny přesnější hodnoty korekčních faktorů po jednom případě u poměru *F/C* (pracoviště 1), u poměru *F/N* (pracoviště 3), v případě pracoviště 2 se jednalo o poměry *F/D* a *F/E*, které vykazovaly shodné % odchylky.

Tabulka 25 shrnuje korekční faktory pro všechny pracovníky provádějící tutéž činnost, která byla sledována (příprava, aplikace) na vybraných pracovištích s ¹⁸F. Tyto korekční faktory byly vypočteny tak, že u všech pracovníků vykonávající přípravu pozitronového radiofarmaka byly stanoveny poměry (*F/C*, *F/D*, *D/E* a *F/N*) a následně byla vypočtena průměrná hodnota pro tyto poměry. Na základě tohoto výpočtu byly stanoveny korekční faktory pro vybranou pozici (*C*, *D*, *E* a *N*). Stejný postup byl použit i v případě aplikace.

Tabulka 25 Hodnoty korekčních faktorů pro vybrané pozice – sledované činnosti (¹⁸F)

Korekční faktor	Příprava	Aplikace
Pozice <i>C</i>	3,5 ± 67 %	3,4 ± 78 %
Pozice <i>D</i>	3,9 ± 75 %	4,6 ± 87 %
Pozice <i>E</i>	5,7 ± 65 %	5,7 ± 102 %
Pozice <i>N</i>	1,9 ± 71 %	1,8 ± 70 %

Při spojení osob do skupiny, kde pracovníci vykonávají shodnou pracovní náplň (příprava nebo aplikace), dojde k výraznému zjednodušení, protože by nemusel být KF určen pro jednotlivá pracoviště. Musela by se však brát v potaz profese sledovaného pracovníka (příprava, aplikace).

Z tabulky 25 lze vidět, že pro přípravu je nejmenší % odchylky v pozici *E*. Pro aplikaci pozitronového radiofarmaka je nejmenší % odchylka v poloze *N*.

V tabulce 26 je uvedena hodnota korekčního faktoru pro vybrané pozice *C*, *D*, *E* a *N*, pokud by byla všechna sledovaná pracoviště sloučena (z hlediska monitorovaných činností). Tyto korekční faktory byly vypočteny na základě poměrů F/C , F/D , F/E a F/N u všech monitorovaných pracovníků připravujících a aplikujících pozitronové radiofarmakum. U jednotlivých poměrů byly následně stanoveny průměrné hodnoty.

Tabulka 26 Hodnota korekčního faktoru pro vybrané pozice - sledovaná PET pracoviště

Korekční faktor	KF pro sledovaná pracoviště
Pozice <i>C</i>	$3,5 \pm 71 \%$
Pozice <i>D</i>	$4,2 \pm 81 \%$
Pozice <i>E</i>	$5,7 \pm 82 \%$
Pozice <i>N</i>	$1,8 \pm 70 \%$

Z tabulky 26 lze vidět, že nejmenší procentuální odchylka byla zjištěna v pozici *N* (námi nově dodaná poloha monitorování) a v pozici *C* (kořen ukazováku).

Dnes nejsou KF rutinně používány. V případě použití KF nebudou několikanásobně podhodnoceny dávky v místě maximálního ozáření. Přestože jsou KF určeny často s velkou chybou (okolo 50 %), je tato chyba malá oproti tomu, když se KF nepoužije a ozáření kůže ruky v místě maximálního ozáření je podhodnoceno s faktorem 3 až 4 (v případě pozice *C*).

V případě sjednocení všech činností na sledovaných pracovištích (tabulka 26) by byla náročnost vyhodnocování při zohlednění příslušného KF nejmenší. Na druhou stranu je potřebné zjistit, do jaké míry má toto sjednocení KF vliv na počty případů, které by mohly překročit 3/10 limitů ozáření H_T kůže nebo limit ozáření H_T kůže.

Tabulka 27 shrnuje výsledky, u kterých nebyly vzaty v úvahu nestandardní pracovní úkony, a které se vztahují na naměřené hodnoty ozáření pracovníků manipulujících s radiofarmaky značenými radionuklidem ^{18}F v pozici *C*, u kterých byly brány v potaz hodnoty KF. Korekční faktory byly uvedeny pro:

- jednotlivé profese (příprava, aplikace) na daných pracovištích;
- jednotlivá pracoviště;
- pro všechna sledovaná pracoviště.

Výsledky

Tabulka 27 Odhad případů možného překročení limitu ozáření H_T kůže při zohlednění doporučeného korekčního faktoru v pozici C na jednotlivých pracovištích za standardních situací

Pracoviště	Činnost s radionuklidem ^{18}F	Experimentálně změřené lokální maximum* (standardní úkony)		Zohlednění doporučeného KF** pro činnosti na jednotlivých pracovištích		Zohlednění doporučeného KF** pro jednotlivé pracoviště		KF** pro všechna 3 sledovaná pracoviště		Naměřený údaj z pozice C bez použití KF**	
		0,3 LO	LO	0,3 LO	LO	0,3 LO	LO	0,3 LO	LO	0,3 LO	LO
Pracoviště 1	¹ P	60 %	0 %	30 %	0 %	30 %	0 %	30 %	0 %	0 %	0 %
	² A	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %	0 %	0 %
Pracoviště 2	¹ P	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	33,3 %	0 %	0 %	0 %
	² A	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Pracoviště 3	¹ P	25 %	0 %	25 %	0 %	25 %	0 %	25 %	25 %	25 %	0 %
	² A	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Všichni	¹ P	41,2 %	0 %	23,5 %	0 %	23,5 %	0 %	29,4 %	5,88 %	5,88 %	0 %
	² A	27,3 %	0 %	27,3 %	0 %	27,3 %	0 %	27,3 %	0 %	0 %	0 %

* Pro odhad byly vzaty naměřené hodnoty mapování (bez nestandardních pracovních úkonů) s různými pozicemi maximálního lokálního ozáření kůže ruky

** KF – korekční faktor pro pozici C

*** LO – limit ozáření H_T kůže

¹ Příprava, ² aplikace

Poslední sloupec v tabulce 27 se vztahuje k případu, kdyby byly vzaty v úvahu jen naměřené hodnoty v pozici C (kořen ukazováku) bez použití KF – jedná se tedy o případ současné praxe v osobní dozimetrii pomocí prstových dozimetrů, kde jsou odpovědi prstového dozimetru bez korekce na $H_p(0,07)$ v pravděpodobném místě maximálního ozáření kůže na ruce.

Pro odhad ročního ozáření kůže ruky byla vzata u každého pracovníka v úvahu maximální hodnota lokálního ozáření kůže ruky stanovena na základě 3 měření, která byla vztažena na předpokládanou manipulovanou aktivitu za rok (odhadováno z průměrné aktivity na jednotlivé činnosti a počtu pacientů na 1 pracovníka za rok).

Z tabulky 27 lze vidět, že na rozdíl od nekorigovaných hodnot prstového dozimetru v pozici C (poslední sloupec této tabulky) navrhnutý systém odhaluje překročení limitu ozáření H_T kůže. Sjednocení KF pro větší počet osob (např. všichni farmaceuti nebo celé pracoviště) může způsobit snížení počtu zaregistrovaných případů překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže (zejména během přípravy ^{18}F na pracovišti 1). Při porovnání situace, kdy jsou vzaty v úvahu jen hodnoty naměřené na prstovém dozimetru v pozici C (poslední sloupec v tabulce 27) je však vidět, že pokud by nebyly KF používány, bude zanedbáváno daleko více případů možného překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže. Tato skutečnost nezachycených možných překročení 3/10 limitů ozáření H_T kůže do určité míry znemožňuje zlepšení radiační ochrany, neboť bez použití KF se může jevit, že radiační ochrana je na všech pracovištích optimalizována (všichni sledovaní pracovníci mají ozáření kůže ruky pod hodnotou 150 mSv/rok).

V tabulce 27 byly hodnoceny standardní pracovní úkony, ale v praxi se mohou vyskytovat i pracovníci se „systematicky nestandardním“ způsobem manipulace s radiofarmakem (viz kapitola 4.1.3 Nestandardní pracovní úkony). U „systematicky nestandardních“ pracovních úkonů může být distribuce dávky na ruce podobná standardním úkonům kromě případů kontaminace, proto v tabulce 28 nejsou uvedeny případy nesystematické nestandardní pracovní úkony u sledovaných pracovníků. Tabulka 28 shrnuje výsledky možného překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže a limitů ozáření H_T kůže u dvou pracovníků se systematicky nestandardními pracovními úkony během aplikace radiofarmaka značeného ^{18}F . Korekční faktory jsou opět vztaženy na pozici C.

Tabulka 28 Odhad případů možného překročení limitu ozáření H_T kůže při zohlednění doporučeného korekčního faktoru v pozici C za systematicky nestandardních situací

Činnost	Experimentálně změřené lokální maximum* (nestandardní úkony)		KF** pro všechna 3 sledovaná pracoviště		Naměřený údaj z pozice C bez použití KF**	
	0,3 LO	LO	0,3 LO	LO	0,3 LO	LO
Aplikace ^{18}F	0 %	100 %	50 %	50 %	50 %	0 %

*Pro odhad byly vzaty naměřené hodnoty mapování nestandardních pracovních úkonů s různými pozicemi maximálního lokálního ozáření kůže ruky

**KF – korekční faktor pro pozici C

***LO – limit ozáření H_T kůže

I v tomto případě byla pro odhad ročního ozáření kůže ruky vzata v úvahu maximální hodnota lokálního ozáření kůže ruky daného pracovníka stanovena na základě třech měření. Tato hodnota byla následně vztažena na předpokládanou manipulovanou aktivitu radiofarmaka za rok (odhadováno z průměrné aktivity radiofarmaka na jednotlivé činnosti a počtu pacientů na 1 sledovaného pracovníka za rok).

V tabulce 28 jsou shrnuty případy dvou pracovníků používajících systematicky („chronické“) nestandardní pracovní úkony (tyto úkony nejsou náhodné), u kterých lze vidět, že v případě zohlednění experimentálně změřeného lokálního maxima může dojít v obou případech k překročení limitu H_T kůže. V případě, že bude u pracovníků uvažován KF navržený pro všechna sledovaná pracoviště, mohl by být zjištěn jen jeden případ překročení limitu ozáření H_T kůže a jeden případ překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže. Pokud však nebude použit žádný korekční faktor, mohl by být zjištěn jen jeden případ překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže. Z tohoto důvodu je v případě těchto pracovníků potřebné používat korekční faktory.

Tabulka 29 uvádí hodnoty korekčních faktorů, které by se vztahovaly na přípravu a aplikaci radiofarmaka značeného ^{131}I a rovněž na vybrané pracoviště 5 z hlediska sledovaných činností. Korekční faktory byly stejně jako v případě pozitronového radiofarmaka počítány na základě poměrů všech pracovníků provádějících přípravu radiofarmaka značeného ^{131}I (poměr F/C , F/D , F/E a F/N), pro každý poměr byla vypočtena průměrná hodnota. Stejný postup byl použit i pro aplikaci radiofarmaka značeného ^{131}I . Poslední sloupec uvedené tabulky byl stanoven na základě vypočtení poměrů F/C , F/D , F/E a F/N pro všechny monitorované pracovníky na pracovišti 5.

Tabulka 29 Hodnota korekčního faktoru vztahujícího se na vybrané pozice pro přípravu radiofarmaka značeného ^{131}I na pracovišti 5

Korekční faktor	Příprava	Aplikace	Pracoviště 5
Poměr F/C	$2,3 \pm 47 \%$	$1,4 \pm 71 \%$	$1,9 \pm 57 \%$
Poměr F/D	$2,0 \pm 46 \%$	$1,3 \pm 63 \%$	$1,8 \pm 54 \%$
Poměr F/E	$3,0 \pm 41 \%$	$2,9 \pm 50 \%$	$2,9 \pm 43 \%$
Poměr F/N	$1,5 \pm 36 \%$	$1,2 \pm 50 \%$	$1,3 \pm 41 \%$

V tabulce 29 jsou navrženy korekční faktory, které se týkají jednoho pracoviště (pracoviště 5), jenž poskytuje terapii pomocí ^{131}I . Přesnější hodnoty KF (z hlediska % odchylky) byly pro přípravu stanoveny v pozici N .

Pro pracovníky podávající toto radiofarmakum byla nejmenší % odchylka stanovena pro pozici *E* a *N*. Na rozdíl od přípravy radiofarmaka byly u aplikace zjištěny menší hodnoty korekčních faktorů (což je dáno zejména pracovními úkony, které jednotlivé profese provádí).

V případě sloučení všech monitorovaných pracovníků z pracoviště 5 do jedné skupiny (poslední sloupec tabulky 29) byla zjištěna nejmenší % odchylka v pozici *N*.

U pracovníků manipulujících s ^{131}I (příprava a aplikace) nebylo v žádném případě (nebyly uvažovány nesystematické nestandardní situace) zjištěno překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže ani limitu ozáření H_T kůže.

Opět je vhodné podotknout, že korekční faktory uvedené v tabulce 22 – tabulce 26 a v tabulce 29 lze použít při činnostech, kdy dochází k manipulaci pouze s radiofarmakem značeným ^{18}F (v tabulce 29 s radiofarmakem značeným ^{131}I). V běžné praxi přichází pracovníci na pracovištích nukleární medicíny do kontaktu také s jinými radionuklidy, např. $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In atd.

4.2 Simulační část

4.2.1 Verifikace MCNP simulace vybrané geometrie ozáření ruky

Pro ověření správnosti nastavení vstupního souboru pro simulace na základě metody Monte Carlo byla uvažována geometrie, kdy ruka drží stříkačku naplněnou radiofarmakem, přičemž uvažovaná stříkačka byla bez ochranného stínění. Pro měření pomocí fantomu ruky držící stříkačku naplněnou ^{18}F bylo použito 9 pozic (pozice *C – K*, obrázek 12), kde byl pomocí TLD stanoven osobní dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$. Simulace pomocí metody Monte Carlo byla provedena ve stejných pozicích, kde byly na fantomu ruky (obrázek 17a) umístěny TLD, aby mohly být naměřené a vypočtené výsledky mezi sebou porovnány. Výsledky u geometrie, kdy je stříkačka držena mezi ukazovákem a prostředníkem, shrnuje tabulka 30.

Tabulka 30 Srovnání výsledků získaných měřením pomocí TLD a MCNP simulace [111]

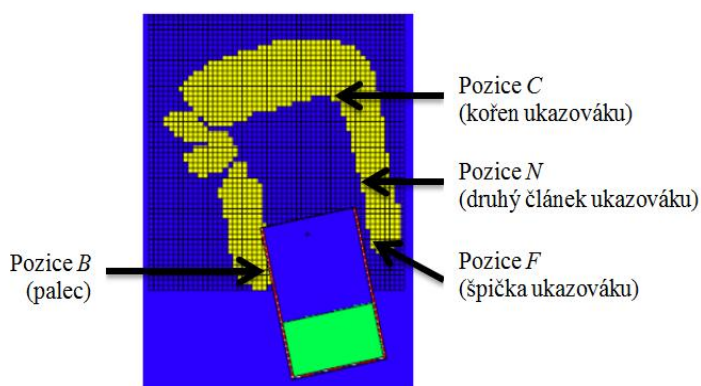
Pozice TLD a skórovacích bodů		TLD [mSv]	MCNP[mSv]	$\left(\frac{MCNP}{TLD} - 1\right) \cdot 100$
C	Kořen ukazováku	2,27	2,70	19 %
D	Kořen prostředníku	2,52	2,94	17 %
E	Kořen prsteníku	1,47	1,41	-4 %
F	Špička ukazováku*	4,84	4,57	-6 %
G	Špička prostředníku*	3,57	3,62	1%
H	Špička prsteníku*	1,93	2,06	7%
I	Špička ukazováku**	3,48	2,92	-16 %
J	Špička prostředníku**	2,94	2,27	-23 %
K	Špička prsteníku**	1,63	1,69	4%

*Dlaňová strana ruky, **hřbetová strana ruky (nehet)

Z tabulky 30 je zřejmá dobrá shoda simulovaných hodnot pomocí MCNP a hodnot měřených na pryskyřicovém fantomu ruky, která je v rámci 23 %.

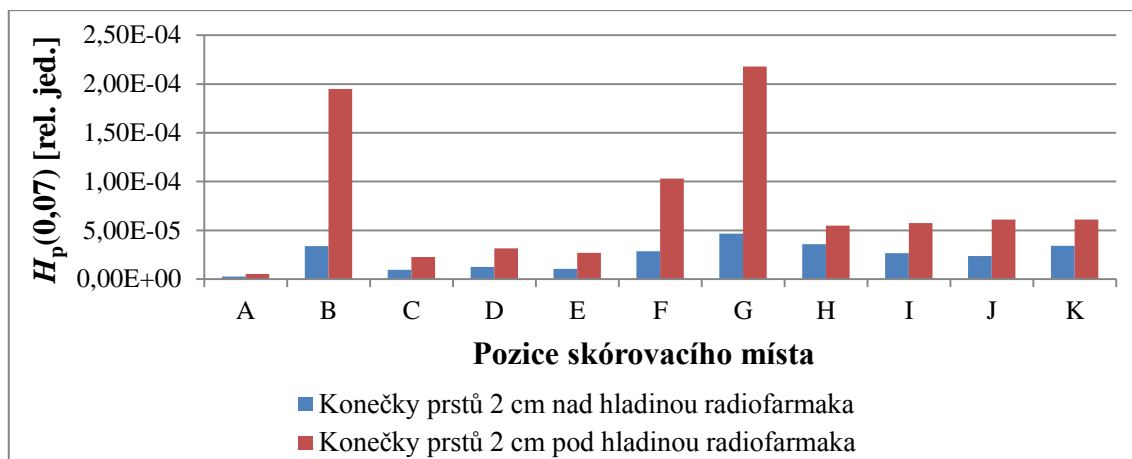
4.2.2 Výsledky simulace vybrané rizikové geometrie během manipulace s ^{131}I

Během experimentů na pracovišti poskytující terapii pomocí ^{131}I byla vybrána „riziková“ geometrie (přenos nádoby s radiofarmakem bez ochranného stínění), která byla následně simulována pomocí MCNP (obrázek 47).



Obrázek 47 Simulace držení kelímku s radiofarmakem 2 cm nad hladinou radiofarmaka $^{131}\text{I-NaI}$

Na obrázku 48 lze vidět rozdíl ozáření kůže ruky v jednotlivých pozicích A – K (viz obrázek 12) v případě, že je nádobka s roztokem $^{131}\text{I-NaI}$ držena 2 cm nad hladinou a 2 cm pod hladinou radiofarmaka.



Obrázek 48 Vliv uchopení kelímku s radiofarmakem značeným ^{131}I na ozáření ruky [112]

Z obrázku 48 lze vidět velký rozdíl mezi jednotlivými geometriemi držení kelímku s roztokem značeným ^{131}I , především v pozicích *B*, *F* a *G*. Pozice na konečcích prstů jsou stíněny stěnou kelímku, u zbylých pozic *C*, *D*, *E* lze snížit ozáření dodatečným stíněním (např. přidáním víčka).

Tabulka 31 dokumentu je vliv ozáření pozice *E* v případě použití 0,5 mm polyetylenem a bez něj.

Tabulka 31 Vliv použití 0,5 mm PE na ozáření kořenu prsteníku [112]

Poloha	Použití stínění v pozici <i>E</i>	Beta záření	Gama záření
		$H_p(0,07)$ [rel. jed.]	
Kořen prsteníku (poloha <i>E</i>)	Ne	5,01E-06	1,04E-05
	Ano	9,33E-07	1,02E-05

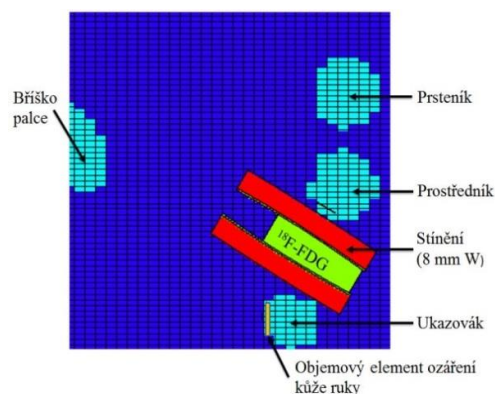
Pokud pracovník podává radiofarmakum bez použití stínění, je kořen prsteníku vystaven expozici ze záření gama i ze záření beta. V případě použití stínění 0,5 mm PE dojde u pozice *E* k poklesu ozáření z hlediska záření beta o pětinašobek (viz tabulka 31). Radiační zátěž v poloze *E*, která je nestíněná a stíněná, je u záření gama téměř stejná. [112]

4.2.3 Výsledky simulace lokální kontaminace ^{18}F

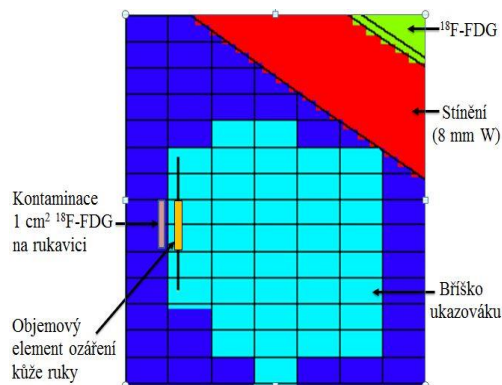
Aplikace pozitronového radiofarmaka může být prováděna v několika různých geometriích, např. držení stříkačky mezi palcem a ukazovákem nebo držení stříkačky mezi ukazovákem a prostředníkem.

Geometrie držení stíněné stříkačky s radiofarmakem značeným ^{18}F mezi ukazovákem a prostředníkem je znázorněna na obrázku 49. Bylo uvažováno stínění o tloušťce 8 mm wolframu.

Během aplikace radiofarmaka může dojít k případné kontaminaci radiofarmakem. Obrázek 50 ilustruje detail simulace v případě kontaminace ^{18}F o ploše 1 cm^2 na rukavici na bříšku ukazováku.



Obrázek 49 Geometrie držení stíněné stříkačky s radiofarmakem [113]



Obrázek 50 Znázornění kontaminace na bříšku ukazováku [113]

V tabulce 32 je shrnuto lokální ozáření kůže na bříšku ukazováku v důsledku kontaminace při situaci, kde je a není použito stínění 1 mm polyetylenů [113]

Tabulka 32 Lokální ozáření kůže na bříšku ukazováku v důsledku kontaminace ^{18}F [113]

Místo ozáření	Použití stínění (1 mm PE)	Typ záření		Poměr $H_p(0,07)$ pozitrony/fotony	Celkové ozáření smíšeným polem
		Fotony	Pozitrony		
Bříško ukazováku	Ne	0,045	5,03	112	5,08
	Ano	0,025	0,08	3,20	0,106

Pozitrony přispívají přibližně 112krát více k ozáření kůže ruky oproti příspěvku od anihilačního záření (viz tabulka 32). Při použití 1 mm stínění polyetylenem se poměr dávky od pozitronů vůči anihilačnímu záření sníží ze 112 na poměr 3,2 (v sumárním ozáření bříška fotony a pozitrony dochází k téměř 48 násobnému snížení) [113].

Na základě vypočtených výsledků (tabulka 32) se proto doporučuje použití rukavic, které jsou zesíleny o 1 mm ekvivalentu PE, především na bříškách prstů, kde se kontaminace vyskytuje nejčastěji.

4.3 Doporučení pro sledovaná pracoviště

Na základě řešení jednotlivých úkolů v rámci disertační práce se dospělo k některým konkrétním závěrům, které lze vyjádřit ve formě doporučení, která souvisí s monitorováním radiační zátěže rukou:

1. monitorování rukou pomocí 2 prstových dozimetrů z důvodu zjištění, která ruka je více ozářena;
2. sjednocení polohy umístění prstových dozimetrů;
3. použití jednotného korekčního faktoru pro vybraná pracoviště z hlediska sledovaných činností s vybraným radionuklidem.

Výsledky disertační práce naznačily, že zavedení korekčního faktoru umožní odhalení reálného překročení limitu ozáření H_T na kůži. Aby se snížila pravděpodobnost možného překročení limitu, může být v zásadě využito několik postupů, které vedou ke snížení ozáření rukou jednotlivých pracovníků:

1. inovace technologie;
2. organizace interních školení či kurzů zaměřených na seznámení se s novými metodami radiační ochrany při práci s radiofarmaky;
3. úprava pracovních postupů;
4. zvýšení nároků na školení pracovníků v oblasti radiační ochrany a ověřování jejich znalostí;
5. důslednější kontrola kontaminace po ukončení každé činnosti s radiofarmakem.

Při správném využití moderní technologie je prokázáno na základě výsledků této práce i jiných publikací snížení ozáření rukou pracovníků. Na druhou stranu mohou být kladeny na pracoviště při využití toho způsobu optimalizace radiační ochrany určité finanční nároky a to jak z hlediska zakoupení nového technologického vybavení, tak i ze strany případných stavebních úprav pracoviště.

Úprava pracovních postupů je často prvním krokem, který se aplikuje v případě, že je zapotřebí snížit ozáření rukou pracovníků (např. změna způsobu podání radiofarmaka). Tento způsob rovněž mnohdy přináší největší přínos.

V případě, že budou pro snížení radiační zátěže rukou zvoleny poslední dvě výše zmíněná opatření, nejsou na pracoviště kladeny v zásadě žádné finanční požadavky. Nároky jsou spíše soustředěny na jednotlivé pracovníky z hlediska jejich přístupu a dodržování vhodných pracovních postupů, což může být leckdy významný faktor, který ovlivní (sníží) velikost radiační zátěže rukou pracovníků.

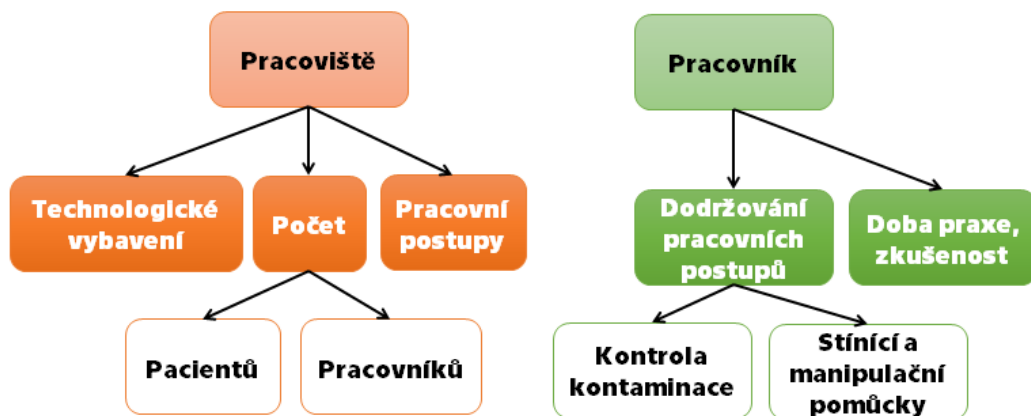
5 Diskuse

V medicíně se podrobí v Evropě každý rok diagnostickým a terapeutickým účelům přes 6 miliónů pacientů (95 % diagnostika, 5 % terapie), přičemž jeden z faktorů ovlivňující počet vyšetření a terapií provedených na pracovištích nukleární medicíny je vzrůstající počet instalovaných PET/CT systémů [114]. V rámci řešení disertační práce došlo v ČR k navýšení počtu PET pracovišť (v roce 2011 bylo v ČR celkem 6 pracovišť s PET, v roce 2018 vzrostl počet PET pracovišť na 14), z čehož je vidět progresse této metody a tedy i aktuálnost řešení problematiky radiační zátěže rukou při manipulaci s pozitronovými radiofarmaky.

5.1 Experimentální část

Disertační práce vycházela z předpokladu, že stejně jako v jiných publikacích, tak i na vybraných pracovištích monitorovaných v rámci disertační práce mohou existovat případy pracovníků na pracovištích nukleární medicíny, u kterých může dojít k překročení 3/10 limitu ozáření H_T kůže či limitu ozáření H_T kůže. Z tohoto důvodu byla provedena měření na vybraných pracovištích především s PET, kde je jako zdroj používáno radiofarmakum značené radionuklidem ^{18}F a dále pak na pracovišti poskytující terapii pomocí ^{131}I .

Na velikost ozáření má především vliv několik faktorů (obrázek 51), které můžou do určité míry ovlivnit pracoviště, ale zejména toto ozáření ovlivní postoj samotného pracovníka k radiační ochraně při práci se zdrojem záření (ochrana stíněním, vzdáleností a časem) a dodržování předepsaných pracovních postupů.



Obrázek 51 Faktory mající vliv na ozáření rukou pracovníků

V případě experimentů disertační práce se potvrdil podstatný vliv použití wolframového stínění stříkačky u přípravy i aplikace radiofarmaka, což je v souladu s publikacemi, které poukázaly na význam stínění nejen u ^{18}F [1, 35, 41 - 43], ale také u ^{90}Y [39, 40] nebo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [1]. V rámci disertační práce se vliv stínění projevil v případech, kdy někteří pracovníci přišli do styku s nestíněnou částí stříkačky s radiofarmakem, např. u přípravy radiofarmaka během nasazování jehly na stříkačku (viz obrázek 14a). V takovýchto případech může být doporučeno použití hliníkového stojanu, který sice nemá stínící účinky, ale slouží k napojení stříkačky na jehlu bez nutnosti manipulace jehly v prstech. Dalším možným důvodem zvýšeného ozáření konečků prstů během přípravy je přenos stříkačky s radiofarmakem umístěné ve stínění, kdy pracovník drží stříkačku palcem a ukazovákem v nestíněné části (obrázek 14b). V případě ^{131}I byly během měření rovněž vyzorovány úkony, během kterých se pracovník dotýkal konečky prstů nestíněné části zariadení. Jednalo se o situaci, kdy pracovník přenášel nádobu (kelímek) s radiofarmakem (obrázek 7a). V tomto případě lze doporučit např. použití manipulátoru. Dalším případem, kdy se pracovník dotýkal nestíněné části zariadení, byla manipulace s vialkou naplněnou radiofarmakem (obrázek 15b), během které nebyla použita pinzeta ani kleště.

Výsledky disertační práce i prací [47, 48, 63, 65, 73 – 75, 115] poukazují na přednost vyžití technologického vybavení oproti manuálnímu způsobu manipulace s radiofarmakem. Z naměřených výsledků v rámci disertační práce bylo zjištěno větší ozáření kůže ruky u pracovníků provádějících manuální aplikaci pozitronového radiofarmaka (přímo do žíly i s použitím kanyly a infuzní trubičky, (medián $0,64 \text{ mSv} \cdot \text{GBq}^{-1}$ – nebyly uvažovány nesystematické nestandardní úkony) oproti pracovníkům provádějících aplikaci pomocí aplikátoru (medián $0,15 \text{ mSv} \cdot \text{GBq}^{-1}$). V případě, že jsou použita automatická zařízení provádějící aplikaci radiofarmaka (tzv. aplikátory) nebo zařízení, která v sobě spojují dvě činnosti – natažení a aplikaci radiofarmaka (tzv. injektor), může dojít k výrazné redukci radiační zátěže rukou. Během automatického způsobu aplikace (aplikátory, injektor) je použita nejen ochrana časem (krátká manipulace se zariadením v ruce), ale i vzdáleností od ZIZ.

Porovnání radiační zátěže rukou pracovníků sledovaných v rámci disertační práce a zahraničních publikací je uveden v tabulce 33 (manuální způsob aplikace ^{18}F) a tabulce 34 (automatický způsob přípravy i aplikace radiofarmaka značeného ^{18}F).

Tabulka 33 Porovnání výsledků mezinárodních studií s výsledky disertační práce - manuální aplikace ^{18}F

Studie	Průměrné $H_p(0,07)$	
	Příprava	Aplikace
Disertační práce (2018, ČR)	$515 \pm 305 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$	$553 \pm 268 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1*}$
Merce (2011, více států) [45]	$770 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$	$710 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$
Covens (2010, Belgie) [47]	$483 \pm 356 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$	$334 \pm 153 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$

**Nebyly uvažovány nestandardní pracovní úkony*

V porovnání s jinými zahraničními pracemi (tabulka 33) se průměrné $H_p(0,07)$ u přípravy ^{18}F a aplikace ^{18}F pohybovalo na sledovaných pracovištích v ČR v podobných hodnotách jako u jiných publikací [45, 47]. Pracovní postupy aplikace radiofarmaka zahraničních publikací nelze porovnat s pracovními postupy na sledovaných pracovištích v ČR, neboť zahraniční publikace neuvádí, jakým způsobem byla prováděna manuální aplikace (zda byla či nebyla použita kanyla a infuzní trubička).

Tabulka 34 Porovnání výsledků mezinárodních studií s výsledky disertační práce - automatická aplikace ^{18}F

Studie	Technologie	Průměrné $H_p(0,07)$
Disertační práce (2018, ČR)	Aplikátor	$128 \pm 8 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$
Lecchi (2012, Itálie) [65]	Injektor	$3,8 \pm 2,1 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$
Covens (2010, Belgie) [47]	Injektor	$12 \pm 7 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$

Při srovnání automatické aplikace pozitronového radiofarmaka (tabulka 34) jsou průměrné hodnoty $H_p(0,07)$ naměřené v rámci disertační práce ve větších hodnotách než uvádí zahraniční práce [47, 65]. Pravděpodobný důvod větších hodnot je odlišné technologické vybavení, kdy sice zahraniční práce i výsledky disertační práce uvádí automatický způsob aplikace, ovšem v zahraničních publikacích měla pracoviště k dispozici injektor (od různých dodavatelů) a na pracovišti v ČR měli k dispozici automatický aplikátor. Samotná obsluha jednotlivých zařízení se liší, což může mít vliv na rozdílné hodnoty ozáření kůže ruky.

Dosažené výsledky v rámci disertační práce a výsledky evropského projektu ORAMED jsou uvedeny v tabulce 35.

Diskuse

Tabulka 35 Výsledky dosažené v rámci disertační práce s v rámci projektu ORAMED (^{18}F)

Parametr		Disertační práce	Projekt ORAMED [1]
Medián maximálního lokálního ozáření normalizovaného na 1 GBq	Příprava ^{18}F	0,43 mSv · GBq ⁻¹	1,20 mSv · GBq ⁻¹
	Aplikace ^{18}F	0,40 mSv · GBq ⁻¹	0,93 mSv · GBq ⁻¹
Překročení limitu ozáření H_T na 1 cm ² kůže*	Příprava ^{18}F	6 % ^{**}	40 %
	Aplikace ^{18}F	15 % ^{***}	23 %
Vliv doby praxe všech pracovníků manipulujících s ^{18}F		Statisticky významný rozdíl mezi začátečníkem a silně pokročilým Statisticky významný rozdíl mezi pokročilým a silně pokročilým	Statisticky nevýznamný rozdíl mezi začátečníkem a ostatními pracovníky
Dominance rukou		Statisticky nevýznamné	Statisticky významné ozáření u nedominantní ruky
Korelace maximálního ozáření v pozici F vůči ostatním polohám		Ano	Ano
Doporučené umístění prstového dozimetru		Druhý článek ukazováku dominantní ruky (pozice N)	Ukazovák nedominantní ruky (pozice C)
Hodnota korekčního faktoru		1,8	6

* uvažováno 1 000 pacientů/1 pracovníka, aktivita radiofarmaka 500 MBq na 1 úkon přípravy, aktivita radiofarmaka 400 MBq na 1 úkon aplikace

** jeden pracovník, u kterého nebyl v rámci 3 cyklů měření nalezen nestandardní pracovní úkon, ale jeho ozáření rukou bylo větší

*** dva systematicky nestandardní pracovníci

Z tabulky 35 lze vidět, že maximální lokální ozáření kůže ruky u pracovníků monitorovaných v rámci této práce je menší, což je pravděpodobně způsobeno zkvalitněním technologického vybavení pracovišť. Toto zjištění rovněž souvisí s menšími počty možných případů, u kterých je v rámci této práce odhadováno

překročení limitu ozáření. V případě této práce i projektu ORAMED mělo podstatný vliv na velikost ozáření použití stínění.

Porovnání lokálního ozáření kůže ruky během přípravy pozitronového radiofarmaka a roztoku $^{131}\text{I-NaI}$ nebylo v rámci projektu ORAMED provedeno. V rámci disertační práce bylo zjištěno statisticky významně větší lokální ozáření kůže ruky u manuální přípravy terapeutického radiofarmaka značeného ^{131}I oproti přípravě pozitronového radiofarmaka pomocí automatické rozplňovací stanice, což především mohl ovlivnit pracovní postup přípravy a technologické vybavení. V práci [116] bylo publikováno, že vhodnou volbou lékové formy radiofarmaka značeného ^{131}I lze ovlivnit velikost radiační zátěže personálu, kdy v případě přechodu z tekuté formy (roztok $^{131}\text{I-NaI}$) na kapslovou formu radiofarmaka došlo z hlediska průměrné měsíční hodnoty $H_p(10)$ k poklesu o více než 70 % a v případě prstových dozimetrů odhalilo snížení roční H_T o více než 75 %. Jiná práce uvádí, že i v případě přípravy ^{131}I lze využít dispenzní stanici, která sníží ozáření kůže rukou až 7x [50].

Srovnání radiační zátěže rukou pracovníků připravujících radiofarmakum značené ^{131}I monitorovaných v rámci disertační práce a zahraničních publikací je uveden v tabulce 36. Srovnání ozáření kůže ruky během podání tohoto terapeutického radiofarmaka není provedeno, neboť zahraniční publikace tyto hodnoty neuvádí.

Tabulka 36 Porovnání výsledků mezinárodních studií s výsledky disertační práce (příprava ^{131}I)

Studie	Průměrné $H_p(0,07)$
Disertační práce (2018, ČR)	$2\,205 \pm 1\,021 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$
Said (2016, Malajsie) [50]	$800 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1*}$
Pant (2006, Indie) [33]	$469,9 \pm 267 \mu\text{Sv} \cdot \text{GBq}^{-1}$

*Uvedená hodnota se týká pravé ruky jednoho pracovníka

Radiační zátěž rukou během přípravy radiofarmaka značeného ^{131}I je oproti zahraničním publikacím větší, což můžou do určité míry ovlivnit nastavené pracovní postupy na daných pracovištích (zahraniční publikace však podrobnosti týkající se pracovních postupů neuvádí).

Z hlediska aplikace radiofarmaka bylo nalezeno statisticky významně větší ozáření kůže ruky u pracovníků provádějících aplikaci pozitronového radiofarmaka oproti podání radiofarmaka značeného ^{131}I , což do značné míry ovlivnila geometrie

podávaného úkonu (aplikace pozitronového radiofarmaka stříkačkou či podání kelímku s radiofarmakem $^{131}\text{I-NaI}$).

Dalším důležitým faktorem, který má vliv na ozáření rukou je kontaminace rukou radiofarmakem [5, 54, 117]. Tato kontaminace radiofarmakem není mnohdy zjištěna ihned. Důvodem je, že se po ukončení činnosti s radiofarmakem neprovádí rutinně kontrola kontaminace pracovní plochy nebo rukou. Lokální kontaminace často vede k významnému ozáření kůže ruky, protože pokud není provedena dekontaminace, působí ozáření v důsledku této kontaminace až do „vymření“ radiofarmaka (v závislosti na poločasu přeměny použitého radionuklidu). Z tohoto důvodu by měla být kontrolována kontaminace pracovní plochy, rukou pracovníka a jeho jednorázových gumových rukavic. Např. monitorováním pracoviště každé dvě hodiny lze dosáhnout snížení relativní osobní kolektivní dávky vztažené na 1 GBq o 28 % [117]. V provedených měřeních disertační práce bylo u 37 monitorovaných pracovníků zjištěno 9 případů nestandardních pracovních úkonů, které byly nesystematické (u pracovníka se vyskytly náhodně) a během kterých byly naměřeny zvýšené hodnoty $H_p(0,07)$. Tyto zvýšené hodnoty ozáření mohly být způsobeny jak možnou kontaminací radiofarmakem, tak i dotykem s málo stíněným radiofarmakem. Pokud se u námi sledovaného pracovníka vezme v úvahu častější výskyt těchto možných případů „nestandardních pracovních úkonů“ a počet pacientů (nebo aktivita radiofarmaka, se kterou pracovník manipuluje) za rok, mohly by tyto „nestandardní pracovní úkony“ představovat významnou část ročního limitu H_T na 1 cm^2 kůže. V případě, že je zjištěna kontaminace radiofarmakem, mělo by být provedeno šetření její příčiny a následně udělána nápravná opatření (dekontaminace). Studie [54] uvádí, že v 70 % případů byla zjištěna kontaminace na nedominantní ruce. V rámci disertační práce byly „nestandardní pracovní úkony“ (mezi které se řadí i možná kontaminace) zjištěny především na dominantní ruce, což může být ovlivněno odlišnými pracovními úkony, které jsou prováděny během jednotlivých činností.

Další nespornou roli na velikosti ozáření kůže ruky může hrát doba praxe a zkušenost jednotlivců. V provedených měřeních disertační práce byly sledovány tři skupiny pracovníků (začátečník, pokročilý a silně pokročilý). Statisticky významný rozdíl byl nalezen mezi začátečníky a silně pokročilými (větší ozáření bylo zjištěno u silně pokročilých), stejně jako byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi pokročilými a silně pokročilými (větší ozáření bylo zjištěno u silně pokročilých). Na druhou stranu

však existují práce [118], které poukazují, že zkušení pracovníci obdrží nižší dávky, ale mnozí zkušení pracovníci mají hluboce zakořeněné nevhodné zvyky (začátečníci pracují naopak s větší opatrností).

V případech, kdy jsou zjištěny velké odchylky mezi naměřenými hodnotami $H_p(0,07)$ sledovaných pracovníků, je vhodné provést optimalizaci pracovních postupů, např. pomocí dodatečného školení [51]. Na pravidelné školení a vzdělávání pracovníků v oblasti radiační ochrany poukazují zahraniční publikace [57, 58, 119] i výsledky této práce [120, 121], protože následně se mohou pracovníci více „zajímat o své ozáření rukou“, což může vést ke snížení radiační zátěže.

Na případném překročení 3/10 limitu ozáření H_T na 1 cm² kůže či limitu ozáření H_T kůže má vliv i počet pacientů, kteří jsou na daném pracovišti vyšetřeni (léčeni), aktivita radiofarmaka zpracovaná na daném pracovišti za rok a taktéž počet pracovníků, kteří vykonávají tutéž činnost. V případě většího počtu pracovníků provádějících tutéž činnost je radiační zátěž rozložena mezi více osob, ovšem tento způsob snížení radiační zátěže rukou jednotlivců nemusí vést ke snížení kolektivní dávky.

V nově vydané legislativě (nový Atomový zákon [85] a Vyhláška o radiační ochraně [86]) došlo ke snížení limitu ozáření H_T na oční čočku. Vznikla tedy otázka, zda je na pracovištích NM stále limitujícím orgánem kůže na ruce. V průběhu řešení disertační práce byla navíc v roce 2017 provedena měření na 5 vybraných pracovištích nukleární medicíny s PET a ¹³¹I v ČR a na Slovensku s cílem stanovit radiační zátěž oční čočky a porovnat ji s radiační zátěží rukou. Tohoto měření oční čočky i kůže rukou se účastnilo 25 osob, které manipulovaly s radiofarmaky značeními ¹⁸F, ⁶⁸Ga, ¹¹C nebo ¹³¹I. Každá osoba byla změřena 1x. Z provedených experimentů nad rámec disertační práce se jeví na pracovištích nukleární medicíny ozáření kůže ruky stále jako limitující faktor [122 - 124].

Klíčovou roli hraje pravidelné monitorování rukou pomocí prstových dozimetrů. Mnohdy se monitorování rukou podceňuje a prstové dozimetry nejsou rutinně nošeny (v Evropě nosí prstový dozimetr méně než 10 % monitorovaných pracovníků [21]). V současné době se radiační zátěž rukou posuzuje na základě údaje z prstového dozimetru, který podává informaci o ozáření pouze v místě, kde je nošen. Z hlediska nošení prstových dozimetrů existují mezi pracovníky na pracovišti nukleární medicíny v ČR rozdíly a to jak z hlediska profesních skupin, které jsou prstovými dozimetry

vybaveny (farmaceut, lékař, radiologický asistent atd.), tak i mezi umístěním prstového dozimetru na prstě (kořen ukazováku, prostředníku, prsteníku nebo malíčku) [125]. Ve většině případů jsou však ruce pracovníků monitorovány na základě jednoho prstového dozimetru, který je nošen na ruce, u které se předpokládá větší ozáření (většinou dominantní ruce pracovníka). Z dosažených výsledků v rámci disertační práce však bylo zjištěno, že ne všichni pracovníci měli naměřeno lokální maximum na dominantní ruce a tudíž by se mohlo jevit jako vhodné řešení doporučit nejprve pracovníkům používání dvou prstových dozimetrů (pravá a levá ruka) než se stanoví, která ruka je více ozářena (např. používání dvou prstových dozimetrů po nějakou dobu a poté vyhodnotit, zda jsou zapotřebí pro monitorování rukou dva prstové dozimetry či jeden, případně na které ruce by měl být tento prstový dozimetr nošen).

Rovněž se v rámci disertační práce vyskytl případ, kdy pracovník uvedl, že je levák, ovšem stěžejní úkony během pracovní činnosti provádí pravou rukou (nedominantní) z důvodu přizpůsobení technologickému vybavení a uzpůsobení pracovnímu prostředí. Vliv technologického vybavení, které je často nastaveno pro pracovníky s dominantní rukou pravou, se projeví spíše u přípravy radiofarmaka (fixní poloha dávkového kalibrátoru, obsluha rozplňovací stanice atd.) než u aplikace (lékař provádějící manuální aplikaci si „přizpůsobí pracovní prostředí“ dle své potřeby). Z tohoto důvodu se jeví jako vhodnější stanovit umístění prstového dozimetru na základě velikosti ozáření dané ruky než na základě její dominance.

V provedených experimentech pomocí termoluminiscenčních dozimetrů umístěných na rukavicích, byla v disertační práci nově přidána poloha *N* (druhá část ukazováku) s cílem zjistit, zda by se mohlo jednat o polohu, kde je časté maximální ozáření z důvodu, že se tato pozice nachází blízko špičce ukazováku (předpokládané místo maxima). Umístění prstového dozimetru v pozici *N* by bylo možné rovněž z praktického hlediska (tato informace je potvrzena rovněž u jednoho z vedoucích PET pracovišť). Výsledky měření ukázaly, že existují pracovní úkony, u kterých je tato pozice zvýšeně ozářena a tudíž je vhodná pro umístění prstového dozimetru (prstový dozimetr je vhodné nosit v místě blízkém k poloze maxima ozáření).

U pozice N bylo na základě měření a pozorování během experimentů stanoveno několik výhod:

- pozice N je nejbližší předpokládanému místu maximálního lokálního ozáření (špička ukazováku);
- pozice N vykazovala dobrou korelaci s místem maximálního lokálního ozáření;
- v pozici N byla zjištěna lepší korelace oproti místům na kořenech prstů (ukazováku, prostředníku a prsteníku), kde jsou rutinně nošeny prstové dozimetrie;
- pozice N je vhodná také z praktického hlediska pro umístění prstového dozimetru.

V případě ^{131}I byla u pracovníků připravující roztok $^{131}\text{I-NaI}$ přidána také pozici na střed dlaně, s cílem zjistit, zda se může jednat o místo, které by bylo výrazně ozářeno během pracovního úkonu, který byl vybrán jako „rizikový“. Na základě měření bylo vidět, že u některých pracovníků byla dlaň více ozářena, přesto se však nejednalo o pozici, kde se rutinně nacházelo maximální lokální ozáření kůže ruky.

Stejně jako v jiných publikacích, byla i v rámci této práce zjištěna poloha s největším ozářením na konečku ukazováku, kde nejsou rutinně prstové dozimetrie nošeny, proto je vhodné zvážení použití korekčních faktorů. V rámci práce se potvrdila potřeba používání korekčních faktorů, přičemž hodnoty korekčních faktorů se mohou lišit mezi pracovníky provádějící odlišnou činnost (příprava, aplikace), ale i mezi pracovníky z odlišných pracovišť (z důvodu odlišného technologického vybavení či pracovních postupů) či dokonce mezi pracovníky provádějící tutéž činnost na jednom pracovišti. Názorů na zavedení použití korekčních faktorů v posledních letech přibývá. Projekt ORAMED doporučoval hodnotu korekčního faktoru 6 pro všechny pracovníky bez rozdílu prováděné činnosti [1]. Jiná práce doporučuje použití korekčního faktoru v závislosti na použití (nepoužití) stínění u vialek a stříkaček [126].

Z praktického hlediska není reálné, aby měl každý pracovník „svůj“ korekční faktor, který by byl stanoven na základě několikanásobného změření pracovníka pomocí TLD umístěných na rukavicích.

Použití korekčních faktorů pro jednotlivá pracoviště by bylo velice pracné zpracovávat v rámci celostátní služby osobní dozimetrie, proto je pro tuto variantu

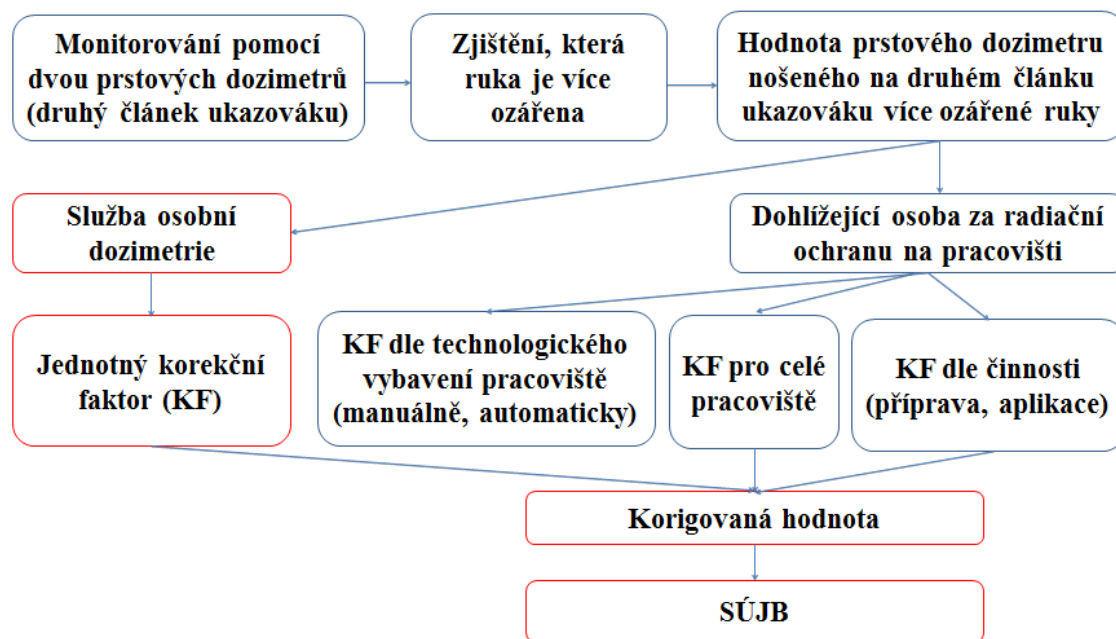
vhodnější jednotný korekční faktor. Ovšem se zde nabízí možnost, že by jednotlivá pracoviště v zastoupení dohlízející osoby za radiační ochranu používala korekční faktory sama na základě korekčních faktorů změřených pro dané pracoviště.

Další možností je použití korekčních faktorů, které by byly určeny pro jednotlivé činnosti (příprava, aplikace), kde by přepočítání mohlo být prováděno opět přes dohlízející osobu za radiační ochranu na daném pracovišti. Dohlízející osoba za radiační ochranu snadněji přiřadí dotyčného pracovníka dle profese (farmaceut, lékař) do patřičné skupiny, na kterou se korekční faktor vztahuje (korekční faktor pro přípravu a aplikaci).

Stejně tak by korekční faktory mohly být používány pro větší skupinu osob na základě technologického vybavení (přítomnost rozplňovací stanice radiofarmaka či aplikátoru radiofarmaka) či způsobu aplikace radiofarmaka (manuální způsob, automatický způsob), přičemž i zde by mohla případně dohlízející osoba za radiační ochranu provádět přepočítání pomocí příslušného korekčního faktoru.

Ve výše zmíněných případech by zodpovědná osoba zasílala korigované hodnoty ozáření příslušným orgánům.

Navržené postupy při zohlednění korekčních faktorů jsou na obrázku 52. Jako vhodnější přístup se však jeví použití jednotného korekčního faktoru, který bude na naměřené hodnoty z prstových dozimetrů aplikovat služba osobní dozimetrie (červená větev navrženého postupu na obrázku 52).



Obrázek 52 Možné postupy při zohlednění korekčního faktoru

V souvislosti s použitím korekčních faktorů by se mohlo rovněž jevit jako vhodné řešení sjednocení umístění polohy prstového dozimetru, tak jako je to v případě monitorování $H_p(10)$, kdy pracovníci nosí osobní dozimetr na levé horní části hrudníku. V rámci disertační práce nebyl nalezen statisticky významný rozdíl mezi dominantní a nedominantní rukou. Projekt ORAMED doporučil umístit prstový dozimetr na nedominantní ruku (1), ale na základě měření provedených v rámci disertační práce se ukázalo, že existují případy, kdy je více ozářena dominantní ruka. Aby bylo dosaženo konzervativního způsobu odhadu, jeví se jako vhodné řešení monitorování radiační zátěže rukou nejprve pomocí dvou prstových dozimetrů (pravá a levá ruka), zjistit, která ruka pracovníka je více ozářena a následně použít příslušný korekční faktor. V případě zavedení jednotné polohy prstového dozimetru a použití příslušného korekčního faktoru by mohl být jednodušeji proveden odhad maximálního lokálního ozáření kůže ruky. Publikace ICRP [127] doporučuje umístění prstového dozimetru na kořenu prostředního prstu s citlivou částí detektoru směrem do dlaně. Projekt ORAMED doporučuje polohu pro prstový dozimetr na kořenu ukazováku [1]. V rámci disertační práce byl taktéž vypočten korekční faktor pro sledované činnosti s vybranými radiofarmaky na vybraných pracovištích pro perspektivní novou pozici N (druhý článek prstu), který měl hodnotu 1,8.

V případě, že by byly v budoucnu přijaty jakékoliv korekční faktory, může být lépe odhaleno případné překračování limitu ozáření H_T na kůži. Podle příslušné vyhlášky [86] má držitel povolení z hlediska oznamovací povinnosti u případného překročení H_T na kůži neprodleně hlásit:

- a) ekvivalentní dávku 150 mSv na končetiny nebo kůži, dosaženou za monitorovací období nebo jednorázově, s vyhodnocením příčin takové situace a přijatými závěry [86];
- b) ekvivalentní dávku 300 mSv na končetiny nebo kůži, které byly dosaženy sečtením v jednotlivých monitorovacích obdobích, a to též v průběhu roku, s vyhodnocením příčin takové situace a přijatými závěry [86].

Držitel povolení k vykonávání činností v rámci expozičních situací proto určí pro účely monitorování monitorovací úroveň (MÚ) a postupy, které jsou aplikovány v případě jejich překročení. Hodnoty monitorovacích úrovní H_T na ruce se však mohou mezi jednotlivými pracovišti lišit. Pokud naměřené hodnoty pomocí prstového dozimetru pracovníka během monitorovacího období (1 měsíc) překročí jeho „obvykle“

naměřené hodnoty, mělo by být ze strany osoby dohlížející za radiační ochranu na daném pracovišti provedeno šetření příčin (např. zda nedošlo u pracovníka v rámci pracovního postupu k „nestandardnímu pracovnímu úkonu“). Neboť i když jsou výsledky monitorování radiační zátěže rukou pod hodnotou MÚ, pracoviště by se mělo zabývat a prozkoumávat případné další možnosti snížení těchto úrovní, i když nepřekračují vyšetřovací MÚ či limit ozáření.

5.2 Simulační část

V disertační práci bylo nejprve provedeno monitorování radiační zátěže rukou pracovníků pomocí TLD umístěných na rukavicích během sledovaných činností s vybranými radiofarmaky na několika pracovištích nukleární medicíny.

Následně byla použita simulační metoda Monte Carlo, díky které byl stanoven osobní dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$ ve vybraných „rizikových“ geometriích, se kterými se můžeme rutinně setkat při pracovních úkonech na pracovištích nukleární medicíny. U těchto simulovaných geometrií bylo poukázáno na vliv použití stínění během vytypovaných pracovních úkonů s radiofarmakem.

Již řada publikací poukázala na nesporný význam použití vhodného stínícího materiálu při manipulaci s radiofarmaky [1, 22, 56, 128]. Tato skutečnost se potvrdila také v rámci disertační práce a to nejen na základě naměřených hodnot $H_p(0,07)$ pomocí termoluminiscenčních dozimetrů umístěných na rukavicích, ale také na základě výsledků vypočtených pomocí simulační metody Monte Carlo. Výpočetní metoda Monte Carlo hraje významnou roli v případech, kdy se v závislosti na použitém radionuklidu zjišťuje (ověřuje) vhodná tloušťka a materiál stínění, který bude následně použit např. pro stříkačky nebo vialky s radiofarmaky.

První uvažovanou geometrií, která byla v rámci práce simulována, byl přenos nestíněné nádoby (kelímku) s radiofarmakem značeným ^{131}I , neboť byly během experimentů s TLD zjištěny situace, kdy pracovník manipuluje s nestíněným kelímkem, ve kterém je radiofarmakum (např. uchopení kelímku z důvodu promísení aktivity radiofarmaka a vody v kelímku, přenos kelímku s roztokem z měřidla aktivity radiofarmaka do stínění, podání kelímku s radiofarmakem pacientovi atd.). Při těchto úkonech mezi dlaní (pozice O) a hladinou radiofarmaka není žádná stínící vrstva. Vypočtené výsledky pomocí MCNP ukázaly, že při této geometrii úkonu jsou konečky

prstů ozářeny více než střed dlaně, což potvrdilo i většinu výsledků, které byly u sledovaných pracovníků naměřeny (z hlediska přípravy radiofarmaka byly pomocí TLD naměřeny lokální maxima ozáření nejčastěji v pozicích *H*, *J*, *K*, kdežto u pracovníků podávající radiofarmakum byla maximální lokální ozáření stanovena pomocí experimentů s TLD v pozicích *C*, *F* a *G*). Na základě výpočtu pomocí kódu MCNP byl proto navíc zkoumán vliv uchopení kelímku s radiofarmakem. Bylo zjištěno, že v případě, že je nádoba (kelímek) s radiofarmakem uchopena konečky prstů 2 cm pod hladinou radiofarmaka, jsou několikanásobně více ozářeny pozice *B* (špička palce), *F* (špička ukazováku) a *G* (špička prostředníku), než když je kelímek s radiofarmakem držen 2 cm nad hladinou roztoku. Pozice *B*, *F*, *G*, které byly při této geometrii na základě metody Monte Carlo, stanoveny jako místa s největším ozářením, odpovídají pozicím maximálního ozáření, které byly zjištěny především u pracovníků během podání ^{131}I . Pracovníci připravující radiofarmakum značené ^{131}I kromě přenosu kelímku s roztokem značeným ^{131}I provádí i další úkony (natažení radiofarmaka do stříkačky atd.), během kterých mohou být ozářeny i jiné pozice.

Pracovníci podávající radiofarmakum značené ^{131}I na sledovaném pracovišti rutinně nejsou vybaveni prstovými dozimetry, pracovníci připravující roztok značený ^{131}I nosili většinou prstový dozimetr na kořenu prsteníku (pozice *E*). Z tohoto důvodu byl pomocí metody Monte Carlo zkoumán vliv použití PE stínění pro tuto polohu *E*. Pomocí MCNP bylo zjištěno, že dodatečné stínění (víčko kelímku) materiálem o tloušťce 0,5 mm polyetylenu může snížit radiační zátěž z hlediska záření beta na kořenu prsteníku o pětinasobek oproti situaci, kdy toto stínění nebude použito.

Druhá geometrie, která byla v rámci disertační práce simulována, byla kontaminace na špičce ukazováku radiofarmakem značeným ^{18}F . Kontaminace má podstatný vliv na velikost ozáření kůže. Často bývá charakterizována jako lokální místo na konečcích prstů na dlaňové straně ruky [129]. Úplná dekontaminace je obtížná z důvodu podkožní absorpce, přičemž v důsledku nedostatečné dekontaminace může být překročen limit 500 mSv/rok [5].

V rámci práce byly na základě provedených měření pomocí TLD odhadovány případy, kdy se předpokládalo, že během experimentů mohlo dojít k potenciální kontaminaci (tzv. „nestandardní pracovní úkony“, mezi které se řadí také kontaminace). Pomocí výpočtu byla simulována situace, kdy je kontaminována špička prstu o ploše

1 cm² radiofarmakem značeným ¹⁸F. Bylo zjištěno, že pozitrony přispívají přibližně 112krát více k ozáření kůže ruky oproti příspěvku od fotonů anihilačního záření.

V práci proto byl pro tuto geometrii zkoumán dodatečný vliv stínění. Pomocí MCNP bylo vypočteno, že při použití 1 mm stínění polyetylenem se poměr dávky od pozitronů vůči anihilačnímu záření sníží z poměru 112 na poměr 3,2. Z tohoto důvodu bylo doporučeno použití rukavic, které jsou zesílené o 1 mm PE, především na bříškách prstů, kde se kontaminace vyskytuje nejčastěji.

Závěr

Výsledky disertační práce hodnotí radiační zátěž rukou pracovníků na vybraných pracovištích nukleární medicíny během přípravy a aplikace u vybraných radiofarmak. Výsledky práce poukazují na značný rozsah naměřených hodnot maximálního lokálního ozáření kůže v jednotlivých pozicích rukou monitorovaných pracovníků. Byla zjištěna korelace mezi místem maximálního lokálního ozáření kůže ruky a ostatními monitorovanými pozicemi. Na velikost maximálního lokálního ozáření kůže ruky mělo vliv několik vybraných faktorů, které byly v rámci práce sledovány. Z hlediska sledované činnosti a použitého radionuklidu bylo zjištěno statisticky významně větší ozáření u manuální přípravy ^{131}I oproti automatické přípravě pomocí rozplňovací stanice ^{18}F ($p < 0,001$), u aplikace bylo stanoveno statisticky větší ozáření u ^{18}F oproti ^{131}I ($p = 0,038$). U technologického vybavení jednotlivých pracovišť s pozitronovou emisní tomografií bylo určeno statisticky významně větší ozáření na pracovišti 1 oproti pracovišti 2 ($p = 0,002$) i oproti pracovišti 3 ($p = 0,006$). Z hlediska doby praxe pracovníků manipulujících s ^{18}F bylo zjištěno statisticky významně větší ozáření u kategorie silně pokročilý oproti kategorii začátečníků ($p = 0,012$) i oproti kategorii pokročilý ($p = 0,002$).

Ze všech sledovaných pracovníků manipulujících s ^{18}F nebo ^{131}I bylo odhadováno, že může dojít přibližně v 5 % případů k překročení limitu ozáření H_T kůže (neuvažovaly se nesystematické nestandardní úkony). Z tohoto důvodu byla navržena možná opatření radiační ochrany vedoucí ke snížení radiační zátěže kůže na rukách.

V práci se potvrdila potřeba používání korekčních faktorů. Rovněž je zde navrženo sjednocení polohy prstového dozimetru na druhém článku ukazováku (pozice N) a přijetí korekčního faktoru pro sledované činnosti s vybranými radiofarmaky. Též je zde uvedena metodika, jakým způsobem tyto korekční faktory stanovit.

U vybraných rizikových úkonů byla použita výpočetní metoda Monte Carlo pro stanovení ozáření v lokálním bodě a vybraných pozicích na povrchu ruky. U těchto geometrií byl zkoumán vliv dodatečného stínění.

Výsledky práce mohou najít uplatnění v radiační technologii, ve specifických oblastech biomedicínského inženýrství, kde se pracuje s otevřenými zářiči, zejména s ohledem na zajištění adekvátní radiační ochrany.

Přínosy práce

- zhodnocení radiační zátěže kůže ruky pracovníků manipulujících s vybranými radiofarmaky na vybraných pracovištích;
- provedení MC simulací vybraných úkonů a stanovení vlivu dodatečného stínění;
- potvrzení potřeby používání korekčních faktorů pro pracoviště s radiofarmaky značenými ^{18}F a ^{131}I ;
- určení hodnot korekčních faktorů pro sledované skupiny pracovníků na vybraných PET pracovištích (jen pro činnosti s radiofarmaky značenými ^{18}F);
- určení hodnot korekčních faktorů pro sledované skupiny pracovníků na monitorovaném pracovišti poskytující terapii ^{131}I (pouze pro činnosti s radiofarmaky značenými ^{131}I);
- navržení sjednocení polohy prstového dozimetru (nová perspektivní poloha);
- zjištění případů „nestandardní pracovních úkonů“, které mohou vést při opakovaném výskytu k případnému překročení limitu ozáření;
- podklad pro optimalizaci radiační ochrany na jednotlivých pracovištích;
- průběžné publikování dosažených výsledků, díky kterým docházelo k seznámení odborníků s průběžnou situací radiační zátěže rukou v ČR (resp. i na Slovensku a v dalších zemích).

Citovaná literatura

- [1] **ORAMED.** *Optimization of Radiation Protection of Medical Staff: Extremity Dosimetry in Nuclear Medicine. EURODAS Report 2012-2.* Braunschweig : EURADOS, 2012. stránky 133-177. ISBN 978-3-943701-01-2.
- [2] **Dylevský, I.** *Funkční anatomie.* Praha : Grada Publishing, a.s., 2009. stránky 507 - 509. ISBN 978 - 80 - 247 - 3240 - 4.
- [3] **Čihák, R.** *Anatomie 3 - periferní nervový systém, kůže a kožní orgány, smyslové orgány.* 3. upravené a doplněné vydání. Praha : Grada Publishing, a.s., 2016. stránky 629 - 655. Sv. vazek III. ISBN 978 - 247 - 5636 - 3.
- [4] **Hanzlová, J., Hemza, J.** Kůže – cutis a její deriváty. *Základy anatomie.* [Online] Fakulta sportovních studií, Masarykova univerzita, 2013. [Citace: 8. 8 2018.] https://is.muni.cz/do/fsps/e-learning/zaklady_anatomie/zakl_anatomieIII/pages/kuze.html.
- [5] **Covens, P., Berus, D., Caveliers, V., Struelens, L., Vanhavere, F., Verellen, D.** Skin Dose Rate Conversion Factors after Contamination with Radiopharmaceuticals: Influence of Contamination Area, Epidermal Thickness and Percutaneous Absorption. *Journal of Radiological Protection.* 33, 2013, stránky 381 - 393.
- [6] **ICRP.** The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37.* 2007, Sv. 2 (4).
- [7] **SÚJB.** Stručný přehled biologických účinků záření. *Státní ústav pro jadernou bezpečnost.* [Online] [Citace: 10. 8 2018.] <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologickyh-ucinku-zareni/>.
- [8] **Ullmann, V.** Biologické účinky ionizujícího záření. *Astronuklfyzika.* [Online] [Citace: 10. 8 2018.] <http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>.
- [9] **IAEA.** *Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students.* Vienna : IAEA, 2014. str. 682. ISBN 978–92–0–131010–1.
- [10] **Sabol, J., Hudzietzová, J.** Současné problémy kvantifikace ozáření osob pro potřeby radiační ochrany. *Bezpečnost jaderné energie.* 3/4, 2013, Sv. 21 (59), stránky 97 - 109.
- [11] **SÚJB.** *Doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany 2007 - Publikace ICRP 103.* Praha : SÚJB, 2009.
- [12] **Daničková, K., Chmelová, D., Suchánek, V., Pádr, R., Roček, M.** Radiační zátěž u intervenčních výkonů při použití CT fluoroskopie - první zkušenosti. *Česká radiologie.* 2016, Sv. 70 (2), stránky 93 - 99.
- [13] **Ullmann, V.** Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. *Astronuklfyzika.* [Online] [Citace: 12. 8 2018.] <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>.
- [14] **Navrátil, L., et al.** Termoluminiscenční dozimetrie. *Radiobiologie.* [Online] Česká vysoké učení technické v Praze: Fakulta biomedicínského inženýrství. [Citace: 12. 8 2018.] <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/164.html>.
- [15] **SÚJB.** Doporučení. *Radiační ochrana - Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření - část I. - zevní ozáření.* Praha : SÚJB, 2007.
- [16] **VF, a.s.** Prstový dozimetr TLD. *Dozimetrie.* [Online] [Citace: 12. 8 2018.] <http://www.dozimetrie.cz/data/files/b-70-a0004c-110511-dozimetr-tld-55.pdf>.

- [17] **Lin, J.P., Chu, T.C., Lin, S.Y., Liu, M.T.** Skin Dose Measurement by Using Ultrathin TLDs. *Applied Radiation and Isotopes*. 55 (3), 2001, stránky 383 - 391.
- [18] **Stathakis, S., Li, J.S., Paskalev, K., Yang, J., Wang, L., Ma, C.M.** Ultra-thin TLDs for Skin Dose Determination in High Energy Photon Beams. *Physics in Medicine & Biology*. 51 (14), 2006, stránky 3549 - 3567.
- [19] **Bilski, P., Budzanowski, M., Olko, P., Christensen, P.** Properties of Different Thin - Layer LiF:Mg, Cu, P TL Detectors for Beta Dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996, Sv. 66 (1 - 4), stránky 101 - 104.
- [20] **Ginjaume, M., Pérez, S., Duch, M. A., Ortega, X.** Comparison of TLD-100 and MCP-Ns for Use as an Extremity Dosemeter for PET Nuclear Medicine staff. *Radiation Measurements*. 43 (2 - 6), 2008, stránky 607 - 610.
- [21] **Ginjaume, M., Pérez, S., Ortega, X, Duch, M. A.** Comparison of Two Extremity Dosimeters Based on LiF:Mg, Cu, P Thin Detectors for Mixed Beta - Gamma Fields. *Radiation Protection Dosimetry*. 2006, Sv. 120 (1 - 4), stránky 316 - 320.
- [22] **Carnicer, A., Ginjaume, M., Duch, M.A., Vanhavere, F., Sans Merce, M., Baechler, S., Barth, I., Donadille, L., Ferrari, P., Fulop, M., Gualdrini, G., Krim, S., Ortega, X., Rimpler, A., Ruiz, N., Olko, P.** The Use of Different Types of Thermoluminescent Dosimeters to Measure Extremity Doses in Nuclear Medicine. *Radiation Measurements*. 2011, Sv. 46, stránky 1835 - 1838.
- [23] **El-Faramawy, N. A., Goksu, H. Y., Panzer, W.** Thermoluminescence Dosimetric Properties of New Thin Beta Detector (LiF: Mg, Cu, P; GR-200F) in Comparison with Highly Sensitive Al₂O₃:C Beta Dosimeters. *Journal of Radiological Protection*. 2004, Sv. 24, stránky 273 - 282.
- [24] **Carinou, E., Donadille, L., Ginjaume, M., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M., Vanhavere, F., Denoziere, M., Bordy, M. J., Itie, C., Covens, P.** Intercomparison on Measurements of the Quantity Personal Dose Equivalent, Hp(0,07), by Extremity Ring Dosimeters in Medical Fields. *Radiation Measurements*. 2008, Sv. 43, stránky 565 - 570.
- [25] **Sylvain, I., Bok, B.** Radiation Exposure in Nuclear Medicine: Real-Time Measurement. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2002, Sv. 45, stránky 111 - 114.
- [26] **Whitby, M., Martín, C. J.** Investigation Using an Advanced Extremity Gamma Instrumentation System of Options for Shielding the Hand during the Preparation and Injection of Radiopharmaceuticals. *Journal of Radiological Protection*. vol. 23 (1), 2003, stránky 79 - 96.
- [27] **Martin, C. J., Whitby, M., Hilditch, T., Anstee, D.** *Use of an Electronic Finger Dosimeter in Optimisation of Finger Doses*. Madrid : Proceedings of the 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 2002.
- [28] **Ahmed Memon, S., Ahmed Laghari, N., Ahmad Cheema, A.** Evaluation of Radiation Workers' Occupational Doses Working at NIMRA Jamshoro. *Journal of Liaquat University of Medical and Health Sciences*. 2012, Sv. 11(3), stránky 190 - 194.
- [29] **Kopec, R., Budzanowski, M., Budzinska, A., Czepcynski, R., Dzuik, M., Sowinski, J., Wyszomirska, A.** On the Relationship Between Whole Body, Extremity and Eye Lens Doses for Medical Staff in the Preparation and Application of

- Radiopharmaceuticals in Nuclear Medicine. *Radiation Measurements*. 2011, Sv. 46, stránky 1295 - 1298.
- [30] **Sudbrock, F., Uhrhan, K., Rimpler, A., Schicha, H.** Dose and Dose Rate Measurements for Radiation Exposure Scenarios in Nuclear Medicine. *Radiation Measurements*. 2011, Sv. 46, stránky 1303 - 1306.
- [31] **Tandom, P., Venkatesh, M., Bhatt, B. C.** Extremity Dosimetry for Radiation Workers Handling Unsealed Radionuclides in Nuclear Medicine Department in India. *Health Physics*. 2007, Sv. 92 (2), stránky 112 - 118.
- [32] **Covens, P., Berus, D., Buis, N., Clerinx, P., Vanhavere, F.** Personal Dose Monitoring in Hospitals: Global Assessment, Critical Applications and Future Needs. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007, Sv. 124 (3), stránky 250 - 259.
- [33] **Pant, G. S., Sharma, S. K., Rath, G. K.** Finger Doses for Staff Handling Radiopharmaceuticals in Nuclear Medicine. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2006, Sv. 34, stránky 169 - 173.
- [34] **EURODAS. CONRAD.** *Radiation Protection Dosimetry in Medicine Report of the Working Group 9 of the European Protection Dosimetry Group (EURODAS) - CONRAD EC N FP - 12684*. France : autor neznámý, 2009. EURADOS. ISSN 0429-3460.
- [35] **Vanhavere, F., Carinou, E., Donadille, L., Ginjaume, M., Jankowski, J., Rimpler, A., Merce, S. M.** An Overview on Extremity in Medical Applications. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 129 (1 - 3), 2008, stránky 350 - 355.
- [36] **Donadille, L., Carinou, E., Ginjaume, M., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M., Vanhavere, F.** An Overview of the Use of Extremity Dosimeters in Some European Countries for Medical Applications. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 131 (1), 2008, stránky 62 - 66.
- [37] **Wrzesien, M., Olszewski, J., Jankowski, J.** Hand Exposure to Ionising Radiation of Nuclear Medicine Workers. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 130 (3), 2008, stránky 325 - 330.
- [38] **Ginjaume, M., Carinou, E., Donadille, L., Jankowski, J., Rimpler, A., Sans Merce, M., Vanhavere, F., Denoziere, M., Daures, J., Bordy, J. M., Itie, C., Covens, P.** Extremity Ring Dosimetry Intercomparison in Reference and Workplace Field. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 131 (1), 2008, stránky 67 - 72.
- [39] **Rimpler, A., Barth, I., Baum, R. B., Senfleben, S., Gerowski, L.** Beta Radiation Exposure of Staff During and after Therapies with ⁹⁰Y-labelled Substances. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 131 (1), 2008, stránky 73 - 79.
- [40] **Rimpler, A., Bath, I.** Beta Radiation Exposure of Medical Staff and Implications for Extremity Dose Monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 125 (1 - 4), 2007, stránky 335 - 339.
- [41] **Struelens, L., Krim, S., Vanhavere, F.** Extremity Doses of Medical Staff for Complex Interventional Procedures and an Nuclear Medicine ExDos. *Extremity Dosimetry in Nuclear Medicine. Final Report 2010*. Mol : Belgian Nuclear Research Centre, 2010. stránky 31 - 62. ISBN 978-3-943701-01-2.
- [42] **Kemerink, G. J., Vanhavere, F., Barth, I., Mottaghy, F. M.** Extremity Doses of Nuclear Medicine Personnel: A Concern. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. vol. 39, 2012, stránky 529 - 532.

- [43] **Vanhavere, F.** *Assesing and Reducing Exposure to Nuclear Medicine Staff*. Bonn : CN 192 International Conference on Radiation Protection for Medical Staff - Setting the Scene for the Next Decade, 3 - 7 December 2012.
- [44] **Vanhavere, F., Carinou, E., Gualdrini, G., Clairand, I., Sans Merce, M., Ginjaume, M.** The ORAMED Project: Optimisation of Radiation Protection for Medical Staff. *IFMBE Proceedings*. vol. 25 (3), 2009, stránky 470 - 473.
- [45] **Sans Merce, M., Ruiz, N., Barth, I., Carnicer, A., Donadille, L., Ferrarri, P., Fulop, M., Ginjaume, M., Gualdrini, G., Krim, S., Ortega, X., Rimpler, A., Vanhavere, F., Baechler, S.** Extremity Exposure in Nuclear Medicine: Preliminary Results of a European Study. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 144 (1 - 4), 2011, stránky 515 - 520.
- [46] **Donadille, L., Baechler, S., Barth, I., Carnicer, A., Ferrari, P., Fulop, M., Ginjaume, M., Gualdrini, G., Krim, S., Mariotti, F., Ortega, X., Rimpler, A., Ruiz, N., Sans Merce, M., Vanhavere, F.** *Extremity Exposure in Nuclear Medicine: Work Page 4 of the Project*. Barcelona : Workshop on Optimization of Radiation Protection of Medical Staff, 20 - 22 January 2011.
- [47] **Covens, P., Berus, D., Vanhavere, F., Caveliers, V.** The Introduction of Automated Dispensing and Injection During PET Procedures: A Step and the Optimisation of Extremity Doses and Whole-body Doses of Nuclear Medicine Staff. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 140 (3), 2010, stránky 250 - 258.
- [48] **Guillet, B., Quentin, P., Waultier, S., Bourrelly, M., Pisano, P., Mundler, O.** Technologist Radiation Exposure in Routine Clinical Practice with 18F-FDG PET. *Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2005, Sv. 33 (3), stránky 175 - 179.
- [49] **Stritt, N., Linder, R.** Measures Taken by the Supervisory Authority to reduce Extremity Doses in Nuclear Medicine Facilities in Switzerland. *Radiation Measurements*. 2011, Sv. 46, stránky 1315 - 1320.
- [50] **Said, M. A., Ashhar, N., Suhaimi, N. E. F., Zainon, R.** A Simple Low - cost of Liquid I-131 for Routine Radiopharmaceutical Dispensing at Nuclear Medicine Department, Institut Kanser Negara. *AIP Conference Proceedings*. 2016, Sv. 1704 (1). Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4940071>.
- [51] **Kaljevic, J., Stankovic, K., Stankovic, J., Ciraj -Bjelac, O., Arandjic, D.** Hand Dose Evaluation of Occupationally Exposed Staff in Nuclear Medicine. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016, Sv. 170 (1 - 4), stránky 292 - 296.
- [52] **Carnicer, A., Baechler, S., Barth, I., Donadille, L., Ferrari, P., Fulop, M., Ginjaume, G., Krim, S., Ortega, X., Rimpler, A., Lopez, N. R., Sans Merce, M., Vanhavere, F.** *Extremity Exposure in Diagnostic NM with 18F and 99mTc Labelled Radiopharmaceuticals*. Barcelona : Workshop on Optimization of Radiation protections of Medical Staff, 20 - 22 January 2011.
- [53] **Rimpler, A., Barth, I., Ferrari, P., Baechler, S., Carnicer, A., Donadille, L., Fulop, M., Ginjaume, M., Mariotti, M., Sans Merce, M., Gualdrini, G., Krim, S., Ortega X., Ruiz, N., Vanhavere, F.** *Extremity Exposure in Nuclear Medical Therapy with 90Y Labelled Substances*. Barcelona : Workshop on Optimization of radiation Protection of Medical Staff, 20 - 22 January 2011.
- [54] **Covens, P., Berus, D., Caveliers, V., Struelens, L., Verrelen, D., Fulop, M., Mariotti, M., Gualdrini, G., Ortega, X., Vanhavere, F.** *The Contribution of Skin*

- Contaminations Dose to the Total Extremity Dose of Nuclear Medicine Staff: First Results of an Intensive Survey*. Barcelona : Workshop on Optimization of Radiation Protection of Medical Staff, 20 - 22 January 2011.
- [55] **CORDIS**. Final Report Summary - ORAMED (Optimization of radiation protection of medical staff). *European Commission*. [Online] [Citace: 22. 7 2018.] https://cordis.europa.eu/result/rcn/55187_en.html.
- [56] **Sans Merce, M., Ruiz, N., Barth, I., Carnicer, A., Donadille, L., Ferrari, P., Fulop, M., Ginjaume, M., Gualdrini, G., Krim, S., Mariotti, F., Ortega, X., Rimpler, A., Vahavere, F., Baechler, S.** Recommendation to Reduce Hand Exposure for Standard Nuclear Medicine Procedures. *Radiation Measurements*. 46, 2011, stránky 1330 - 1333.
- [57] **Sans Merce, M., Ginjaume, M.** Training for Medical Staff Involved in Nuclear Medicine. *ORAMED*. [Online] [Citace: 20. 7 2018.] <http://www.oramed-fp7.eu/en/Training%20material>.
- [58] **IAEA**. Training Material. *IAEA*. [Online] [Citace: 20. 7 2018.] https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/AdditionalResources/Training/1_TrainingMaterial/NuclearMedicine.htm.
- [59] **Delacroix, D., Guerre, J. P., Leblanc, P., Hickman, C.** *Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook*. druhá . místo neznámé : Nuclear Technology Publishing, 2002. str. 168. ISBN 1 870965 87 6.
- [60] **Berus, B., Covens, P.** Monthly Radiation Protection Training of Workers: An Evaluation of Two Years Operational Practice. *Radiation Measurements*. 2011, Sv. 46, stránky 131 - 1323.
- [61] **Covens, P., Berus, D., Caveliers, V., Struelens, L., Verellen, D.** The Contribution of Skin Contamination Dose to the Total Extremity Dose of Nuclear Medicine Staff: First Results of an Intensive Survey. *Radiation Measurements*. 46, 2011, stránky 1291 - 1294.
- [62] **Svegborn, S. L.** External Radiation Exposure of Personnel in Nuclear Medicine from ¹⁸F, ^{99m}Tc and ¹³¹I with Special Reference to Finger, Eyes and Thyroid. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 149 (2), 2012, stránky 196 - 206.
- [63] **Montgomery, A., Anstee, D. E., Martin, C. J., Hilditch, E. T.** Reducing in Finger Doses for Radiopharmaceutical Dispensing Afforded by a Syringe Shielded and a Automatic Dose Dispenser. *Nuclear Medicine Communication*. vol. 20 (2), 1999, stránky 189 - 194.
- [64] **Whitby, M., Martin, C. J.** A Multi-centre Study of Dispensing Methods and Hand Doses in UK Hospital Radiopharmacies. *Nuclear Medicine Communications*. 2005, Sv. 26, stránky 49 - 60.
- [65] **Lecchi, M., Luciagnani, G., Maioli, C.** Validation of a New Protocol for ¹⁸F-FDG Infusion Using an Automatic Combined Dispenser and Injection System. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. vol. 39, 2012, stránky 1720 - 1729.
- [66] **Ferrari, P., Sans Merce, M., Carnicer, A., Donadille, L., Fulop, M., Ginjaume, C., Gualdrini, G., Mariotti, F., Riuz, N.** Min Results of the Monte Carlo Studies Carried out for Nuclear Medicine Practices within the ORAMED Project. *Radiation Measurements*. 46, 2011. pp. 1287 - 1290.

- [67] **Ilas, D., Eckerman, K.** Monte Carlo Assessments of Absorbed Doses to the Hands of Radiopharmaceutical Workers Due to Photon Emitters. *Nuclear Technology*. 2009, Sv. 168.
- [68] **Blunck, Ch., Becker, F., Hegenbart, L., Heide, B., Schimmelpfeng, J., Urban, M.** Radiation Protection in Inhomogeneous Beta-Gamma Fields and Modelling of Hand Phantoms with MCNPX. *Radiation Protection Dosimetry*. 134 (1), 2009, stránky 13 - 22.
- [69] **Blunck, Ch., Becker, F., Urban, M.** Simulation o Beta Radiator Handling Procedures in Nuclear Medicine by Means of a Moveable Hand Phantom. *Radiation Protection Dosimetry*. 144 (1 - 4), 2011, stránky 497 - 500.
- [70] **Becker, F., Blunck, Ch.** Investigation of Radiation Exposure of Medical Staff: Measurements Supported by Simulations with an Articulated Hand Phantom. *Radiation Measurements*. 46, 2011, stránky 1299 - 1302.
- [71] **Salessess, F., Perez, P., Maillard A. E., Blanchard, J., Mallard, S., Bordeneva, L.** Effect of dosimeter's position on occupational Radiation Extremity dose Measurement for Nuclear Medicine Workers during 18F-FDG Preparation fo PET/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging Physics*. 2016, Sv. 3 (16).
- [72] **Wrzesien M., Albiniaak, L.** Hand Exposure of Workers in 18F-FDG Production Centre. *Journal of Radiological Protection*. 2016, Sv. 36, stránky 67 - 76.
- [73] **Sánchez, M. R., Vano, E., Fernández, J. M, Ginjaume, M., Carreras, L.** Evaluation of an Automated FDG Dose Infuser to PET-CT Patients. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015, Sv. 165 (1 - 4), stránky 457 - 460.
- [74] **Antic, V., Ciraj-Bjelac, O., Stankovic, J., Arandjic, D., Todorovic, N., Lucic, S.** Radiation Exposure to Nuclear Medicine Staff Involved in PET/CT Practice in Serbia. *Radiation Protection Dosimetry*. vol. 162 (4), 2014, stránky 577 - 585.
- [75] **O'Doherty, J., Woods, E., Modde, L., Mackewn, J.** Validation of an Automated Dose-Dispensing System for 18F-FDG Administrations and Associated Reduction in Operator Extremity Dose. *Nuclear Medicine Communications*. vol. 35(2), 2014, stránky 151 - 159.
- [76] **Hušák, V., Havlík, J.** Radiační zátěž rukou při práci s generátory 99Mo-99mTc prstovými dozimetry ÚVVVR. *Jaderná energetika*. 1980, Sv. 26 (12), stránky 465 - 466.
- [77] **Hušák, V., Ptáček, J., Mysliveček, M.** Radiační ochrana pracovníků a obyvatelstva při léčbě radiofarmaky značenými otevřeným zářičem ytrem-90. *Česká radiologie*. 59 (4), 2005, stránky 299 - 235.
- [78] **Hušák .V, Ptáček J., Drymlová J., Pašková Z.** Radiační zátěž rukou pracovníků v nukleární medicíně připravujících radiofarmaka se zářiči gama včetně pozitronového zářiče 18F. *Česká radiologie*. 61 (1), 2007, stránky 80 - 84.
- [79] **Berus, D., Covens, P., Buls. N. et al.** Extremity Doses of Workers in Nuclear Medicine: Mapping Hand Doses in Function of Manipulation. *Congress of IRPA, Madrid*. 2004.
- [80] **Barth, I., Rimpler, A., Mielcare, J.** Beta - Radiation Exposure of Medical Personnel. *Congress of IRPA, Madrid*. 2004.

- [81] **Janeba, D., Heřmanská, J., Bělohlávek, O.** Personal Dosimetry in the PET Centre Prague. *Nuclear Medicine Review*. 2001, Sv. 4 (2), stránky 105 - 107.
- [82] **Pekárek, J., Tydláčková, H.** Příspěvek k realizaci individuální přípravy radiofarmak. *Česká a slovenská farmacie*. 2008, Sv. 57 (3), str. 145.
- [83] **Hušák, V., Ptáček, J.** Přehled a hodnocení profesionální radiační zátěže a ochranných opatření v nukleární medicíně v České republice v roce 2003. Olomouc : Zpráva pro SÚJB Praha podle smlouvy u objednavatele 164/04/05, 2005.
- [84] **Hušák, V., Ptáček, J., Petrová, K., Pašková, Z., Mysliveček, M.** Radiation exposure of Nuclear Medicine workers in the Czech Republic in 2003 and its Relation to Various Factors - Results of Questionnaire Survey. Athens : Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine, 30 September - 4 October 2006.
- [85] **ČR.** Zákon č. 263/2016 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů v platném znění. 2016.
- [86] **SÚJB.** 422/2016 Sb. – Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. Praha : SÚJB, 2017.
- [87] **Bělohlávek, O.** Potřeba PET/CT. *Česká společnost nukleární medicíny České lékařské společnosti J. E. Purkyně*. [Online] [Citace: 19. 7 2018.] <http://csnm.cz/article/show/aboutDomain/pet-ct-need>.
- [88] **SÚJB.** *Požadavky SÚJB při provádění terapie onemocnění štítné žlázy radiojódem na pracovištích nukleární medicíny*. Praha : SÚJB, 2000.
- [89] **IAEA.** Live Chart of Nuclides. *Nuclear Data Section*. [Online] IAEA, 2009 - 2018. [Citace: 19. 8 2018.] <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
- [90] **Ullmann, V.** Tabulka nejčastěji používaných radionuklidů. *Astronuklfyzika*. [Online] [Citace: 20. 7 2018.] <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>.
- [91] **MOTOL, FN.** Lůžkové oddělení Fakultní nemocnice v Motole. [Online] [Citace: 8. 8 2018.] <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospale/klinika-nuklearnimediciny-a-endokrinologie-uk-2-1/luzkove-oddeleni/>.
- [92] **Fulop, M.** Osobní sdělení. *Termoluminiscenční dozimetry*. Bratislava : SZU v Bratislavě, 2018.
- [93] **Carinou, E., Askounis, P., Dimitropoulou, F., Kiranos, G., Kyrgiakou, H., Nirgianaki, E., Papadomarkaki, E., Kamenopoulou, V.** re- and Post- Irradiation Fading Effect for LiF: Mg, Ti and LiF: Mg, Ti, Cu, P Materials Used in Routine Monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011, Sv. 144 (1 - 4), stránky 207 - 210.
- [94] **Poland, TLD.** LiF:Mg,Cu, P THERMOLUMINESCENT PHOSPHOR & PELLETS. *Thermoluminescent detectors*. [Online] [Citace: 20. 7 2018.] <http://www.tld.com.pl/tld/mcp.html>.
- [95] **Poland, TLD.** MCP-Ns - TL dosimeters. *Thermoluminescent detectors*. [Online] [Citace: 20. 7 2018.] <http://www.tld.com.pl/tld/mcpns.html>.
- [96] **RADCARD.** TLD Dosimeters. [Online] [Citace: 20. 7 2018.] <http://www.radcard.pl/det/mcpns.html>.
- [97] **Horský, J., Horský, P.** Jak pochopit vyjadřování nejistoty měření spojené s metrologií elektrických veličin. *Elektro*. 2011, Sv. 5, stránky 14 - 17.

- [98] **Horský, J, Horský, P.** Vyjadřování výsledků měření. *Elektro*. 2010, Sv. 12, stránky 6 - 9.
- [99] **Červenka, M.** Zpracování fyzikálních měření. *Fyzika*. [Online] [Citace: 22. 7 2018.] <http://fyzika.feld.cvut.cz/~cervenka/vyuka/zprfm/zpracdat.pdf>.
- [100] **Tesař, T.** Protokol o ozáření. Praha : Český metrologický institut, 2017.
101. **GmbH, RadPro International.** TLD-Material. *Radiation Protection for the Radiation Professional*. [Online] [Citace: 22. 7 2018.] <https://www.radpro-int.com/tld-1/tld-material/>.
- [102] **Bedáňová, I.** Testování hypotéz ve statistice. *Biostatistika*. [Online] [Citace: 14. 8 2018.] <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>.
- [103] **Bedáňová, I.** Mann-Whitneyův pořadový test. *Biostatistika*. [Online] [Citace: 14. 8 2018.] <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn4/MannWhit.htm>.
- [104] **Masarykova univerzita, IBA LF.** Neparametrická alternativa analýzy rozptylu – Kruskalův-Wallisův test. *Aplikovaná analýza klinických a biologických dat*. [Online] [Citace: 14. 8 2018.] <http://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinicky-a-biologicky-dat--analyza-a-management-dat-pro-zdravotnicke-obory--analyza-rozptylu-anova--neparametricka-alternativa-analyzy-rozptylu-kruskaluv-wallisuv-test>.
- [105] **Bedáňová, I.** Wilcoxonův test. *Biostatistika*. [Online] [Citace: 14. 8 2018.] <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn4/Wilcoxon.htm>.
- [106] **University, Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering Kansas State.** An MCNP Primer. [Online] 2006. [Citace: 20. 7 2018.] www.mne.ksu.edu/~jks/MCNPprmr.pdf.
- [107] **Pellowitz, D. B.** MCNP User's Manual. *Version 2.6.0 - No. LA CP 02 408*. místo neznámé : Los Alamos National Laboratory, 2007. http://www.mcnp.ir/admin/imgs/1354176297.2.6.0_Users_Manual.pdf.
- [108] **Beneš, J. et al.** *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory*. Praha : Grada, 2015. ISBN 978-80-247-4712-5.
- [109] **Bureš, J.** Hustota pevných látek. *conVERTER*. [Online] 2002. [Citace: 20. 7 2018.] <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>.
- [110] **Fulop, M.** Osobní sdělení. *Parafínové fantomy rukou*. Bratislava : SZU v Bratislavě, 2018.
- [111] *The use of the Monte Carlo simulation method for assessing the radiation burden of the hands of workers during some risky manipulations with radiopharmaceuticals.* **Hudzietzová, J., Fulop, M., Ragan, P., Sabol, J., Povinec, P.** Cape Town : The International Radiation Protection Association, 2016, Proceedings of the 14th International Congress of the International Radiation Protection Association , stránky 613 - 618. ISBN 978-0-998966-1-8.
- [112] **Hudzietzová, J., Fulop, M., Sabol, J.** Vliv geometrie ve vybrané rizikové operaci s ¹³¹I-NaI na ozáření rukou pracovníků. *53. Dny nukleární medicíny*. 21.9. - 23.9.2016.
- [113] **Fulop, M., Hudzietzová, J., Sabol, J.** Ozáření kůže rukou pracovníků při vybrané rizikové operaci vedoucí k lokální kontaminaci ¹⁸F-FDG. *53. Dny nukleární medicíny*. 21.9. - 23.9.2016.

- [114] **Lassmann, M., Pedroli, G.** Dose Optimization in Nuclear Medicine. *Clin Transl Imaging*. 2016, Sv. 4, stránky 3 - 4.
- [115] **Kohutová, R., Jiřík, V., Ullmann, V.** Radiační ochrana personálu na PET/CT. *Nukleární medicína*. 2017, Sv. 6, stránky 53 - 55.
- [116] **Jonášová, L., Kráčmerová, T., Solný, P.** Porovnání radiační zátěže pracovníků při přechodu od roztoku I-131 ke kasplím. *Nukleární medicína*. 6, 2017, Sv. 3, stránky 49 - 52.
- [117] **Dostálová, P.** Vliv monitorování pracoviště na radiační zátež personálu na pracovišti PET. *Nukleární medicína*. 2018, Sv. 7, stránky 2 - 6.
- [118] **Hildith, T. E., Eliot, A. T., Anstee, D. E., Murray, T.** Fifteen Years of Radiological Protection Experience in a Radiopharmacy. *Health Physics*. 1990, Sv. 59 (1), stránky 109 - 116.
- [119] *Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students*. Vienna : IAEA, 2014. str. 766. ISBN 978-92-0-143810-2.
- [120] **Hudzietzová, J., Fulop, M., Sabol, J.** Possibilities of the Exposure Reduction of Hands during the Preparation and Application of Radiopharmaceuticals. *Bratislava Medical Journal*. 2016, Sv. 117 (7), stránky 413 – 417.
- [121] **Hudzietzová, J., Fulop, M., Sabol, J., Doležal, J.** Assessment of the Local Exposure of Skin on Hands of Nuclear Medicine Workers Handling 18F-Labelled Radiopharmaceuticals: Preliminary Czech Study. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016, Sv. 171 (4), stránky 445–452.
- [122] **Hudzietzová, J., Fulop, M., Sabol, J., Vondrák, A., Baček, D., Vlk, P., Solivajs, D.** Radiační zátěž oční čočky a lokálního ozáření rukou během manipulace s radiofarmaky značenými F-18 a Ga-68. *XVIII. Nitranské Dni nukleárnej medicíny*. Mojmirovce : IZOTOPCENTRUM, s.r.o, Nitra, 2017. str. 22. ISBN 978-80-972870-0-9.
- [123] **Hudzietzová, J., Fulop, M., Sabol, J., Povinec, P., Baček, D., Vondrák, A., Solivajs, D.** Význam monitorování radiační zátěže oční čočky a lokálního ozáření kůže na rukou v nukleární medicíně. *XXXIX. Dni radiačnej ochrany*. Stará Lesná : autor neznámý, 2017. str. 18. ISBN 978-80-89702-40-4.
- [124] **Hudzietzová, J., Fulop, M., Sabol, J., Doležal, J., Povinec, P., Baček, D., Solivajs, D.** Exposure of Eye Lens as a Possible Limiting Factor? *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017, Sv. 44 (2), str. S452.
- [125] **Hudzietzová, J.** *Rozprava k disertační práci*. Kladno : FBMI ČVUT v Praze, 2013.
- [126] **Martin, C. J.** Strategies for Assessment of Doses to the Tips of the Fingers in Nuclear Medicine. *Journal of Radiological Protection*. 2016, Sv. 36, stránky 405 - 418.
- [127] **ICRP.** *Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals - Addendum 3 to ICRP Publication 53*. Vienna : ICRP Publication 106. Ann. ICRP 38 (1-2), 2008.
- [128] **Cho, Yong - In, Kim, Chang - Soo, Kim Jung - Hoon.** Evaluation of Syringe Shield Effectiveness in Handling Radiopharmaceuticals. *Nuclear Technology & Radiation Protection*. 2015, Sv. 30 (2), stránky 158 - 163.
- [129] **Covens, P., Berus, D., Cavelliers, V., Struelens, L., Verellen, D.** Skin Contamination of Nuclear Medicine Technologists: Incidence, Routes, Dosimetry and Decontamination. *Nuclear Medicine Communications*. 2012, Sv. 33, stránky 1024 - 1031.

Příloha 1: Seznam publikací autora k tématu disertační práce

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J., Doležal, J.: Assessment of the Local Exposure of Skin on Hands of Nuclear Medicine Workers Handling ^{18}F - Labelled Radiopharmaceuticals: Preliminary Czech Study. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016, 171 (4), pp. 445 – 452. ISSN 0144-8420.

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J.: Possibilities of the Exposure Reduction of Hands during the Preparation and Application of Radiopharmaceuticals at a PET Department in Nuclear Medicine. *Bratislava Medical Journal*. 2016, 117 (7), pp. 413-417. ISSN 0006-9248.

Sabol, J., Fülöp, M., Hudzietzová, J., Šesták, B.: Letter to the Editor. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015, 163 (2), p. 167. ISSN 0144-8420.

Hudzietzová, J., Sabol, J., Šesták, B.: Problems in Controlling Skin Dose Using the Dose Limit Quantities. *Universal Journal of Biomedical Engineering*. 2014, 2 (2), pp. 38 – 40. ISSN 2333-2662.

Hudzietzová, J., Sabol, J.: Knowledge of Basic Radiological Protection: A Must for any Use of Radiation or Nuclear Technologies. *International Research Journal of Public and Environmental Health*. 2014, 1(6), pp. 140 - 149

Sabol, J., Šesták, B., Hudzietzová, J., Ralbovská, R.: Facts about Radiation Risk Related to Bioengineering: Awareness of the Public by Passing on Relevant Information. *Bioengineering and Bioscience*. 2014. 2(1), pp. 11 – 14. ISSN 2332-001X

Hudzietzová, J., Prchalová, D., Sabol, J., Vlček, P.: Radiační zátěž pracovníků na Klinice nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol v letech 2006 - 2011. *Česká radiologie*, Galén. 2013. 67 (1), s. 87 – 94. ISSN 1210-7883

Sabol, J., Hudzietzová, J.: Současné problémy kvantifikace ozáření osob pro potřeby radiační ochrany. *Bezpečnost jaderné energie*. 2013. 21 (59), č. 3/4, s. 97 – 109. ISSN 1210-7085

Hudzietzová, J., Koláček, M., Ullmannová, L., Sabol, J., Kraft, O.: Zhodnocení průměrné roční efektivní dávky a průměrné roční ekvivalentní dávky na ruce u personálu Kliniky nukleární medicíny Fakultní nemocnice Ostrava v letech 2006 -2012. *Česká radiologie*, Galén, 2013. 67 (3), s. 225 – 231. ISSN 1210-7883

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J., Doležal, J.: Radiační zátěž rukou pracovníků během přípravy a aplikace radiofarmak značených radionuklidem ^{18}F . *Česká radiologie*, Galén, 2014. 68 (4), s. 318 – 322. ISSN 1210-7883

Fülöp, M., Hudzietzová, J., Sabol, J., Bělohávek, O., Makaiová, I., Povinec, P., Veselý, J., Vondrák, A., Mihalová, P.: A Method for the Identification of Hand Exposure by Annihilation Photons and Positrons during the Handling of ^{18}F -FDG Radiopharmaceuticals. *Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine*. Lyon, Francie, 19 - 23 October 2013

Hudzietzová, J., Ralbovská, R., Sabol, J.: Important Role of Radiation Protection in Specific Applications of X-Rays and Radionuclides in Bioengineering. The 4th IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering. *EHB 2013*. Iasi, Rumunsko, 21 - 23 November 2013

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J.: Jeden z problémů radiační ochrany v nukleární medicíně: Ozáření kůže rukou pracovníků při vybraných činnostech s radiofarmakem ^{18}F -FDG. *15. Štiavnické dni*. Banská Štiavnica, Slovensko, 23. - 25. 9. 2014

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J., Doležal, J., Povinec, P., Makaiová, I., Vondrák, A.: Radiation Burden of Extremities of Workers During the Manipulation with Radiopharmaceuticals Labelled with F-18: Study Carried Out in the Czech Republic and Slovak Republic. *Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine*. Gothenburg, Švédsko, 18 - 22 October 2014

Fülöp, M., Hudzietzová, J., Sabol, J., Doležal, J., Povinec, P., Makaiová, I., Vondrák, A.: Monitoring Optimization of the Local Hand Exposure when Handling Radiopharmaceuticals. *Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine*. Gothenburg, Švédsko, 18 - 22 October 2014

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J.: Experimental Assessment of the Local Skin Exposure of Hands of Workers and its Quantification with Respect to Relevant Reference Levels and Dose Limits. *XXXVI. Dny radiační ochrany*. Poprad - Tatry, Slovensko, 10. - 14. 11. 2014

Fülöp, M., Hudzietzová, J., Foltýnová, L.: A method for Skin Hand Exposure by Positrons during Handling of ^{18}F -FDG Radiopharmaceutical. *XXXVI. Dny radiační ochrany*. Poprad - Tatry, Slovensko, 10. - 14. 11. 2014

Sabol, J., Hudzietzová, J.: Is The Current System of the Quantification of Radiation Exposure and its Monitoring Optimal? *XXXVI. Dny radiační ochrany*. Poprad - Tatry, Slovensko, 10. - 14. 11. 2014

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J., Doležal, J.: Risk due to the exposure of skin on hands of workers handling radiopharmaceuticals labelled with ^{18}F : Preliminary results from the Czech Republic, *Internal Conference on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments*. Vienna, Rakousko 1 – 5 December 2014

Sabol, J., Hudzietzová, J., Šesták, B.: Skin Exposure: A Specific Problem in Occupational Monitoring. *Internal Conference on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments*. Vienna, Rakousko 1 – 5 December 2014

Fülöp, M., Hudzietzová, J., Sabol, J., Makaiová, I., Povinec, P., Veselý, J., Vondrák, A.: A New Method for Experimental Evaluation of Operations when Handling Radiopharmaceuticals. *Internal Conference on Occupational Radiation Protection: Enhancing the Protection of Workers – Gaps, Challenges and Developments*. Vienna, Rakousko 1 – 5 December 2014

Fülöp, M., Hudzietzová, J. et al. Hand Phantoms for Optimization of Radiation Protection of Nuclear Medicine Personnel. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2015, **42** S347. ISSN 1619-7070.

Hudzietzová, J., et al. Improvements in the Identification of the Maximum Skin Exposure and the Position of its Maximum on the Surface of Hands of Workers Handling Selected Radiopharmaceuticals. In: *International Conference on Clinical PET-CT and Molecular Imaging (IPET 2015): PET-CT in the Era of Multimodality Imaging and Image-Guided Therapy*. International Conference on Clinical PET-CT and Molecular Imaging: PET-CT in the era of multimodality imaging and image-guided therapy, Vienna, 2015-10-05/2015-10-09. Wien: IAEA, 2015. pp. 354.

Hudzietzová, J., et al. Proposal of Correction Factors for the Assessment of the Maximum Exposure to Hands of Workers Handling Radiopharmaceuticals Labelled with F-18: Based On Studies In CR And SR. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2015, **42** S351. ISSN 1619-7070.

Sabol, J., J. Hudzietzová, and M. Fülöp. Imaging in Nuclear Medicine: Monitoring of Skin Doses of Workers. In: *The 5th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering*. The 5th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering, Iasi, 19. 11. – 21. 11. 2015. Iasi: Gr. T. Popa University of Medicine and Pharmacy, 2015. ISBN 978-1-4673-7545-0. DOI 10.1109/EHB.2015.7391458.

Hudzietzová, J., et al. Ozáření rukou pracovníků KNM FN Ostrava radiofarmakem značeným I-131. In: *XVII. Nitrianske Dni Nukleárnej medicíny s medzinárodnou účasťou*. XVII. Nitrianske Dni Nukleárnej medicíny s medzinárodnou účasťou, Nitra, 26. 11. – 27. 11. 2015. Nitra: Izotopcentrum, s.r.o., 2015. pp. 22. XVII. Nitrianske Dni Nukleárnej medicíny s medzinárodnou účasťou. ISBN 978-80-972177-1-6.

Fulop, M., Hudzietzová, J., et al. Monte Carlo Simulations of Risky Non-standard Operations during handling radiopharmaceuticals. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2016, S527. ISSN 1619-7070.

Hudzietzová, J., et al. The Impact of Selected Factors on the Exposure of Hands of Workers during Handling Radiopharmaceuticals in Nuclear Medicine in the Czech Republic. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2016, S530-S531. ISSN 1619-7070.

Fulop, M., Hudzietzová, J., et al. Comparison of the Methods for Eye Lens Dose Measurement by a Monte Carlo Method. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017, **44**(2), S289. ISSN 1619-7070.

Hudzietzová, J., et al. Exposure of Eye Lens as a Possible Limiting Factor?. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017, **44**(2), S452. ISSN 1619-7070.

Hudzietzová, J., et al. Význam monitorování radiační zátěže oční čočky a lokálního ozáření kůže na rukou v nukleární medicíně. In: *XXXIX. Dni radiačnej ochrany - Zborník abstraktov*. XXXIX. Dni radiačnej ochrany, Stará Lesná, 6. 11. – 10. 11. 2017. Slovenská zdravotnícka univerzita v Bratislave, 2017. pp. 18. ISBN 978-80-89702-40-4.

Fulop, M., Hudzietzová, J., et al. Hodnotenie metód monitorovania ožiarenia očnej šošovky pomocou simulácií MC. In: *XVIII. Nitrianske Dni nukleárnej medicíny*. XVIII. Nitrianske Dni nukleárnej medicíny, Mojmirovce, 22. 11. – 24. 11. 2017. Nitra: Izotopcentrum, s.r.o., 2017. pp. 21. ISBN 978-80-972870-0-9.

Hudzietzová, J., et al. Radiační zátěž oční čočky a lokálního ozáření rukou během manipulace s radiofarmaky značenými F-18 a Ga-68. In: *XVIII. Nitrianske Dni nukleárnej medicíny*. XVIII. Nitrianske Dni nukleárnej medicíny, Mojmirovce, 22. 11. – 24. 11. 2017. Nitra: Izotopcentrum, s.r.o., 2017. pp. 22. ISBN 978-80-972870-0-9.

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J.: Hodnocení lokálního ozáření kůže u rukou pracovníků během manipulace s radionuklidem ¹⁸F. *Nukleární medicína*. 2013, 2 (3), s. 7. ISSN 1805-1146.

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J.: *Ekvivalentní dávka na kůži končetin pracovníků při manipulaci s vybranými radiofarmaky*. XX. pracovní den technologicko - ošetrovatelské sekce. Praha, 11. 4. 2014.

Bayerová, P., Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J.: Srovnání lokálního ozáření kůže končetin během manipulace s vybraným radiofarmakem na oddělení nukleární medicíny. *Česká a slovenská farmacie*. 2014, roč. 63, s. 184. ISSN 1210-7816

Hudzietzová, J. et al.: Ozáření rukou pracovníků během přípravy radiofarmak značených ¹⁸F a ¹³¹I. *Česká a slovenská farmacie*. 2014, roč. 63, s. 185. ISSN 1210-7816.

Sabol, J., Hudzietzová, J.: Ozáření kůže pracovníků v nukleární medicíně: Problém kvantifikace i monitorování. *Nukleární medicína*. 2014, 3(3), s. 13. ISSN 1805-1146.

Hudzietzová, J., Fülöp, M., Sabol, J., Vlček, P., Sovadinová, E., Kraft, O., Pekárek, J., Bajgerová, P.: Zhodnocení lokálního ozáření kůže rukou pracovníků při přípravě radiofarmak značených I-131. *Nukleární medicína*. 2014, 3(3), s. 20. ISSN 1805-1146.

Hudzietzová, J., Sabol, J.: Local Skin Exposure of Hands of Workers at Selected PET Nuclear Medicine Departments in the Czech Republic: Recommended Correction Factors Based on Specific Measurements. *Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2014*. Brno, 15. - 19. 12. 2014

Hudzietzová, J., et al. Stanovení radiační zátěž rukou pracovníků během rizikových úkonů při manipulaci s radiofarmaky značenými I-131 na základě měření a Monte Carlo simulací. *Nukleární medicína*. 2015, **4**(3), ISSN 1805-1146.

Hudzietzová, J., et al. Stanovení radiační zátěže rukou při manipulaci s radiofarmakem na základě metody Monte Carlo. In: *XXXVII. Dny radiační ochrany*. XXXVII. Dny radiační ochrany, Mikulov, 9. 11. – 13. 11. 2015. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. pp. 80. ISBN 978-80-01-05822-0.

Sabol, J. and J. Hudzietzová. Kvantifikace ozáření kůže pracovníků: Současné problémy a inkonzistence. In: *XXXVII. Dny radiační ochrany*. XXXVII. Dny radiační ochrany, Mikulov, 9. 11. – 13. 11. 2015. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. pp. 85. ISBN 978-80-01-05822-0.

Hudzietzová, J., M. Fülöp, and J. Sabol. Radiační ozáření pracovníků nukleární medicíny - manuální aplikace versus automatické dispenzní stanice během aplikace radiofarmak v České republice. In: *International Masaryk Conference for Ph.D. Students and Young Researchers 2015*. International Masaryk Conference for Ph.D. Students and Young Researchers 2015, Hradec Králové, 14. 12. – 18. 12. 2015. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2015. pp. 2346-2353. ISBN 978-80-87952-12-2.

Fulop, M., J. Hudzietzová, and J. Sabol. Ozáření kůže rukou pracovníků při vybrané rizikové operaci vedoucí k lokální kontaminaci ¹⁸F-FDG. *Nukleární medicína*. 2016, **5**(3), 11-12. ISSN 1805-1146.

Hudzietzová, J., J. Sabol, and M. Fulop. Zajištění radiační ochrany pracovníků při manipulaci s otevřenými zářiči na základě experimentálních a výpočetních metod. In: EFREMOVA, Y. and J. HUDZIETZOVÁ. *Současné problémy radiační ochrany obyvatelstva*. Současné problémy radiační ochrany obyvatelstva, Praha, 6. 5. 2016. Praha: katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva, 2016. pp. 51-54. ISBN 978-80-01-05948-7.

Hudzietzová, J., M. Fulop, and J. Sabol. Vliv geometrie ve vybrané rizikové operaci s ¹³¹I-NaI na ozáření rukou pracovníků. *Nukleární medicína*. 2016, **5**(3), 12. ISSN 1805-1146.