



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Radiační zátěž personálu při vyšetření sentinelových uzlin u karcinomu prsu

Radiation Load in Health Professionals during Examination of the Sentinel Lymph Nodes in Breast Cancer

Bakalářská práce

Studijní program: Specializace ve zdravotnictví

Studijní obor: Radiologický asistent

Autor bakalářské práce: Monika Koutná

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Hudzietzová, Ph.D.

Kladno 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koutná** Jméno: **Monika** Osobní číslo: **474081**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Specializace ve zdravotnictví**
Studijní obor: **Radiologický asistent**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Radiační zátěž pracovníků během intervencí na sentinelové uzlině karcinomu prsu

Název bakalářské práce anglicky:

Radiation Load in Health Professionals During Examination of the Sentinel Lymph Nodes in Breast Cancer

Pokyny pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce bude problematika radiační zátěže pracovníků během označení radiofarmakem a následné biopsie sentinelové uzliny u karcinomu prsu. Práce bude rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části bude popsána anatomie a význam sentinelové uzliny u karcinomu prsu, možnosti jejího zobrazení v rámci nukleární medicíny a rovněž odstranění a vyšetření sentinelové uzliny. V práci budou rovněž popsány principy radiační ochrany personálu provádějícího vybrané výkony na sentinelové uzlině. V praktické části studentka popíše předoperační aplikaci radiofarmaka a následně chirurgické odstranění sentinelové uzliny na vybraném pracovišti nukleární medicíny a provede vyhodnocení monitorování vybraných skupin pracovníků provádějících intervenci na sentinelové uzlině z konkrétního pracoviště.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK, Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami, ed. , Praha: Grada Publishing, 2018, ISBN 978-80-271-0168-9
- [2] KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL, Nukleární medicína, ed. 6. vydání (2. vydání v Nakladatelství P3K), V Praze: P3K, 2015, ISBN 978-80-87343-54-8
- [3] KRŠKA, Zdeněk, David HOSKOVEC a Luboš PETRUŽELKA, Chirurgická onkologie, Praha: Grada, 2014, ISBN 978-80-247-4284-7

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

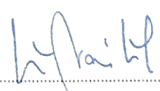
Ing. Jana Hudzietzová, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

RNDr. Drahomíra Pecinová, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **18.02.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**


prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., MBA, dr.h.c.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Radiační zátěž personálu při vyšetření sentinelových uzlin u karcinomu prsu vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

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), ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne 27.05.2020

.....
Monika Koutná

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala Ing. Janě Hudzietzové, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a ochotu při odborném vedení mé bakalářské práce. Poděkování dále patří RNDr. Drahomíře Pecinové, Ph.D. za poskytnuté konzultace a spolupráci při získávání údajů pro praktickou část práce.

Děkuji také MUDr. Petru Hoferkovi, MUDr. Petru Motyčkovi, Ph.D., Bc. Daniele Bencsikové a všem zúčastněným pracovníkům a pracovištím, kde byla prováděna měření, za jejich vstřícnost a všestrannou pomoc.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na porovnání radiační zátěže personálu při vyšetření sentinelové uzliny u karcinomu prsu.

Obsahem teoretické části jsou základní informace o karcinomu prsu, jeho diagnostických a léčebných metodách. Je zde vysvětlen koncept sentinelové uzliny v závislosti na lymfatickém systému jedince. Popsány jsou i možnosti zobrazení sentinelové uzliny vitálními barvivy a radiofarmaky z hlediska práce nukleární medicíny. Závěr teoretické části práce se věnuje radiační ochraně personálu při práci s ionizujícím zářením.

Praktická část se věnuje porovnání nasbíraných dat při vyšetřeních sentinelových uzlin u karcinomu prsu. Sběr dat a měření probíhala ve dvou nemocničních zařízeních s odlišným typem protokolu. Popis jednodenního a dvoudenního protokolu charakterizuje rozdílnost postupů v těchto nemocničních zařízeních. Porovnává se četnost vybraných intervencí na odděleních nukleární medicíny a množství podaných aktivit ^{99m}Tc -Senti-Scint, které pacienti při intervencích sentinelové uzliny dostali. Dalšími upřesňujícími údaji jsou věk a pohlaví pacientů.

Výsledky jsou založeny na porovnání naměřené radiační zátěže lékařů nukleární medicíny a chirurgů u rozdílných protokolů. V diskusi se nachází zamyšlení nad získanými daty i srovnání dat s jinými autory. Včetně popisu možností, jak z hlediska radiační ochrany radiační zátěž personálu snížit.

Klíčová slova

Sentinelová uzlina; karcinom prsu; lymfoscintigrafie; biopsie; radiační zátěž; radiační ochrana

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on comparing radiation exposure of medical staff during sentinel node examination in breast cancer.

In the theoretical part, basic information about breast cancer will be discussed, including its diagnostic and treatment methods. There will also be a section explaining the concept of sentinel lymph nodes, depending on the system of the individual. It describes the possibilities of sentinel lymph node imaging with vital dyes and radiopharmaceuticals from nuclear medicine's point of view. The conclusion of the theoretical part is devoted to the description of radiation protection of personnel exposed to radiation in the course of their work.

The practical part is dedicated to the comparison of collected data during sentinel lymph node examinations in breast cancer. Measurements and data collection took place in two medical facilities with different types of protocols. The differences in procedures in these hospitals are characterized by the description of one-day and two-day protocols. It contains the juxtaposed frequency of selected interventions in the departments of nuclear medicine and the amount of administered ^{99m}Tc -Senti-Scint activities that patients received during interventions. Other specifying information added are age and sex of the patients.

The results are based on differences of the measured radiation exposure that nuclear medicine doctors and surgeons received for different protocols. The discussion includes reflections on the data obtained and a comparison with other authors results. This part also includes a description of how to reduce the radiation exposure of medical personnel in terms of radiation protection.

Keywords

Sentinel lymph node; breast cancer; lymphoscintigraphy; biopsy; radiation exposure; radiation protection

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce.....	11
3	Přehled současného stavu.....	12
3.1	Karcinom prsu.....	12
3.1.1	Anatomie prsu	13
3.1.2	Neinvazivní a invazivní karcinom in-situ	14
3.1.3	Rizikové faktory	15
3.1.4	Symptomy	15
3.1.5	Screening	16
3.1.6	Léčba karcinomu prsu	17
3.2	Lymfatický systém.....	19
3.2.1	Obecná anatomie lymfatického systému	19
3.2.2	Lymfatická drenáž prsu	23
3.3	Sentinelová uzlina	25
3.4	Možnosti zobrazení sentinelové uzliny.....	27
3.4.1	Vitální barvení	27
3.4.2	Lymfoscintigrafie sentinelové uzliny	28
3.5	Radioaktivní přeměna.....	32
3.5.1	Přeměna alfa.....	33
3.5.2	Přeměna beta.....	33
3.5.3	Přeměna gama	33
3.6	Ionizující záření.....	34
3.6.1	Přímo ionizující záření.....	34

3.6.2	Nepřímí ionizující záření	34
3.7	Radiační ochrana	35
3.7.1	Základní veličiny dozimetrie a radiační ochrany	36
3.7.2	Základní principy radiační ochrany	38
3.7.3	Radiační ochrana pracovníků.....	40
3.7.4	Kategorizace pracovišť	41
3.7.5	Kategorizace radiačních pracovníků	41
3.7.6	Osobní dozimetrie pracovníků	42
4	Metodika.....	44
4.1	Seznámení s pracovišti.....	44
4.1.1	Nemocnice A	44
4.1.2	Nemocnice B	45
4.2	Sběr dat.....	46
4.3	Vyhodnocení dat.....	49
5	Výsledky.....	50
5.1	Popis protokolů nemocnic.....	50
5.2	Vyšetřování pacienti.....	53
5.3	Aplikované aktivity.....	54
5.4	Radiační zátěž lékařů nukleární medicíny	56
5.5	Radiační zátěž chirurgů.....	57
6	Diskuze	60
7	Závěr	70
8	Seznam použitých zkratk.....	71
9	Seznam použité literatury.....	72

10	Seznam použitých obrázků	75
11	Seznam použitých tabulek.....	76
12	Seznam příloh.....	77
13	Přílohy.....	78

1 ÚVOD

Lymfatické mapování sentinelové uzliny se stalo standardem péče o pacienty s diagnózou karcinomu prsu. Biopsie sentinelové uzliny nahrazuje starší metodu disekce axilárních lymfatických uzlin. Využívá anatomické a fyziologické znalosti lymfatického systému k identifikaci skrytých metastáz regionálních lymfatických uzlin. Lymfatický tok je vizualizován a je identifikována první „strážná“ lymfatická uzlina na cestě z primárního nádoru. Tato uzlina je největším rizikem ukládání metastatických ložisek [1].

Zjištění sentinelové uzliny vyžaduje společné úsilí lékaře nukleární medicíny, chirurga a patologa. Lymfoscintigrafie umožňuje zobrazit umístění a označit počet sentinelových uzlin. Chirurg může k nalezení uzlin použít vizuálně identifikovatelné vitální barvivo nebo detekovat radiofarmakum gama sondou. Patolog využívá řadu technik pro stanovení přítomnosti nádorových buněk v lymfatické uzlině [2].

Přístup lymfatického mapování se selektivní lymfadenektomií může u pacientů s karcinomem prsu vést k podstatné redukci potřeby disekce axilárních uzlin, a to bez ztráty prognostických a stagingových informací [1].

2 CÍLE PRÁCE

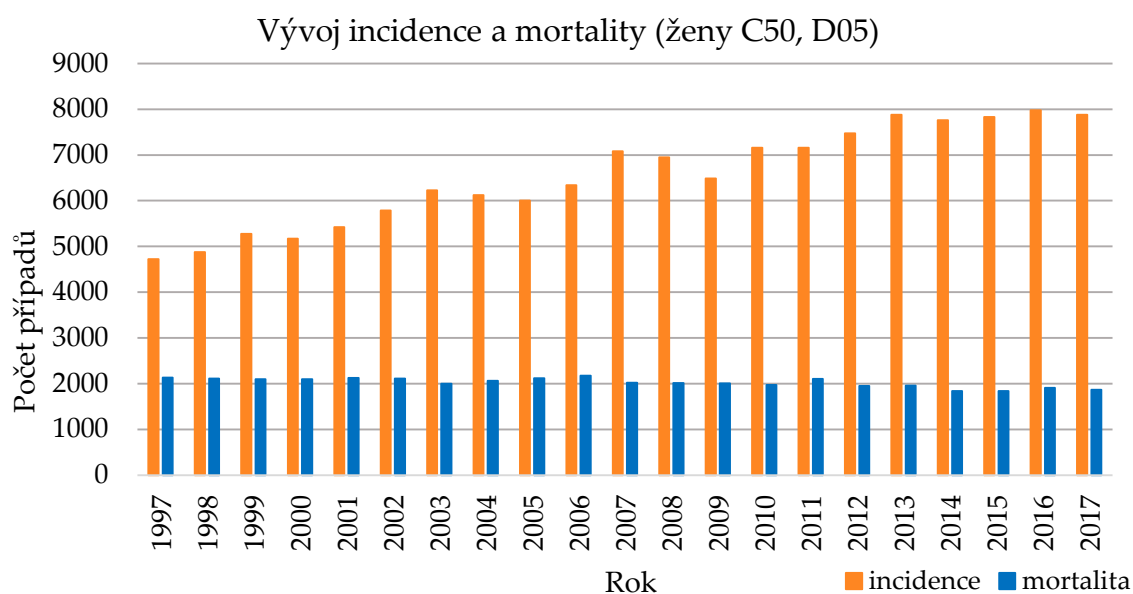
Cílem této bakalářské práce je porovnání radiační zátěže rozdílných skupin pracovníků při biopsii sentinelové uzliny u karcinomu prsu. Popisován je průběh tohoto vyšetření od předoperační aplikace radiofarmaka po odběr bioptického vzorku. Při intervenčních výkonech na sentinelové uzlině přichází personál do kontaktu s radioaktivní látkou nebo tkání. Práce také odpovídá na otázku, zda je z hlediska radiační ochrany potřeba, aby chirurgové provádějící tyto operace byli zařazeni jako radiační pracovníci kategorie A. Stejně tak hodnotí význam dodržování zásad radiační ochrany u těchto pracovníků a poukazuje na možnosti, jak radiační zátěž snížit.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Karcinom prsu

Termínem karcinom prsu se rozumí různé formy maligních nádorů buněk mléčné žlázy. Maligní buňky nejen že infiltrují prsní žlázu, ale vyznačují se i invazí do okolních struktur a tvorbou vzdálených metastáz [3]. Obvykle se karcinomy prsu dělí na neinvazivní a invazivní karcinomy [4]. Dle Mezinárodní statistické klasifikace nemocí a přidružených zdravotních problémů (MKN-10) jsou nádory prsu označovány kódy diagnóz C50 (zhoubné novotvary prsu) a D05 (karcinomy in situ prsu) [5].

Každoročně tvoří karcinom prsu až 16 % všech hlášených zhoubných nádorů u žen [6]. Na obr. 1 je znázorněn vývoj incidence a mortality nádoru prsu u žen v letech 1997–2017. V roce 2017 bylo v České republice přes 7 000 nových případů tohoto onemocnění [7]. Vyšší incidence, ve srovnání s lety minulého století, je dána především zlepšením screeningových metod a větší informovaností veřejnosti. Snížení mortality je považováno za výsledky pokroku léčby a časného zachytu nových případů [3, 7, 8].

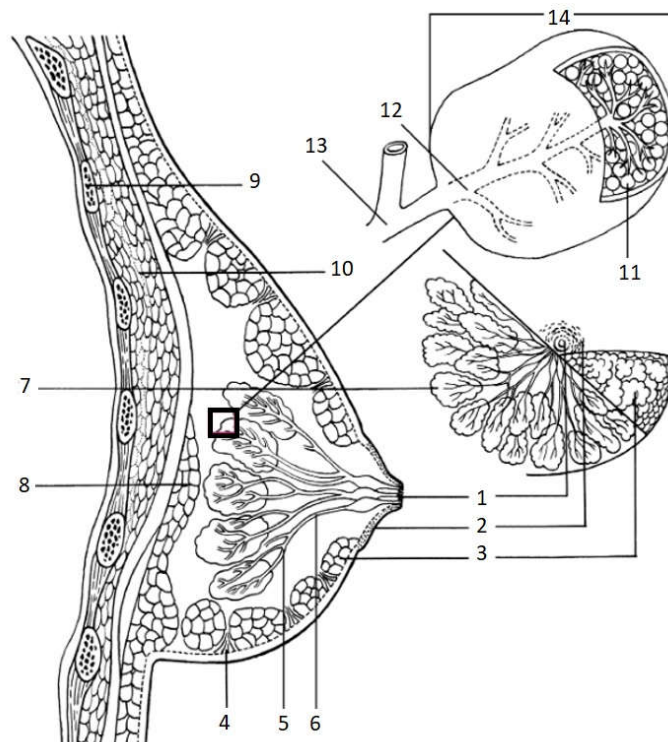


Obr. 1 – Vývoj incidence a mortality nádoru prsu u žen (1997–2017), zdroj dat: [7]

3.1.1 Anatomie prsu

Prs je párová laločnatá žláza ležící mezi svalovinou hrudní stěny a kůží přední strany hrudníku. U dospělé ženy se prs nachází zhruba v úrovni 3. až 6. žebra [9].

Laloků je v prsu 15 až 20 a jsou tvořeny menšími lalůčky (*lobuly*), jejichž fyziologickým úkolem je produkce mléka. Jednotlivé lobuly jsou propojeny mlékovody (*tubuly*), které se sbíhají v centru dvorce a ústí ve vystouplé bradavce (obr. 2). Objem prsu mezi lalůčky, kůží a hrudní stěnou je vyplněn tukovou a pojivovou tkání. Anatomický objem prsu se mění v závislosti na věku ženy a fázi menstruačního cyklu [9, 10, 11].



Obr. 2 – Anatomie prsu. 1 - bradavka, 2 - dvorec, 3 - lalůček tuku, 4 - podkožní vazivo, 5,6 - mlékovod, 7 - mléčný lalok, 8 - tuk, 9 - žebro, 10 - sval, 11 - acinus, 12 - mlékovod uvnitř lobulu, 13 - konečný mlékovod mimo lobulus, 14 - lobulus [11]

3.1.2 Neinvazivní a invazivní karcinom in-situ

Čistě neinvazivní karcinom in-situ je pouze náhodným nálezem. U tohoto typu karcinomu jsou maligní buňky přítomny, ale neinfiltroují se do okolí, tj. nemetastazují. Největší záchyt těchto typů nádorů nastal s rozvojem mamografických screeningových metod, bez nichž se neinvazivní formy podařilo odhalit jen náhodně [4, 8].

Oproti tomu invazivní typy karcinomu jsou typické infiltrací maligních buněk do okolí [3].

Duktální karcinom in-situ (DCIS)

Vzniká bujením přetvořených epitelových buněk mlékovodů. Ve své neinvazivní formě je pokládán za preinvazivní stádium karcinomu prsu. Na mamogramu jsou v případě DCIS viditelné jemné kalcifikace nebo zastínění. Často může docházet k přechodu do infiltrující formy karcinomu [3, 4]. U invazivního typu jsou ložiska palpačně hmatná a potenciální metastázy prostupují do axilárních uzlin [8].

Mezi speciální formy infiltrujícího duktálního karcinomu řadíme medulární, tubulární, apokrinní, mucinozní a papilární karcinomy [3].

Lobulární karcinom in situ (LCIS)

Vyvíjí se z epitelových buněk mamárních lobulů. Nevyznačuje se žádnými specifickými příznaky, je nehmatný a léze jsou makroskopicky neviditelné. Ve většině případů je nalezen náhodně při bioptickém vyšetření jiné léze prsu. Tento druh karcinomu dokáže metastazovat velmi časně a jeho výskyt může být bilaterální [4].

Pagetův karcinom bradavky

Jedná se o povrchově uložený duktální karcinom v neinvazivní nebo invazivní formě. Může být zaměněn s ekzematizací prsního dvorce, protože se jeví

jako zánětlivé onemocnění kůže. V epidermis jsou ovšem přítomny maligní tzv. Pagetovy buňky [3, 4].

3.1.3 Rizikové faktory

Etiologie vzniku karcinomu prsu je velmi různorodá a nedá se s jistotou říci, že následující faktory přímo souvisí s počátkem tohoto nádorového onemocnění. Více než 50 % zjištěných karcinomů prsu vzniká bez patrné příčiny [3]. Faktory přispívající ke vzniku karcinomu prsu mohou být:

- věk – hlavní roli hraje časná první menstruace a pozdní menopauza;
- dědičnost – významný vliv má mutace genu BRCA1 nebo BRCA2 a výskyt karcinomu v první příbuzenské linii;
- existence nezhoubných lézí;
- předešlý výskyt karcinomu prsu – zvýšené riziko malignity v druhém prsu;
- životní styl – kouření, alkohol, nezdravá strava, nedostatek fyzické aktivity;
- jiné – stresové faktory, socio-ekonomická situace apod. [12].

3.1.4 Symptomy

Nejčastějším klinickým příznakem karcinomu prsu je hmatná léze v prsu. Následující symptomy jsou poměrně málokdy se vyskytující, ale při jejich případném objevení by mělo dojít k vyšetření odborníkem:

- bolest prsu či paže;
- asymetrie prsu;
- edém nebo erytém kůže;
- zvýraznění kožních žil;
- vtažení kůže nebo bradavky;
- výtok z bradavky [4].

3.1.5 Screening

Záměrem aktivního vyhledávání karcinomu prsu je jeho případné odhalení v co nejnižším stadiu.

Mamografie

Mamografický screening v posledních letech výrazně snižuje mortalitu u karcinomu prsu. Jeho hlavními výhodami jsou dostupnost, snadná proveditelnost a případná znovu interpretovatelnost, důležitá v případném porovnávání novějších nálezů se staršími snímky [3, 12].

Mamografické vyšetření prsní žlázy využívá měkké rentgenové záření k pořízení dvou snímků prsu. Dvě projekce se používají pro lepší zhodnocení patologie, jelikož celý prs je na snímku sesumován. Vyšetřovací metodou v mammodiagnostice může být i digitální tomosyntéza (3D mamografie) [13].

Jeho nejlepší výtěžnost je u žen středního a vyššího věku, vzhledem k involuci parenchymu žlázy. Obraz prsu je pak přehledný a ve značné většině případů dobře hodnotitelný. U mladých žen může neinvoluovaná mléčná žláza zapříčinit nepřehlednost rentgenového snímku [3].

V České republice je od roku 2002 možnost mamografického vyšetření pro ženy od 45 let, tomuto screeningu se lze bezplatně podrobit každé dva roky [12].

Ultrazvukové vyšetření

V případě ultrazvukového vyšetření je výhodou zobrazení prsu po jednotlivých vrstvách. To má význam při vyšetření prsu mladých žen, hmatných změnách prsní tkáně nebo jako doplňující modalita k mamografickým snímkům [3].

Jiné vyšetřovací metody

Další specifickou vyšetřovací metodou může být magnetická rezonance. Ta se využívá u přesně daných indikací kvůli vysoké senzitivitě, ale nízké specificitě. Doplnujícími metodami pro vyhledávání patologií spojených s karcinomem prsu mohou být i výpočetní tomografie (CT) nebo pozitronová emisní tomografie (PET) [3].

3.1.6 Léčba karcinomu prsu

Chirurgická léčba

Operační výkon na mléčné žláze je nejběžnějším časným léčebným zákrokem při karcinomu prsu. Rozsah výkonu záleží především na velikosti a umístění nádoru. Podle toho se odvíjí typ chirurgického zásahu, ty lze zjednodušeně rozdělit na:

- radikální mastektomie – odstraňuje se celý prs včetně prsních svalů a axilárních lymfatických uzlin, v současné době se již nevyužívá;
- modifikovaná radikální mastektomie – odstraňuje se celý prs, malý prsní sval a axilární lymfatické uzliny;
- totální mastektomie – odstraňuje se veškerá prsní tkáň včetně kůže, dvorce a bradavky;
- lumpektomie – odstraňuje se nádor včetně zasaženého okolního parenchymu a nejméně 1 cm okraje zdravé tkáně lemující nádor, může se provádět s nebo bez axilární disekce [12, 13].

Součástí výkonu může být i odstranění podpažních uzlin. Na základě takto odebrané tkáně se zjišťuje typ nádorového bujení. V současnosti dochází k omezení početné lymfadenektomie a provádí se pouze exstirpace sentinelových uzlin. Podle jejich následného histopatologického vyšetření se rozhodne o další možné disekci axily [4, 13].

Radioterapie

Obecně se radioterapie zabývá léčbou zhoubných nádorů pomocí ionizujícího záření. U karcinomu prsu lze nejčastěji využít následující druhy radioterapie.

Fotonová radioterapie se v současnosti provádí na lineárních urychlovačích a je nejčastěji využívanou technikou zevní radioterapie [11].

Protonová radioterapie je metodou využívající urychlené protony, používá techniku skenování cílového objemu tužkovým svazkem. [11].

Brachyterapie je umístění zdroje ionizujícího záření do místa, kde se nachází nádor nebo ze kterého byl nádor odstraněn. Dávka záření je v tomto případě aplikována pouze do nejbližšího okolí zavedených zdrojů záření [11].

Chemoterapie

Chemoterapie je léčba cytostatiky, chemickými látkami s účinkem na nádorové buňky. Hlavním cílem chemoterapie je poškození DNA (deoxyribonukleové kyseliny) struktury nádorových buněk. Tím se znemožní schopnost jejich dalšího dělení, až dojde k buněčné smrti [3, 4].

Cytostatika se využívají zejména u nádorů s negativními steroidními receptory. Tyto látky působí buď po dobu celého buněčného cyklu, nebo jen v daných fázích buněčného cyklu. V klinické praxi se využívá i kombinace různých cytostatik pro větší účinnost léčby [11].

Nežádoucím vedlejším účinkem chemoterapie i radioterapie je alterace zdravé tkáně. Rozdíl poškození je v systémovém působení cytostatik oproti lokálnímu účinku ionizujícího záření. U obou metod se spoléhá na rychlejší obnovu zdravých buněk ve srovnání s buňkami nádorovými [11].

Hormonální léčba

Hormonální terapie je systémovou léčbou, která závisí na pozitivitě steroidních receptorů nádorových buněk. Podávání hormonální léčby může trvat

mezi několika lety až po celou dobu života pacientky. Tím se snižuje riziko recidivy a riziko nových malignit [4, 13].

Na rozdíl od chemoterapie, která ovlivňuje také zdravé buňky, je cílená farmaceutická léčba specificky zaměřena na konkrétní nádorové buňky. Pokud nejsou steroidní receptory v nádorové tkáni přítomny, hormonální léčba by byla neúčinná a z tohoto důvodu se u těchto případů nepodává [12, 13].

Biologická léčba

Jedná se o tzv. cílenou léčbu využívající vlastní imunitní systém těla. Podávané protilátky působí na konkrétní povrchové receptory nebo struktury uvnitř nádorových buněk [3, 12].

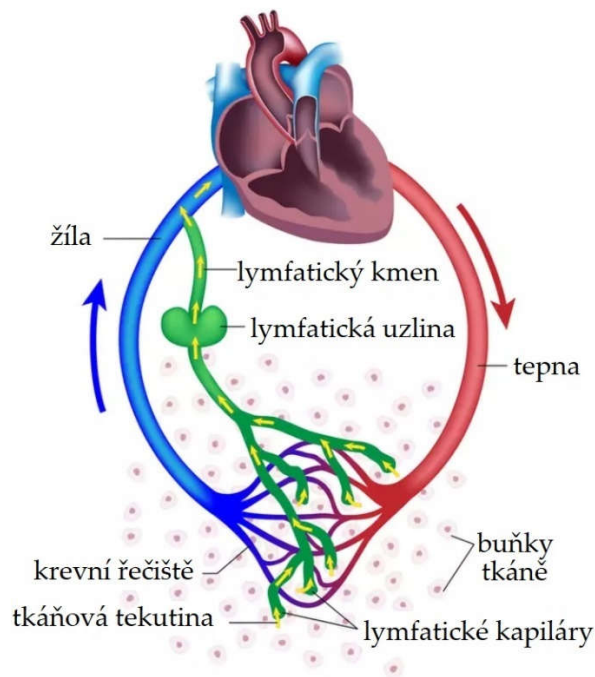
Biologická léčba je vhodná pouze pro konkrétní typy nádorů prsu, které splňují určitý biologický profil. U karcinomu prsu s označením HER2-pozitivní jsou účinnými látkami trastuzumab a lapatinib. U pacientek bez výrazného HER2 receptoru se využívá bezacizumab, který zabraňuje růstu dalšího cévního zásobení nádoru [3, 11].

3.2 Lymfatický systém

Lymfatický systém hraje významnou roli v systémové imunitě, stálosti vnitřního prostředí tzv. homeostáze a návratu tkáňové tekutiny včetně makromolekul zpět do oběhu [10].

3.2.1 Obecná anatomie lymfatického systému

Lymfatický systém se skládá z mízy (*lymfy*), lymfatických cév (*vasa lymphatica*) a lymfatických orgánů. Mezi lymfatické orgány patří lymfatické uzliny (*nodi lymphatici*), mandle (*tonsilae*), brzlík (*thymus*) a slezina (*lien*). Vztah lymfatického systému k systému oběhovému je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3 – Lymfatický systém ve vztahu k oběhovému systému [14]

Tkáňová tekutina a lymfa

Permeabilní stěny krevních kapilár dokáží propustit určité množství krevní plazmy do mezibuněčných prostor. Zde plazma tvoří tkáňovou tekutinu, která mimo to může být produkována i přímo tkáňovými buňkami. Ze zhruba 10 % vytvořené tkáňové tekutiny vzniká lymfa. Ta je z tkání odváděna lymfatickými cévami. Zbytek tkáňové tekutiny je vstřebáván zpět do krevního oběhu. Pokud by tkáňová tekutina nebyla drenována z tkání, došlo by k hromadění tekutiny a postupné celkové zástavě cirkulace. Celkové složení lymfy se odvíjí od tkáně nebo orgánu, v němž se tvoří [10, 15].

Lymfatické cévy

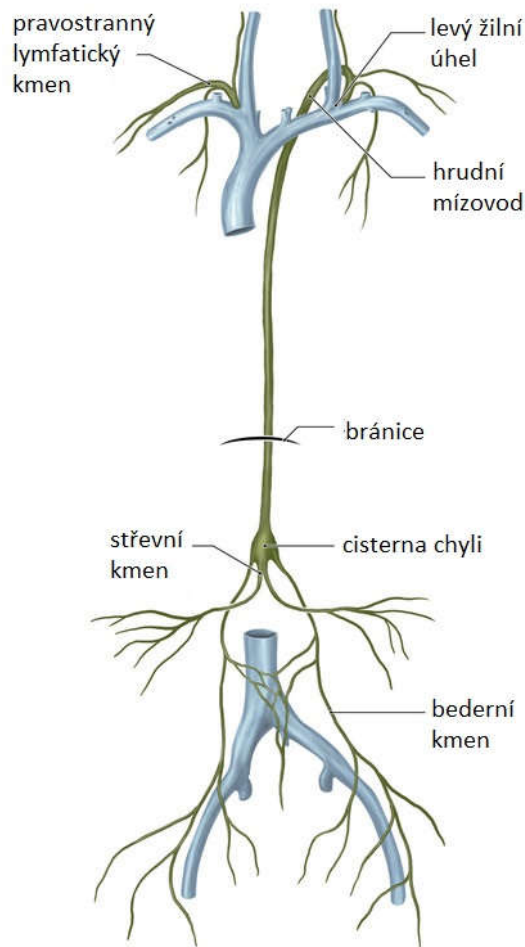
Lymfatický systém je síť cév, která běží souběžně s krevními cévami. Nachází se ve všech oblastech těla s výjimkou centrálního nervového systému, kostní dřeně a bezcévných tkání. Mízní cévy začínají slepě v mezibuněčných prostorech a jejich hlavním úkolem je drenáž tkání. Tkáňová tekutina je odváděna mízními cévami a v podobě lymfy vstřebána zpět do krevního oběhu [9, 10].

Mízní vlásečnice neboli lymfatické kapiláry mají pouze jedinou vrstvu endotelových buněk, v nich je pak mnoho štěrbin o průměru do 2 μm . Štěrbinu umožňují rychlý přechod tekutiny z mezibuněčných prostor do kapilár, vstřebávání tuků a makromolekul. Kapiláry se vzájemně sdružují a vytváří síť lymfatických kapilár [10].

Několik přívodných lymfatických cév (*vasa afferentia*) vede lymfu do lymfatické uzliny. Z lymfatické uzliny je poté lymfa odváděna jednou až dvěma odvodnými lymfatickými cévami (*vasa efferentia*) [9].

Sítě lymfatických kapilár se spojují do povrchových a hlubokých sběrných kolektorů. Kolektory obdobně jako žíly obsahují chlopně a mají endoteliální vrstvu hladkého svalstva. Tato vrstva vytváří tlakový gradient, který je následně udržován kontrakcí kosterních svalů, respiračním pohybem, gravitací a brání zpětnému toku lymfy [2, 10].

Pokračováním kolektorů krku, hrudníku a břicha jsou lymfatické kmeny (*trunci lymphatici*). Pravý horní trup, včetně pravé paže a prsu, odtéká pravostranným lymfatickým kmenem (*ductus lymphaticus dexter*). Lymfatické cévy dolních končetin, pánve, retroperitoneálních a peritoneálních orgánů se pod bránicí spojují v rozšíření hrudního mízovodu (*cisterna chyli*). Hrudní mízovod (*ductus thoracicus*) sbírá následně lymfu ze zbytku těla, včetně levé paže a prsu, dolních končetin a gastrointestinálního traktu, do hrudního mízovodu. Oba kmeny se na svých ústích vlévají do žilních úhlů (pravého a levého) [10]. Anatomie hlavních lymfatických kmenů je ilustrována na obr. 4.



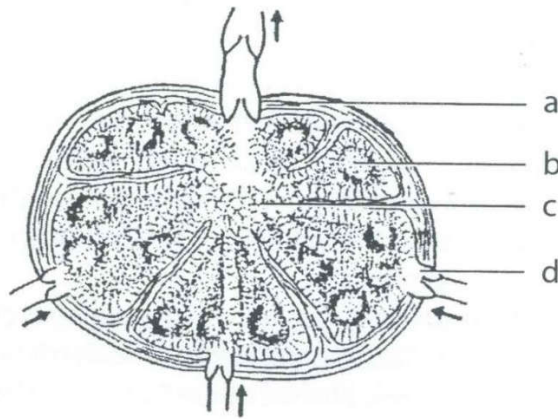
Obr. 4 – Lymfatické kmeny [16]

Lymfatické uzliny

Lymfatické uzliny jsou opouzdřené struktury fazolovitého tvaru nezbytné pro buněčnou imunitu. Jejich hlavním úkolem je filtrace lymfy od mikroorganismů a nádorových buněk. Podél celého lymfatického systému se nachází přibližně 650 nerovnoměrně rozložených uzlin [15]. Počet, tvar i velikost jsou proměnlivé v závislosti na věku a zdravotní anamnéze [10].

Od okolí je každá uzlina oddělená vazivovým pouzdrém. Následující vrstvou uzliny je korová zóna a v centru se nacházející dřeň. Korová část je tvořena folikuly zejména s T a B lymfocyty. Strukturu dřeně uzliny tvoří dřeňové provazce, což jsou výběžky lymfatické tkáně s řidším uskupením lymfocytů

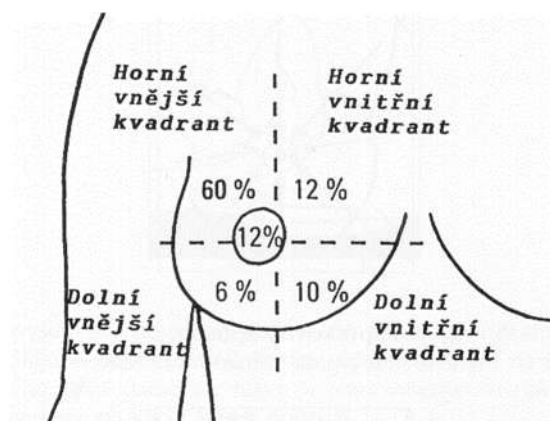
než v korové zóně [2, 10, 15]. Anatomie lymfatické uzliny včetně přívodných a odvodných lymfatických kapilár je znázorněna na obr. 5.



Obr. 5 – Anatomie lymfatické uzliny. a-vazivové pouzdro, b-uzlíky, c-dřeň, d-ústí lymfatické kapiláry [10]

3.2.2 Lymfatická drenáž prsu

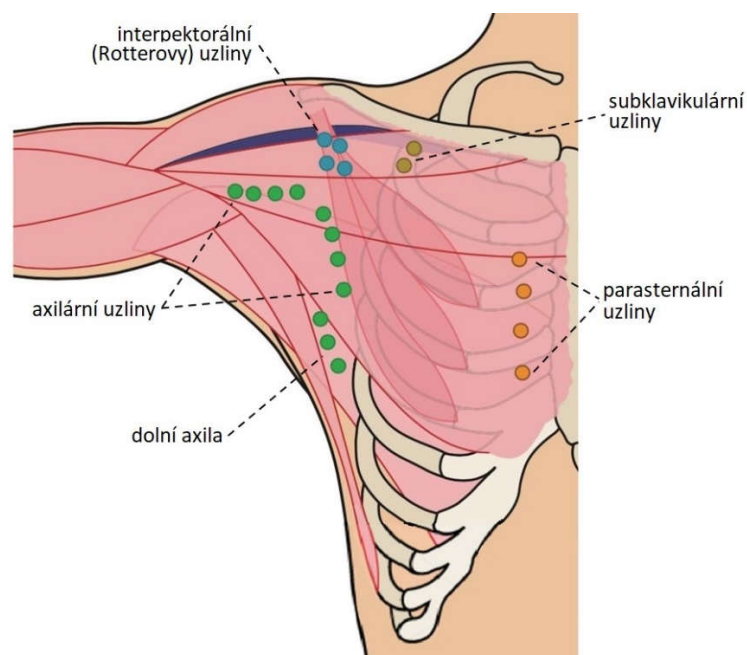
Lymfatická drenáž prsu je nedílnou součástí patologie i léčby karcinomu prsu. Mohutná lymfatická pleteň prsu začíná pod prsním dvorcem, kde navazuje na drobnější kapilární síť lalůček prsu [10]. Odtok lymfy je z prsu zajištěn několika směry převážně podle kvadrantů prsu popsaných na obr. 6, i když lymfatický systém prsu má u každého jedince svoji variabilitu [15].



Obr. 6 – Kvadranty prsu s procentuálním výskytem nádorů prsu v jednotlivých oblastech [17]

Většina lymfatické drenáže prsu směřuje do ipsilaterálních axilárních uzlin, zbytek odtéká do uzlin parasternálních v oblasti hrudní kosti [10]. Lymfatické uzliny drénující prso lze rozdělit (obr. 7) na:

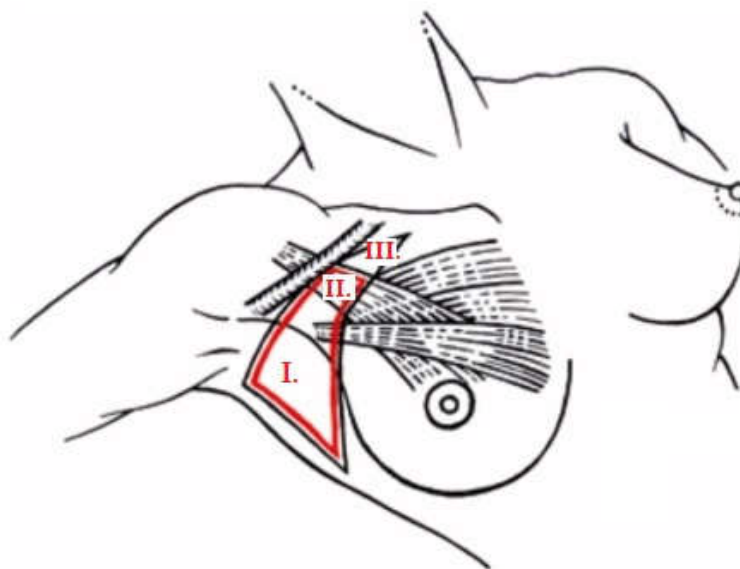
- axilární uzliny;
- uzliny dolní axily;
- subklavikulární uzliny;
- interpektorální (Rotterovy) uzliny;
- parasternální uzliny [15].



Obr. 7 – Lymfatická drenáž prsu [18]

Chirurgicky lze axilární lymfatické uzliny rozdělit, stejně jako je zobrazeno na obr. 8, do tří etáží na základě jejich polohy:

- I. etáž – leží laterálně od malého prsního svalu, pod axilární žílou;
- II. etáž – leží pod malým prsním svalem;
- III. etáž – leží mediálně od malého prsního svalu [15].



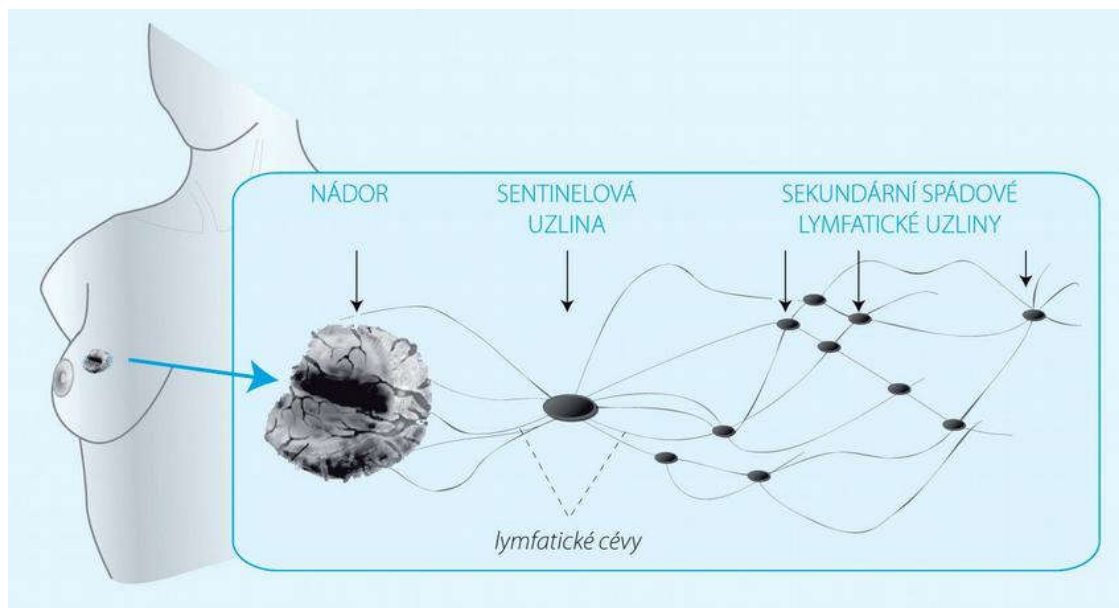
Obr. 8 – Chirurgické etáže axily [4]

Šíření nádorových metastáz je nejčastější do podpažních uzlin. Obecně platí, že nádory zevních kvadrantů prsu metastazují do axilárních, kvadranty vnitřní naopak do uzlin parasternálních [4, 10].

3.3 Sentinelová uzlina

Sentinelová uzlina je definována jako „první přímá lymfatická uzlina nebo uzliny v lymfatickém povodí daného tumoru, do které je nádor drénován a v níž se objevují metastázy“ [1, s. 18]. V lymfatickém spádu nádoru by neměla být obtékána žádnou lymfatickou kolaterálou, jak je znázorněno na konceptu sentinelové uzliny u obr.9. Anatomicky ovšem nemusí být nádoru nejbližší lymfatickou uzlinou [1, 15].

Buňky metastazujícího nádoru se lymfatickou cestou přirozeně šíří do této uzliny. V ní jsou zadrženy filtračním mechanismem v subskapulárních lymfatických sinusech. Nádorová populace může po určité době diseminovat do vyšších etáží lymfatického systému nebo lymfo-venózní cestou tvořit vzdálené metastázy. Doba, po které se prolomí filtrační mechanismus, je zcela individuální [1].



Obr. 9 – Koncept sentinelové uzliny [15]

Lymfatická drenáž prsu je na cestě do axilární oblasti propojena mnoha spojkami. Několik aferentních lymfatik prsu se obvykle shromažďuje v jedné nebo dvou sentinelových lymfatických uzlinách [15].

Biopsie a vyšetření sentinelové uzliny

Hlavním důvodem odstranění a vyšetření sentinelové uzliny je její schopnost zadržet a uchovat šířící se nádorové buňky. Při zjištění metastatického postižení sentinelové uzliny lze předpokládat, že i další uzliny vyšších etází budou postiženy. Při negativním výsledku biopsie je zde pravděpodobnost, že ani další spádové uzliny nejsou infiltrovány. V tomto případě není indikována následná rozsáhlejší lymfadenektomie. Pokud je výsledek pozitivní lze v lymfadenektomii pokračovat. Dochází tak ke značnému snížení rizika komplikací, které jsou s tímto výkonem spojené [1, 2].

Velmi zásadní význam má metoda biopsie sentinelových uzlin ve stagingu nádoru. Patolog může v případě odebrání jedné sentinelové uzliny, či menších identifikovaných uzlin, určit tzv. ultrastaging. Vyšetřením většího počtu řezů je dosaženo vyšší senzitivity a klesá riziko understagingu. Dalším přínosem je

i zjištění tzv. skip metastáz, kdy dochází k rozsevu nádorových buněk přeskočením bližších etází a metastáza se může objevit až ve vyšší etáži [1, 2, 15].

3.4 Možnosti zobrazení sentinelové uzliny

V současné době se k identifikaci sentinelových uzlin využívají dvě metody, které se uplatňují samostatně nebo v kombinaci. Jedna z metod zahrnuje aplikaci lymfotropního barviva, které detekuje sentinelovou uzlinu změnou její barvy. Při druhé metodě se aplikuje radioaktivní látka, která je detekována díky svým fyzikálním vlastnostem [15].

Lymfografie je založena na zobrazení lymfatické drenáže nádoru, a především vyskytujících se sentinelových uzlin. Látky používané k lymfografii protékají sentinelovou uzlinou, ve které se více či méně vychytávají. Podle množství takto vychytaných látek je pak možné sentinelové uzliny vyhledat a následně vyšetřit. Aby byl zaručen správný výsledek vyšetření, je nevhodné ho provádět, pokud jsou známy kontraindikace jako:

- lymfadenopatie vyšetřované oblasti;
- předchozí radioterapie v regionální oblasti vyšetřované lymfatické drenáže;
- předchozí operační výkony v oblasti nádoru nebo lymfatické drenáže.

Zcela individuálně je pak plánováno lymfatické mapování v době těhotenství nebo laktace [4, 15].

3.4.1 Vitální barvení

Detekce sentinelové uzliny pomocí vitálního barvení je metodou čistě peroperační. Při vyšetření se aplikuje lymfotropní barvivo. To se šíří mizním systémem difuzí, čímž se absorbuje do mizních cév a sentinelové uzliny [1].

Nejčastěji využívanými lymfotropními barvivy jsou patentní modř (trifenylmethan) nebo isosulfanová modř (monosodná sůl 2,5-disulfonovaného

trifenylnmethanu). V Evropě je nejpoužívanější sterilní patentní modř, Bleu Patenté V. Množství aplikovaného barviva závisí na velikosti a lokalizaci tumoru, přičemž obvykle se optimální množství pohybuje v rozmezí 0,5 ml až 5 ml [1].

Samotná aplikace se provádí peritumorózně, subdermálně nebo intradermálně. Od provedení intratumorózní aplikace se dnes opouští, vzhledem k velkému riziku uvolnění nádorových buněk. Důležité je také zabránit kontaminaci okolních tkání, což by mohlo vést ke ztrátě přehlednosti operačního pole. Doporučuje se proto použití jehel o co nejmenším průměru. Pro urychlení transportu barviva do první spádové uzliny se doporučuje jemná masáž místa aplikace [1, 15].

Po podání se zhruba 1/3 barviva absorbuje do 30 minut, 2/3 barviva do 1 hodiny a do 24 hodin se absorbuje veškeré barvivo. Barvivo se vylučuje močí, žlučí i stolicí. Jelikož se lymfou barvivo také dostává do žilního systému, může nastat modravé zbarvení kůže pacienta, připomínající hyperkapnii nebo plicní embolii. Zbarvení je ovšem neškodné a zpravidla vymizí do 48 hodin. Někdy na kůži může v některých případech přetrvat modrá tetováž, které se obvykle do půl roku ztratí. Alergické reakce na patentní modř jsou velmi vzácné [1, 15].

Výhodou této metody je menší časová náročnost a nižší náklady. Nevýhodou může být nižší počáteční úspěšnost metody, která závisí na zkušenostech operátora [2].

3.4.2 Lymfoscintigrafie sentinelové uzliny

Je to nejčastější metoda, které se v nukleární medicíně využívá při detekci sentinelové uzliny. Princip tohoto vyšetření spočívá v peroperační detekci gama záření emitovaného aplikovaným radiofarmakem. Cílem je dosáhnout dostatečné akumulace radionuklidu v sentinelové uzlině. K následné detekci dochází pomocí scintilační kamery a gama sondy [1, 2].

Radiofarmakum

Radiofarmaka jsou léčiva obsahující radionuklid. V případě lymfoscintigrafie sentinelové uzliny se radiofarmakum vychytává díky schopnosti makrofágů lymfatické uzliny fagocytovat přitékající koloidní částice. V Evropě převládají jako nosiče radionuklidu u vyšetření sentinelových uzlin nanokoloidní albuminové preparáty. Zvýšená akumulace radioaktivity v porovnání s okolními tkáněmi zajišťuje identifikovatelnost ložiska [1, 19].

Nejčastěji jsou využívána radiofarmaka značená ^{99m}Tc . Radioizotop technecia je čistý gama zářič s fyzikálním poločasem přeměny 6,03 h [20]. Díky svým vlastnostem je vhodný pro scintigrafické zobrazení i pro detekci gama sondou [19].

Aby byly částice v lymfatické uzlině dostatečně intenzivně vychytávány, je potřebný rozsah jejich velikosti od 4 nm do 1000 nm [1]. V případě částic menších než 4 nm, dochází k odplavení přes hrudní mízovod (*ductus thoracicus*) do venózního řečiště a pohlcení v játrech a slezině. Naopak částice příliš velké mohou být zachyceny již v místě aplikace a do lymfatického řečiště se vůbec nemusí vstřebat. Neméně důležité je pro úspěšnou detekci i množství aplikovaných částic [15].

Nejznámějšími používanými radiofarmaky při vyšetření sentinelových uzlin jsou preparáty s obchodními názvy Nanocoll a SentiScint. Preparát Nanocoll obsahuje částice menší než 80 nm. U preparátu SentiScint se uvádí rozmezí velikosti částic 100 až 600 nm [1].

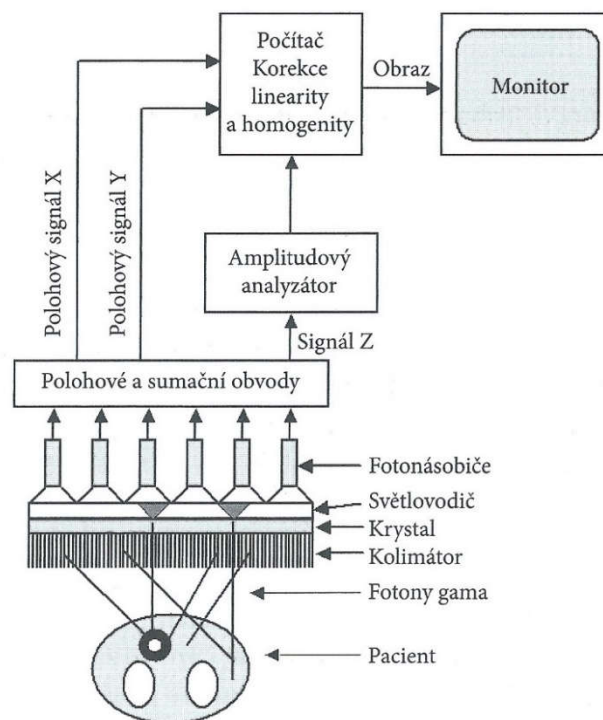
Způsob aplikace radiofarmaka závisí na pracovišti a umístění nádoru. Podání může být intradermální, submukózní, intraparenchymové, peritumorózní, v případě karcinomu prsu i subdermální nebo retroareolární. Aplikované objemy a aktivity radiofarmak se liší podle zvyklostí pracoviště, místa a druhu aplikace. Celkový objem roztoku může být injekčně podán i v několika menších dávkách [15, 19]. Aplikovaná aktivita radiofarmaka u vyšetření sentinelových

uzlin by dle národních diagnostických referenčních úrovní pro diagnostická vyšetření dospělých v nukleární medicíně neměla překročit 150 MBq [21].

Gamakamery

K detekci gama záření u scintigrafických vyšetření se využívají scintilační kamery, gamakamery. Ty slouží k planárnímu zobrazení distribuce radiofarmaka v těle. Základní součásti detekčního systému gamakamery, které lze rovněž vidět na obr. 10, tvoří:

- kolimátor;
- scintilační krystal;
- fotonásobiče;
- vyhodnocovací elektronika [19].

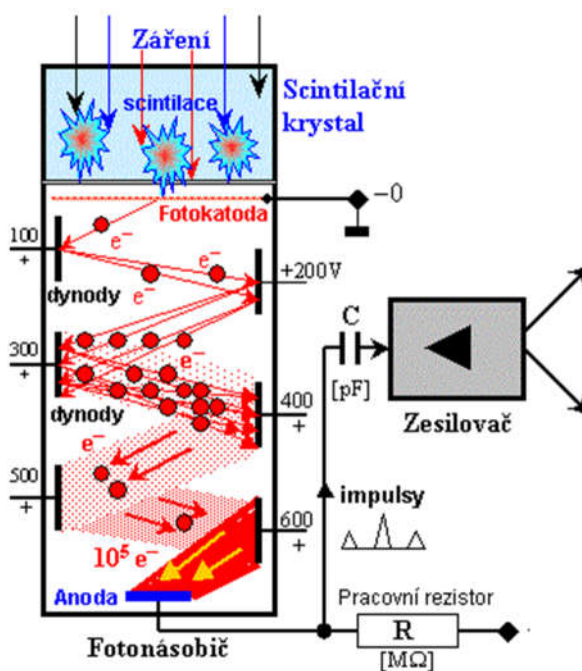


Obr. 10 - Schéma scintilační kamery [20]

Kolimátor je olověná deska s mnoha otvory, vymezující směr fotonů dopadajících na scintilační detektor. Jelikož záření vystupující z pacienta se šíří

izotropně, je úkolem kolimátoru propouštět pouze fotony gama dopadající na detektor kolmo. Ostatní fotony jsou vychytány v olověných septech [19].

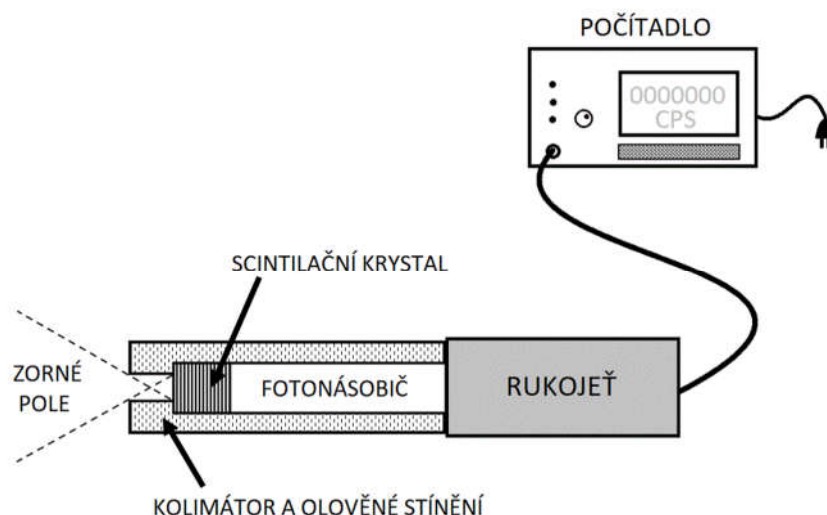
Scintilačním krystalem je obvykle jodid sodný aktivovaný thaliem – NaI(Tl). Interakce ionizujícího záření se scintilačním krystalem vyvolávají excitaci elektronů krystalu. Při následné deexcitaci elektronů jsou emitovány záblesky viditelného světla. Ke krystalu je světlovodivou hmotou přilepeno několik desítek fotonásobičů. Fotonásobič je elektronická součástka převádějící scintilační záblesky na elektronický signál. Schéma scintilačního detektoru včetně fotonásobiče lze vidět na obr. 11. Kromě této konverze slouží fotonásobič ještě k výraznému zesílení elektrického signálu. Za pomoci polohových a sumačních obvodů se vyhodnotí signály ze všech fotonásobičů. Následným stanovením souřadnic signálu X, Y, Z lze získat mapu distribuce radiofarmaka ve tkáni [19, 20].



Obr. 11 – Schéma scintilačního detektoru [19]

Gamasondy

Pro nescintigrafickou detekci aktivit sentinelových uzlin se používají gamasondy. Schéma gamasondy je uvedeno na obr. 12. Jedná se o jednoduché, přenosné přístroje, které obsahují stejně jako gamakamery kolimátor, scintilační krystal a fotonásobič. Scintilačním krystalem může v případě gamasond být NaI(Tl) nebo polovodičový detektor CdZnTe. Lokalizace radioaktivně pozitivních sentinelových uzlin probíhá zjišťováním četnosti impulzů v dané lokalitě. Na displeji přístroje se zobrazuje číselná hodnota impulzů, která se převádí v akustický signál, jehož intenzita je úměrná číselnému údaji [20].



Obr. 12 – Schéma gama sondy [autor]

3.5 Radioaktivní přeměna

Radioaktivní přeměna je samovolný rozpad atomového jádra, který má za následek emisi energie ve formě ionizujícího záření. Nestabilní mateřský radionuklid se takto transformuje na jiná jádra, až do vzniku stabilního nuklidu [20, 22].

Každý radionuklid má specifickou rychlost této přeměny, která se nazývá radioaktivní poločas přeměny. To je doba potřebná k přeměně poloviny původního počtu jader [22].

3.5.1 Přeměna alfa

Během přeměny alfa se z atomového jádra radioaktivního izotopu emituje částice α (alfa). Ta se skládá ze dvou protonů a dvou neutronů, stejně jako jádro helia. Alfa částice jsou relativně velké, ale nepříliš pronikavé. Díky velmi krátké dráze doletu lze tyto částice odstínit listem papíru [22].

3.5.2 Přeměna beta

Mezi částice β (beta) řadíme elektrony nebo pozitrony (elektrony s kladným elektrickým nábojem). Přeměna beta nastává, pokud je v atomovém jádru příliš velký počet protonů nebo neutronů. Existují tyto způsoby beta přeměny:

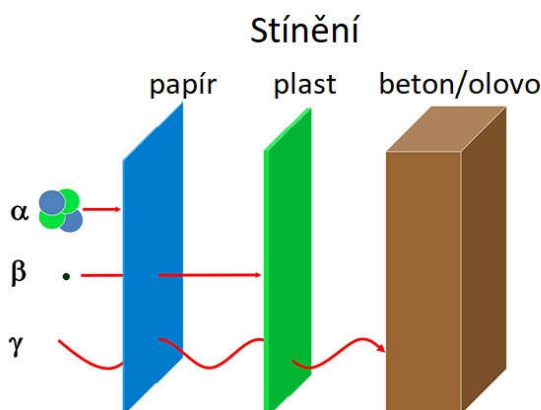
- přeměna β^- – emise elektronů a antineutrína z nestabilního jádra atomu;
- přeměna β^+ – emise pozitronů a neutrína z nestabilního jádra atomu;
- elektronový záchyt – záchyt a pohlcení elektronu z elektronového obalu doprovázeno emisí charakteristického záření (nejčastěji fotony gama záření) [20, 22].

Beta částice jsou pronikavější než částice alfa. Absorbují se v plastech, skle či hliníku, případnou emisi brzděného záření je možné odstínit olovem [23].

3.5.3 Přeměna gama

Radioaktivní přeměna γ (gama) obvykle doprovází přeměnu alfa nebo beta. Jedná se o přechod dceřiného jádra ze vzbuzeného energetického stavu do stavu základního, prostřednictvím emise elektromagnetického záření. Přebytečná energie je tak vyzářena ve formě fotonů gama. Záření gama velmi snadno proniká hmotou. Vhodnými stínícími materiály jsou např. olovo, beton [19, 22].

Na obr. 13 lze vidět příklady vhodných stínících materiálů pro jednotlivé typy záření.



Obr. 13 – Stínění jednotlivých druhů záření (α -alfa, β -beta, γ -gama) [24]

3.6 Ionizující záření

„Ionizující záření je označení pro záření, jehož částice mají energii postačující k ionizaci atomů nebo molekul ozářené látky“ [22, s. 122]. Podle způsobu ionizace látky lze toto záření rozdělit na přímo a nepřímo ionizující.

3.6.1 Přímě ionizující záření

Přímě ionizující záření je tvořeno částicemi, které nesou elektrický náboj. Mezi ně řadíme elektrony, protony, pozitrony, částice α , β^+ , β^- a jiné. Tento typ částic interaguje s elektronovým obalem atomu primárně prostřednictvím Coulombovských sil. Elektrony z atomů nebo molekul jsou odpuzovány nebo přitahovány na základě jejich nábojů [20, 22].

Do skupiny přímě ionizujících záření spadá záření alfa a záření beta. V obou případech se jedná o částicové záření vzniklé radioaktivními přeměnami [22].

3.6.2 Nepřímě ionizující záření

Jedná se o záření, které nenesé žádný elektrický náboj. Nejběžnějšími druhy nepřímě ionizujícího záření je záření gama, rentgenové a neutronové záření.

Záření gama

Gama záření, na rozdíl od alfa nebo beta záření, se skládá z fotonů emitovaných z nestabilních atomových jader. Nemá žádnou hmotu ani náboj, může vzduchem pronikat mnohem dále než alfa nebo beta částicové záření. Odstínit jej lze materiály s dostatečně vysokým atomovým číslem, jako je olovo [19, 23].

Rentgenové záření

Rentgenové záření je velmi podobné záření gama. Rozdíl spočívá v původu rentgenového záření v elektronovém obalu. Obecně je toto záření způsobeno přesuny elektronů z vnější do vnitřní vrstvy elektronového obalu, což má za následek uvolnění přebytečné vazbové energie. Rentgenové záření má delší vlnové délky a nižší energie než záření gama [22].

Neutronové záření

Neutronové záření je tvořeno proudem volných neutronů, které jsou emitovány jaderným štěpením nebo rozpadem některých radioaktivních atomů. Neutrony mají nulový elektrický náboj a nemohou způsobit přímou ionizaci. Proto mohou vzduchem prostupovat stovky metrů bez jakékoli interakce. Účinně lze neutronové záření zastavit materiály bohatými na vodík, jako je beton nebo voda [22, 23].

3.7 Radiační ochrana

Pro diagnostické i terapeutické účely je v nemocničních zařízeních využíváno ionizující záření mnoha způsoby. Na pracovištích nukleární medicíny je použití radionuklidů stejně jako jiné druhy ionizujícího záření regulováno legislativními předpisy. V České republice je nejdůležitějším legislativním požadavkem radiační ochrany Atomový zákon (zákon č. 263/2016 Sb.) [25] a s ním související Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje (vyhláška č. 422/2016 Sb.) [21].

Cílem radiační ochrany je zabezpečit dostatečnou úroveň ochrany zdraví dotčených osob. Biologické účinky ionizujícího záření lze rozdělit na deterministické a stochastické [22].

Deterministické účinky

Jednou z charakteristik deterministických účinků je existence prahové dávky. Radiační expozice nad prahovou dávkou způsobuje smrt nebo degeneraci velkého počtu buněk najednou. Účinek nenastane, pokud je expozice záření pod prahovou dávkou. Z klinických příznaků sem řadíme akutní nemoc z ozáření, akutní lokální změny nebo pozdní nenádorová poškození [20, 22].

Stochastické účinky

Na druhé straně se v radiační ochraně předpokládá, že neexistuje žádná prahová dávka pro stochastické účinky. Za tohoto předpokladu nelze nikdy vyloučit možnost, že ozáření i při extrémně nízkých dávkách může mít určité následky. Neexistuje tedy žádná prahová dávka, pod kterou by bylo jisté, že stochastické účinky nenastanou. Pravděpodobnost těchto účinků roste se zvyšující se dávkou. Patří mezi ně pozdní somatické účinky a genetické mutace [20, 22].

3.7.1 Základní veličiny dozimetrie a radiační ochrany

Aktivita

Aktivita A udává střední počet radioaktivních přeměn dN daného radionuklidu za jednotku času dt . Jednotkou aktivity je becquerel (Bq). Aktivitu lze stanovit na základě vztahu:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right|$$

V praxi je možné se setkat s odvozenými pojmy plošná, objemová nebo hmotnostní aktivita [20, 22].

Absorbovaná dávka

Absorbovaná dávka D je definována pro přímo i nepřímo ionizující záření, jako poměr střední energie $d\bar{\epsilon}$ absorbované v daném objemovém elementu a hmotnosti dm látky obsažené v tomto objemovém elementu. Tato veličina v určitém bodě dané látky je dána vztahem:

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

Jednotkou absorbované dávky je gray (Gy), který odpovídá $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ [22].

Ekvivalentní dávka

Pro ionizující záření je ekvivalentní dávka H_T definována jako součin radiačního váhového faktoru w_R a střední absorbované dávky D_T v orgánu nebo tkáni. Ekvivalentní dávka H_T je veličina radiační ochrany vztažena k deterministickým účinkům ionizujícího záření. Veličina ekvivalentní dávka je stanovena jako:

$$H_T = w_R \cdot D_T$$

Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert (Sv) [22, 23].

Efektivní dávka

Efektivní dávka E je definována jako součet součinů váhových tkáňových faktorů w_T a ekvivalentní dávky H_T v ozářených orgánech nebo tkáních. V závislosti na efektivní dávce E lze posoudit míru rizika stochastických účinků ionizujícího záření [22, 23]. Tato veličina je definována následujícím vztahem:

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

Jednotkou efektivní dávky je sievert (Sv).

Dávkový ekvivalent

Dávkový ekvivalent H je bodová veličina definován jako součin absorbované dávky D v určitém bodě tkáně a jakostního součinitele Q . Tato veličina je stanovena jako:

$$H = Q \cdot D$$

Jednotkou dávkového ekvivalentu je sievert (Sv) [22].

Osobní dávkový ekvivalent

Jedná se o veličinu používanou k monitorování osob na pracovištích se zdroji ionizujícího záření. Osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$ je dávkový ekvivalent v určitém bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně d . Jednotkou je sievert (Sv) [22].

Nejčastěji se používá osobní dávkový ekvivalent v hloubce 0,07 mm pro ozáření kůže a 3 mm pro ozáření oka u nepronikavého záření. Pro pronikavé záření se užívá hodnota hloubky 10 mm [22].

3.7.2 Základní principy radiační ochrany

„Cílem radiační ochrany je zcela vyloučit deterministické účinky ionizujícího záření a omezit pravděpodobnost vzniku stochastických účinků na míru přijatelnou pro jednotlivce a společnost“ [20, s. 46].

Princip zdůvodnění

Všechna lékařská ozáření, ať už diagnostická nebo terapeutická, musí být odůvodněna dostatečným přínosem, převažující případná rizika. Mezi nezdůvodněná ozáření se řadí „radiologická vyšetření pro detekci krádeže, pro právní a pojišťovací účely, pro účely zaměstnávání a pro výzkum, pokud nejsou prováděna v souladu s Helsinskou deklarací“ [22, s. 295].

Princip optimalizace

Běžně je tento princip označován jako ALARA (z anglického názvu „As Low As Reasonably Achievable“), v překladu „tak nízko, jak je rozumně dosažitelné“. Cílem optimalizace je snížit dávku ozáření osob a riziko ohrožení života, zdraví a životního prostředí na přijatelnou úroveň. Současně by měl být zohledněn hospodářský a společenský aspekt ozáření [20, 23].

Princip limitace

Vykonavatel činnosti spojené s ozářením osob je povinen omezit toto ozáření tak, aby celkové ozáření z těchto činností nepřekračovalo limity ozáření [23]. Lékařské ozáření nepodléhá limitům, ovšem je u něj nutné uplatnit principy zdůvodnění a optimalizace [20].

Základní limity ozáření jsou rozděleny do tří skupin (pro obyvatelstvo, pro radiační pracovníky a pro žáky, studenty). Všechny stanovené limity jsou shrnuty v tab. 1 a jsou pevně ukotveny ve Vyhlášce č. 422/2016 Sb. (Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje).

Tab. 1 – Tabulka limitů, zdroj dat: [21]

	Efektivní dávka za rok	Roční ekvivalentní dávka		
		Oční čočka	1 cm ² kůže	Končetiny
Obecné limity	1 mSv	15 mSv	50 mSv	-
Limity pro radiační pracovníky	20 mSv / 1 rok 100 mSv / 5 let	50 mSv / 1 rok 100 mSv / 5 let	500 mSv	500 mSv
Limity pro žáky a studenty	6 mSv	15 mSv	150 mSv	150 mSv

Princip zabezpečení zdrojů ionizujícího záření

Všechny zdroje ionizujícího záření musí být zabezpečeny před odcizením, přístupem nepovolaných osob a nezdůvodněným použitím. Stejně tak by za předvídatelných podmínek nemělo dojít ke ztrátě kontroly nad zdroji ionizujícího záření [21].

3.7.3 Radiační ochrana pracovníků

Následující způsoby radiační ochrany pracovníků, kteří přichází do styku s uzavřenými i otevřenými zdroji, slouží především k dodržení principů optimalizace a limitace.

Ochrana časem

Absorbovaná dávka záření je přímo úměrná době expozice. Zkrácením doby pobytu pracovníka v prostředí s ionizujícím zářením, se snižuje i jeho radiační zátěž. Pracovní postupy, které mají být provedeny v blízkosti zdroje ionizujícího záření, je dobré si předem nastudovat a nacvičit. Stejně tak je vhodné střídání pracovníků, tím se sníží ozáření jednotlivce [23].

Ochrana vzdáleností

Ochrana vzdáleností vyplývá ze skutečnosti, že intenzita záření klesá se přibližně se čtvercem vzdálenosti od zdroje. Pokud tedy zdvojnásobíme vzdálenost osoby od zdroje ionizujícího záření, poklesne hodnota obdržené dávky na čtvrtinu [23].

V nukleární medicíně hraje ochrana vzdáleností důležitou roli. Personál na těchto odděleních přichází přímo do styku s radiofarmaky. Při manipulaci s otevřenými zdroji se doporučuje používat pinzety a jiné manipulátory. Pacienti jsou vždy předem seznámeni s průběhem výkonu, aby byl omezen kontakt personálu s pacientem po aplikaci radiofarmaka [23].

Ochrana stíněním

Použití ochranných stínících prostředků výrazně zeslabuje až úplně zamezuje prostupu ionizujícího záření. Stínící vrstvy se umísťují mezi zdroj ionizujícího záření a pracovníka. Materiál se volí na základě druhu záření [20].

K nejčastěji používaným ochranným prostředkům patří olověné zástěry, nákrční límce a brýle. Na odděleních nukleární medicíny se mimo již zmíněné ochranné prostředky využívají i olověné kontejnery a ochranné stínící kryty na injekční stříkačky [20, 23].

3.7.4 Kategorizace pracovišť

Pracoviště se zdroji ionizujícího záření se dělí do čtyř kategorií podle možné míry ohrožení zdraví, životního prostředí.

Do první kategorie se řadí pracoviště s drobným zdrojem ionizujícího záření, jehož typ není schvalován Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Také pracoviště s kostním denzitometrem a pracoviště s veterinárním nebo zubním rentgenovým zařízením [21].

Do druhé kategorie patří pracoviště s rentgenovým zařízením určeným k radiodiagnostice nebo radioterapii [21].

Ve třetí kategorii jsou pracoviště s urychlovači částic a pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zdroj, které je určeno k radioterapii [21].

Čtvrtá kategorie zahrnuje jaderná zařízení a uložení radioaktivních odpadů [21].

3.7.5 Kategorizace radiačních pracovníků

Radiační pracovníky lze podle jejich potenciálního ozáření za běžného provozu zařadit do kategorie A nebo B.

Do kategorie A řadíme radiační pracovníky, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně, ekvivalentní dávku vyšší než 15 mSv na oční čočku,

nebo ekvivalentní dávku vyšší než 3/10 limitu ozáření pro kůži a končetiny. Ostatní radiační pracovníci mimo kategorii A jsou zařazeni do kategorie B [21].

3.7.6 Osobní dozimetrie pracovníků

Osobní dozimetrie se zabývá měřením, výpočtem a hodnocením osobních dávek a přiřazení těchto dávek jednotlivcům. Využívá se především u osob, které jsou vystaveny záření souvisejícím s jejich pracovními činnostmi. Měření probíhá pomocí zařízení známých jako dozimetry [20].

Osobní dozimetry se obvykle používají filmové nebo fotoluminiscenční, které je možné podle charakteru práce doplnit prstovými dozimetry. Pro okamžité měření osobní radiační dávky může být pracovník vybaven dozimetrem elektronickým. Na pracovištích, kde nelze vyloučit překročení limitů ozáření pro radiačního pracovníka v důsledku jednorázového ozáření, jsou operativní dozimetry typu elektronických dozimetrů povinné.

Dozimetry musí být schopny zaznamenat všechny druhy záření, které mohly zapříčinit zevní ozáření pracovníků. Naměřené hodnoty osobního dávkového ekvivalentu jsou přepočítávány na efektivní dávku. Ta pak slouží k posouzení dodržení limitů pro pracovníky s ionizujícím zářením [19, 22].

Osobní dozimetry se zpravidla nosí na referenčním místě, kterým je levá přední strana hrudníku. V případě nošení ochranné stínící zástěry se umísťují vně této zástěry [21]. Prstové dozimetry se nosí pod rukavicí na prstech pravé nebo levé ruky, v závislosti na charakteru práce a také toho, zda je pracovník levák či pravák [23].

Obecně platí, že na pracovištích radiodiagnostiky, radioterapie a nukleární medicíny, se osobní dozimetrie zevního ozáření zajišťuje osobními případně i prstovými dozimetry. Pracovníci kategorie A mají povinnost nosit osobní dozimetry, které jsou měsíčně vyhodnocovány a evidovány.

Pracovníkům kategorie B je doporučeno nošení osobních dozimetrů, které jsou vyhodnocovány v tříměsíčních cyklech [21, 22].

Osobní dozimetrie na pracovištích nukleární medicíny

Pracoviště nukleární medicíny spadají většinou do II. kategorie pracovišť se zdroji ionizujícího záření. Při provádění terapeutických výkonů s radiojódem ¹³¹I se pracoviště řadí do III. kategorie. Zajištění osobní dozimetrie na pracovištích nukleární medicíny může být provedeno osobními dozimetry v jednoměsíčním kontrolním cyklu a prstovými dozimetry [23].

4 METODIKA

Sběr dat pro tuto bakalářskou práci probíhal ve dvou nemocničních zařízeních. Zařízení se liší použitým protokolem pro biopsii sentinelové uzliny. V dalším textu jsou rozděleny jako „nemocnice A“ a „nemocnice B“.

Pro uskutečnění praktické části byl nemocnicí A i B udělen písemný souhlas o umožnění sběru dat. V obou nemocničních zařízeních byla všechna měření prováděna se souhlasem dohlížející osoby a přítomného personálu.

4.1 Seznámení s pracovišti

Během první návštěvy pracovišť nukleární medicíny i oddělení chirurgie jsem byla pověřenou osobou seznámena s chodem pracoviště, časovým harmonogramem výkonů, používanými metodami a prostředky. Následně byla pod dohledem pověřené osoby realizována měření radiační zátěže personálu a provedeno zaznamenání naměřených hodnot.

4.1.1 Nemocnice A

V nemocničním zařízení A probíhá vyšetření sentinelové uzliny v jednodenním protokolu. Tedy lymfoscintigrafie i chirurgický zákrok probíhají v jeden den.

Pracoviště nukleární medicíny A

Oddělení nukleární medicíny A standardně provádí konvenční scintigrafické výkony i vyšetření pomocí pozitronové emisní tomografie (PET). Nejčastější jsou scintigrafická vyšetření skeletu, ledvin, plic, štítné žlázy, perfúze myokardu a mozku, zobrazování nádorů a zánětů. Toto oddělení disponuje třemi gamakamery, z nichž dvě jsou hybridními SPECT/CT gamakamerami. Dále je zde v provozu i hybridní zobrazovací přístroj PET/CT. Kromě diagnostických vyšetření provádí pracoviště nukleární medicíny A terapie nádorových i nenádorových onemocnění pomocí radiofarmak emitujících alfa i beta záření.

V radiofarmaceutické laboratoři jsou připravována nejen radiofarmaka značená ^{99m}Tc , ale i ^{111}In , ^{67}Ga nebo ^{123}I . Mimo přípravu radiofarmak se laboratoř zabývá i značením krevních elementů, včetně značení leukocytů pro scintigrafii zánětu nebo značení trombocytů pro stanovení jejich přežívání.

Pracoviště chirurgické kliniky A

Chirurgická klinika A vedle všeobecné chirurgické problematiky zabezpečuje i operace, jak pro nezhoubná onemocnění, tak pro nádorová onemocnění.

Poskytována je i specializovaná péče o nemocné s onemocněním mléčné žlázy, pro muže i ženy. Před samotným chirurgickým zákrokem prochází všichni pacienti s nádorovým onemocněním prsu přes odbornou mezioborovou komisi. Pro zhoubné onemocnění prsní žlázy je obvykle operován jak vlastní tumor prsu, tak současně i uzlina či uzliny ve spádové podpažní oblasti.

4.1.2 Nemocnice B

Nemocniční zařízení B vyšetřuje sentinelové uzliny ve dvoudenním protokolu. U dvoudenního protokolu se nejdříve provede detekce sentinelové uzliny a druhý den operační zákrok.

Pracoviště nukleární medicíny B

Pracoviště nukleární medicíny B zajišťuje řadu standardních diagnostických zobrazovacích metod a metod léčebných s použitím otevřených radionuklidů. Je vybaveno pěti gamakamerami, z nichž dvě jsou hybridní SPECT/CT a jedna je speciální kardiologickou gamakamerou.

Součástí pracoviště je i radiofarmaceutická laboratoř, která připravuje diagnostická radiofarmaka používaná k in vivo zobrazovacím vyšetřením. V laboratoři se připravují radiofarmaka značená radionuklidy ^{99m}Tc , ^{111}In , ^{67}Ga a ^{123}I . Provádí se zde také in vitro značení krevních elementů, nejčastěji značení leukocytů pro scintigrafii zánětlivých ložisek.

Pracoviště hrudní chirurgie B

Oddělení hrudní chirurgie B je samostatným specializovaným pracovištěm. Současně oddělení zajišťuje chirurgickou péči o mammologické pacienty ve spolupráci s mammárním týmem. Z hmatných nádorů prsu a podezřelých nehmatných ložisek zde zajišťují odběr biopsií, včetně biopsie sentinelové uzliny u malignit prsu nebo kůže.

4.2 Sběr dat

Data byla sbírána na odděleních nukleární medicíny a chirurgie v období 19.11.2019–10.3.2020.

Vybraný soubor zdravotnického personálu

V obou nemocničních zařízeních tvořili sledovaný soubor lékaři oddělení nukleární medicíny a operatéri hrudní chirurgie. Každému z nich byl při daných výkonech připnut osobní elektronický dozimetr. Hodnoty osobních dávkových ekvivalentů $H_p(10)$ získaných z osobních elektronických dozimetrů jednotlivých pracovníků byly zaznamenány a analyzovány.

Během 5 měření, která probíhala na pracovišti nukleární medicíny A, byli sledováni 3 lékaři tohoto oddělení. Všichni mají dlouholeté zkušenosti z oblasti nukleární medicíny i samotného značení sentinelových uzlin. V průběhu navazujících 5 měření na chirurgické klinice A byli sledováni 3 operatéri. Dlouholeté zkušenosti z oblasti chirurgie i mammologie mají dva z nich, jeden je v tomto oboru „začátečníkem“ chystajícím se na atestaci.

V nemocničním zařízení B bylo provedeno 15 měření. Během nich byla sledována radiační zátěž u 2 lékařů nukleární medicíny B, kteří mají dlouholeté zkušenosti ve svém oboru včetně přednostování tohoto oddělení. Na hrudní chirurgii B byli sledováni 2 chirurgové s mnohaletou praxí v oblasti hrudní chirurgie i mammologie.

Vybrané pracovní postupy

Měření radiační zátěže u vybraného souboru zdravotnických pracovníků probíhalo vždy pomocí dozimetru v aplikační místnosti nukleární medicíny nebo na operačním sále chirurgie.

Na oddělení nukleární medicíny byl dozimetr vynulován a připnut lékaři těsně před aplikací radiofarmaka pacientovi. Výsledné hodnoty byly zaznamenány bezprostředně po odložení aplikační stříkačky.

Při sběru dat na operačních sálech byl vynulovaný dozimetr umístěn na halenu hlavního operátora před nasazením sterilního jednorázového operačního pláště, tedy před samotným zahájením operace. Naměřené hodnoty byly z dozimetru odečteny po vyjmutí poslední nalezené sentinelové uzliny, kdy byla zkontrolována nulová residuální aktivita axilární oblasti.

Použitý dozimetr a jeho umístění

Radiační zátěž personálu byla měřena osobním elektronickým dozimetrem značky Mirion, typ RAD-60S. Běžně se tento druh dozimetru, který je zobrazen na obr. 14, používá pro monitorování aktuálních dávkových ekvivalentů gama nebo rentgenového záření.



Obr. 14 – Elektronický dozimetr Mirion, typ RAD-60S [autor]

Detektorem pro tento typ elektronického osobního dozimetru je energeticky kompenzovaná křemíková dioda. Digitální displej dokáže v reálném čase zobrazit dávku nebo dávkový příkon. Měřící rozsah dozimetru je 1,00 μSv až 9,99 Sv, případně 5 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ až 3 $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Pod pojmem dávka a dávkový příkon se v tomto případě rozumí osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$ a příkon osobního dávkového ekvivalentu, nikoliv absorbovaná dávka [26].

Dozimetr byl u všech vybraných pracovníků umístěn na referenční místo, kterým je přední levá strana hrudníku. Upevňovací svorka směřovala od těla pracovníků.

Sledované parametry

Před zahájením sběru dat byly vytvořeny vlastní protokoly pro zaznamenávání údajů při měřeních na oddělení nukleární medicíny a chirurgie. Na obr. 15 a obr. 16 jsou zobrazena záhlaví těchto protokolů.

pracoviště/výkon						
datum	pacient - věk - pohlaví - diagnóza	aplikovaná aktivita [MBq]	čas aplikace radiofarmaka	čas scintigrafie	osobní dávkový ekvivalent [μSv]	pozn.

Obr. 15 – Záhlaví protokolu pro oddělení nukleární medicíny

pracoviště/výkon							
datum	pacient - věk - pohlaví - diagnóza	aplikovaná aktivita [MBq]	datum a čas aplikace	začátek výkonu	čas vyjmutí	osobní dávkový ekvivalent [μSv]	počet uzlin

Obr. 16 – Záhlaví protokolu pro chirurgická oddělení

Všechny sledované parametry se zaznamenanými hodnotami jsou uvedeny v přílohách 1–4. Jedná se o:

- pohlaví, věk a diagnózu pacienta;
- množství aplikované aktivity a celkový počet vpichů;
- čas aplikace a scintigrafie;

- čas zahájení a konce biopsie sentinelové uzliny;
- počet vyjmutých radioaktivních sentinelových uzlin;
- osobní dávkový ekvivalent;
- poznámky v případě provedení mastektomie před odstraněním sentinelové uzliny.

Informace o pohlaví, věku, diagnóze pacienta a celkové aplikované aktivitě byly ústně sděleny lékařem nukleární medicíny. Zbytek parametrů byl sledován v reálném čase při osobní přítomnosti autorky práce u jednotlivých výkonů.

4.3 Vyhodnocení dat

Hodnoty naměřených osobních dávkových ekvivalentů vztažených na jeden daný výkon při jednodenním nebo dvoudenním protokolu jsou statisticky porovnány metodou t-testu. Shody rozptylů jsou porovnány f-testem při hladině významnosti $\alpha 0,05$. Zpracování všech dat proběhlo v programu Microsoft Excel.

Při přepočtech aktivit je zohledněn čas, který uplynul od aplikace radiofarmaka po začátek chirurgického zákroku. Aktivita aplikovaného radionuklidu ^{99m}Tc klesá exponenciálně s časem t podle rovnice:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Rovnice byla upravena pomocí vztahu pro přeměnovou konstantu λ :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_f}$$

Hodnoty získané při sběru dat jsou dosazeny do upravené rovnice:

$$A_t = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_f}}$$

A_t ...aktivita v době chirurgického zákroku;

A_0 ...aktivita v době aplikace radiofarmaka;

T_f ...fyzikální poločas přeměny ^{99m}Tc , který je roven 6 hod;

t ...časový rozdíl mezi okamžikem aplikace radiofarmaka a začátkem operace.

5 VÝSLEDKY

Všechny naměřené a zaznamenané hodnoty jsou popsány, uspořádány do tabulek a pro lepší přehlednost též do grafů.

5.1 Popis protokolů nemocnic

Ve zvolených nemocničních zařízeních probíhá vyšetření sentinelových uzlin v jednodenním nebo dvoudenním protokolu. Protokoly se liší jak dobou trvání, tak i množstvím aplikovaných aktivit.

Nemocnice A

Podle statistik z let 2015–2019, uvedených v tab. 2, je průměrný počet značení sentinelových uzlin v jednodenním protokolu nemocnici A 202 vyšetření za rok. Za posledních pět let bylo provedeno nejvíce značení v roce 2018 s počtem 226.

Tab. 2 - Počet vyšetření sentinelových uzlin v letech 2015–2019, nemocnice A

Rok	Počet vyšetření sentinelových uzlin
	Nemocnice A
2015	169
2016	185
2017	211
2018	226
2019	218

Na oddělení nukleární medicíny A se mezi 8–9 hodinou ranní provede aplikace radiofarmaka. Aplikaci provádí lékař nukleární medicíny za asistence radiologického asistenta nebo zdravotní sestry. Použitým radiofarmakem je ^{99m}Tc-Senti-Scint. U značení karcinomu prsu pro sentinelové uzliny se do okolí nádoru aplikuje 2–4 vpichy celková aktivita 120 MBq. Pacientům je doporučeno jemné masírování místa vpichu, aby se urychlil odtok radiofarmaka lymfatickou cestou.

Vlastní lymfoscintigrafické vyšetření je zahájeno 30 minut od aplikace. Pacient je položen na záda pod detektor dvouhlavé tomografické kamery. Snímání se provádí v přední projekci, případně je doplněno scintigramy v projekci bočné. Vše se ukončuje zakreslením zjištěné sentinelové uzliny na pokožku pacienta. Při zakreslování leží pacient v poloze, ve které bude operován. Pokud dojde k zobrazení více sentinelových uzlin, provádí se zakreslení všech zobrazených uzlin. Zakreslení je prováděno ve dvou navzájem kolmých projekcích. Výsledná zpráva lymfoscintigrafie je z oddělení nukleární medicíny předána chirurgickému týmu.

Časový interval mezi provedením lymfoscintigrafie a chirurgickým výkonem se pohybuje od 2 do 3 hodin. Na chirurgickém sále operátor nejprve detekuje a odstraní sentinelové uzliny a následně nádor. V některých případech je možné primárně odstranit nádor a následně preparovat uzliny. K detekci sentinelových uzlin se využívá ruční gamasonda Neoprobe neo2000. Po odstranění značených uzlin je zkontrolováno množství residuální aktivity v oblasti axily, která by měla být na konci zákroku nulová. Aktivita vypreparovaných sentinelových uzlin je ověřována i ex vivo.



Obr. 17 – Gamasonda Neoprobe neo2000 [27]

Posledním krokem je histopatologické vyšetření vyjmutých sentinelových uzlin.

Nemocnice B

Na oddělení nukleární medicíny B je podle statistik z let 2015–2019, popsaných v tab. 3, průměrný roční počet vyšetření sentinelových uzlin 70. Nejvíce bylo realizováno 120 značení v roce 2015. Nemocnice B využívá dvoudenní protokol.

Tab. 3 - Počet vyšetření sentinelových uzlin v letech 2015–2019, nemocnice B

Rok	Počet vyšetření sentinelových uzlin
	Nemocnice B
2015	120
2016	21
2017	63
2018	58
2019	88

První den se pacient dostaví na oddělení nukleární medicíny B, kde je kolem 11 hodiny dopoledne provedena aplikace radiofarmaka. Stejně jako na oddělení nukleární medicíny A je aplikace provedena lékařem nukleární medicíny. Použitým radiofarmakem je také ^{99m}Tc -Senti-Scint. Aplikuje se celková aktivita 60 MBq během 2–5 vpichů.

Lymfoscintigrafické vyšetření probíhá 2 hodiny po aplikaci radiokoloidu. Samotná detekce sentinelové uzliny probíhá stejně jako u zmíněného jednodenního protokolu. Zakreslení sentinelové uzliny na pokožku pacienta v tomto protokolu neprobíhá. Ovšem k výsledné zprávě z oddělení nukleární medicíny jsou doloženy scintigramy dané oblasti.

Pacient je operován až druhý den po lymfoscintigrafii. Interval mezi vyšetřením a operací se pohybuje okolo 20–24 hodin. Na chirurgickém sále operatér detekuje sentinelovou uzlinu ruční gamasondou Eurorad Europrobe 1.

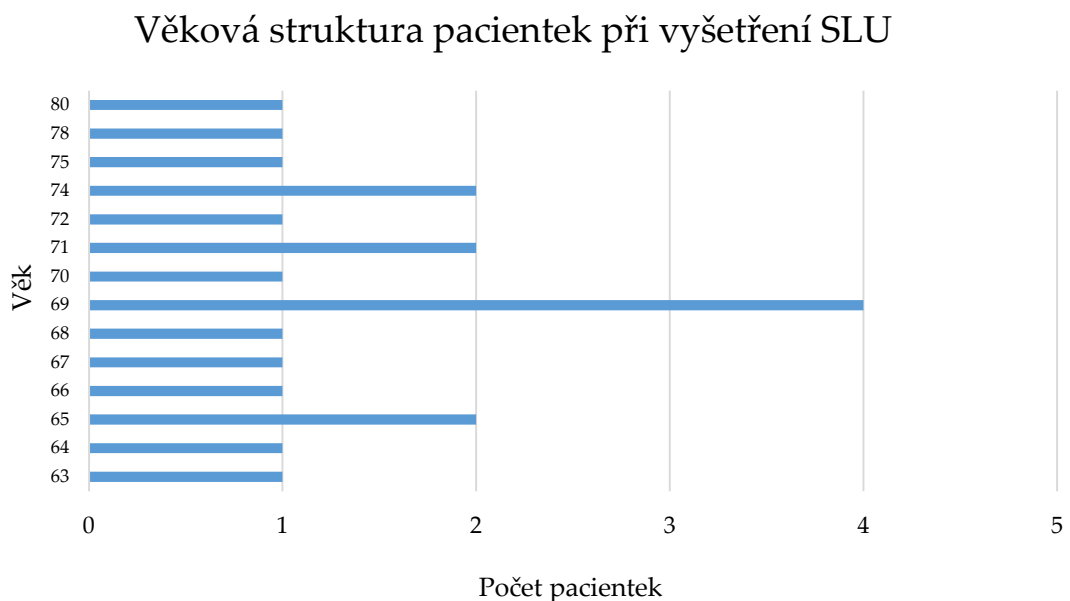


Obr. 18 – Gamasonda Eurorad Europrobe 1 [28]

Odstranění sentinelové uzliny nejčastěji probíhá před odstraněním nádoru. V operované oblasti je několikrát ověřena nulová residuální aktivita. Aktivita odebraných sentinelových uzlin je zkontrolována gamasondou a preparát poslán na histopatologické vyšetření.

5.2 Vyšetřovaní pacienti

Celkově bylo při měřeních vyšetřeno 20 pacientů. Vyšetřované pacienty představovaly výhradně ženy. Průměrný věk patientek při vyšetření sentinelové uzliny byl 70 let. Nejmladší pacientce z našeho souboru bylo 63 let, naopak nejstarší měla 80 let. Věková struktura patientek při intervencích na sentinelové uzlině je graficky znázorněna na obr. 19.



Obr. 19 – Věková struktura patientek při 20 vyšetřeních sentinelových uzlin

5.3 Aplikované aktivity

Při jednodenním i dvoudenním protokolu využívají obě oddělení nukleární medicíny ke značení sentinelových uzlin ^{99m}Tc -Senti-Scint. Rozdíly v aplikovaných aktivitách během měření lze vidět v tab. 4.

V případě jednodenního protokolu nemocnice A byla průměrná aplikovaná aktivita při značení sentinelových uzlin 118,2 MBq. Nejmenší aplikovaná aktivita byla 110 MBq, největší 123 MBq.

Během dvoudenního protokolu nemocnice B byla průměrná aplikovaná aktivita 56,7 MBq. Z 15 měření bylo aplikováno nejméně 52 MBq a nejvíce 63 MBq.

Tab. 4 – Souhrn aplikovaných aktivit na odděleních nukleární medicíny

	Nukleární medicína A	Nukleární medicína B
Počet měření	5	15
Nejmenší aplikovaná aktivita	110 MBq	52 MBq
Největší aplikovaná aktivita	123 MBq	63 MBq
Průměrná aplikovaná aktivita	118,2 MBq	56,7 MBq

Jednodenní protokol

Jednodenní protokol nemocnice A zahrnuje aplikaci radiofarmaka a biopsii sentinelové uzliny v jeden den. Mezi aplikací radiofarmaka a začátkem biopsie v průměru uplynuly 2 hodiny 13 minut. V tab. 5 jsou zaznamenány časové údaje jednodenního protokolu spolu s časovým úsekem mezi aplikací radiofarmaka a samotnou biopsií.

Tab. 5 – Zaznamenané časové údaje jednodenního protokolu

Jednodenní protokol		
Čas aplikace	Začátek biopsie	Interval
8:15	10:20	2:05
8:35	11:50	3:15
8:40	10:30	1:50
10:00	11:45	1:45
8:20	10:30	2:10

Pokud bychom brali v úvahu aplikovanou aktivitu 118,2 MBq a časový údaj 2 hodiny 13 minut od aplikace k začátku biopsie. Aktivita aplikovaného ^{99m}Tc -Senti-Scint by za tento čas klesla na 91,5 MBq.

Dvoudenní protokol

Dvoudenní protokol nemocnice B spočívá v biopsii sentinelové uzliny následující den po aplikaci. Mezi aplikací radiofarmaka a začátkem biopsie v průměru uplynulo 21 hodiny 39 minut. V tab. 6 jsou zaznamenány časové údaje jednodenního protokolu spolu s intervalem mezi aplikací radiofarmaka a začátkem chirurgického výkonu.

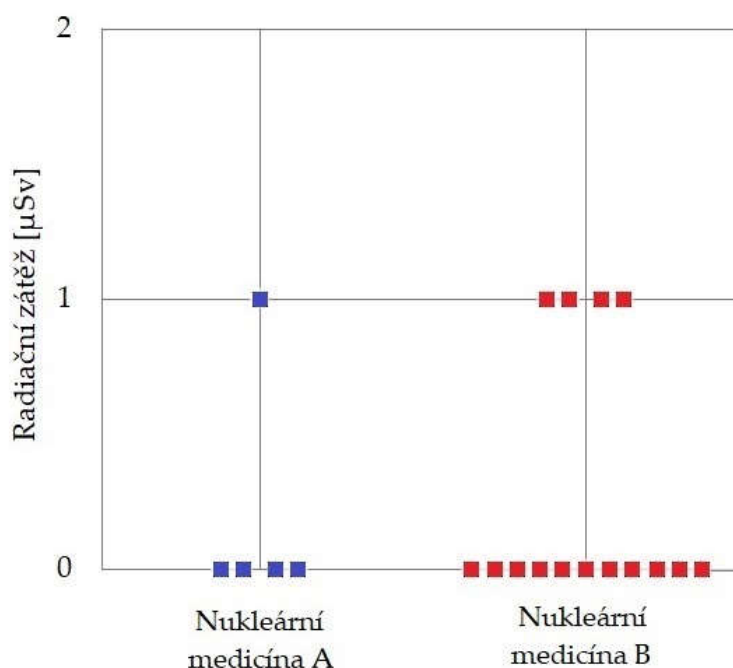
Tab. 6 – Zaznamenané časové údaje dvoudenního protokolu

Dvoudenní protokol		
Čas aplikace (první den)	Začátek biopsie (druhý den)	Interval (hodiny:minuty)
11:25	8:30	21:05
11:30	9:45	22:15
11:30	8:15	20:45
11:35	9:15	21:40
11:00	8:30	21:30
11:10	9:30	22:20
11:20	8:10	20:50
11:25	9:15	21:50
12:15	9:40	21:25
11:00	8:30	21:30
11:10	9:45	22:35
11:20	8:10	20:50
11:35	9:30	21:55
10:15	8:20	22:05
11:15	9:30	22:15

Při aplikované aktivitě 56,7 MBq a začátku biopsie 21 hodin 39 minut od aplikace, klesne aktivita aplikovaného ^{99m}Tc -Senti-Scint na 4,7 MBq.

5.4 Radiační zátěž lékařů nukleární medicíny

Ve sledovaném souboru lékařů nukleárních medicín, kteří aplikovali radiofarmakum pro lymfoscintigrafii sentinelové uzliny karcinomu prsu, jsou naměřené hodnoty graficky znázorněné na obr. 20.



Obr. 20 – Naměřené hodnoty radiační zátěže lékařů nukleární medicíny A a B

Naměřené hodnoty radiační zátěže u lékařů aplikujících radiofarmakum jsou také zpracovány do tab. 7.

Tab. 7 – Radiační zátěž lékařů na oddělení nukleární medicíny (v μSv)

personál	Lékaři	
	Nukleární medicína A	Nukleární medicína B
oddělení		
počet měření	5	15
medián	0	0
průměr	0,20	0,27
směrodatná odchylka	0,45	0,46
max. hodnota	1	1
min. hodnota	0	0
<i>p</i>	0,78	

Na nukleární medicíně A byla průměrná aplikovaná aktivita radiofarmaka 118,2 MBq. Maximální naměřená hodnota osobního dávkového ekvivalentu lékařů $H_p(10)$ byl 1 μSv . Při jednodenním protokolu nemocnice A dosahovala průměrná radiační zátěž lékaře nukleární medicíny $(0,20 \pm 0,45)$ μSv .

Nukleární medicína B používající dvoudenní protokol průměrně aplikovala aktivitu radiofarmaka 56,7 MBq. Maximální naměřená hodnota osobního dávkového ekvivalentu $H_p(10)$ byla stejná jako na nukleární medicíně A, tedy 1 μSv . Průměrná radiační zátěž lékaře aplikujícího radiofarmakum při dvoudenním protokolu nemocnice B se rovnala $(0,27 \pm 0,46)$ μSv .

Při zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ je hodnota $p = 0,78$. U lékařů nukleární medicíny tedy nebyl prokázán t-testem statisticky významný rozdíl při použití jednodenního a dvoudenního protokolu.

5.5 Radiační zátěž chirurgů

V tab. 8 jsou uvedeny časové údaje přítomnosti chirurgů v blízkosti radioaktivních tkání od začátku operace po skončení biopsie sentinelových uzlin (odstranění všech radioaktivních sentinelových uzlin).

Tab. 8 – Časové údaje od začátku operace po vyjmutí sentinelových uzlin (v min)

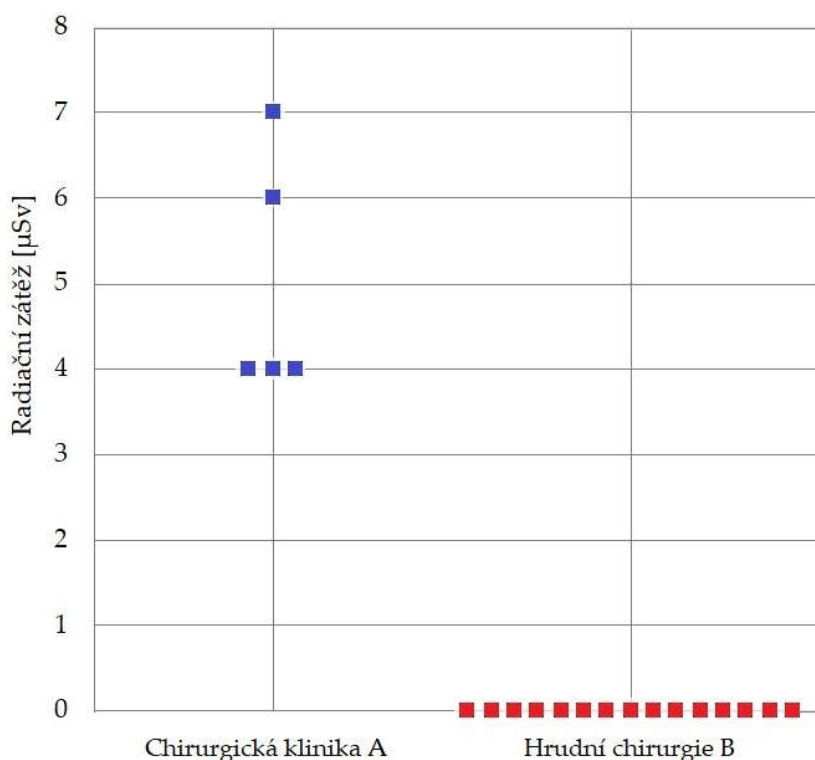
Časové údaje biopsií (v min)		
oddělení	Chirurgická klinika A	Hrudní chirurgie B
počet měření	5	15
medián	20	15
modus	15	15
průměr	28	16
směrodatná odchylka	19	4
max. hodnota	60	25
min. hodnota	15	10

Na chirurgické klinice A trvalo vyjmutí sentinelových uzlin v průměru (28 ± 19) minut. Nejméně setrval chirurg v přítomnosti radioaktivních

sentinelových uzlin 15 minut, nejdéle 1 hodinu. Chirurgové hrudní chirurgie B odstraňovali sentinelové uzliny 10–25 minut, v průměru (16 ± 4) minuty.

Chirurg „začátečník“ z chirurgické kliniky A se časem operačního výkonu nijak nelišil od ostatních chirurgů této kliniky, biopsie v jeho případě trvala 15 minut. Z tohoto poznatku lze říci, že rozhodujícím faktorem doby trvání zákroku není zkušenost operátéra.

Ve sledovaném souboru chirurgů, kteří byli hlavními operátéry při biopsiích sentinelových uzlin karcinomu prsu, jsou naměřené hodnoty graficky znázorněné na obr. 21.



Obr. 21 - Naměřené hodnoty radiální zátěže chirurgů chirurgické kliniky A a chirurgů hrudní chirurgie B

Na chirurgické klinice A, která využívá jednodenního protokolu, operace probíhá 2–3 hodiny od aplikace radiofarmaka aktivity 120 MBq. Maximální naměřenou hodnotou osobního dávkového ekvivalentu chirurgů $H_p(10)$ byla hodnota 7 μSv . Tato radiální zátěž byla naměřena při operaci, kdy byla nejprve provedena parciální mastektomie a až poté biopsie sentinelové uzliny.

Od začátku operace po vyjmutí sentinelových uzlin uplynula 1 hodina. Nejvyšší naměřenou hodnotou radiační zátěže na chirurgické klinice A byly 4 μSv , při operaci s prvotním odstraněním sentinelových uzlin trvající 15 minut.

Hodnoty radiační zátěže chirurgů hrudní chirurgie B, kde operace probíhá 21–22 hodin od aplikace radiofarmaka o aktivitě 60 MBq, byly vždy nulové.

Souhrn naměřených hodnot radiační zátěže u chirurgů provádějících biopsii sentinelové uzliny u karcinomu prsu je zpracován v tab. 9.

Tab. 9 – Radiační zátěž chirurgů při biopsii sentinelové uzliny (v μSv)

personál	Chirurgové	
	Chirurgická klinika A	Hrudní chirurgie B
počet měření	5	15
medián	4	0
průměr	5	0
směrodatná odchylka	1,41	0
max. hodnota	7	0
min. hodnota	4	0
<i>p</i>	0,0014	

Na chirurgické klinice A, při jednodenním protokolu, dosahovala průměrná radiační zátěž chirurga ($5 \pm 1,41$) μSv .

Při dvoudenním protokolu hrudní chirurgie B činila průměrná radiační zátěž při operační intervenci na sentinelové uzlině při diagnóze karcinomu prsu u chirurgů 0 μSv . Všechny operace probíhaly stejně, kdy jako první byly odstraněny sentinelové uzliny a případná parciální mastektomie byla provedena následně. Doba, při které byl chirurg v kontaktu s radioaktivní tkání se pohybovala mezi 10–25 minutami.

Rozdíl v radiační zátěži chirurgů používajících jednodenní a dvoudenní protokol byl statisticky významný. Při použití t-testu o zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ je *p* hodnota rovna 0,0014.

6 DISKUZE

Data pro tuto bakalářskou práci byla sbírána v reálném čase během osobní přítomnosti na pracovištích. V souvislosti s opatřeními souvisejícími s výskytem koronaviru SARS CoV-2 v České republice nebylo možné zajistit více měření v nemocničních zařízeních.

Pro porovnání radiační zátěže lékařů nukleární medicíny a chirurgů, spolupracujících při biopsii sentinelové uzliny u karcinomu prsu, byl použit elektronický dozimetr. Ten umožňuje měřit osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$ a díky vyhodnocovací elektronice s číselným displejem i jeho hodnoty odečítat v reálném čase. Oproti tomu z integrálních osobních dozimetrů filmových, fotoluminiscenčních a termoluminiscenčních lze obdrženou dávku zjistit až po vyhodnocení dozimetru sjednanou dozimetrickou službou.

U lékařů z obou sledovaných pracovišť nukleární medicíny byla naměřena stejná maximální hodnota osobního dávkového ekvivalentu $1 \mu\text{Sv}$. Během jednodenního protokolu s aplikací radiofarmaka $^{99\text{m}}\text{Tc-Senti-Scint}$ o průměrné aktivitě 118 MBq byla naměřena průměrná radiační zátěž $(0,20 \pm 0,45) \mu\text{Sv}$. Při průměrné aplikované aktivitě 57 MBq byla u dvoudenního protokolu naměřena průměrná radiační zátěž $(0,27 \pm 0,46) \mu\text{Sv}$.

Nejvyšší hodnoty osobních dávkových ekvivalentů byly naměřeny ve skupině hlavních chirurgů nemocnice A, která používá jednodenní protokol. Chirurgický výkon probíhal 1,5–3 hodiny od aplikace radiofarmaka o průměrné aktivitě 118 MBq. Maximální naměřená hodnota $H_p(10)$ činila $7 \mu\text{Sv}$. Během 5 měření na tomto oddělení byla radiační zátěž na jeden výkon $(5 \pm 1,41) \mu\text{Sv}$. Při dvoudenním protokolu hrudní chirurgie B bylo provedeno 15 měření. Operační intervence sentinelové uzliny probíhala 21–22 hodin od aplikace radionuklidu o průměrné aktivitě 57 MBq. Všechny naměřené hodnoty $H_p(10)$ u těchto chirurgů nepřesáhly $0 \mu\text{Sv}$.

Naměřená data v rámci této bakalářské práce potvrdila předpoklad, že při intervenčních výkonech na sentinelové uzlině závisí výsledná radiační zátěž na aplikované aktivitě radiofarmaka, použitém protokolu i délce chirurgického výkonu.

„Limity pro radiační pracovníky se považují za nepřekročené, pokud nejsou překročeny kvantitativní ukazatele vyjádřené v měřitelných veličinách (dále jen „odvozené limity“) [29, s. 279]“. Odvozeným limitem pro zevní ozáření je i osobní dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm. Limitní hodnotou $H_p(10)$ je 20 mSv za kalendářní rok, tedy $2 \cdot 10^4 \mu\text{Sv}$ [29].

Pokud bychom vzali v úvahu $1 \mu\text{Sv}$, nejvyšší námi naměřenou hodnotu osobního dávkového ekvivalentu $H_p(10)$ při aplikaci radiofarmaka, tak lékař, který by během celého roku prováděl výhradně pouze scintigrafii sentinelových uzlin karcinomu prsu, by musel provést přes 20 000 těchto aplikací, aby byl překročen roční limit pro radiačního pracovníka. Pro srovnání bylo dle statistik z roku 2019 v nemocnici A provedeno 218 a v nemocnici B 88 značení sentinelových uzlin. Meziročně během uplynulých několika let se tento počet nijak výrazně nemění.

Lékaři nukleární medicíny provádějí ročně mnoho desítek vyšetření, u kterých je radiační zátěž mnohonásobně vyšší. Jedny z diagnostických vyšetření s nejvyšší zátěží jsou aplikace osteotropního radiofarmaka u scintigrafie skeletu (jednotky μSv), aplikace PET radiofarmaka (jednotky až desítky μSv). Roční efektivní i ekvivalentní dávky na ruce, ve kterých jsou zahrnuty všechna ročně prováděná vyšetření diagnostická a terapeutická, nepřesahují jednotky mSv.

Z naměřených hodnot osobních dávkových ekvivalentů $H_p(10)$ a výše uvedeného je tedy zřejmé, že u lékařů nukleární medicíny, při značení sentinelových uzlin u karcinomu prsu, nedochází k překračování ročních limitů pro radiační pracovníky.

Při chirurgickém výkonu činila nejvyšší naměřená hodnota 7 μSv . Zákrok trval 1 hodinu, kdy byla nejprve provedena parciální mastektomie a následně vyjmutí sentinelové uzliny. Operující chirurgové na pracovišti A i B provádějí pouze a výhradně tuto operaci, při které se setkávají s ionizujícím zářením. Tedy tento operatér by musel sám provést přes 2 800 operací ročně, aby byl překročen roční limit pro radiační pracovníky. Chirurg ovšem nespadá do kategorie radiačních pracovníků, a proto pro něj platí roční limit efektivní dávky pro obyvatelstvo 1 mSv. Roční limit by byl překročen provedením 143 takto shodných operací. Vzhledem k počtu prováděných operací na pracovišti A a B (viz výše) a faktu, že 3–4 chirurgové se střídají v provádění těchto operací, roční limit překročen nikdy není. Ani na jednom z námi sledovaných pracovišť chirurgie nejsou chirurgové zařazeni do kategorie radiačních pracovníků kategorie A.

V případě jednodenního protokolu obdržel operující chirurg několikanásobně větší dávku než lékař aplikující radiofarmakum. To je dáno především delším časovým úsekem stráveným v blízkosti naaplikované tkáně.

Rozdíl radiační zátěže mezi skupinou lékařů nukleární medicíny a chirurgů lze vysvětlit rozdílnou dobou pobytu tohoto personálu u radioaktivních látek a tkání. Lékař nukleární medicíny využíval při aplikaci radiofarmaka stíněnou injekční stříkačku a celková doba výkonu nepřesáhla 5 minut. Naopak námi sledovaný chirurg byl při operaci v blízkosti radioaktivní tkáně až 1 hodinu a nepoužíval žádnou radiační ochranu.

Odlišnost protokolů má také velký význam v radiační zátěži personálu, a to především u operujících chirurgů. Při jednodenním protokolu probíhala operace 2–3 hodiny od aplikace radiofarmaka s aktivitou 120 MBq, poločas přeměny $^{99\text{m}}\text{Tc}$ je však vyšší (6 hodin). Chirurg tedy přišel do kontaktu s tkání, ve které se stále nacházelo až 80 % původní aktivity radionuklidu. U dvoudenního protokolu s operací 21–22 hodin od aplikace radiofarmaka

s aktivitou 60 MBq došlo ke snížení aktivity radionuklidu na méně než 10 % původní aktivity.

Studie a výsledky jiných autorů

Několik zahraničních publikací ([30, 31, 32]) zkoumalo radiační zátěž při biopsii sentinelových uzlin karcinomu prsu u hlavního chirurga i patologů. V České republice byla provedena obdobná studie v roce 2009 [33]. V tab. 10 jsou shrnuty parametry uvedených studií včetně sledovaného personálu, protokolů a použitých dozimetrů. Tab. 11 analyzuje výsledky radiační zátěže chirurgů těchto studií při biopsiích u karcinomu prsu.

Tab. 10 – Porovnání vybraných parametrů studií

studie	sledovaný personál				použitý dozimetr	umístění dozimetru	sledovaný protokol	
	lékaři NM	chirurgové	patologové	jiný*			jednodenní	dvoudenní
Bakalářská práce [Koutná]	x	x	-	-	elektronický (Mirion)	referenční místo	x	x
Golisová [33]	-	x	x	x	elektronický (Isotrack)	referenční místo	-	x
Klausen [30]	-	x	x	-	TLD**	prsty, břišní stěna	x	x
Waddington [31]	-	x	x	-	TLD** a GM***	prsty, břišní stěna	-	x
Najafi [32]	-	x	-	-	TLD**	prsty, břišní stěna, štítná žláza	x	x

* Jiný sledovaný personál – radiologičtí asistenti, instrumentářky

** TLD – termoluminiscenční dozimetr

*** GM – Geiger-Müllerův čítač

Tab. 11 – Aplikované aktivity a průměrné hodnoty radiační zátěže chirurgů sledovaných studií

studie	aplikovaný radionuklid	aplikované aktivity [MBq]		průměrná radiační zátěž chirurgů	
		jednodenní protokol	dvoudenní protokol	hodnoty $H_p(10)$	hodnoty $H_p(0,07)$
Bakalářská práce [Koutná]	^{99m}Tc	110–123	52–63	$5,00 \pm 1,41 \mu\text{Sv}$ (jednodenní protokol)	-
				$0 \mu\text{Sv}$ (dvoudenní protokol)	-
Golisová [33]	^{99m}Tc	-	60–100	$0,95 \pm 0,78 \mu\text{Sv}$	-
Klausen [30]	^{99m}Tc	45–55	90–110	$0,01 \pm 0,02 \text{ mSv}$ (protokol nerozlišoval)	$0,04 \pm 0,04 \text{ mSv}$ (protokol nerozlišoval)
Waddington [31]	^{99m}Tc	-	10–15	$0,21 \pm 0,37 \mu\text{Sv}$	$0,06 \pm 0,04 \text{ mSv}$
Najafi [32]	^{99m}Tc	$44,40 \pm 56,98^*$		$30,92 \pm 17,14 \mu\text{Sv}$	-
				$27,75 \pm 20,06 \mu\text{Sv}^{**}$	-

* autor uvádí průměrné aplikované aktivity v jednodenním a dvoudenním protokolu

** autor tuto hodnotu upřesňuje jako „průměrnou ekvivalentní dávku na oblast štítné žlázy“

Z námi dostupných zdrojů všechny studie sledovaly radiační zátěž chirurgů při biopsii sentinelových uzlin u karcinomu prsu. Naopak žádná studie, kromě této práce, nesledovala lékaře nukleární medicíny aplikující radiofarmakum. Většina publikací ([30, 31, 33]) prováděla navíc měření u patologů, případně i radiologických asistentů a instrumentárek. Všechny jmenované studie sledovaly jednodenní nebo i dvoudenní protokol.

Nejčastěji používanými dozimetry byly termoluminiscenční a elektronický dozimetr, v jedné studii byl využit i Geiger-Müllerův čítač. Dozimetry byly podle typu studie umístěny na referenční místo, prsty, břišní stěnu nebo štítnou žlázu. Termoluminiscenční dozimetry byly dány do rukavic chirurgů nebo přilepeny na stanovená místa, elektronické dozimetry byly připnuty sponou na referenční místo.

Naše měření lze nejlépe porovnat se studií [33], kde Golisová měřila radiační zátěž chirurgů 22 hodin po aplikaci radiokoloidu o aktivitě 60–100 MBq. Chirurgický zákrok trval přibližně 30 minut a průměrná radiační zátěž chirurgů činila $(0,95 \pm 0,78) \mu\text{Sv}$. Při našich měřeních byly ve stejném protokolu pacientům aplikovány aktivity 52–63 MBq a hodnoty radiační zátěže chirurgů byly nulové. Pro porovnání během jednodenního protokolu v námi sledovaném nemocničním zařízení byly pacientům aplikovány aktivity 110–123 MBq a průměrná radiační zátěž chirurgů dosahovala $(5,00 \pm 1,41) \mu\text{Sv}$.

Klausen ([30]) a Najafi ([32]) ve výsledcích nerozlišovali radiační zátěž chirurgů při jednodenním a dvoudenním protokolu. U Klausena dosahovaly průměrné hodnoty radiační zátěže chirurgů $(0,01 \pm 0,02) \text{mSv}$, u Najafi $(30,92 \pm 17,14) \mu\text{Sv}$. U pacientů uváděl Klausen aplikované aktivity 45–55 MBq, resp. 90–100 MBq podle použitého protokolu. Najafi specifikovala průměrné aplikované aktivity $(44,40 \pm 56,98) \text{MBq}$.

Podle Waddingtona ([31]) byla průměrná radiační zátěž chirurga při jedné operaci sentinelové uzliny u pacientů s karcinomem prsu $(0,21 \pm 0,37) \mu\text{Sv}$

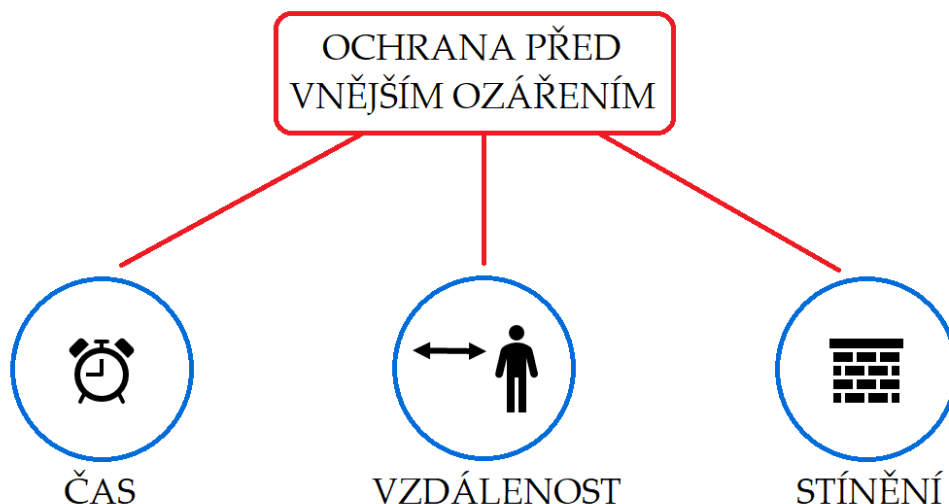
a průměrná ekvivalentní dávka na ruce chirurgů byla $(0,06 \pm 0,06)$ mSv. Při protokolu této studie bylo den před operací pacientovi aplikováno radiofarmakum o aktivitě 10–15 MBq [31]. Průměrnou ekvivalentní dávku na ruce chirurgů ve studii uváděl i Klausen a to $(0,04 \pm 0,04)$ mSv.

Vliv na výsledky radiační zátěže chirurgů může mít různé množství aplikovaných aktivit, zkušenost lékařů s aplikací radiofarmak, použití jednodenního nebo dvoudenního protokolu, tedy doba mezi aplikací radiofarmaka a operací, zkušenost hlavních chirurgů i délka operace.

Možnosti snížení radiační zátěže

Úroveň radiační zátěže všech sledovaných chirurgů při biopsii sentinelové uzliny byla velmi nízká. Naše měření ověřila, že stejně jako v jiných studiích je radiační zátěž chirurgů (i jiných exponovaných zaměstnanců) minimální. Lze navíc uvažovat, že vzhledem k časům trvání operačního výkonu a vzdálenosti chirurga od pacienta, byl chirurg vystaven největším expozicím ze všech sledovaných zaměstnanců.

Lékaři nukleární medicíny jsou osobními dozimetry vybaveni povinně vzhledem k povaze jejich práce s ionizujícím zářením. Na operačních sálech nejsou chirurgové běžně monitorováni dozimetry, protože nejsou radiačními pracovníky. Proto není nutností použití dozimetrů u tohoto personálu. Vzhledem k minimálním naměřeným hodnotám, není ani nutností použití dozimetrů u tohoto personálu. Pracovníci operačních sálů by ovšem, v případě biopsií sentinelových uzlin, měli být seznámeni se základními zásadami radiační ochrany pracovníků před ionizujícím zářením. Fyzikální metody ochrany před vnějším ozářením jsou znázorněny na obr. 22.



Obr. 22 – Fyzikální metody ochrany před vnějším ozářením – ochrana časem, vzdáleností, stíněním [autor]

Pro příklad lze chirurgům doporučit odstranění sentinelové uzliny před provedením mastektomie, u pacientů, u kterých se tento postup dá uskutečnit. Dojde tak ke značnému zkrácení pobytu chirurga v blízkosti radioaktivních tkání.

Částečně lze záření odstínit použitím ochranných stínících zástěr, vest a límců. K odstínění toku gama záření technecia na polovinu jsou potřeba ochranné pomůcky se stínícím ekvivalentem 0,5 mm olova. Olověná zástěra s tímto stínícím ekvivalentem prokazuje lepší stínění, může ovšem vážit až 6 kg. Pro chirurga by při hodinové operaci zástěra znamenala značný diskomfort se zanedbatelným snížením radiační zátěže oproti přírodnímu pozadí v České republice.

Po analyzování námi naměřených osobních dávkových ekvivalentů $H_p(10)$ chirurgů při jednodenním a dvoudenním protokolu, lze více doporučit použití dvoudenního protokolu ke snížení radiační zátěže chirurgů. V úvahu je ovšem třeba vzít faktory, které mohly ovlivnit naměřené hodnoty (aplikovaná aktivita radiofarmaka, použití protokolu, časová délka jednotlivých výkonů).

U těhotných lékařek-chirurgů provádějících biopsii sentinelové uzliny by měla být prenatální expozice plodu během těhotenství omezena na nejvýše 1 mSv. Jedna ze zkoumaných studií ([34]) uvádí, že by mělo být provedeno méně než 100 operací sentinelových uzlin po dobu těhotenství, pokud by lékařka neprováděla jinou operaci, při které se setká s ionizujícím zářením. Na této úrovni jsou rizika deterministických nebo stochastických radiačních účinků na plod zanedbatelná. Ve studii se doporučuje posoudit aplikovanou aktivitu ^{99m}Tc a používání ochranných pomůcek [34].

7 ZÁVĚR

Lymfoscintigrafie má nezastupitelné místo pro určení lokalizace sentinelové uzliny a svodného lymfatického povodí. Zároveň pomáhá upřesnit léčebnou strategii. Mezi nejvýznamnější indikace k provedení biopsie sentinelové uzliny patří karcinom prsu a maligní melanom.

Cílem této práce bylo zhodnotit radiační zátěž vybraného personálu při výkonech na sentinelové uzlině u karcinomu prsu. Jedním z podnětů k vypracování bakalářské práce byl zájem ze strany Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) o problematiku radiační ochrany chirurgů provádějících operace po označení sentinelových uzlin na pracovišti A.

U sledovaného personálu obou nemocničních zařízení svědčí námi naměřené hodnoty o velmi malé radiační zátěži, která nepředstavuje zvýšené zdravotní riziko, nepřekračuje stanovené roční limity a je v souladu s požadavky SÚJB. Výsledky praktické části práce budou v listopadu 2020 předloženy na plánované kontrole inspektorům SÚJB na pracovišti A dohlížející osobou (konzultantka této práce), aby doložily oprávněnost toho, že vzhledem ke zjištěné radiační zátěži chirurgů není nutné jejich zařazení k radiačním pracovníkům kategorie A.

Obecně je aplikované radiofarmakum při intervencích na sentinelové uzlině vždy zdrojem ionizujícího záření, jehož působení by mohlo představovat zdravotní riziko pro zdravotnický personál. S radiační zátěží zdravotnického personálu je tak nutné počítat při lymfoscintigrafii, odstraňování i histopatologickém zpracování sentinelové uzliny. Důležitým aspektem pro snížení radiační zátěže personálu při intervencích na sentinelových uzlinách je dodržování zásad bezpečnosti práce se zdroji ionizujícího záření.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
Bq	becquerel
DCIS	duktální karcinom in situ
DNA	deoxyribonukleová kyselina
Gy	gray
LCIS	lobulární karcinom in situ
MBq	megabecquerel
mSv	mikrosievert
NaI(Tl)	jodid sodný aktivovaný thaliem
NM	nukleární medicína
p.m.	parciální mastektomie
Sv	sievert
SLU	sentinelová uzlina
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
μSv	milisievert

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. NEORAL, Čestmír a BOHANES, Tomáš. *Biopsie sentinelové uzliny*. Praha : Galén, c2012. ISBN 978-80-7262-882-7.
2. CODY, Hiram S., ed. *Sentinel lymph node biopsy*. London : Martin Dunitz, 2002. ISBN 1-84184-034-3..
3. ADAM, Zdeněk, KREJČÍ, Marta a VORLÍČEK, Jiří. *Speciální onkologie: příznaky, diagnostika a léčba maligních chorob*. Praha : Galén, c2010. ISBN 978-807-2626-489.
4. COUFAL, Oldřich a FUK, Vait. *Chirurgická léčba karcinomu prsu*. Praha : Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3641-9.
5. *MKN-10: mezinárodní statistická klasifikace nemocí a přidružených zdravotních problémů : desátá revize : obsahová aktualizace k 1.1.2018*. Praha : Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR, 2018. ISBN 978-80-7472-168-7.
6. ČR, ÚZIS. *Zdravotnická ročenka České republiky 2018*. [<https://www.uzis.cz/res/f/008280/zdrroccz-2018.pdf>] Praha : autor neznámý, 2019. ISSN 1210-9991.
7. DUŠEK Ladislav, MUŽÍK Jan, KUBÁSEK Miroslav, KOPTÍKOVÁ Jana, ŽALOU DÍK Jan, VYZULA Rostislav. *Epidemiologie zhoubných nádorů v České republice*. [Online] [Citace: 30. 3 2020.] Dostupný z WWW: <http://www.svod.cz>. ISSN 1802 - 8861.
8. KRŠKA, Zdeněk, HOSKOVEC, David a PETRUŽELKA, Luboš. *Chirurgická onkologie*. Praha : Grada, 2014. ISBN 978-80-247-4284-7.
9. DYLEVSKÝ, Ivan. *Funkční anatomie*. Praha : Grada, 2016. ISBN 978-80-247-3240-4.
10. DYLEVSKÝ, Ivan. *Lymfa: míza*. Olomouc : Poznání, 2006. ISBN 80-866-0642-2.
11. ABRAHÁMOVÁ, Jitka. *Co byste měli vědět o rakovině prsu*. Praha : Grada, 2019. ISBN 978-80-271-2055-0.

12. VORLÍČEK, Jiří a ABRAHAMOVÁ, Jitka, VORLÍČKOVÁ, Hilda. *Klinická onkologie pro sestry. 2., přeprac. a dopl vyd.* Praha : Grada, 2012. ISBN: 978-80-247-3742-3.

13. HLADÍKOVÁ, Zuzana. *Diagnostika a léčba onemocnění prsu.* Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouvi, 2009. ISBN 978-802-4422-688.

14. ALILA, Medical Media. Shutterstock.com. *Fluid exchange between the circulatory and the lymphatic systems.* [Online] [Citace: 15. 12 2019.] <https://www.shutterstock.com/image-illustration/fluid-exchange-between-circulatory-lymphatic-systems-147789437>.

15. ŠIMŠA, Jaromír. *Sentinelová uzlina: lymfadenektomie u solidních nádorů.* Praha : Maxdorf, 2010. ISBN 978-80-7345-213-1.

16. Lymphatische Organe und Lymphgefäße (Anatomie). *Thieme.de.* [Online] [Citace: 20. 12 2019.] <https://eref.thieme.de/cockpits/clAna0001/0/coAna00072/4-9329>.

17. Návod na samovyšetření. *Klub ŽAP.* [Online] [Citace: 20. 12 2019.] <http://klub.zap.sweb.cz/images/samovysetrovani/samovy9.gif>.

18. Axillary lymph nodes. *Shutterstock.com.* [Online] [Citace: 30. 3 2020.] <https://www.shutterstock.com/image-vector/axillary-lymph-nodes-101583685>.

19. KUPKA, Karel, KUBINYI, Jozef, ŠÁMAL, Martin a kol. *Nukleární medicína.* Praha : Nakladatelství P3K, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-87343-54-8.

20. KORANDA, Pavel a kolektiv. *Nukleární medicína.* Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4031-6.

21. Vyhláška č. 422/2016 o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. *Atomový zákon.* Praha : Tiskárna Ministerstva vnitra, p.o., 2016. ISSN 1211-1244.

22. PODZIMEK, František. *Radiologická fyzika: fyzika ionizujícího záření.* Praha : České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05319-5.

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

24. Characteristics of Alpha, Beta and Gamma Radiation. *Oak Ridge Institute for Science and Education*. [Online] [Citace: 30. 3 2020.] <https://orise.orau.gov/reacts/guide/img/shielding-alpha-beta-gamma.jpg>.
25. ČR. Zákon č. 263/2016 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon). 2016.
26. RAD-60™ Electronic Radiation Dosimeter. *Mirion Technologies*. [Online] [Citace: 21. 4 2020.] https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/rad-60-electronic-radiation-dosimeter.pdf?1523762071.
27. Neoprobe neo2000 Gamma Detection System. *Soma Technology*. [Online] [Citace: 24. duben 2020.] <https://www.somatechnology.com/GetImage.ashx?Path=%7e%2fAssets%2fProductImages%2fNeoProbe-neo2000-Gamma-Detection-System.jpg&maintainAspectRatio=true&maxHeight=300&maxWidth=300>.
28. EURORAD Europrobe Gamma Counter. *DotMed*. [Online] [Citace: 24. duben 2020.] <https://www.dotmed.com/images/modelpics/16979.jpg>.
29. NAVRÁTIL, Leoš a ROSINA, Jozef. *Medicínská biofyzika. 2., zcela přepracované a doplněné vydání*. Praha : Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-2700-9.
30. KLAUSEN, Thomas, a další. Radiation doses to staff involved in sentinel node operations for breast cancer. *Clinical physiology and functional imaging*. 2005. 25. 10.1111/j.1475-097X.2005.00611.x.
31. WADDINGTON, W. A., KESHTGAR, M. R. S. a TAYLOR, I. Radiation safety of the sentinel lymph node technique. *Eur. J. Nucl. Med.* London, 2000. 27.
32. NAJAFI, Maryam, a další. Radiation exposure of the surgeons In sentinel lymph node biopsy. *Iranian journal of radiation research (IJRR)*, 2012. 10.
33. GOLISOVÁ, Jana a NAKLÁDALOVÁ, Marie. Radiační zátěž zdravotníků při vyšetřování sentinelové uzliny. místo neznámé : Pracovní lékařství, 2009. 3. ISSN 0032-6291.
34. SAHA, Sunita, a další. Safety of radioactive sentinel node biopsy for breast cancer and the pregnant surgeon – A review. 2016. 36. ISSN 1743-9191.

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Vývoj incidence a mortality nádoru prsu u žen (1997-2017) [7]	12
Obr. 2 – Anatomie prsu [11].....	13
Obr. 3 – Lymfatický systém ve vztahu k oběhovému systému [14].....	20
Obr. 4 – Lymfatické kmeny [16].....	22
Obr. 5 – Anatomie lymfatické uzliny [10]	23
Obr. 6 – Kvadranty prsu s procentuálním výskytem nádorů prsu v jednotlivých oblastech [17].....	23
Obr. 7 – Lymfatická drenáž prsu [18].....	24
Obr. 8 – Chirurgické etáže axily [4]	25
Obr. 9 – Koncept sentinelové uzliny [15]	26
Obr. 10 - Schéma scintilační kamery [20]	30
Obr. 11 – Schéma scintilačního detektoru [19]	31
Obr. 12 – Schéma gama sondy [autor].....	32
Obr. 13 – Stínění jednotlivých druhů záření (α -alfa, β -beta, γ -gama) [24].....	34
Obr. 14 – Elektronický dozimetr Mirion, typ RAD-60S [autor].....	47
Obr. 15 – Záhloví protokolu pro oddělení nukleární medicíny.....	48
Obr. 16 – Záhloví protokolu pro chirurgická oddělení	48
Obr. 17 – Gamasonda Neoprobe neo2000 [27].....	51
Obr. 18 – Gamasonda Eurorad Europrobe 1 [28]	53
Obr. 19 – Věková struktura pacientek při vyšetřeních sentinelových uzlin ...	53
Obr. 20 – Naměřené hodnoty radiační zátěže lékařů nukleární medicíny A a B.....	56
Obr. 21 - Naměřené hodnoty radiační zátěže chirurgů chirurgické kliniky A a chirurgů hrudní chirurgie B	58
Obr. 22 – Fyzikální metody ochrany před vnějším ozářením – ochrana časem, vzdáleností, stíněním [autor]	68

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 – Tabulka limitů, zdroj dat: [21]	39
Tab. 2 - Počet vyšetření sentinelových uzlin v letech 2015–2019, nemocnice A	50
Tab. 3 - Počet vyšetření sentinelových uzlin v letech 2015–2019, nemocnice B	52
Tab. 4 – Souhrn aplikovaných aktivit na odděleních nukleární medicíny	54
Tab. 5 – Zaznamenané časové údaje jednodenního protokolu.....	55
Tab. 6 – Zaznamenané časové údaje dvoudenního protokolu	55
Tab. 7 – Radiační zátěž lékařů na oddělení nukleární medicíny (v μSv)	56
Tab. 8 – Časové údaje od začátku operace po vyjmutí sentinelových uzlin...	57
Tab. 9 – Radiační zátěž chirurgů při biopsii sentinelové uzliny (v μSv).....	59
Tab. 10 – Porovnání vybraných parametrů studií.....	64
Tab. 11 – Aplikované aktivity a průměrné hodnoty radiační zátěže chirurgů sledovaných studií	65

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Naměřená a získaná data na pracovišti nukleární medicíny A	78
Příloha 2 - Naměřená a získaná data na pracovišti chirurgické kliniky A	79
Příloha 3 - Naměřená a získaná data na pracovišti nukleární medicíny B.....	80
Příloha 4 - Naměřená a získaná data na pracovišti hrudní chirurgie B	81

13 PŘÍLOHY

Příloha 1 – Naměřená a získaná data na pracovišti nukleární medicíny A

pracoviště/výkon		Nukleární medicína A/aplikace radiofarmaka				
datum	pacient - věk - pohlaví - diagnóza	aplikovaná aktivita [MBq]	čas aplikace radiofarmaka	čas scintigrafie	osobní dákový ekvivalent [μSv]	pozn.
17.1.2020	69 let žena C50.2	123 MBq SentiScint	17.1.2020 8:15	8:50	0 μSv	2 vpichy
17.1.2020	78 let žena C50.3	123 MBq SentiScint	17.1.2020 8:35	9:00	1 μSv	3 vpichy
31.1.2020	74 let žena C50.3	112 MBq SentiScint	31.1.2020 8:40	9:00	0 μSv	3 vpichy
31.1.2020	74 let žena C50.3	110 MBq SentiScint	31.1.2020 10:00	10:20	0 μSv	3 vpichy
21.2.2020	80 let žena C50.3	123 MBq SentiScint	21.2.2020 8:20	8:50	0 μSv	3 vpichy

Příloha 2 - Naměřená a získaná data na pracovišti chirurgické kliniky A

pracoviště/výkon		Chirurgická klinika A/biopsie sentinelové uzliny						
datum	pacient - věk - pohlaví - diagnóza	aplikovaná aktivita [MBq]	datum a čas aplikace	začátek výkonu	čas vyjmutí	osobní dákový ekvivalent [μSv]	počet uzlin	pozn.
17.1.2020	69 let žena C50.2	123 MBq Sentiscint	17.1.2020 8:15	17.1. 10:20	17.1. 10:35	4 μSv	1 SLU	
17.1.2020	78 let žena C50.3	123 MBq Sentiscint	17.1.2020 8:35	17.1. 11:50	17.1. 12:50	7 μSv	3 SLU	vyjmutí SLU po p.m.*
31.1.2020	74 let žena C50.3	112 MBq Sentiscint	31.1.2020 8:40	31.1. 10:30	31.1. 11:00	6 μSv	1 SLU	vyjmutí SLU po p.m.*
31.1.2020	74 let žena C50.3	110 MBq Sentiscint	31.1.2020 10:00	31.1. 11:45	31.1. 12:00	4 μSv	1 SLU	
21.2.2020	80 let žena C50.3	123 MBq SentiScint	21.2.2020 8:20	21.2. 10:30	21.2. 10:50	4 μSv	2 SLU	

*p.m.=parciální mastektomie

Příloha 3 - Naměřená a získaná data na pracovišti nukleární medicíny B

pracoviště/výkon		Nukleární medicína B/aplikace radiofarmaka				
datum	pacient - věk - pohlaví - diagnóza	aplikovaná aktivita [MBq]	čas aplikace radiofarmaka	čas scintigrafie	osobní dákový ekvivalent [μSv]	pozn.
18.11.2019	69 let žena C50.9	56 MBq SentiScint	18.1.2019 11:25	13:30	0 μSv	3 vpichy
18.11.2019	68 let žena C50.9	52 MBq SentiScint	18.1.2019 11:30	13:45	0 μSv	3 vpichy
2.12.2019	65 let žena C50.3	53 MBq SentiScint	2.12.2019 11:30	13:30	0 μSv	4 vpichy
2.12.2019	65 let žena C50.9	61 MBq SentiScint	2.12.2019 11:35	13:45	1 μSv	3 vpichy
16.12.2019	69 let žena C50.9	58 MBq SentiScint	16.12.2019 11:00	13:05	0 μSv	4 vpichy
16.12.2019	69 let žena C50.4	54 MBq SentiScint	16.12.2019 11:10	13:30	0 μSv	3 vpichy
6.1.2020	72 let žena C50.9	63 MBq SentiScint	6.1.2020 11:20	13:30	1 μSv	3 vpichy
6.1.2020	64 let žena C50.9	52 MBq SentiScint	6.1.2020 11:25	13:45	0 μSv	5 vpichů
20.1.2020	71 let žena C50.3	60 MBq SentiScint	20.1.2020 12:15	14:00	1 μSv	3 vpichy
24.2.2020	66 let žena C50.9	61 MBq SentiScint	24.2.2020 11:00	13:15	0 μSv	4 vpichy
24.2.2020	67 let žena C50.3	57 MBq SentiScint	24.2.2020 11:10	13:00	0 μSv	3 vpichy
2.3.2020	63 let žena C50.4	55 MBq SentiScint	2.3.2020 11:20	13:25	0 μSv	4 vpichy
2.3.2020	70 let žena C50.2	62 MBq SentiScint	2.3.2020 11:35	13:45	1 μSv	3 vpichy
9.3.2020	75 let žena C50.3	55 MBq SentiScint	9.3.2020 10:15	12:30	0 μSv	3 vpichy
9.3.2020	71 let žena C50.9	52 MBq SentiScint	9.3.2020 11:15	13:15	0 μSv	3 vpichy

Příloha 4 - Naměřená a získaná data na pracovišti hrudní chirurgie B

pracoviště/výkon		Hrudní chirurgie B/biopsie sentinelové uzliny					
datum	pacient - věk - pohlaví - diagnóza	aplikovaná aktivita [MBq]	datum a čas aplikace	začátek výkonu	čas vyjmutí	osobní dákový ekvivalent [μSv]	počet uzlin
19.11.2019	69 let žena C50.9	56 MBq Sentiscint	18.11.2019 11:25	19.11. 8:30	19.11. 8:45	0 μSv	2 SLU
19.11.2019	68 let žena C50.9	52 MBq Sentiscint	18.1.2019 11:30	19.11. 9:45	19.11. 10:00	0 μSv	2 SLU
3.12.2019	65 let žena C50.3	53 MBq Sentiscint	2.12.2019 11:30	3.12. 8:15	3.12. 8:30	0 μSv	2 SLU
3.12.2019	65 let žena C50.9	61 MBq Sentiscint	2.12.2019 11:35	3.12. 9:15	3.12. 9:40	0 μSv	3 SLU
17.12.2019	69 let žena C50.9	58 MBq Sentiscint	16.12.2019 11:00	17.12. 8:30	17.12. 8:45	0 μSv	2 SLU
17.12.2019	69 let žena C50.4	54 MBq Sentiscint	16.12.2019 11:10	17.12. 9:30	17.12. 9:40	0 μSv	1 SLU
7.1.2020	72 let žena C50.9	63 MBq Sentiscint	6.1.2020 11:20	7.1. 8:10	7.1. 8:25	0 μSv	1 SLU
7.1.2020	64 let žena C50.9	52 MBq Sentiscint	6.1.2020 11:25	7.1. 9:15	7.1. 9:30	0 μSv	1 SLU
21.1.2020	71 let žena C50.3	60 MBq Sentiscint	20.1.2020 12:15	21.1. 9:40	21.1. 10:00	0 μSv	2 SLU
25.2.2020	66 let žena C50.9	61 MBq Sentiscint	24.2.2020 11:00	25.2. 8:30	25.2. 8:55	0 μSv	2 SLU
25.2.2020	67 let žena C50.3	57 MBq Sentiscint	24.2.2020 11:10	25.2. 9:45	25.2. 10:00	0 μSv	2 SLU
3.3.2020	63 let žena C50.4	55 MBq Sentiscint	2.3.2020 11:20	3.3. 8:10	3.3. 8:30	0 μSv	1 SLU
3.3.2020	70 let žena C50.2	62 MBq Sentiscint	2.3.2020 11:35	3.3. 9:30	3.3. 9:40	0 μSv	3 SLU
10.3.2020	75 let žena C50.3	55 MBq Sentiscint	9.3.2020 10:15	10.3. 8:20	10.3. 8:35	0 μSv	2 SLU
10.3.2020	71 let žena C50.9	52 MBq Sentiscint	9.3.2020 11:15	10.3. 9:30	10.3. 9:45	0 μSv	2 SLU